

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

MARKUS SAMUEL REBMANN

**Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland:
desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e
morfológica dos agregados**

**São Paulo
2016**

MARKUS SAMUEL REBMANN

**Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland:
desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e
morfológica dos agregados**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências**

**Área de concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana**

**Orientador:
Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi**

**São Paulo
2016**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Rebmann, Markus Samuel

Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados / M. S. Rebmann -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
252 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Concreto 2.Baixo consumo de cimento Portland 3.Robustez
4.Ecoeficiência 5.Reologia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

AGRADECIMENTOS

Quando se conclui uma etapa da vida deve-se olhar para frente na busca de novos horizontes, sem, no entanto, deixar de olhar para trás e avaliar como se chegou ao momento atual. Nada daquilo que foi conquistado seria possível sem a participação de inúmeras pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram. A todos estes quero aqui prestar os meus sinceros agradecimentos.

A Deus pela vida, a Jesus Cristo pela salvação e ao Espírito Santo pela condução diária.

À minha esposa Franciane pelo amor e carinho dedicados, pela infinita compreensão nos momentos ausentes e pelo auxílio na revisão do texto. Ao meu pequeno Lukas, que tantas vezes teve que se contentar com poucos minutos de “brinca comigo, papai”. Aos meus pais, Roland e Annerose, por todos os ensinamentos e exemplos de vida que me deram e pelo incentivo constante no aprimoramento profissional. Também aos meus irmãos e demais familiares agradeço por todo amor e alegria compartilhados.

Ao professor Rafael G. Pileggi pela orientação durante a elaboração desta pesquisa. Agradeço pela confiança em mim depositada, pela oportunidade de integrar o grupo de pesquisa do LME e pelos incontáveis momentos de conversa que ajudaram a definir os rumos da pesquisa. Aos professores Vanderley John, Antônio Figueiredo, Sérgio Ângulo e Maria Alba, pelas inúmeras oportunidades para “trocar uma ideia”.

À turma do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência: César, Marco, Fábio, Bruno, Eric, Victor, Liz, Gabi, Heitor, Marcel, Thiago, Gabriel, Rafael, e tantos outros que cruzaram as portas do laboratório nestes anos. Um agradecimento especial ao Franco Grandes, pelas ajudas com revisão de texto e discussão de ideias sobre artigos conjuntos. Também à turma dos técnicos, Mário, Reginaldo, Adilson, Jéssica, Renata e Jenício, sempre prontos a dar uma mão ou duas.

À Engrácia e Vandreia que me ajudaram várias vezes a “descascar pepinos” burocráticos.

Aos professores da comissão julgadora (Sérgio Cirelli Ângulo, Paulo César Correia Gomes, Luiz Roberto Prudêncio Júnior e Marcelo Henrique Farias de Medeiros), pelas preciosas contribuições que enriqueceram o texto final desta tese.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa por meio do processo 2012/21134-2 e às empresas FURNAS, Intercement, Torkflex e Grace pelo apoio à pesquisa com informações e materiais.

Enfim, a todos que contribuíram para que este trabalho fosse iniciado, conduzido e concluído, dedico aqui meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. 2016. 252 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2016.

Concretos com baixo consumo de cimento Portland se justificam por motivos técnicos (menor calor de hidratação, retração e fissuração) e de sustentabilidade (menores consumos de energia e matérias-primas, emissão de CO₂ e demanda por transporte). A variabilidade nas matérias-primas, nas condições ambientais e no processo de confecção de um concreto resultam em variabilidade de diversas propriedades no estado fresco e endurecido. A viabilidade da aplicação de concretos com baixo consumo de cimento, em escala no campo, depende da sensibilidade que estes apresentam diante das variabilidades presentes. Concretos com robustez adequada, ou seja, suficientemente tolerantes às variações, são desejáveis. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a robustez de concretos com baixo consumo de cimento, com foco principal em desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados. Aplicando conceitos de empacotamento e dispersão de partículas, uso de fílers calcários, escolha adequada dos materiais e aplicação de métodos reológicos para desenvolvimento da composição, desenvolveu-se um concreto com efetivo baixo consumo de ligantes (3,66 kg/m³/MPa). Os resultados obtidos indicam que as mudanças granulométricas são as mais impactantes, em especial devido à variabilidade no teor de pó fino nos agregados britados. Mudanças morfológicas, em especial na fração de tamanho que mais impacta no empacotamento (fração dominante), também são relevantes. O cenário de desvios de pesagem proporcionou o menor impacto dentre os três avaliados. Estas conclusões são específicas do concreto analisado e das particularidades dos cenários de variabilidade considerados. Por este motivo esta pesquisa buscou explicar de modo mais geral a influência das diversas variáveis. A distância que separa as partículas (IPS e MPT), a área específica dos materiais granulares e as concentrações de sólidos são alguns dos parâmetros que se correlacionam com o comportamento reológico nos diversos cenários avaliados. Com base no processo experimental e de análise dos resultados aplicados, propôs-se uma metodologia para avaliação de robustez e um índice numérico para avaliação quantitativa da robustez. Foram ainda propostas algumas ferramentas que visam atribuir mecanismos robustos ao processo de produção de concreto: sistema computacional para previsão de propriedades baseado em caracterização fundamental dos constituintes, uso de reômetro de concreto como instrumento de controle de qualidade e medida no campo da robustez e instrumentação de misturador como mecanismo de detecção de mudanças na etapa de mistura.

Palavras-chave: Concreto. Baixo consumo de cimento Portland. Robustez. Ecoeficiência. Reologia.

ABSTRACT

REBMANN, M.S. **Robustness of concrete with low Portland cement consumption: deviations in proportioning and particle size and morphological variability of the aggregates.** 2016. 252 Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2016.

The use of concretes with low Portland cement content is justified by technical reasons (lower hydration heat, shrinkage and cracking) and sustainability (lower energy and raw materials consumptions, CO₂ emissions and demand for transport). Variability in raw materials, environmental conditions and production process result in variability of various concrete properties in the fresh and hardened states. The feasibility of applying low cement concretes in large production scale depends on the sensitivity that these concretes show, given the existing variability. Concretes with adequate robustness, that is, sufficiently tolerant to variations are desirable. This research evaluated the robustness of concretes with low cement consumption, with focus on deviations in proportioning and particle size and morphological variability of the aggregates. Applying particle packing and dispersion concepts, rheological control, use of limestone fillers and appropriate of material choice a concrete with effective low binder consumption (3.66 kg/m³/MPa) was developed. The obtained results indicate that among the considered scenarios, the particle size changes are the most impactful, especially due to the presence of fine dust in the crushed aggregates. Morphological changes, especially in the size fraction that most impacts the packing (dominant fraction), are also relevant. Weighing deviations provided the smallest impact among the three evaluated scenarios. These findings, however, are specific to the analyzed concrete and the considered variability scenarios. For this reason, this research aimed to explain more generally the influence of several variables. The distance between the particles (IPS and MPT), the specific area of the granular material and the solids concentrations are some of the parameters that explain the rheological behavior. Based on the experimental process and the analysis of the applied results, a methodology was proposed for robustness evaluation and a numerical index for the quantitative evaluation of the robustness. Some additional tools to confer robust mechanisms to the concrete production process were proposed: a computer system for forecasting concrete properties, based on fundamental characterization of the constituents, use of a mobile rheometer as a quality control instrument and mixer instrumentation as change detection mechanism during the mixing process.

Keywords: Concrete. Low Portland cement consumption. Robustness. Eco-efficiency. Rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre intensidade de ligantes e resistência à compressão aos 28 dias. Fonte: adaptada de Daminieli et al. (2010), incluindo os resultados de Rebmann (2011).....	27
Figura 2 - Ilustração simplificada do conceito de robustez (adaptada de Nunes et al. (2006)).....	41
Figura 3 - Origem da variabilidade em estruturas de concreto	50
Figura 4 - Fatores que influenciam as propriedades de um concreto (adaptada por CASTRO, 2007 de TATTERSAL e BANFIL, 1983).	51
Figura 5 - Distribuição granulométrica por diversos critérios de tamanho na análise de imagens dinâmicas	58
Figura 6 – Ilustração das partículas empregadas: Esferas (esquerda), Areia Natural (centro) e Areia Britada (direita). A imagem superior é da fração [1,00-1,18] com ampliação de 50x e a imagem inferior da fração [0,25-0,30] com ampliação de 200x.....	65
Figura 7 – Equipamento para medida do empacotamento experimental (GeoPyc 1360): vista frontal (esquerda) e detalhe da célula de 50,8 mm com êmbolo (direita).....	67
Figura 8 – Resultado de empacotamento das esferas da fração 4 mm com as frações de 2 a 0,25 mm.	69
Figura 9 - Resultado de empacotamento binário de esferas com mesma relação de diâmetros (4:1).70	70
Figura 10 – Porosidade das frações discretas das esferas em função do diâmetro	71
Figura 11 - Efeito da forma das partículas no empacotamento: misturas bimodais de partículas de 2mm e 0,25mm (esquerda); todas medidas (direita).....	72
Figura 12 – Previsão dos modelos de empacotamento e dados experimentais de empacotamento de esferas	74
Figura 13 – Resultados experimentais e previstos pelos modelos para porosidade das esferas	74
Figura 14 – Índice de compactação K necessário para compactar frações discretas de esferas de diferentes tamanhos, considerando porosidade virtual de empacotamento de 0,74.	75
Figura 15 - Resultados experimentais e previstos pelo MEC para porosidade das esferas e areias	76
Figura 16 - Resultados experimentais e previstos pelo MEC (calibrado) para porosidade das esferas e areias	77
Figura 17 - Adequação aos dados experimentais do modelo de regressão para cálculo da porosidade de frações discretas.....	79
Figura 18 – Representação esquemática do conceito de distância média de separação entre partículas (D): (a) partículas em contato sem nenhum fluido, ou com o mesmo preenchendo exatamente o vazio entre estas, e (b) partículas separadas pelo fluido (fonte: Pileggi (PILEGGI, 2001)).....	82
Figura 19 – Representação esquemática dos módulos do sistema computacional	84

Figura 20 - Ilustração de parte do Banco de Dados. Cada coluna se refere a um conjunto de caracterização de uma matéria-prima. A granulometria se estende da faixa nanométrica até 76,2mm, abrangendo assim todos materiais empregados, desde pós muito finos até agregados graúdos de grandes dimensões. Os parâmetros granulométricos são resultados de cálculos sobre a distribuição granulométrica. Nota: alguns trechos estão ocultos por questões de tamanho da imagem.....	85
Figura 21 - Ilustração da etapa de definição das formulações. As entradas podem ser feitas manualmente (em massa ou volume) ou ainda de forma automática com base em uma dosagem experimental acoplada.....	86
Figura 22 - Ilustração da aplicação dos modelos de empacotamento. Mostram-se apenas as etapas de cálculo, que se compõe de uma série de cálculos matriciais. Na parte inferior mostra-se os três modelos disponíveis.....	88
Figura 23 - Ilustrações de partes de relatórios. Na esquerda ficha de pesagem. Na direita diagrama de fases.	89
Figura 24 - Ilustração do menu de controle do Arquivo.	89
Figura 25 - Exemplo de aplicação do robô, onde se avaliou a influencia na porosidade de acordo com os modelos disponíveis, ao se variar as proporções dos materiais 1 e 2.....	90
Figura 26 - Análise temporal da fração maior que 19mm da Brita 25 (média móvel em preto).....	92
Figura 27 – Distribuições granulométricas acumuladas dos três agregados nos três períodos de análise. A caixa delimita os percentis 5% a 95%, com mediana representada pelo risco horizontal central. Ainda estão mostrados a média (losango) e os valores máximo e mínimo (barras externas).	93
Figura 28 - Coeficiente de variação do volume retido individual em cada peneira, em função deste volume, para agregados graúdos.....	94
Figura 29 - Variabilidade granulométrica de areia natural	94
Figura 30 - Variabilidade de umidade dos agregados	95
Figura 31 - Variações de umidade da areia britada em um único dia.....	95
Figura 32 - Variabilidade do desvio absoluto na pesagem de materiais em uma central de concreto comercial.....	96
Figura 33 - Variabilidade do desvio relativo na pesagem de materiais em uma central de concreto comercial.....	96
Figura 34 - Casos extremos de distribuição de forma (relação de aspecto) de agregados	98
Figura 35 – Levantamento da variabilidade da morfologia de areias britadas ao longo de um período de 2 meses.....	99
Figura 36 - Diagramas de dosagem da família de concretos de referência, segundo o método de dosagem de FURNAS.....	100

Figura 37 – Variabilidade da porosidade intergranular das partículas grossas após aplicação de todas as variabilidades dos fatores considerados	103
Figura 38 - Influência relativa dos fatores sobre a porosidade das partículas grossas (> 100 µm) nos concretos convencionais	105
Figura 39 Variabilidade do IPS nos concretos convencionais, após aplicação de todas as variabilidades dos fatores considerados	105
Figura 40 - Influência relativa dos fatores sobre o IPS nos concretos convencionais.....	106
Figura 41 Variabilidade do MPT nos concretos convencionais, após aplicação de todas as variabilidades dos fatores considerados	107
Figura 42 - Influência relativa dos fatores sobre o MPT nos concretos convencionais	107
Figura 43 - Efeitos da variabilidade dos fatores sobre a porosidade dos grossos, IPS e MPT em um concreto com baixo consumo de cimento.....	110
Figura 44 - Influência relativa dos fatores sobre a porosidade das partículas grossas (>100µm) no concreto de baixo consumo de cimento.....	110
Figura 45 - Influência relativa dos fatores sobre o IPS no concreto de baixo consumo de cimento ..	111
Figura 46 – Influência relativa dos fatores sobre o MPT no concreto de baixo consumo de cimento	112
Figura 47 - Produção mundial de cimento e prognósticos. Rótulos numéricos indicam produção em 2005 e 2015.....	113
Figura 48 – Procedimento de quarteamento: deposição do material na pilha alongada (esquerda); seccionamento da pilha (centro); quarteamento secundário com quarteador tipo Jones (direita) ..	121
Figura 49 – Ensaios de granulometria de duas amostras diferentes do mesmo material, para Brita 1, Brita 0 e Areia britada.	122
Figura 50 – Distribuição granulométrica discreta dos agregados empregados na dosagem do concreto base	123
Figura 51 - Distribuição granulométrica discreta dos finos empregados	123
Figura 52 - Distribuição dos grãos em função do parâmetro morfológico “relação de aspecto”	124
Figura 53 - Ensaio de reologia de pasta: misturador cowles usado para dispersar a pasta em alta rotação (esquerda); reometro DHR-3 (centro); geometria de placa paralela (direita).....	126
Figura 54 – Sequência completa de mistura, incluindo dois ciclos de cisalhamento (ver detalhes dos ciclos na Figura 55).....	128
Figura 55 – Programação do ciclo de cisalhamento.....	129
Figura 56- Resultado típico do ensaio reológico de fluxo com pastas aditivadas com superplastificante	130
Figura 57 – Evolução dos parâmetros reológicos em função do tipo e teor do aditivo. Os teores indicados se referem ao teor total de aditivo (sólidos + líquido) em relação à massa do cimento. ..	133

Figura 58 - Evolução dos parâmetros reológicos em função tempo para dois aditivos superplastificantes em teores próximos ao teor de saturação	135
Figura 59 – Efeito do teor de aditivo sobre propriedades reológicas de pastas de fílers.....	136
Figura 60 – Propriedades reológicas de pastas mistas (cimento + fílers) em função dos teores de cimento (30, 40 e 50%) e fíler P1. O teor do fíler P5 corresponde ao complemento para totalizar 100% (P5=100%-P1-cimento)	138
Figura 61 - Distribuição granulométrica dos agregados do concreto base.....	139
Figura 62 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da relação água/cimento	140
Figura 63 - Perfil reológico dos concretos com consumos variados de água	141
Figura 64 - Ensaio de slump-flow com teor de água de 150 L/m ³ , evidenciando separação de fases	141
Figura 65 – Efeito do aumento de teor de P1, de 30 a 43% sobre o espalhamento e separação de fases.	142
Figura 66 - Curva de mistura completa do concreto de referência	144
Figura 67 – Evolução dos torques ao longo da mistura da argamassa seca	145
Figura 68 – Evolução dos torques ao longo da mistura da argamassa úmida	146
Figura 69 - Evolução dos torques na homogeneização final da argamassa.....	146
Figura 70 - Evolução dos torques após a introdução dos agregados graúdos.....	147
Figura 71 – Concreto base: ciclos de cisalhamento da argamassa (esquerda) e do concreto (direita)	149
Figura 72 - Ensaios de espalhamento (flow-test) após o primeiro ciclo de cisalhamento (esquerda) e após o segundo ciclo (direita), evidenciando a mudança na tendência de separação de fases. O tempo entre os ensaios é de cerca de 20 minutos.....	150
Figura 73 - Intensidade de ligantes do concreto desenvolvido (circulo vermelho). Pontos em laranja, cinza e verde oriundos de Damineli (2013).....	151
Figura 74 - Granulometrias dos agregados empregados na etapa de avaliação dos efeitos de mudanças granulométricas. Para cada agregado (Brita 1 = Br1; Brita 0 = Br0; Areia Britada = ArB; Areia Natural = ArN) foi produzida uma versão mais fina (F) e mais grossa (G) em relação à Referência (R).	162
Figura 75 – Granulometrias: (a) distribuição acumulada passante dos agregados individuais, sendo que Brita 1 e Brita 0 já estão compostas em um único agregado graúdo Gr; (b) distribuição granulométrica discreta do conjunto de agregados nos concretos.	164
Figura 76 - Distribuição de morfologia dos agregados graúdos (a e b) e miúdos (c e d): relação de aspecto (a e c) e esfericidade (b e d).....	165
Figura 77 - Curvas de mistura obtidas na fase de avaliação de desvios de pesagem	168
Figura 78 - Perfil reológico dos concretos da fase de avaliação de desvios de pesagem, obtidos logo após a mistura inicial (trecho de desaceleração).....	168

Figura 79 – Comparação entre os parâmetros reológicos experimentais e os previstos pelos modelos empíricos.....	171
Figura 80 - Efeito do ajuste de água sobre o torque de mistura (etapa de desvios de pesagem).....	174
Figura 81 – Adequação do modelo empírico de previsão do torque de mistura na etapa de desvios de pesagem	175
Figura 82 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da relação água/cimento na etapa de desvios de pesagem	175
Figura 83 – Módulo de elasticidade aos 28 dias em função da relação água/cimento na etapa de desvios de pesagem	176
Figura 84 - Efeito do volume da batelada sobre a faixa de variação da resistência do concreto em virtude dos desvios de pesagem	178
Figura 85 – Ajuste das regressões lineares (Equações 47 a 50) aos resultados reológicos experimentais (etapa de desvios de granulometria)	180
Figura 86 – Torques de mistura dos concretos da etapa de variação granulométrica: no início (sem correção) e no fim (com correção) da mistura adicional.	181
Figura 87 – Relação entre torque de mistura e relação água/finos (a) e volume de pasta (b) nos concretos da etapa de avaliação de mudanças granulométricas	183
Figura 88 – Adequação da regressão da Equação 51 aos valores experimentais de torques de mistura	184
Figura 89 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a relação água/cimento (etapa de variação granulométrica).	185
Figura 90 – Reometria de mistura em rotação constante (126 rpm) de concretos com agregados de morfologias diferentes.....	187
Figura 91 – Comportamento reológico das argamassas, obtido na rampa de desaceleração (etapa de variações morfológicas)	188
Figura 92 - Comportamento reológico dos concretos na etapa de variações morfológicas, obtido na rampa de desaceleração	189
Figura 93 – Ajuste das regressões das Equações 57 a 59 aos parâmetros reológicos experimentais na fase de avaliação de alterações morfológicas.....	190
Figura 94 – Correlação entre parâmetro de forma ponderado e parâmetros reológicos da argamassa: (a) torque de mistura no estado seco; (b) torque de mistura no estado úmido; (c) energia de mistura; (d) “viscosidade” aparente na rotação de 253 rpm.....	191
Figura 95 – Pesos normalizados da areia natural. Os valores marcados no topo das colunas correspondem aos R^2 das regressões lineares obtidas.....	192

Figura 96 – Correlação entre os parâmetros de forma da areia natural e o torque de mistura <i>T_{mist1}</i>	193
Figura 97 - Torques de mistura dos concretos da etapa de variação morfológica: no início (sem correção) e no fim (com correção) da mistura adicional.	194
Figura 98 – Relação entre morfologia da areia natural e resistência do concreto na etapa de variações morfológicas.....	194
Figura 99 - Proposta de sequência de análise para avaliação numérica da robustez de uma formulação de concreto frente a um cenário de variabilidade.....	197
Figura 100 - Reômetro utilizado: visão geral (esquerda); detalhe da geometria de mistura (direita).	199
Figura 101 – Reometria de mistura de dois concretos com agregados graúdos de morfologias distintas: arredondados (CAA Red) e lamelares (CAA Lam).....	200
Figura 102 - Variabilidade detectada em campo, por meio de reometria de fluxo, em concretos de mesma composição teórica.	202
Figura 103 - Modelo da célula de torque, fornecido pela Torkflex Distribuidora de Acionamentos Mecânicos (TORKFLEX, 2016).....	204
Figura 104 - Misturador de concreto reformado e instrumentado: visão geral (esquerda), vista interna (centro) e detalhe da célula de torque, instalada entre o motor e o redutor do misturador (peça laranja - direita).....	204
Figura 105 - Sistema de alimentação do misturador instrumentado: vista geral (esquerda) e vista inferior da bateria de mini silos (direita).....	205
Figura 106 - Sistema de alimentação do misturador instrumentado: vista superior parcial da bateria de mini silos (esquerda) e detalhe de um mini silo individual, o qual é removível para preenchimento e pesagem (direita).	206
Figura 107 –Vista lateral da sequência de posicionamento para descarga: bateria de silos posicionados ao nível do solo (esquerda), bateria de silos na posição elevada (centro) e descolamento horizontal para posicionamento acima do funil de descarga (direita).....	206
Figura 108 - Vista inferior dos silos, com detalhes das portinholas e gatilhos de abertura.	207
Figura 109 - Sinais obtidos pela célula de torque e inversor de frequência durante o processo de mistura	209
Figura 110 - Comparação de resultados obtidos no reômetro e no misturador	209
Figura 111 – Curvas de mistura de três concretos no reômetro. A diferença entre eles é o consumo de água, em intervalos de 5 L/m ³	210
Figura 112 - Curvas de mistura de três concretos no misturador instrumentado. A diferença entre eles é o consumo de água, em intervalos de 5 L/m ³	210

Figura 113 - Partícula de um grão de agregado de granito analisado com Camsizer® (unidade de dimensão: mm)	227
Figura 114 - Curvas granulométricas de um mesmo material, ensaiado em fração única e fracionado em duas parcelas.....	231
Figura 115 - Comparação de granulometrias obtidas pelo Camsizer® e por peneiramento.....	232
Figura 116 - Granulometria via Camsizer® para frações retidas em peneiras.....	233
Figura 117 - Variabilidade de aberturas em uma peneira com abertura nominal de 106 µm	234
Figura 118 - Ajuste de resultados de peneiramento utilizando os resultados de Camsizer® como fator de correção.	235
Figura 119 - Parâmetros de forma: esfericidade e relação b/l	236
Figura 120 - Esfericidade de areias naturais e artificiais.....	237
Figura 121 - Esfericidade e relação b/l para diferentes formatos.....	237
Figura 122 - Carga passante em ensaio de penetração de cloretos, segundo a ASTM C1202. Gráfico superior se refere à etapa de avaliação de desvios de pesagem e foi ensaiada aos 90 dias de idade. O gráfico inferior se refere à etapa de variação granulométrica e foi ensaiada aos 35 dias de idade. Os concretos com o sufixo “aj” se referem às formulações que sofreram ajuste reológico por meio de alteração do teor de água.	242
Figura 123 – Equipamento de medida de permeabilidade ao ar. Visão geral (esquerda), detalhe da câmara de pressão onde se insere a fatia de concreto (centro) e bolômetros de diversos calibres para medidas de permeabilidade em diferentes ordens de grandeza (direita)	243
Figura 124 – Coeficiente de permeabilidade K_1 . O gráfico superior se refere à etapa de avaliação de desvios de pesagem e o inferior se refere à etapa de variação granulométrica.....	244
Figura 125 - Análise termogravimétrica do cimento CPV-ARI.....	251

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo de definições de robustez e campos do conhecimento em que foram aplicados .	40
Tabela 2 – Caracterização das frações empregadas nos ensaios de empacotamento.....	66
Tabela 3 – Proporção volumétricas das misturas binárias e ternárias	66
Tabela 4 - Densidade de empacotamento virtual das frações calculadas a partir dos dados de empacotamento experimental e índice de compactação $K=9$	76
Tabela 5 – Caracterização dos materiais empregados no estudo de avaliação dos modelos de empacotamento.....	77
Tabela 6 – Concretos convencionais: composição e parâmetros tradicionais na tecnologia de dosagem de concreto	101
Tabela 7 - Concretos convencionais: composição volumétrica e parâmetros adicionais.....	101
Tabela 8 - Fatores e níveis empregados na análise teórica da influência da variabilidade	103
Tabela 9 - Coeficientes dos fatores na regressão linear para a porosidade das partículas grossas ($> 100 \mu\text{m}$) nos concretos convencionais.....	104
Tabela 10 - Influência relativa dos fatores sobre a porosidade das partículas grossas ($> 100 \mu\text{m}$) nos concretos convencionais.....	104
Tabela 11 – Concreto de baixo consumo de cimento: composição e parâmetros do concreto de baixo consumo de cimento.....	109
Tabela 12 - Caracterização física dos agregados e finos: técnicas, equipamentos e tamanho das amostras ensaiadas	122
Tabela 13 –Parâmetros granulométricos e morfológicos, densidade e área específica dos materiais empregados para produção do concreto base	124
Tabela 14 - Composição do concreto de referência (kg)	144
Tabela 15 - Parâmetros reológicos do concreto base.....	149
Tabela 16 – Conjunto de fatores avaliados no estudo experimental de robustez	156
Tabela 17 - Respostas e limites de aceitação no estudo experimental de robustez	157
Tabela 18 –Definição dos níveis genéricos para os fatores de avaliação de desvios de pesagem	159
Tabela 19 –Definição dos desvios percentuais para os fatores de avaliação de desvios de pesagem	160
Tabela 20 – Definição dos desvios percentuais de pesagem de cada material, na etapa de avaliação de desvios de pesagem	160
Tabela 21 –Composições (kg por batelada), com aplicação dos desvios percentuais de pesagem sobre cada material, na etapa de avaliação de desvios de pesagem	160
Tabela 22 –Composições dos concretos (kg) da etapa de avaliação de desvios de pesagem para volume de ensaio (17 L)	161

Tabela 23 – Composições dos concretos (kg) da etapa de avaliação de desvios de pesagem para volume de 1 m ³	161
Tabela 24 – Definição dos níveis genéricos dos fatores (etapa de variações granulométricas).....	162
Tabela 25 - Parâmetros granulométricos das versões grossa e fina de cada agregado empregado na fase de avaliação de mudanças granulométricas	163
Tabela 26 – Composições dos concretos (kg), na etapa de variação granulométrica, para volume de ensaio (17 L)	163
Tabela 27 – Composições dos concretos (kg), na etapa de variação granulométrica, para volume de 1 m ³	163
Tabela 28 – Definição dos níveis genéricos dos fatores (etapa variações morfológicas)	164
Tabela 29 – Caracterização física dos agregados empregados na etapa de avaliação de mudança morfológica	165
Tabela 30 - Composições dos concretos (kg), na etapa de variação morfológica, para volume de ensaio (17 L).....	166
Tabela 31 - Composições dos concretos (kg), na etapa de variação morfológica, para volume de 1 m ³	166
Tabela 32 – Parâmetros reológicos principais obtidos na etapa de avaliação de desvios de pesagem	169
Tabela 33 – Consumo de materiais por m ³ dos concretos ajustados na etapa de desvios de pesagem	174
Tabela 34 – Parâmetros reológicos principais do concreto (fase variações granulométricas).....	178
Tabela 35 – Composição dos concretos (kg/m ³) após os ajustes de água (fase de avaliação de mudanças granulométricas)	182
Tabela 36 – Parâmetros reológicos das argamassas e concretos da etapa de avaliação da mudança de morfologia	190
Tabela 37 – Principais critérios de dimensão de partículas na análise de imagens dinâmicas	228
Tabela 38 – Principais parâmetros de forma de partículas na análise de imagens dinâmicas.....	229
Tabela 39 - Relação ente carga passante e penetrabilidade de íons cloreto (ASTM C1202/2012)	241
Tabela 40 – Granulometria dos finos (% volume retido)	246
Tabela 41 – Granulometria dos agregados empregados na produção do concreto base e na etapa de desvios de pesagem (% volume retido)	247
Tabela 42 – Granulometria dos agregados empregados na etapa de desvios de granulometria (% volume retido).....	248
Tabela 43 – Granulometria dos agregados empregados na etapa de desvios de morfologia (% volume retido).....	249

Tabela 44 – Resultados de análise química do cimento	250
Tabela 45 – Resultados da resistência à compressão (MPa) do cimento	250
Tabela 46 – Resultados das características físicas do cimento	250
Tabela 47- Composição química do cimento por fluorescência de raio-X (%).....	252

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ArN	Areia Natural
ArB	Areia Britada
AID	Análise de Imagens Dinâmicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (EUA)
BET	Método Brunauer, Emmett e Teller de adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida
CAA	Concreto Auto Adensável
CO ₂	Gás Carbônico
CPV-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung (Alemanha)</i>
Esf	esferas (de vidro)
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FURNAS	Empresa Furnas Centrais Elétricas S.A. (Eletrobras Furnas)
IPS	<i>Interparticle separation distance</i> (distância de separação entre partículas)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LME	Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência
MCSs	Materiais Cimentícios Suplementares
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
MPs	Matérias Primas
MPT	<i>Maximum Paste Thickness</i> (espessura máxima de pasta)
NaCl	Cloreto de Sódio
N ₂	Gás nitrogênio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	<i>Norma Mercosur</i>
P1, P5	Fílers de calcário denotados de P1 e P5
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
SP	Superplastificante
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

a	volume de água
a/c	(relação) água/cimento em massa
a/lig	(relação) água/ligantes em massa
agr	volume de agregados
a _i	volume aparente da classe discreta i
a _{ij}	coeficiente do efeito de afastamento que os grãos da classe j exercem sobre os grãos da classe i
b/l	relação de aspecto
bi	<i>Binder intensity</i> (consumo de ligantes por m ³ de concreto em relação à resistência à compressão aos 28 dias)
b _{ij}	coeficiente do efeito de parede que os grãos da classe j exercem sobre os grãos da classe i
C15, C25, C35	concretos convencionais com f _{ck} de 15, 25 e 35 MPa respectivamente
ci	<i>CO₂ intensity</i> (emissão de CO ₂ por m ³ de concreto em relação à resistência à compressão aos 28 dias)
CSR	razão de tamanho entre o tamanho de uma classe na distribuição granulométrica e a classe imediatamente menor
d _i , d _j	diâmetros médios das classes i e j, respectivamente
D ₁₀ , D ₅₀ e D ₉₀	percentil de 10%, 50% e 90%, isto é, 10%, 50% e 90%, respectivamente, do volume de partículas possui dimensão inferior a estes valores
D _{max}	diâmetro máximo de agregados, conforme ABNT NBR NM 248 (2001)
E_{concr}^{mist}	energia de mistura na fase de concreto, correspondendo à área abaixo da curva torque x tempo desde o início da adição do agregado graúdo até o fim da mistura principal.
f _c	resistência à compressão do concreto
f _{ck}	resistência característica à compressão do concreto. Quando não há especificação de idade se refere a 28 dias.
f _{cj}	resistência média à compressão do concreto na idade j. Quando não há especificação de idade se refere a 28 dias.
f _{cm}	resistência média à compressão do concreto na idade de 28 dias.
fin:	volume de finos
h_B	constante equivalente à viscosidade plástica no modelo de Bingham
h_{HB}	constante equivalente ao índice de consistência no modelo de Herschel-Bulkley
I _d	índice de desempenho (relação de custo ou impacto com benefício ou desempenho)

I_{Rob}	índice de robustez
K	índice de compactação
K_H	índice de consistência, segundo modelo de Herschel-Bulkley
K_p	coeficiente de permeabilidade
M_u	massa unitária
MF	módulo de finura, conforme definição da ABNT NBR NM 248 (2001)
n	índice de comportamento de fluxo (adimensional) no modelo de Herschel-Bulkley
P_{of}, P_{ofg}	Porosidade de empacotamento de um sistema granular. Quando acompanhado pelo sub índice “g” se refere apenas às partículas grossas (> 100 μm)
R	velocidade de rotação (da geometria do reômetro)
R^2	coeficiente de determinação (estatística)
R_{dir}, R_{ind}	risco direto, risco indireto
S_d	desvio padrão de dosagem de concreto
T, T_0, T_{mist}	torque, torque de escoamento e torque de mistura, respectivamente
$V_{a,i}$	volume aparente da mistura quando i é a classe dominante
V_{ap}	volume aparente (volume total ocupado por um volume unitário de sólidos)
V_{ap}	viscosidade aparente em alta taxa de rotação
V_p	volume de pó (fração < 150 μm)
VSA, VSA_g	área superficial volumétrica. Quando acompanhado pelo sub índice “g” se refere apenas às partículas grossas (> 100 μm)
V_s, V_{sg}	fração volumétrica de sólidos em uma suspensão. Quando acompanhado pelo sub índice “g” se refere apenas às partículas grossas (> 100 μm)
V_{sol}	volume ocupado pelas partículas sólidas em um sistema particulado
V_{tot}	volume total de um sistema particulado
V_{vaz}	volume de vazios de um sistema particulado
x_i, x_j	fração volumétrica das classes i e j , respectivamente
β_i	densidade de empacotamento virtual da classe i
$\dot{\gamma}$	taxa de cisalhamento
γ_i	densidade de empacotamento virtual da mistura quando i é a classe dominante
$\Delta P_{S_{Gr}}, \Delta P_{S_{M1}}, \Delta P_{S_{Fin}}$	desvios relativos de pesagem, respectivamente dos agregados graúdos, areia britada e finos (%)
$\Delta P_{S_{Agr}}$	desvio relativo de pesagem do total de agregados
$\Delta \frac{a}{a_{gr}}$	variação percentual da relação volumétrica de água e agregados

$\Delta \frac{a}{fin}$	variação percentual da relação volumétrica de água e finos
ϵ	porosidade de um sistema particulado
\emptyset	densidade de empacotamento real
ρ_{emp}	densidade relativa de empacotamento
ρ_s	densidade aparente das partículas
τ	tensão de cisalhamento
τ_0	tensão de escoamento
η_p	viscosidade plástica

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	17
LISTA DE SÍMBOLOS	18
SUMÁRIO.....	21
1 INTRODUÇÃO	26
1.1 Justificativa e importância da pesquisa.....	26
1.2 Objetivo.....	28
1.3 Escopo	28
1.4 Metodologia.....	29
1.5 Originalidade.....	30
1.6 Estrutura do texto	30
2 ROBUSTEZ.....	32
2.1 Robustez em algumas áreas do conhecimento	32
2.1.1 Biologia.....	32
2.1.2 Redes.....	34
2.1.3 Sistemas computacionais.....	36
2.1.4 Projeto robusto na engenharia de produtos e processos.....	36
2.1.5 Robustez de estruturas	37
2.1.6 Definições e mecanismos de robustez.....	39
2.2 Robustez em concretos.....	39
2.2.1 Alguns estudos de robustez	42
2.2.2 Considerações a respeito de concretos atuais.....	46

2.2.3	Robustez e ecoeficiência.....	48
2.2.4	Variabilidade na produção de concreto.....	49
3	MODELOS DE EMPACOTAMENTO COMO FERRAMENTAS DE AUXÍLIO À DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ.....	53
3.1	Introdução.....	53
3.2	Caracterização granulométrica e morfológica por meio de análise dinâmica de imagens ..	55
3.2.1	Granulometria.....	57
3.2.2	Morfologia.....	58
3.3	Modelos de empacotamento.....	59
3.3.1	Fundamentos sobre empacotamento de partículas.....	59
3.3.2	Modelos de empacotamento de Westman e Hugill	61
3.3.3	Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).....	62
3.4	Programa experimental.....	64
3.4.1	Empacotamento experimental	66
3.5	Resultados e discussão.....	68
3.5.1	Resultados experimentais com esferas.....	68
3.5.2	Efeito da forma.....	72
3.5.3	Previsão de porosidade pelos modelos.....	73
3.5.4	Modelagem da porosidade discreta a partir da forma e dimensão das partículas	77
3.6	Considerações finais do capítulo.....	80
4	MODELAGEM COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA GRANULAR DO CONCRETO E USO NA AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ	81
4.1	Desenvolvimento do software	81
4.1.1	Banco de dados	84
4.1.2	Formulação.....	86
4.1.3	Modelos de dosagem convencionais	87
4.1.4	Modelagem	87
4.1.5	Relatórios	88

4.1.6	Arquivo	89
4.1.7	Robô	89
4.2	Coleta de dados acerca de variabilidade.....	90
4.2.1	Variabilidade de granulometria.....	91
4.2.2	Variabilidade de umidade	94
4.2.3	Variabilidade de pesagem	95
4.2.4	Variabilidade de forma.....	97
4.2.5	Síntese do levantamento de variabilidade.....	99
4.3	Efeito teórico das variabilidades em concretos de diferentes famílias	100
4.3.1	Concreto bombeável convencional.....	100
4.3.2	Concreto de baixo consumo de cimento	108
4.4	Considerações finais do capítulo.....	112
5	CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DE CONCRETOS DE BAIXO CONSUMO DE CIMENTO E PRODUÇÃO DO CONCRETO BASE.....	113
5.1	Introdução.....	113
5.1.1	Dados sobre consumo de cimento.....	113
5.1.2	O que pode ser considerado concreto com baixo consumo de cimento.....	115
5.1.3	O que esperar de um concreto com baixo consumo de cimento	116
5.1.4	Formas de reduzir o consumo de cimento.....	117
5.2	Materiais e métodos aplicados no desenvolvimento de um concreto de baixo consumo de cimento	119
5.2.1	Materiais	119
5.2.2	Otimização da pasta por meio de ensaios reológicos.....	125
5.2.3	Mistura e ensaios reológicos do concreto	127
5.2.4	Caracterização mecânica do concreto endurecido	129
5.3	Resultados e discussão.....	130
5.3.1	Desenvolvimento da pasta.....	130
5.3.2	Empacotamento do esqueleto granular de agregados.....	138

5.3.3	Consumo de água e ajuste do teor de fílers.....	139
5.3.4	Concreto de referência.....	143
5.4	Considerações finais do capítulo.....	151
6	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE ROBUSTEZ	153
6.1	Planejamento experimental.....	153
6.1.1	Fundamentos.....	153
6.1.2	Parâmetros do planejamento	155
6.1.3	Projeto do planejamento experimental fracionado.....	158
6.1.4	Detalhamento dos ensaios.....	159
6.2	Resultados e análise	166
6.2.1	Forma de análise	166
6.2.2	Desvios de pesagem	167
6.2.3	Variações Granulométricas	178
6.2.4	Variações Morfológicas.....	187
6.3	Considerações finais do capítulo.....	195
7	PROPOSTA DE INSTRUMENTOS PARA CONTROLE DE CAMPO DA ROBUSTEZ	198
7.1	Uso de reômetro como instrumento de controle de qualidade e medida de robustez	199
7.1.1	Descrição do equipamento e ensaio	199
7.1.2	Resultados de aplicação	201
7.2	Instrumentação de um equipamento de mistura	203
7.2.1	Equipamento e sistema de aquisição.....	203
7.2.2	Sistema de carregamento do misturador	205
7.2.3	Proposta Experimental.....	207
7.2.4	Resultados e discussão.....	208
7.2.5	Considerações finais.....	211
8	CONCLUSÃO	212
8.1	Sugestões para futuras pesquisas	217

9	REFERÊNCIAS	219
10	Apêndices	227
10.1	Parâmetros de dimensão e forma na Análise de Imagens Dinâmicas	227
10.1.1	Dimensão.....	227
10.1.2	Morfologia.....	229
10.2	Detalhes da aplicação da técnica de Análise de Imagens Dinâmicas.....	230
10.2.1	Cuidados no ensaio e interpretação	230
10.2.2	Comparação com outras técnicas	232
10.2.3	Análise de forma de alguns materiais	235
10.2.4	Considerações finais a respeito de análise dinâmica de imagens.....	238
10.3	Breves considerações a respeito de durabilidade.....	240
10.3.1	Resistência à penetração de íons cloreto.....	240
10.3.2	Permeabilidade ao ar	242
10.4	Caracterização dos materiais	246
10.4.1	Granulometrias	246
10.4.2	Caracterização física, química e mecânica do cimento.....	250
10.4.3	Termogravimetria do cimento	251
10.4.4	Fluorescência de raios-X do cimento	252

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e importância da pesquisa

A demanda por materiais à base de cimento elevou substancialmente a produção de cimento nos últimos anos (CEMBUREAU, 2015) e previsões apontam que o consumo global de cimento continuará crescendo fortemente nos próximos anos (BERNSTEIN et al., 2007). Isto acarretará, necessariamente, em redução da longevidade das atuais jazidas de matérias-primas, necessidade de licenciamento de novas jazidas e de instalação de novas fábricas, aumento da emissão de CO₂ e poluentes, maiores consumos de energia exigindo investimentos na geração, maiores custos de distribuição e impactos na logística de transporte.

Vários trabalhos evidenciam a possibilidade de produção de concreto com reduzido teor de cimento (CATOIA et al., 2008a, 2008b; DAMINELI, 2013; ISAIA; GASTALDINI, 2009; PEREIRA, 2010; REBMANN, 2011; TIBONI, 2007). Este enfoque se insere no âmbito geral de sustentabilidade e ecoeficiência que busca a produção de estruturas mais duráveis e com menor consumo de concreto, concretos com menor consumo de cimento e cimentos com menor consumo de clínquer. Além de enfrentar os desafios citados, vislumbram-se ainda algumas vantagens técnicas, como a redução do calor de hidratação, da retração e de fissuração. De acordo com cada situação particular pode-se ainda obter redução no custo, principalmente em função do melhor desempenho obtido, como sugere Rebmann (2011).

Damineli et al. (2010) realizaram um extenso levantamento a respeito de consumos de ligantes e a relação com o desempenho obtido, em termos de resistência à compressão. Na Figura 1 ilustram-se os dados levantados, incluindo-se ainda os resultados obtidos na pesquisa de Rebmann (2011), na qual se avaliou a durabilidade de concretos de baixo consumo de cimento. A intensidade de ligantes equivale à massa de ligantes por m³ de concreto necessária para obter 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

Nota-se que consumos próximos a 5 kg/m³ por MPa de resistência à compressão são factíveis. A atual prática do mercado, no entanto, está longe deste número. Mesmo em condições de produção mais controladas (concreteiras) tem-se consumos da ordem de 9 a 14 kg.m⁻³.MPa⁻¹, e valores ainda mais altos no caso de concretos executados em obras com menor nível de controle (JOHN, 2009).

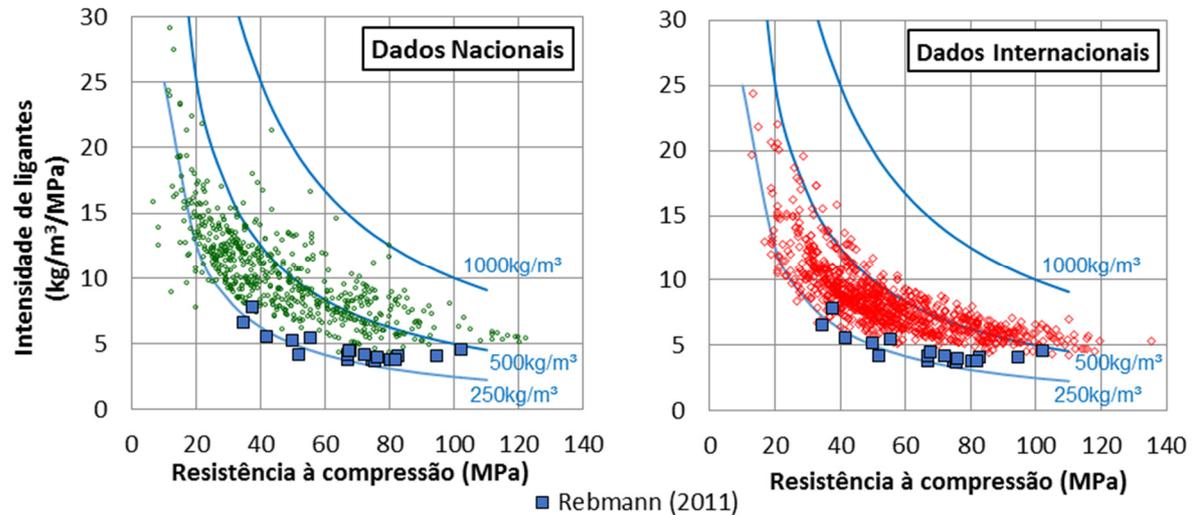


Figura 1 - Relação entre intensidade de ligantes e resistência à compressão aos 28 dias. Fonte: adaptada de Damineli et al. (2010), incluindo os resultados de Rebmann (2011).

As resistências à compressão dos concretos empregados atualmente estão em sua grande maioria abaixo de 50 MPa, o que exige consumos de cimento abaixo de 250 kg/m^3 para obter $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$. As atuais normas técnicas exigem consumos de cimento acima de um valor mínimo, no Brasil pelo menos 260 kg/m^3 (ABNT NBR 12655:2006). Preocupações com durabilidade e segurança motivam estas especificações.

Já se encontram pesquisas que mostram que é possível obter níveis de durabilidade adequados mesmo com reduzidos teores de cimento (REBMANN, 2011; WASSERMAN; KATZ; BENTUR, 2009). A preocupação com segurança, no entanto, permanece uma questão chave. As propriedades de um concreto dependem de um grande número de fatores. A variabilidade destes fatores resulta em variabilidade nas propriedades. A prática tem mostrado que, mesmo em face da falta de uniformidade e controles mais apurados dos atuais métodos de produção, a variabilidade do concreto tem se mantido em níveis aceitáveis, permitindo a produção segura de estruturas de concreto. Um maior volume de cimento contribui para esta estabilidade. Ao se reduzir o consumo aos baixos níveis sugeridos ($< 250 \text{ kg/m}^3$) uma área praticamente inexplorada foi investigada.

Flatt, Roussel e Cheeseman (2012) examinaram as rotas mais promissoras para aumentar a ecoeficiência de concretos. Concluíram que o futuro do concreto está no emprego de diversas soluções otimizadas e, como consequência, espera-se um aumento de sensibilidade a variações na proporção ou natureza dos seus componentes.

A redução do volume de ligantes, para que não haja impacto negativo no desempenho mecânico e na durabilidade, precisa ser acompanhada por redução de água. A consequente redução no volume de

pasta pode ser compensada com a adição de finos inertes (fílers) apenas até certo limite, imposto por questões reológicas. Assim, os agregados assumem um papel cada vez mais relevante, necessitando também de soluções otimizadas.

Alterações no proporcionamento, decorrentes dos desvios usuais no processo de produção (pesagem), passam a ser mais críticos caso ocorram nos ligantes, presentes em menores quantidades. Também a configuração otimizada dos agregados pode ser prejudicada por desvios de proporcionamento ou por alterações na própria natureza dos agregados.

Defende-se aqui a tese de que variações na proporção (em decorrência de desvios de pesagem) e na natureza dos agregados (granulometria e morfologia) afetam as propriedades dos concretos e, portanto, precisam ser consideradas para que soluções robustas possam ser obtidas, especialmente quando se emprega reduzidos teores de cimento.

1.2 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é determinar como desvios de proporcionamento e mudanças granulométricas e morfológicas dos agregados afetam a robustez de concretos produzidos com reduzido teor de cimento. Desta forma busca-se contribuir com a obtenção de sistemas robustos que permitam levar estes concretos do laboratório à aplicação no campo, de maneira segura e eficiente.

1.3 Escopo

Em virtude da grande quantidade de variáveis que afetam as características de um concreto, alguns limites precisaram ser impostos para permitir a conclusão do trabalho em prazo e custo razoáveis. Assim sendo, foi necessário fixar algumas variáveis, optando-se por delimitar o seguinte escopo: concreto do tipo estrutural, um único tipo e lote de cimento (CPV-ARI, por ser um cimento sem adições de materiais cimentícios suplementares), um único tipo de aditivo superplastificante principal (à base de policarboxilatos devido à necessidade de elevada redução de água), tamanho máximo de agregado (dimensão máxima 19 mm, limite máximo em geral adotado com vistas ao bombeamento com bombas padrões) e aplicação adequada ao Brasil (o que significa atenção às condições normativas, técnicas, comerciais e ambientais nacionais, com exceção às exigências de consumo mínimo de cimento e limite máximo de relação água/cimento). Cabe lembrar que neste tipo de estudo não é apropriado fixar muitos limites no início, pois, à priori, não se deve excluir nenhum fator que não tenha sido avaliado, para não correr o risco de excluir fatores importantes.

O foco principal desta pesquisa são os fatores que afetam a produção do concreto, dedicando-se atenção especial às variações nas proporções (dosagem) e na granulometria/morfologia dos agregados, por estes se tornarem cada vez mais influentes à medida que o consumo de cimento é reduzido.

1.4 Metodologia

O trabalho se desenvolveu a partir de uma revisão bibliográfica sobre aspectos de robustez em diversas áreas do conhecimento e mais detalhadamente em concretos. A seguir, um programa experimental investigou os aspectos necessários para que se pudesse alcançar o objetivo da pesquisa.

O programa experimental central consiste em um planejamento fatorial que segue as seguintes etapas:

- seleção dos fatores que serão avaliados, levantamento de dados relevantes (em campo e bibliografias) a respeito da variação destes e estabelecimento dos níveis de variação a serem empregados na pesquisa;
- seleção das variáveis resposta e definição dos limites de aceitação;
- escolha de materiais para o estudo e caracterização detalhada;
- desenvolvimento de um concreto base, para o qual se fixou consumo de cimento em 200 kg/m^3 . Isto conduz a resistências à compressão aos 28 dias acima de 40 MPa, ao se obter intensidades de ligantes $< 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$, caracterizando o baixo consumo de cimento.
- aplicação de variações dos fatores sobre o traço base;
- interpretação dos resultados, proposta de modelos e análise da robustez.

Paralelamente desenvolve-se um ferramental que servirá de apoio tanto à pesquisa, como pode ser aplicado posteriormente para proporcionar mecanismos de robustez ao processo de produção do concreto. Este desenvolvimento consiste em:

- avaliação de um sistema moderno de caracterização granulométrica e morfológica de partículas (Análise de Imagens Dinâmicas);
- avaliação de modelos de empacotamento descritos na literatura técnica;
- ajuste dos modelos para que possam incorporar as principais variáveis que afetam o empacotamento;
- desenvolvimento de uma solução computacional para previsão dos impactos causados pela variabilidade;

- uso de ensaios reológicos com um reômetro de concreto como ferramenta de controle de variabilidade do concreto;
- instrumentação de um equipamento de mistura e avaliação da possibilidade de utilizar as informações obtidas para identificação de desvios que possam comprometer a qualidade do concreto.

1.5 Originalidade

Ainda são poucos os trabalhos que se propõem a romper as barreiras normativas na direção de consumos de cimento realmente baixos. Nestes trabalhos, observa-se principalmente foco em obter adequadas resistências mecânicas, mesmo com baixo teor de cimento, e mais recentemente as primeiras investigações acerca da durabilidade destes concretos. Mesmo com estas questões razoavelmente bem esclarecidas, uma aplicação em escala comercial somente será possível quando se adquirir confiança sobre a possibilidade de produção contínua em uma unidade industrial. Neste sentido este trabalho é original, ao se debruçar sobre os efeitos que alguns aspectos variáveis no dia-a-dia têm sobre concretos com baixo consumo de cimento.

Além do tema central, vários assuntos desenvolvidos nesta tese também podem ser considerados originais: a adaptação de modelos de empacotamento com base na morfologia dos grãos quantificada por meio de análise dinâmica de imagens; desenvolvimento de um software integrando métodos de dosagem convencionais com métodos baseados na distribuição granulométrica e que pode ser empregado para avaliações teóricas de robustez; proposição de ferramentas que conferem mecanismos robustos à produção do concreto, como o software desenvolvido, uso de reômetros com método de controle e uso de misturadores instrumentados.

1.6 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado em oito capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices.

O **Capítulo 1** compreende esta introdução onde se estabeleceu as motivações para o trabalho além do objetivo que se pretende alcançar. A metodologia a ser empregada e o escopo, bem como os pontos originais desta pesquisa, são brevemente comentados.

A revisão bibliográfica do **Capítulo 2** aborda o assunto robustez, como ele é tratado em diversas áreas do conhecimento, os seus mecanismos e os principais trabalhos relativos a estudos de robustez em concretos. Conclui-se que novas soluções fatalmente surgirão devido à pressão para

reduzir o impacto ambiental, decorrente substancialmente do consumo de cimento no caso do concreto. Estas soluções precisarão ser suficientemente robustas para permitir aplicações em maior escala e avanços nas metodologias de dosagem serão peças importantes neste processo.

Considerando que a problema de formulação de concretos é inicialmente um problema de empacotamento, o **Capítulo 3** analisa alguns métodos teóricos disponíveis na literatura. Três métodos foram implementados e os resultados confrontados com medidas de empacotamento de materiais com morfologia variada. Com base nestes resultados, analisou-se a adequação dos modelos e propôs-se um ajuste com a incorporação de parâmetros morfológicos e granulométricos. Este capítulo também descreve e avalia um método recente para avaliação simultânea de granulometria e morfologia, a Análise de Imagens Dinâmicas, que fornece os dados utilizados nos cálculos dos modelos.

No **Capítulo 4**, apresentam-se levantamentos de variabilidade relativos às variáveis que serão estudadas: variações na pesagem, granulometria e morfologia dos agregados. Com base nestas informações, e empregando o modelo de empacotamento ajustado no capítulo anterior, analisou-se o efeito das variações sobre alguns parâmetros de formulações convencionais e de baixo consumo de cimento.

O **Capítulo 5** apresenta fundamentos sobre concretos com baixo consumo de cimento e detalha o desenvolvimento de um destes concretos, o qual foi utilizado como base para o planejamento experimental do capítulo seguinte.

O estudo experimental de robustez, por meio de planejamentos fatoriais fracionados, é descrito no **Capítulo 6**. O estudo é dividido em três etapas, englobando análise do efeito de desvios de pesagem, variação granulométrica e de morfologia dos agregados. Avaliaram-se os efeitos sobre os parâmetros reológicos no estado fresco e sobre propriedades mecânicas no estado endurecido.

A condição no estado fresco influencia a aplicação do concreto, podendo conduzir a decisões equivocadas que podem levar as propriedades no estado endurecido para além dos limites aceitáveis. Por esta razão, é proposto que o monitoramento do processo de mistura seja utilizado como instrumento de controle da reologia. O **Capítulo 7** descreve a adaptação de um misturador para este fim e demonstra a aquisição de dados durante a mistura para alguns casos limites detectados no capítulo anterior. Também se discute o uso de um reômetro de concreto como instrumento de controle de qualidade.

O **Capítulo 8** apresenta as considerações finais, com as conclusões do estudo e propostas para desenvolvimentos futuros.

Por fim, o trabalho apresenta ainda as Referências Bibliográficas e alguns Apêndices, onde são apresentados dados complementares dos trabalhos realizados.

2 ROBUSTEZ

Os termos robustez e robusto têm sido muitas vezes empregados como sinônimos de forte, resistente, tendo fraco e frágil como antônimo. É o que, à primeira vista, nos dá a entender a definição encontrada em dicionários:

Robustez: qualidade de robusto. Força, fortaleza, vigor: Robustez de ânimo.

Robusto: que manifesta boa saúde e robustez; vigoroso. Valente, duro, potente. Forte, ingente, temeroso. Que resiste à violência; que tem boa construção. Firme, inabalável, rígido.

(Michaelis)

A origem da palavra deriva do latim *rōbustus*, relativo ao carvalho, árvore de porte cuja madeira dura e resistente é utilizada em diversas aplicações duráveis.

Há, porém, outro significado também descrito com o termo robustez: a capacidade de manter suas características mesmo em condições adversas. Esta qualidade pode ser observada em diversas áreas do conhecimento. Observam-se características robustas em organismos unicelulares, grupos e colônias de animais, modelos matemáticos, sistemas elétricos, mecânicos e computacionais, estruturas organizacionais, estruturas de construções e infraestruturas metropolitanas, continentais e globais.

Neste capítulo inicial, são analisados alguns destes casos e os mecanismos que conferem robustez aos sistemas. Posteriormente, analisa-se como estes conceitos se aplicam aos concretos e como podem ser afetados quando se reduz o consumo de cimento.

2.1 Robustez em algumas áreas do conhecimento

2.1.1 Biologia

Robustez é uma característica onipresente em sistemas biológicos evoluídos e garante que certas funções do sistema se mantenham mesmo em face de perturbações externas (ambiente) ou internas (ruído intracelular e genéticas) (STELLING et al., 2004). Isto pode ser visto desde o nível de transcrição de genes até a regulação interna dos organismos para manter-se estável (homeostase), como, por exemplo, através de regulação térmica ou química (KITANO, 2004).

Como exemplo cita-se a bactéria *Escherichia coli*, massivamente presente no organismo humano, que se locomove frente a estímulos químicos, na busca por alimento (atraentes) ou na fuga de venenos (repelentes). Este movimento, denominado de *chemotaxis*, ocorre em uma larga variação de concentração destes ligantes químicos, graças a um feedback intracelular (*Integral feedback control*) que garante a adaptação da bactéria a ambientes variados.

Integral feedback control é uma estratégia básica de engenharia para garantir a estabilidade da resposta (saída) de um sistema, independente do ruído ou variações nos parâmetros de entrada. Em sistemas biológicos, é comum o retorno à situação anterior ao estímulo extracelular, mesmo na presença contínua do sinal (YI et al., 2000). Pequenas variações no sinal são identificadas, ainda que o valor absoluto do sinal varie em diversas ordens de grandeza (HARTWELL et al., 1999).

Em sistemas biológicos, Kitano (2004) identifica e descreve alguns mecanismos responsáveis por conferir robustez:

- a) Controle do sistema;
- b) Mecanismos alternativos;
- c) Modularização;
- d) Desacoplamento.

O controle do sistema consiste de *feedbacks* aos estímulos, que podem ser tanto negativos como positivos. No caso de *feedbacks* negativos, quando um resultado divergente é obtido, o sistema atua de maneira a reduzir esta divergência. Por exemplo, quando a temperatura no corpo humano desvia do normal, mecanismos como suor, mudanças no metabolismo, vasoconstrição ou vasodilatação, arrepios da pele e tremores são ativados, possibilitando que a temperatura retorne ao normal. Já o *feedback* positivo amplia o estímulo. Geralmente é associado a situações de dupla estabilidade, onde a ampliação do sinal leva o sistema a um segundo nível estável, mais robusto, contra ruídos e flutuações do estímulo.

A presença de mecanismos alternativos propicia a robustez. Se uma mesma função pode ser realizada de diversas maneiras, então a falha de uma delas não impede a sua concretização. Manifesta-se na forma de redundância, sobreposição de funções e diversidade. A existência de dois rins é um exemplo de redundância, sendo que um único é mais que suficiente para uma vida normal. O fígado é outro exemplo. Por este motivo estes órgãos se aplicam a transplantes em vida. A diversidade se manifesta quando uma mesma função pode ser suprida por mecanismos diferentes. A energia necessária para viver pode ser obtida de fontes diferentes, sejam carboidratos, gorduras ou proteínas. O processo de extrair energia destes compostos difere, mas tem o mesmo objetivo: produzir energia.

A modularização é um mecanismo efetivo para conter danos, evitando que os mesmos se propaguem e afetem todo o sistema. As próprias células são exemplos clássicos, sendo ao mesmo tempo formadas por módulos intracelulares e compondo tecidos e órgãos. Danos localizados se mantêm restritos e mecanismos de reparo e regeneração substituem os módulos danificados, reconduzindo o organismo, como um todo, a um novo estado de normalidade.

O desacoplamento se refere a mecanismos que isolam variações em baixo nível, de funcionalidades em alto nível. Um exemplo é a proteína Hsp90, capaz de corrigir outras proteínas que foram danificadas devido a uma variação exagerada do ambiente. Usando este mesmo processo, a Hsp90 ainda é capaz de desacoplar variações genéticas (genótipo) das características observáveis (fenótipo), atuando desta forma como uma espécie de buffer genético contra mutações.

Geralmente estes mecanismos trabalham em conjunto, resultando em um sistema complexo e evoluído, capaz de se defender, reparar e regenerar (SUSSMAN, 2007). Continuamente os organismos monitoram o ambiente interno e externo, disparam controles, utilizam rotas alternativas e paralelas, substituem módulos danificados e protegem as funcionalidades principais de interferências locais. Embora no caso de sistemas biológicos, a robustez seja um resultado de um longo processo de evolução natural, sistemas e produtos desenvolvidos pelo homem também tendem a evoluir para situações mais robustas, em decorrência de exigências competitivas, de nichos de mercado ou oriundas da sociedade (KITANO, 2004).

Stelling et al. (2004) ressaltam um aspecto importante a respeito da relatividade do conceito de robustez. Robustez deve ser vista como uma propriedade relativa, uma vez que nenhum sistema é capaz de se manter estável em todas as funções, para qualquer tipo de perturbação. Sendo assim, é necessário especificar qual característica está sendo analisada e perante qual tipo de distúrbio ou incerteza esta característica deve ser robusta.

Kitano (2004) ainda lembra que ser robusto não significa ser inalterável independentemente dos estímulos ou mutações. De fato, robustez é a manutenção de funcionalidades específicas em face a perturbações, e isto muitas vezes exige que o sistema mude seu modo de operação de uma forma flexível.

2.1.2 Redes

A robustez em sistemas de engenharia possui literatura técnica iniciada durante a segunda guerra mundial, com projetos de redes elétricas (BODE, 1945). Redes robustas são sistemas capazes de manter suas funções principais, mesmo no caso de falhas localizadas ou aumentos localizados de

demanda. Talvez um dos exemplos mais simples sejam as cadeias de pequenas lâmpadas, muito comuns no natal. No caso de ligação simples em série, a queima de uma única lâmpada resultaria no desligamento de toda a cadeia. Ligações complementares, em paralelo, permitem que todas as demais lâmpadas se mantenham em funcionamento, no caso de queimas isoladas.

Conceitos de robustez têm sido aplicados desde pequenos circuitos elétricos a redes continentais e globais.

Sistemas de transporte são um caso particular de rede. A robustez de sistemas de transporte está relacionada à habilidade de oferecer rotas alternativas na ocorrência de eventos, tais como falhas, acidentes ou ataques direcionados (DERRIBLE; KENNEDY, 2010). A existência de estações de transbordo, interconectando várias linhas, propicia a formação de rotas alternativas, tornando os sistemas mais robustos frente a falhas aleatórias. Derrible e Kennedy (2010) propuseram uma métrica e avaliaram 33 redes de metrô ao redor do mundo, concluindo que Tóquio, Seul e Madri são as mais robustas, enquanto que Roma, Delhi e Cairo são as menos robustas. Nenhuma rede brasileira foi avaliada.

O metabolismo de organismos vivos pode ser considerado uma rede de produção e consumo de diversas substâncias. Cada etapa ocorre em um determinado módulo e estes se interconectam, transferindo produtos e sinais de comunicação. Estas redes são incrivelmente robustas em alguns casos. Alguns organismos simples crescem, sobrevivem e se reproduzem mesmo em ambientes onde ocorrem intervenções farmacêuticas ou mudanças ambientais drásticas (HARTWELL et al., 1999).

A internet, rede de computadores interligados globalmente, e a WWW (World Wide Web), rede de documentos interligados por meio de hyperlinks, são outros exemplos de redes robustas a falhas aleatórias. Mesmo com constantes falhas em roteadores, muito raramente ocorrem grandes eventos que interrompem a internet em larga escala. E, apesar de algumas vezes se encontrar páginas “não disponíveis”, isto não impede a continuidade da navegação, e nem que as informações desejadas sejam encontradas. De forma simplificada pode-se dizer que esta capacidade robusta advém da existência de uma estrutura de conexões específica, com existência de certa quantidade de nós que se ligam a uma quantidade específica de outros nós. Apesar desta robustez a falhas aleatórias, esta estrutura é menos robusta a ataques direcionados. Quando apenas os nós mais conectados são alvos direcionados de ataques, a rede pode se desestruturar mais rapidamente que outros tipos de redes. Embora pouco interessante no caso das redes de energia ou comunicação (SOLÉ et al., 2007), a falta de robustez a ataques direcionados pode ser explorada, como, por exemplo, com uso de drogas medicamentosas específicas (ALBERT; JEONG; BARABÁSI, 2000).

2.1.3 Sistemas computacionais

Robustez em sistemas computacionais é a habilidade de um software ou hardware em tratar erros adequadamente e continuar operando, mesmo no caso de entradas inválidas ou erros gerados em cálculos. Quanto mais difícil for gerar uma entrada que o sistema não é capaz de tratar, tão mais robusto será este sistema. Casos de entradas inválidas são, por exemplo, alfanuméricos onde se esperaria apenas numéricos, números negativos em cálculos de raízes ou logaritmos, valores nulos em divisões, estouros de memória, etc. Um sistema realmente robusto será capaz de “sobreviver” não apenas aos casos mais comuns, mas inclusive àqueles não previstos durante a sua concepção (MEYER, 1997).

É necessária a criação de códigos adicionais para detectar entradas e resultados inválidos, e permitir o prosseguimento da execução ou interrupção com devolução de mensagens claras ao usuário, de modo que se possa corrigir a entrada e assim prosseguir a execução sem comprometer a integridade do sistema. Note-se, no entanto, que a adição indiscriminada de código não contribui com um aumento de robustez. Ao contrário, esta prática introduz mais erros, torna o sistema mais complexo e de difícil entendimento. Apenas adicionando de maneira correta, permitirá um aumento de robustez (HUHNS; HOLDERFIELD, 2002).

A criação de sistemas computacionais realmente robustos é difícil e de alto custo. Atualmente a prioridade é dada à eficiência, exatidão e escalabilidade. No entanto, inspirado pela robustez observada em sistemas biológicos evoluídos, alguns sistemas permitem adaptação a novas situações sem custos desproporcionais. Uso de técnicas de programação que permitem encapsulamento e modularização e técnicas advindas da inteligência artificial propiciam a geração de sistemas mais robustos (SUSSMAN, 2007).

2.1.4 Projeto robusto na engenharia de produtos e processos

Na engenharia de produtos, deseja-se que possíveis fatores variáveis na produção não interfiram na qualidade dos artigos produzidos. Nesta área destacam-se os trabalhos de Genichi Taguchi, que propôs o conceito de projeto robusto (TAGUCHI, 1986). A abordagem se baseia em planejamentos experimentais, buscando obter produtos e processos que fossem pouco sensíveis a variações ambientais e dos componentes, e que tivessem desvios mínimos em torno de um valor-alvo. Este enfoque trouxe como novidade o fato de que desvios do valor-alvo são sempre considerados indesejáveis, mesmo que ainda dentro do limite de especificações. Também é considerado no processo de planejamento, não apenas os parâmetros possíveis de serem controlados pelo fabricante, mas

também os ruídos de difícil ou impossível controle, e os que só ocorrem posteriormente no uso pelo consumidor. Nos experimentos, durante o processo de planejamento, todos estes fatores são analisados e buscam-se soluções que, ao mesmo tempo, se aproximam do valor-alvo e sejam robustas, ou seja, pouco sensíveis aos ruídos.

Na prática o método de Taguchi é um estudo multivariado, baseado em planejamentos ortogonais, realizando um cruzamento de um arranjo experimental interno, formado pelos parâmetros controláveis, e um arranjo experimental externo formado pelos ruídos. Assim, para cada combinação de fatores do arranjo interno se aplica a variação de ruídos do arranjo externo. Para isto, Taguchi propõe conjuntos compostos por 4 a 32 experimentos. Propõe ainda cálculos de relações sinal/ruído para decidir pela solução mais robusta. Propõe diferentes relações sinal/ruído para as situações em que a resposta deve ser minimizada, maximizada ou alcançar um valor pré-estabelecido (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010; MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009).

Taguchi e seus seguidores alcançaram bons resultados em diversas empresas de grande porte. O uso destes planejamentos experimentais multivariados e o conhecimento técnico que tinham do processo industrial possibilitaram este sucesso (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Apesar do sucesso prático, o método recebeu duras críticas da comunidade de estatísticos, principalmente com relação a implementação e natureza técnica da análise de dados. Embora os arranjos internos e externos sejam bem econômicos em termos de número de experimentos, o cruzamento entre os dois resulta em uma quantidade de experimentos grande. Também dificulta o estudo de interação entre fatores. Existem outros planejamentos que permitem obter os mesmos resultados de forma mais eficiente e com menos ensaios, possibilitando ainda a quantificação de efeitos de interação entre os fatores. No caso de interações significativas, os planejamentos de Taguchi podem levar a interpretações pouco claras. Outro item muito criticado foi o uso das relações sinal/ruído. Embora prático para análise dos resultados, este tipo de parâmetro não permite distinguir efetivamente a contribuição do sinal e do ruído. Apesar das críticas, a partir deste trabalho pôde-se avançar significativamente na área de projeto experimental voltado à qualidade de produtos, inclusive levando ao desenvolvimento do conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas que se denomina hoje de Metodologia de Superfície de Resposta (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009).

2.1.5 Robustez de estruturas

Na engenharia de estruturas, robustez é a propriedade de sistemas estruturais que lhes permite sobreviver a situações imprevisíveis ou não usuais (KNOLL; VOGEL, 2009). Vasconcelos (2010)

interpreta este conceito como similar ao que a ABNT NBR 6118 (2014) denomina de colapso progressivo.

A engenharia de estruturas começou a se preocupar com este assunto após um acidente ocorrido em 1968 em Londres, com um prédio de apartamentos de 22 andares. Uma explosão localizada de gás, expulsou um painel estrutural de parede de um dos cômodos, localizados em um dos vértices do edifício. Com a perda de sustentação, os cômodos superiores desabaram sobre o cômodo afetado. O impacto e sobrecarga deste desabamento levaram ao colapso todos os demais cômodos dos andares inferiores. Neste caso, um dano localizado de menor monta resultou em um impacto desproporcional.

Laranjeiras (2010) identifica e descreve atributos que conferem robustez a um sistema estrutural:

- a) Redundância: se caracteriza pela disponibilidade de alternativas diversas de redistribuir os esforços quando um elemento estrutural é retirado. No caso de falha de um ou mais elementos estruturais, o sistema possibilita que os esforços inicialmente suportados por estes elementos, sejam absorvidos para outros, e que estes sejam capazes de suportar o acréscimo de esforços.
- b) Continuidade: se caracteriza pela capacidade da estrutura em redistribuir esforços, após um dano. Mesmo havendo redundância, caso não exista uma continuidade (conectividade) entre os elementos, não será possível a redistribuição dos esforços. Estruturas formadas por elementos pré-fabricados, em que não se faz um trabalho de ligação efetivo entre as peças, são casos típicos propensos a colapsos progressivos.
- c) Dutilidade: se caracteriza pela capacidade de plastificação, isto é, de suportar extensas deformações antes de romper-se. Após o dano inicial e supressão de um ou mais elementos, a estrutura deforma-se até atingir uma nova situação de equilíbrio, com os esforços distribuídos a outros elementos estruturais. Caso os elementos e ligações não tenham capacidade de se deformar sem se romper, o dano se propagará levando ao colapso progressivo.

Uma forma de quantificar a robustez de sistemas estruturais, empregando conceitos de avaliação probabilística de riscos, tem sido proposta, permitindo assim comparar diversas soluções na busca pela mais robusta (BAKER; SCHUBERT; FABER, 2008). Consiste na identificação de cenários, de eventos de falha, e correspondentes riscos diretos e indiretos, e as probabilidades de ocorrência de cada um. Os riscos diretos são aqueles associados com o dano inicial, enquanto que os indiretos são os decorrentes da propagação do dano. Propõe um índice de robustez simples, comparando o risco direto com o risco total (direto + indireto):

$$I_{Rob} = \frac{R_{dir}}{R_{dir} + R_{Ind}}$$

Estruturas robustas possuem índices de robustez próximos de 1, ou seja, pequeno risco indireto. Já valores próximos a 0 caracterizam estruturas onde o risco é quase que na totalidade indireto, particular de estruturas com grande risco de ocorrer colapso progressivo.

2.1.6 Definições e mecanismos de robustez

Na Tabela 1 estão sintetizadas algumas definições do termo robustez em diversos campos do conhecimento, incluindo alguns não comentados anteriormente.

Com base nos casos expostos anteriormente, pode-se dizer que sistemas robustos apresentam um ou mais dos mecanismos listados abaixo:

1. Mecanismos de controle do sistema;
2. Possibilidade de rotas alternativas, resultado de redundância/diversidade e continuidade;
3. Estrutura modularizada;
4. Desacoplamento entre os níveis que sofrem com os ruídos e os níveis das características principais;
5. Capacidade de regeneração;
6. Encapsulamento;
7. Dutilidade.

2.2 Robustez em concretos

Na área de materiais cimentícios pode-se encontrar diversas referências a características robustas.

Aïtcin (2000) utiliza o termo robusto ao se referir a processos de fabricação de cimento. Cita que os atuais processos de fabricação de cimento são pouco robustos, o que leva a propriedades variáveis. No futuro os cimentos devem atender a requisitos de qualidade mais estreitos, isto é, menores faixas de variação serão aceitas. Neste caso, o processo de fabricação do cimento é o processo que deverá ser reestruturado, de modo a possibilitar a fabricação de cimentos robustos. Olhando a partir do prisma da produção de concreto, esta estratégia defendida por Aïtcin está relacionada a diminuir a variabilidade de um dos componentes do concreto, e com isto obter produtos que sofram menos com esta fonte de variabilidade.

Tabela 1 - Resumo de definições de robustez e campos do conhecimento em que foram aplicados

Definição	Campo de conhecimento em que foi aplicada	Referência
Habilidade de manter o desempenho mesmo em face de perturbações e incertezas.	Sistemas biológicos	(STELLING et al., 2004)
"Canalização" em direção a um resultado específico a partir de condições de partida incertas.	Sistemas biológicos	(WADDINGTON, 1942)
As consequências de uma falha estrutural não são desproporcionais ao efeito que causou a falha.	Engenharia de Estruturas	(CEN, 1994)
O grau em que um sistema é insensível aos efeitos que não são considerados no projeto.	Controle de processos	(SLOTINE; LI, 1991)
Robustez no reconhecimento de fala refere-se à necessidade de manter boa precisão do reconhecimento, mesmo quando a qualidade da voz de entrada é degradada, ou quando a acústica, articulatória, ou características fonéticas da fala no ambiente de teste diferem do ambiente de treinamento.	Reconhecimento de fala	(STERN, 1996)
Robustez trata mais especificamente de caminhos alternativos oferecidos aos usuários de trânsito e probabilidade de acidentes / falhas.	Sistemas de transportes	(DERRIBLE; KENNEDY, 2010)
Habilidade [...] de reagir de forma adequada às circunstâncias anormais (ou seja, as circunstâncias "fora das especificações"). [Um sistema] pode estar correto sem ser robusto.	Sistemas computacionais	(MEYER, 1997)
Insensibilidade perante pequenos desvios nas premissas.	Estatística	(HUBER, 1977)
Robustez é a propriedade de sistemas estruturais que lhes permite sobreviver a situações imprevisíveis ou não usuais	Engenharia de Estruturas	(KNOLL; VOGEL, 2009)
Processo robusto é aquele que é apenas minimamente afetado por fontes externas de variabilidade	Projeto de experimentos	(MONTGOMERY, 2009)
Robustez é a capacidade que o concreto tem de manter as propriedades no estado fresco, se ocorrerem pequenas variações nas propriedades ou quantidades dos materiais constituintes.	Tecnologia de Concretos Autoadensáveis	(EFNARC, 2005)

Na tecnologia do concreto, robustez pode ser definida como sendo a **capacidade do concreto de manter as suas propriedades com variações aceitáveis, tanto no estado fresco como no endurecido, seja em termos mecânicos ou de durabilidade, ao longo do tempo, mesmo ocorrendo pequenas alterações no conjunto de matérias-primas, nas quantidades ou no processo de produção.**

É a característica de uma composição cimentícia que compreende a sua tolerância às variações nas características dos constituintes e quantidades, variações durante a mistura, transporte e aplicação, bem como as condições ambientais (RILEM TECHNICAL COMMITTEE, 2008).

Na Figura 2 ilustra-se de forma simplificada o conceito. Y representa uma propriedade do concreto que depende de uma variável X genérica. Existe um limite aceitável ($R_{inf} \leq Y \leq R_{sup}$) e a variável X varia

entre dois limites ($x_{\min} \leq X \leq x_{\max}$). Neste cenário duas formulações de concreto são representadas (*Mix A* e *Mix B*). Pode-se observar que *Mix A* é mais robusta que *Mix B*, pois tolera uma maior variação de X , sem que a propriedade Y saia do limite de aceitação. Se no dia-a-dia X varia aleatoriamente entre x_{\min} e x_{\max} , em diversas situações *Mix B* se encontrará fora dos limites de especificação. Para que *Mix B* tenha robustez adequada seria necessário estreitar o limite entre x_{\min} e x_{\max} , por exemplo, com maior esforço no controle de qualidade, treinamento de operadores ou com uso de equipamentos mais modernos. Neste caso, existindo a alternativa de usar *Mix A*, esta opção é preferível, por possuir robustez suficiente no cenário atual e não demandar de investimentos adicionais no processo.

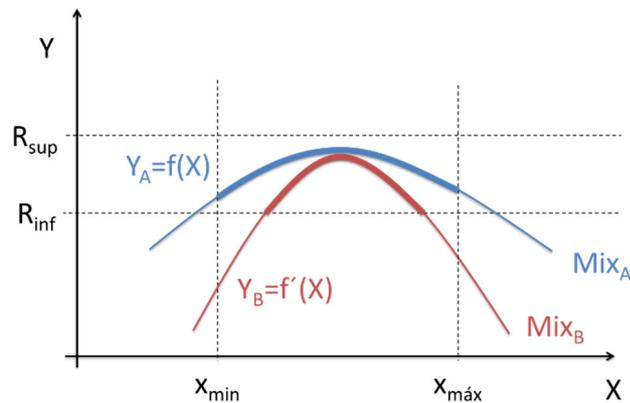


Figura 2 - Ilustração simplificada do conceito de robustez (adaptada de Nunes et al. (2006)).

Pelas definições anteriores se nota que o estudo de robustez em concreto não é um trabalho tão simples como nesta ilustração. Têm-se variabilidades na qualidade e quantidade dos materiais envolvidos e nos processos de produção, transporte e aplicação, além de variáveis ambientais, o que afeta um grande número de propriedades, desde os primeiros minutos de vida do concreto até após décadas de uso.

Assim, de maneira mais completa, pode-se escrever que a probabilidade de que todos os limites sejam atendidos é dada por:

$$p = P\left(\bigcap_{i=1}^n R_{\text{inf}}^i \leq Y_i = f_i(x_1, \dots, x_m) \leq R_{\text{sup}}^i\right)$$

Onde n propriedades (variáveis dependentes) do concreto dependem de m variáveis independentes e devem-se conhecer as relações entre as variáveis dependentes e independentes, além da distribuição de probabilidade de ocorrência de cada variável independente. Quanto maior a probabilidade de se atender todos os limites, maior será a robustez da solução analisada.

É de se esperar que tal avaliação seja de grande complexidade, razão pela qual a maioria dos estudos de robustez se concentra em algumas propriedades principais, e em conhecimento técnico prévio, para escolha de quais variáveis independentes serão variadas. Por sua vez, a escolha do número e tipo de variáveis independentes, propriedades do concreto, e os limites de aceitação estabelecidos afetam a avaliação de robustez (NUNES et al., 2006).

2.2.1 Alguns estudos de robustez

Estudos de robustez na literatura técnica de concretos, são encontrados quase que essencialmente em concretos auto adensáveis (CAA). Variações no cimento ou adições minerais devido a mudanças no processo produtivo, e mudanças nos agregados, por exemplo, de uma jazida para outra, tem causado grandes variações nas propriedades no estado fresco (NUNES et al., 2006).

A EFNARC (2005), na diretriz sobre produção de concreto auto adensável, considera que para ser robusto, um CAA deve suportar uma variação de água de 5 a 10 litros/m³ sem que as propriedades no estado fresco ultrapassem os limites especificados. Essa capacidade deve ser confirmada durante a dosagem. Estes estudos de robustez em geral se limitam a garantir que a trabalhabilidade seja mantida dentro de limites pré-estabelecidos e o fator variável a ser considerado é apenas o consumo de água. Esta consideração simplificada se baseia no fato de que muitas das variabilidades encontradas nos materiais, sejam mudanças de umidade, granulometria ou área específica, resultam em uma mudança na demanda de água. Esta simplificação, no entanto, ignora as características específicas do produtor de concreto, tais como controle de qualidade, desempenho de equipamentos e conhecimento do pessoal envolvido na dosagem e produção do concreto (NUNES et al., 2006).

Esta mesma diretriz faz algumas recomendações sobre táticas que afetam a robustez. Uso de aditivos modificadores de viscosidade minimizam as consequências de variações na umidade, presença de finos na areia e variações granulométricas, tornando o concreto menos sensível a pequenas variações na proporção e qualidade de outros constituintes. Um conteúdo apropriado de finos também é recomendado. Por outro lado, não encoraja o uso de altas proporções de escória de alto forno granulada por poder trazer problemas de controle de consistência e aumentar o risco de segregação.

Mueller e Wallevik (2009) testaram variações de ± 5 L/m³ e ± 10 L/m³ de água e ainda de $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$ de superplastificante em um concreto auto adensável ecoeficiente. Concretos com cerca de 315 kg/m³ de ligantes resultaram em resistências médias à compressão entre 60 e 70 MPa aos 28 dias, o que pode ser considerado um ótimo desempenho quando comparado com os dados levantados no estudo de ecoeficiência realizado por Damineli et al. (2010). Nas variações mais extremas de água e no

menor consumo de aditivo as composições resultantes passaram a exibir propriedades apenas semi auto adensáveis. Variações de consumo de água afetam o volume de pasta disponível e consequentemente a distância de separação entre as partículas de agregado, o que afetou tanto a viscosidade plástica como a tensão de escoamento. Já variações de aditivo afetaram basicamente a tensão de escoamento. Principalmente nas medidas com 30 minutos após a mistura inicial, pequenas alterações de aditivo (cerca de $0,13 \text{ kg/m}^3$) elevaram a tensão de escoamento de 50 a 90 Pa. Isto evidencia que uma precisão maior na pesagem do aditivo deve ser considerada como alternativa tecnológica que favorece a robustez quando se está interessado em estabilidade na tensão de escoamento. Já se o critério é a viscosidade plástica o teor de aditivo não é tão significante. Infelizmente este estudo foi planejado apenas para variações independentes das variáveis, não sendo possível avaliar a influência conjugada de variações em ambas as variáveis.

Nunes et al. (2006) reconhecem que a introdução de concreto auto adensável na indústria depende da possibilidade de produção de formulações robustas. Para tanto propõe um método de quantificação da robustez de CAA. Utilizaram um planejamento experimental fatorial e avaliaram a influência de alguns parâmetros de dosagem nas propriedades no estado fresco e na resistência à compressão. Os parâmetros de dosagem utilizados são os sugeridos pelo método de dosagem de CAA Japonês (OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000): relações volumétricas água/finos, areia/argamassa e teor de sólidos e as relações em massa fíler/cimento, superplastificante/finos e areia fina/areia total. O fator mais influente observado foi a relação água/finos, porém vários outros também se mostraram significantes, inclusive com interações de efeitos entre variáveis.

Com base nos resultados experimentais propuseram modelos matemáticos atrelados aos parâmetros variados e com base nas variações que estes parâmetros sofrem ao longo da produção na indústria puderam avaliar a frequência com que as propriedades de interesse estavam dentro e fora dos limites admitidos. Para a situação que analisaram, concluíram que um em cada quatro concretos executados na indústria em questão não atendia todos os requisitos do estado fresco, constituindo-se em uma formulação pouco robusta. Os autores consideram que a metodologia empregada neste estudo é útil para comparar a robustez de diferentes formulações no contexto de variabilidade do produtor, auxiliando na escolha de soluções que no dia-a-dia sejam mais estáveis e atendam os limites impostos.

Rigueira (2008) conduziu uma pesquisa semelhante, onde avaliou erros na pesagem dos materiais. Concluiu que variações no cimento e no aditivo são importantes, porém, estes materiais em geral são medidos com boa precisão, mais acuradamente que as variações permitidas por norma. Erros na areia e brita não afetaram significativamente as propriedades avaliadas. A quantidade de água total e de materiais finos é fator duvidoso, principalmente da água, pois pode ter diversas fontes de origem e a

falta de precisão na medida da umidade dos agregados pode levar a variações excessivas. Notou também que a sensibilidade depende da dosagem e que por vezes a melhora em um aspecto pode prejudicar outro.

Kwan e Ng (2010) também consideram que a robustez é um dos fatores chave quando se pretende fazer aplicações de concreto auto adensável em larga escala. Na tentativa de aumentar a robustez de CAA, analisaram a introdução de Materiais Cimentícios Suplementares (MCSs), especificamente cinza volante e sílica ativa. O estudo considerou teores variados de MCSs e de superplastificante e se restringiu a avaliar as propriedades no estado fresco por meio de ensaios tradicionais aplicados a CAA. Notaram que cada propriedade avaliada conduz a um teor ótimo de aditivo diferente. Quando o teor de aditivo é muito abaixo do teor ótimo as propriedades variam mais acentuadamente com pequenas mudanças no teor de aditivo. Já um excesso de aditivo conduziu a uma situação repentina de segregação. Assim o uso de taxas de aditivo inadequadas propicia baixa robustez, tanto na falta como no excesso.

Uma formulação adequada precisa atender simultaneamente aos requisitos de fluidez e de estabilidade contra segregação. Estas duas propriedades são geralmente opostas, e ao se priorizar uma, a outra é penalizada. No caso dos concretos avaliados por Kwan e Ng (2010), para a mistura padrão sem MCSs, apenas um único teor de aditivo permitia o atendimento de todos os limites. Qualquer desvio para mais ou menos resultava no não atendimento de pelo menos um dos limites estabelecidos. Trata-se de um exemplo muito típico de solução não-robusta e que na aplicação em campo provavelmente levará a muitos casos de não conformidade. Já as formulações com SCM, em especial as com sílica ativa, apesar de demandarem um consumo superior de aditivo, possibilitaram intervalos bem maiores de consumos dentro dos quais todas as propriedades de auto adensabilidade foram atendidas.

Com base nestas observações, Kwan e Ng (2010) recomendam que o intervalo de teor de aditivo onde todas as propriedades são atendidas é uma expressão de robustez da formulação. Quanto mais extenso este intervalo, mais robusta é a formulação. Para a aplicação do concreto, recomendam que o teor médio do intervalo de atendimento seja usado como teor ótimo para máxima robustez, notando-se que este teor não coincide com os teores que conferem máximo desempenho de propriedades isoladas (máxima fluidez, ou máxima estabilidade, por exemplo). Trata-se de um caso em que a busca por otimizar esta ou aquela propriedade isoladamente conduz a soluções menos robustas.

Além destas recomendações, estes autores ainda relatam que redução da relação água/cimento e aumento do teor de finos são medidas efetivas para aumentar a robustez de CAA. O uso de alto teor

de finos é uma estratégia seguida por muitos estudos de CAA. Encontram-se recomendações de consumos de 386 a 475 kg/m³ (ACI COMMITTEE 237, 2007) e 500 a 600 kg/m³ (KHAYAT, 2000). Estes altos teores, especialmente se constituídos essencialmente de ligantes, representam soluções de baixa ecoeficiência, como se verá mais adiante.

Pereira, Evangelista e Brito (2012) estudaram concretos com substituição da areia natural por areia reciclada de concreto e a influência de dois tipos de aditivo superplastificante. Ao avaliar a resistência mecânica, observaram que, a depender do tipo de aditivo, a incorporação da areia reciclada pode levar a perdas maiores ou menores de resistência. Neste caso, a escolha adequada do aditivo superplastificante pode ser considerada uma solução que permitiu acréscimo de robustez frente a variações no teor de agregado reciclado.

Gálvez-Moreno et al. (2016) avaliaram a robustez de CAA quanto ao teor de superplastificante, teor de água e granulometria dos agregados miúdos. Propuseram um índice de robustez que agrega a sensibilidade da composição frente a diversos ensaios reológicos tradicionais, tais como slump-flow, caixa-L, funil-V, além de medidas de reometria e resistência mecânica. Concluíram que o concreto avaliado é mais sensível a mudanças de granulometria da areia e de teor de água do que a variações no teor de superplastificante.

Vale ainda citar algumas soluções menos convencionais que tem surgido e que se valem de mecanismos robustos. É o caso de concretos com incorporação de alto teor de fibras ou material biológico.

Compósitos auto curáveis tem sido propostos para aumentar a vida útil de estruturas. Contendo elevado teor de material ligante e fibras, estes compósitos possuem alta capacidade de deformação e, caso sejam submetidos a carregamentos que conduzem à fissuração, tem uma reserva de material cimentício inerte, a qual, em contato com a umidade do ambiente, pode formar novos produtos hidratados capazes de selar as fissuras que surgiram. É um caso de robustez baseado nos mecanismos de regeneração e utilidade. Apesar de ser uma proposta interessante, os consumos de material ligante costumam ser muito elevados, chegando a superar 1.200 kg/m³ (YANG et al., 2009), constituindo claramente uma solução para casos específicos e que não pode ser aplicada de forma generalizada.

Outra proposta de solução com capacidade de auto cura é a incorporação de bactérias no concreto. Alguns tipos de bactérias são capazes de, em certas circunstâncias, precipitar produtos similares aos encontrados em cimentos hidratados. Para proteger as bactérias do pH alto característico do concreto algumas soluções de encapsulamento tem sido estudadas (PACHECO-TORGAL; LABRINCHA, 2013).

2.2.2 Considerações a respeito de concretos atuais

Uma pergunta que surge quando se trata de robustez é como os concretos atualmente aplicados em obras podem ser considerados neste aspecto. Os principais relatos sobre robustez que se encontra na literatura se referem a concretos auto adensáveis, tipo de concreto que apenas recentemente vem ganhando espaço de aplicação. Aparentemente não há muita preocupação com o assunto quando se trata de concretos convencionais.

Deve-se considerar que tradicionalmente os consumos de cimento nos concretos são relativamente altos, o que torna o concreto mais robusto por vários motivos.

Inicialmente uma variação no consumo de água resultará em menor variação da relação água/cimento. Uma das fontes de variação de água é a umidade dos agregados, principalmente da areia. Em um m³ de concreto convencional têm-se em torno de 600 kg de areia. Um erro na estimativa da umidade de 1% equivale a 6 L de água. Em um concreto convencional $f_{ck} = 35\text{MPa}$, que possui consumo de cerca de 400 kg de cimento por m³, isto equivale a uma alteração da relação água/cimento de 0,015, o que resulta em alteração de cerca de 1,5MPa na resistência média, ou seja, afeta a resistência em no máximo 4%.¹

Este mesmo f_{ck} pode ser obtido com apenas 200 kg de cimento por m³. Ao reduzir o consumo de cimento (e água para manter o desempenho), um maior consumo de agregados é necessário, resultando em cerca de 700 kg de areia por m³ de concreto. O mesmo erro de umidade resultará em uma variação da relação água/cimento de 0,035, afetando a resistência em cerca de 10%, bem superior ao caso anterior.

Outras variações nos agregados, tais como granulometria e morfologia, também são menos relevantes quando se tem um excesso de pasta de cimento. O excesso de pasta garante um afastamento maior entre os grãos dos agregados, reduzindo o efeito de possíveis interações entre eles devido a mudanças de granulometria ou forma.

Enquanto se produzia concretos sem aditivos plastificantes, a trabalhabilidade era obtida apenas com a adição de água e/ou aumento do teor de pasta, o que se constituía em uma solução relativamente robusta, pois dependia pouco de fatores químicos. A partir do advento dos aditivos plastificantes, foi possível reduzir o consumo de água, possibilidade muito bem-vinda pelos produtores de concreto que vislumbraram a possibilidade de reduzir os consumos de cimento. Introduziu-se, no entanto, uma nova

¹ Os dados numéricos são citados apenas com intuito de dar uma noção da ordem de grandeza das variações e baseiam-se em dosagens conduzidas pelo autor deste trabalho.

problemática: a compatibilidade química entre cimentos e aditivos. Casos de não compatibilidade resultam em concretos de menor trabalhabilidade ou não estáveis ao longo do tempo e estas deficiências, se corrigidas com acréscimos de água, levam a produção de concretos fora de especificação (menos resistentes e duráveis). Além disto, em função do custo do aditivo, em geral não se utiliza aditivos mais sofisticados (superplastificante de terceira geração) e em teores suficientemente altos para atingir uma estabilidade de fluidez.

Um segundo aspecto a ser considerado está relacionado com a durabilidade do concreto. No concreto armado, dois mecanismos principais previnem a corrosão do aço: a tortuosidade e interrupção da conectividade do sistema de poros, constituindo um obstáculo físico à penetração de agentes agressivos, e a reserva química capaz de fixar agentes que participam de processos de corrosão. A tortuosidade do sistema de poros, levando a uma redução da permeabilidade, é decorrente da formação de produtos hidratados, em especial os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e de um esqueleto granular empacotado. A reserva química é resultante principalmente da presença de Hidróxido de Cálcio (CH), um dos produtos da reação de hidratação do clínquer. A presença de CH permite a fixação do CO_2 à medida que este penetra no concreto, evitando a carbonatação da região próxima do aço. Ambos mecanismos juntos garantem um pH elevado na região das barras de aço, impedindo a sua corrosão. No caso de ataque por cloretos, os aluminatos formados a partir da hidratação do C_3A são capazes de reagir com os íons cloreto, formando um sal insolúvel. Assim, um maior teor de aluminatos possibilita também uma reserva química no combate à corrosão (RASHEEDUZZAFAR et al., 1990; AİTCIN, 2000).

Os dois mecanismos citados constituem um exemplo de rotas alternativas por meio de diversidade, um dos mecanismos de robustez, conforme discutido anteriormente. Concretos mais antigos se valeram por muito tempo de ambas as rotas, resultando em concretos duráveis, mesmo em ambientes agressivos e com baixas espessuras de cobrimento². Mudanças sistemáticas na indústria do cimento, com alteração de composição e finura, possibilitaram a produção de concretos com adequada resistência à compressão, mesmo com menores consumos de cimento e maiores relações água/cimento. Como resultado, abriu-se mão ao mesmo tempo de ambas as rotas, resultando em concretos mais porosos (maior relação água/cimento) e com menor reserva alcalina (menor consumo de cimento). Os inevitáveis problemas de durabilidade passaram então a ser combatidos por meio de prescrições normativas em uma tentativa de reestabelecer o mecanismo de robustez que garante a

² O Prof. Eduardo C. S. Thomaz relata detalhes da emblemática obra do prédio do jornal "A Noite" na orla do Rio de Janeiro, projetado pelo Eng. Emílio Baumgart com lajes de 7cm de espessura e 0,5mm de cobrimento, que em vistoria realizada em 2011, mais de 80 anos após a construção, não apresentava sinais de corrosão. (<http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/baumgart/baumgart01.pdf>)

durabilidade. Passou-se a exigir consumos de cimento acima de um limite mínimo e relações água/cimento inferiores a limites máximos, além de aumentar o cobrimento das armaduras (ABNT NBR 12.655:2006; BSI BS 8500:2006; EN 206-1/DIN 1045-2).

2.2.3 Robustez e ecoeficiência

O caminho escolhido pelas normas prescritivas privilegia aumentos de consumo de cimento (consumos mínimos) e aumentos de consumo de concreto (maiores cobrimentos). Estas soluções caminham no sentido oposto da ecoeficiência. Mehta (2008) indicou três caminhos na direção da sustentabilidade: redução do consumo de concreto nas estruturas, redução do consumo de cimento no concreto e redução do teor de clínquer no cimento. É, portanto, necessário buscar novas soluções para conciliar ambas as necessidades.

Flatt, Roussel e Cheeseman (2012) examinam algumas rotas que consideram viáveis para melhorar o desempenho ambiental do concreto. Como o concreto é largamente aplicado e insubstituível em muitas aplicações, o seu impacto ambiental (consumo de energia e emissão de CO₂) é de grande relevância. Pelo mesmo motivo, qualquer solução que reduza o impacto terá grande efeito devido à escala de aplicação. Dentre as soluções atualmente já conhecidas e que possuem grande potencial de redução de impacto ambiental são citadas:

- a) Substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares;
- b) Desenvolvimento de ligantes alternativos;
- c) Uso de métodos de dosagem que limitam o consumo de cimento;
- d) Reciclagem de concreto demolido em novos concreto;
- e) Aumento da vida útil para novas construções;
- f) Reabilitação das construções existentes.

Ressaltam que qualquer solução que for adotada deve ser robusta a variações no material, sejam variações de origem geográfica, temporal e/ou sazonal. É muito provável que o concreto do futuro esteja baseado não apenas em uma única solução, mas sim na combinação adequada das soluções disponíveis em cada local e tempo. Os concretos passarão a ser mais sensíveis a variações na proporção e propriedades dos seus componentes e a robustez das soluções se tornará um assunto de grande importância.

A necessidade de reduzir os consumos de água e a diversidade química dos materiais presentes deverá levar a um uso ainda mais intensivo e diversificado de aditivos químicos. Além de necessitarem ser compatíveis com os componentes do concreto, precisarão ainda ser compatíveis entre si.

Flatt, Roussel e Cheeseman (2012) consideram que existe um grande potencial no uso de concretos com baixo consumo de cimento, sendo o projeto granulométrico dos agregados e uma reologia adequada as questões mais importantes. Uma variação em qualquer um dos componentes será muito mais crítica que nos concretos convencionais, e modos eficientes de lidar com este risco terão de ser estabelecidos.

2.2.4 Variabilidade na produção de concreto

Ao se tratar de robustez de um sistema, invariavelmente está se tratando de variabilidade nos fatores que afetam as suas propriedades. De forma geral, pode-se dizer que a variabilidade das propriedades de um produto é gerada pela variabilidade das características dos materiais constituintes, pelo desempenho dos equipamentos de produção e pela diferença entre operadores (MONTGOMERY, 1997).

Avaliando a variação da resistência à compressão de concretos convencionais, Mercer (1954) há seis décadas já listava 60 causas. Nos concretos atuais, com presença de materiais adicionais (aditivos, adições, fibras), e considerando as demais propriedades do concreto, muito mais variáveis precisam ser consideradas. As variáveis podem ser classificadas em:

- variabilidade das matérias-primas: propriedades físicas/químicas/mecânicas;
- proporcionamento: quantidades dos constituintes;
- mistura: ordem, tempo, forma e energia de mistura;
- condições ambientais;
- aplicação: forma de lançamento, adensamento e acabamento e o tempo decorrido até estas etapas.

Quando se mensura uma propriedade de interesse devem-se considerar ainda as variações intrínsecas aos ensaios executados. Por exemplo, no ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, têm-se várias etapas que influenciam o resultado final medido: tamanho e forma de coleta da amostra, moldagem, condições de cura inicial e no laboratório, transporte, geometria do corpo de prova, planeza das faces de ensaio e calibração e operação da prensa.

Excluindo a variabilidade decorrente da amostragem e do processo de ensaio, resta a variabilidade de produção que, juntamente com a variabilidade inserida pelo processo de execução (lançamento, adensamento, cura, desenforma, retirada de escoramentos), é transmitida à estrutura executada. Sobre esta, ao longo da vida útil, atuam os fatores de utilização e ambientais, também variáveis, determinando o desempenho final da estrutura. Cabe lembrar que, a qualquer instante da vida útil,

podem ser executados ensaios sobre a estrutura, cada qual também com suas fontes de variação. Os diversos aspectos abordados, referentes às origens da variabilidade em estruturas de concreto, estão resumidos na Figura 3.

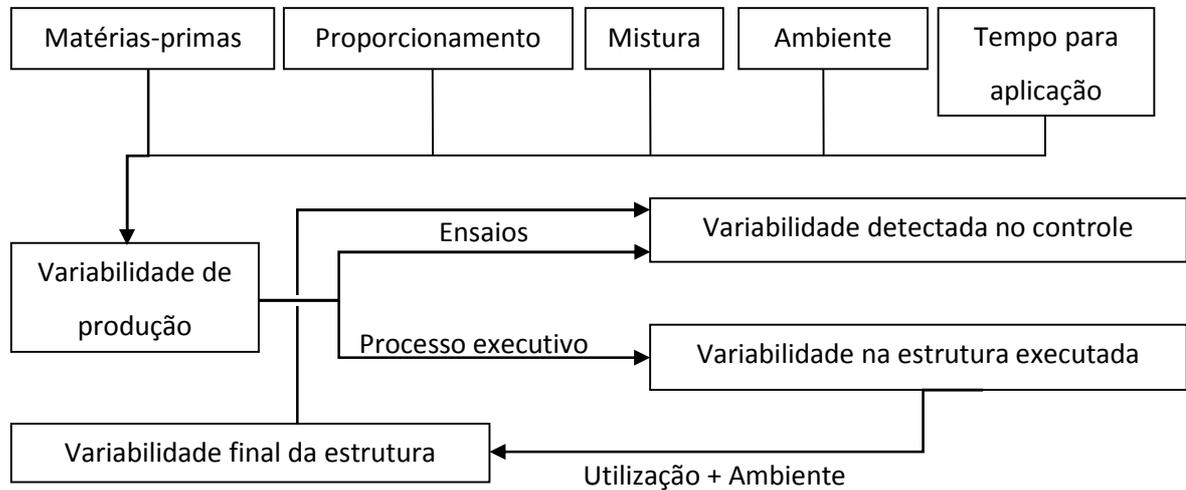


Figura 3 - Origem da variabilidade em estruturas de concreto

O foco deste trabalho é a variação na produção. Considera-se que as variáveis do processo executivo, uma vez fornecido um concreto adequado, devem-se, em sua maioria, à capacidade técnica da equipe de execução e aos métodos de produção aplicados. Convém, no entanto, salientar que características inadequadas, especialmente no estado fresco, podem contribuir para uma execução deficiente. Por este motivo, o estudo do estado fresco assume grande importância. Decisões equivocadas tomadas nesta fase podem comprometer o desempenho final do concreto. O exemplo clássico é o acréscimo indiscriminado de água na obra para ajustar a trabalhabilidade.

Quando se precisa produzir concreto para uma dada situação, o passo inicial é elaborar uma dosagem em laboratório, estabelecendo a composição e o processo de produção. Parte-se de uma amostra de materiais e de um processo executivo com características estabelecidas e controladas. Ao se passar para a aplicação contínua no campo, naturalmente surgem variações no conjunto de matérias-primas, no processo de mistura, no tempo decorrido até o lançamento, na temperatura e umidade do ambiente, além de erros na medida das quantidades dos materiais. O resultado é um desvio das propriedades inicialmente estabelecidas.

As variações nos materiais são decorrentes de modificações (intencionais ou não) de fabricação daqueles que sofrem algum tipo de beneficiamento, devido às variações naturais daqueles extraídos da natureza ou devido a condições de transporte e estocagem. As variações mais importantes são:

- Cimento: composição química, mineralogia do clínquer, granulometria, temperatura, pré-hidratação, área superficial;
- Agregados: granulometria, morfologia, umidade, porosidade, absorção de água, resistência mecânica, temperatura, densidade, área superficial, contaminantes;
- Aditivo: composição química, concentração de sólidos, compatibilidade com cimento;
- Adições: composição química, reatividade, granulometria, morfologia, dispersão, área superficial;
- Água: contaminantes, tais como sais, óleos, açúcares ou aditivos de concretos anteriores quando se trata de água de reuso do próprio processo de produção.

Os principais erros na composição do traço ocorrem em função de variações não detectadas, ou não consideradas, da umidade de agregados (principalmente areia e agregados graúdos porosos), erros na pesagem (sobretudo quando não é automatizada, dependendo da atenção do operador) e adição não controlada de água e/ou aditivo.

Tattersal e Banfill (1983) ilustram os principais aspectos de variabilidade e como influenciam as propriedades do concreto (Figura 4).

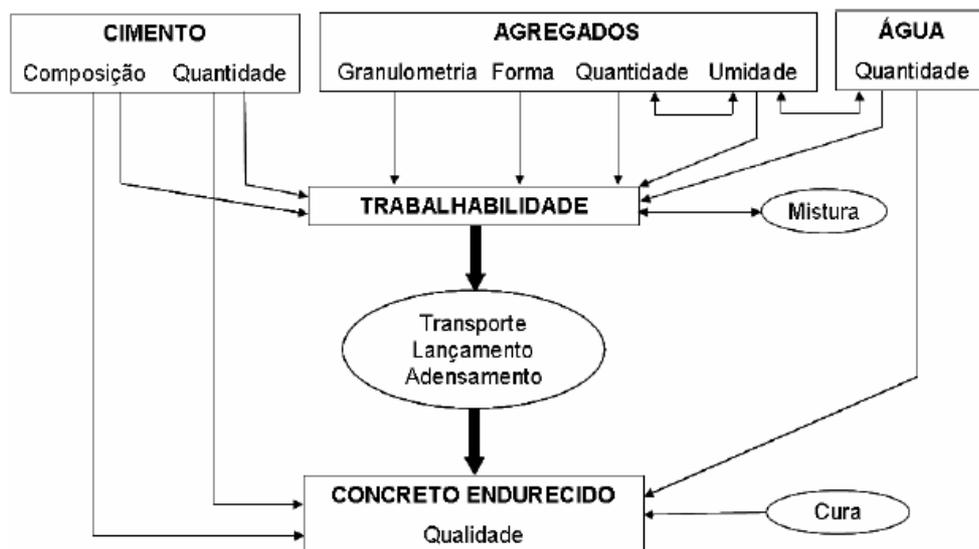


Figura 4 - Fatores que influenciam as propriedades de um concreto (adaptada por CASTRO, 2007 de TATTERSAL e BANFIL, 1983).

É desejável que as matérias-primas possuam propriedades regulares e que o processo de produção seja uniforme, reduzindo assim a variabilidade das propriedades do concreto fornecido. A regularidade e uniformidade absolutas, porém, não existem. Pequenas variações são naturais e precisam ser admitidas. Por isso o controle de qualidade do concreto é baseado em critérios probabilísticos (base da maioria dos atuais métodos de introdução de segurança em estruturas). Admite-se que a distribuição de resistência de concretos de mesmo lote é aproximadamente normal, conforme o Teorema do Limite Central da Estatística que afirma que *se a flutuação total de uma variável aleatória decorrer da somatória das flutuações de muitas variáveis independentes e de importância aproximadamente igual, sua distribuição tenderá para a normalidade, independente da natureza das distribuições das variáveis individuais.*

A distribuição normal é considerada na dosagem do concreto. Em geral, exige-se que 95% dos concretos elaborados em condições semelhantes devem atingir resistência igual ou superior à resistência característica especificada. É o que a ABNT NBR 6118 (2003, p 63) exige ao definir que “a resistência característica inferior é admitida como sendo o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido pelos elementos de um dado lote de material”.

Quanto menor a variabilidade das matérias-primas e maior o controle na produção, menor será a variabilidade do concreto obtido (menor será o desvio padrão do conjunto de resultados). Com isto, o valor médio aproxima-se do valor característico e aumenta-se a confiança na qualidade. Este objetivo é perseguido pelos produtores de concreto, pois se reflete em redução do custo e garantia da qualidade.

Algumas variações são mais críticas que outras, alterando de forma mais pronunciada uma ou mais propriedades no estado fresco ou endurecido. Quanto mais sensível for o concreto, mais rigoroso deverá ser o processo de análise das características das matérias-primas e maior atenção será necessária na produção. Do ponto de vista prático, portanto, é desejável que um concreto seja pouco sensível a pequenas mudanças, de modo que ligeiras alterações não afetem de maneira importante as características antes e após o endurecimento. Esta característica é denominada por alguns pesquisadores de robustez, que neste contexto pode ser também entendido como o oposto de sensibilidade.

Convém notar que alguns fatores são de difícil controle (ou até incontroláveis), mesmo em processos com controle mais rigoroso. As condições ambientais, principalmente a temperatura, são exemplos. A esses se deve dar atenção especial, e seria desejável que variações comuns desses fatores não afetassem em demasia as características do concreto.

3 MODELOS DE EMPACOTAMENTO COMO FERRAMENTAS DE AUXÍLIO À DOSAGEM E AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ

3.1 Introdução

Com a necessidade de melhorar a ecoeficiência do concreto e o surgimento de materiais alternativos, novas possibilidades devem ser consideradas no momento em que se desenvolve um concreto para uma dada aplicação. Por questões de custos e disponibilidade de materiais, não é possível gerar soluções universais, mas adaptações sempre serão necessárias. Espera-se que ocorram evoluções nas metodologias de dosagem que considerem estas adaptações. Também por questões de custo e tempo é interessante que isto seja realizado com o mínimo de esforço experimental possível. Surge então a necessidade de criação de modelos que permitam a previsão das propriedades do concreto a partir das propriedades fundamentais dos materiais constituintes. Flatt, Roussel e Cheeseman (2012) identificam a previsão de desempenho como uma área de real interesse prático onde pesquisas acadêmicas trarão importantes contribuições para a produção de concretos com maior eficiência ambiental e que se adaptem às condições locais de materiais e produção. Acreditam que com base nisto também haverá uma evolução mais rápida nos métodos de dosagem nas próximas décadas.

A maioria dos atuais métodos de dosagem ainda emprega várias etapas experimentais, consumindo tempo e materiais, trabalho que precisa ser refeito quando há mudanças nos materiais constituintes. Especialmente na avaliação de robustez, onde diversas propriedades da formulação, do processo de produção ou do ambiente podem variar simultaneamente, métodos com menor esforço experimental são bem-vindos. Assim um entendimento mais fundamental do concreto e uma abordagem mais sistemática da dosagem são desejáveis.

A formulação de concretos é, antes de tudo, um problema de empacotamento de partículas (DE LARRARD, 1999). Entende-se por empacotamento a maneira como as partículas presentes se arranjam e ocupam o espaço, definindo o volume total do sistema. Um concreto bem simples, composto apenas por um agregado graúdo e um agregado miúdo imersos na pasta de cimento, pode ser considerado um caso de mistura bin de agregados. O empacotamento destas duas frações resulta em uma porosidade intergranular que é preenchida pela pasta de cimento. Vários modelos de dosagem empíricos adotam etapas experimentais onde se ajustam os teores de areia e pedra, na busca por um “ponto ótimo” que permita um concreto trabalhável e com consumo otimizado de cimento (ANDRADE, 1997; HELENE; TERZIAN, 1995). O volume de pasta deve ser suficiente para envolver os grãos de agregados, preencher os vazios entre estes e ainda afastá-los, promovendo assim a mobilidade

(OLIVEIRA et al., 2000). Desta maneira, o consumo de pasta tem relação com a porosidade intergranular, a qual depende do empacotamento. Em uma escala menor, observando a pasta apenas, um segundo empacotamento, agora dos grãos de cimento (e de materiais cimentícios suplementares ou fílers, caso estejam presentes), é observado. A porosidade deste sistema determina o consumo de água (OLIVEIRA et al., 2000), que por sua vez define muitas propriedades, como a resistência e as decorrentes do transporte de líquidos e gases pela rede de poros do concreto endurecido .

Mesmo em concretos com distribuições granulométricas mais complexas, esta análise pode ser realizada e os volumes de água, pasta e argamassa necessários para garantir a trabalhabilidade do concreto podem ser traduzidos em termos de camadas de material envolvendo e fluidificando as partículas maiores. Ter-se-ia então uma espessura média de água envolvendo as partículas de finos, resultando na pasta, uma espessura média de pasta envolvendo os grãos menores de agregados, resultando na argamassa, e uma espessura média de argamassa envolvendo os agregados graúdos, resultando no concreto. Alguns trabalhos consideram estas três camadas (KWAN; LI, 2014) e outros distinguem apenas o comportamento na região dos finos, onde as forças superficiais são predominantes, do comportamento na região dos agregados onde as forças volumétricas predominam (OLIVEIRA et al., 2000). Em ambos os casos, o cálculo das espessuras destas camadas de separação entre partículas depende do empacotamento do sistema granular e da área específica das partículas.

Portanto, o emprego de modelos que possibilitem a previsão do empacotamento, e consequentemente da porosidade do concreto, é de grande interesse. Desde o início do século XX, com os trabalhos de Fuller e Thompson (1907), Furnas (1928), Andreasen e Andersen (1930) e Westman e Hugill (1930), até mais recentemente com os trabalhos de Yu e Standish (1991) e de De Larrard (1999), muitos experimentos têm sido realizados e vários modelos propostos. Vários destes modelos foram calibrados utilizando partículas ideais (esféricas), o que as distancia da realidade prática quando se considera a formulação de concretos e argamassas. Gray (1968), ao revisar de maneira crítica alguns modelos, sugeriu que os estudos deveriam incluir formatos mais complexos, típicos das partículas reais.

Alguns estudos com partículas não esféricas podem ser encontrados na literatura, destacando a influência do tamanho e da forma das partícula no empacotamento (YU; ZOU; STANDISH, 1996; ZOU; YU, 1996). A maior parte dos dados experimentais refere-se a partículas convexas bem definidas, como cilindros, discos e esferas. Partículas irregulares, com formas aleatórias e complexas, como os agregados utilizados na produção de concretos, são menos explorados.

Mais recentemente, outros modelos têm sido propostos, tentando explicar por que os resultados medidos nem sempre concordam com os previstos pelos modelos. Um destes modelos (KWAN; CHAN;

WONG, 2013) considera efeitos adicionais levando a bons ajustes para partículas esféricas (WONG; KWAN, 2014) e irregulares (KWAN; WONG; FUNG, 2015). Modelos que consideram mais efeitos na prática exigem parâmetros adicionais. A menos que parâmetros com validade ampla possam ser propostos, mais parâmetros em um modelo provavelmente significarão esforço experimental adicional.

O objetivo desta etapa do trabalho visa contribuir com o desenvolvimento de ferramentas práticas que possam auxiliar no processo de dosagem baseado nas características mais fundamentais dos constituintes. Para isto considerou-se alguns modelos de empacotamento da literatura que foram implementados na forma de planilha eletrônica automatizada e que permite calcular os parâmetros granulométricos, de porosidade e de distância de separação de partículas.

Sabe-se que a morfologia dos grãos tem influência relevante no empacotamento e nas propriedades reológicas das suspensões cimentícias (CEPURITIS et al., 2016; CORTES et al., 2008; ERDOĞAN et al., 2008; HU; WANG, 2011; LECOMTE, 2006; OLIVEIRA et al., 2000; REINHARDT; WÜSTHOLZ, 2006; TRISTÃO, 2005; WESTERHOLM et al., 2008) e deveria portanto ser considerada em qualquer modelo de previsão de empacotamento. Para que isto possa ser realizado de maneira prática, é necessária a quantificação da forma das partículas e a incorporação desta informação nos modelos de empacotamento. Este capítulo busca avançar neste sentido, analisando um método para avaliação simultânea de granulometria e morfologia, propondo em seguida uma forma de considerar estas informações nos modelos de empacotamento.

3.2 Caracterização granulométrica e morfológica por meio de análise dinâmica de imagens

A caracterização de partículas por meio da captação da sua imagem, e avaliação da geometria assim obtida, é empregada desde o advento de lupas e microscópios. A qualidade da análise depende da amplificação das lentes e o tamanho dos grãos investigados. O advento da microscopia eletrônica de varredura permitiu avaliar inclusive os menores grãos no âmbito da pesquisa com materiais cimentícios. Nestas análises, as partículas permanecem em repouso sobre uma superfície, diante da lente, razão pela qual esta técnica é denominada de **Análise de Imagens Estáticas**. O repouso sobre uma superfície resulta em uma orientação preferencial das partículas não esféricas, que serão visualizadas na posição mais estável, ou seja, as suas maiores dimensões (maior área) são paralelas à superfície e à lente, enquanto que a menor dimensão é paralela à direção de observação, não podendo ser detectada (RUSS; DEHOFF, 2000). Uma limitação adicional desta técnica é a produtividade de análise. Apenas amostras reduzidas podem ser analisadas em tempo razoável, reduzindo assim a

representatividade estatística. Na análise de partículas mais finas também se torna mais difícil obter uma distribuição monocamada para análise das imagens sem sobreposição. Como vantagens pode-se citar a possibilidade de observar e distinguir partículas individuais de aglomerados, melhor focalização das imagens e possibilidade de alta resolução para partículas pequenas.

Na busca por superar as limitações citadas, desenvolveu-se a **Análise de Imagens Dinâmicas (AID)**, onde a amostra em análise se desloca diante da lente. Existem diversas formas de obter este movimento: queda natural (gravidade), propulsão por meio de fluxo de ar ou disperso em líquido em movimento. A AID somente se tornou viável tecnicamente há pouco tempo, com o desenvolvimento de câmeras digitais de alta resolução e alta frequência de captura e computadores com alto poder de processamento, transferência e armazenamento de dados. Tornou-se possível assim obter dezenas de imagens de alta resolução por segundo. Em tempo real as partículas presentes são detectadas e para cada uma podem ser avaliados dezenas de parâmetros relacionados à sua geometria. Desta forma a análise saltou de poucas partículas por minuto (Estática) para milhões de partículas (Dinâmica) ampliando de forma extraordinária a representatividade estatística. Resolveu-se naturalmente também o problema da orientação preferencial, pois as partículas em movimento não se posicionam mais de acordo com uma direção preferencial. Embora as imagens obtidas continuem sendo 2D, com a AID observa-se as possíveis dimensões 3D dos grãos, permitindo uma descrição mais ampla das partículas. Recentes avanços na AID aumentaram a frequências de captura de imagens para uma centena de imagens por segundo. Com isto cada partícula pode ser fotografada diversas vezes enquanto passa diante da câmara, e em cada imagem a partícula é observada de outro ângulo, podendo-se avaliar mais aspectos da sua geometria tridimensional. Este aprimoramento vem recebendo a designação de AID 3D (MICROTRAC, 2016).

Diversos equipamentos hoje realizam a Análise de Imagens Dinâmicas, podendo-se citar o Qicpic (Sympatec), o Camsizer® (Retsch Technology) e o PartAn^{3D} (Microtrac). De forma simplificada todos funcionam pelo mesmo princípio: as partículas passam diante de uma fonte de luz controlada e a imagem projetada é captada por uma câmara fotográfica de alta resolução e alta velocidade. A alimentação de partículas é controlada de modo a que poucas partículas sejam captadas em cada imagem, evitando assim distúrbios por sobreposição. As imagens são instantaneamente tratadas via software que detecta as partículas que estão adequadamente em foco, desprezando as demais. Para cada partícula são calculados os parâmetros geométricos previamente escolhidos pelo usuário.

3.2.1 Granulometria

Nenhuma partícula, com exceção da esfera, pode ter sua geometria descrita completamente por uma única medida de dimensão obtida em uma projeção bidimensional. Sendo assim, na análise do tamanho de uma partícula é necessário adotar um critério, que descreva a partícula de acordo com um determinado fim. Os equipamentos de AID permitem o cálculo de mais de uma dezena de dimensões. No Anexo 10.1 os principais critérios estão descritos e exemplificados.

A AID analisa partícula por partícula. A distribuição de tamanhos final pode ser expressa em termos de número de partículas ou em termos de volume de partículas. No caso da distribuição expressa em número de partículas, a própria análise individualizada fornece a contagem. No caso da distribuição expressa em volume, as dimensões observadas de cada partícula são transformadas em um volume, considerando, por exemplo, um modelo de elipsoide ou esfera. O principal erro que se comete neste cálculo se refere ao desconhecimento da dimensão de profundidade, estimada a partir das dimensões da projeção. Quanto mais irregular a partícula, maior será o desvio entre o volume real e o volume calculado. Em um exemplo extremo, onde foram analisadas partículas achatadas com volume real conhecido (moedas), verificou-se que o volume calculado variou entre 9% e 893% do volume real. O volume médio foi estimado em 250% do volume real. Conforme Allen (1997), os erros se tornam mais evidentes quando se trata de uma distribuição ampla e ocorrem erros na avaliação das partículas maiores, pois poucas destas partículas representam um grande volume. Deve-se ter em mente estas limitações durante a avaliação dos resultados obtidos, pois conduzirão inclusive a erros na avaliação de área superficial e nas distribuições de forma.

Na Figura 5 ilustra-se a análise granulométrica de uma areia natural quartzosa. As distribuições mais à esquerda (diâmetros menores) equivalem às dimensões “Martin mínimo” e “Corda mínima”. “Área” conduz a distribuições intermediárias enquanto que “Ferret máximo” leva a distribuições mais grossas.

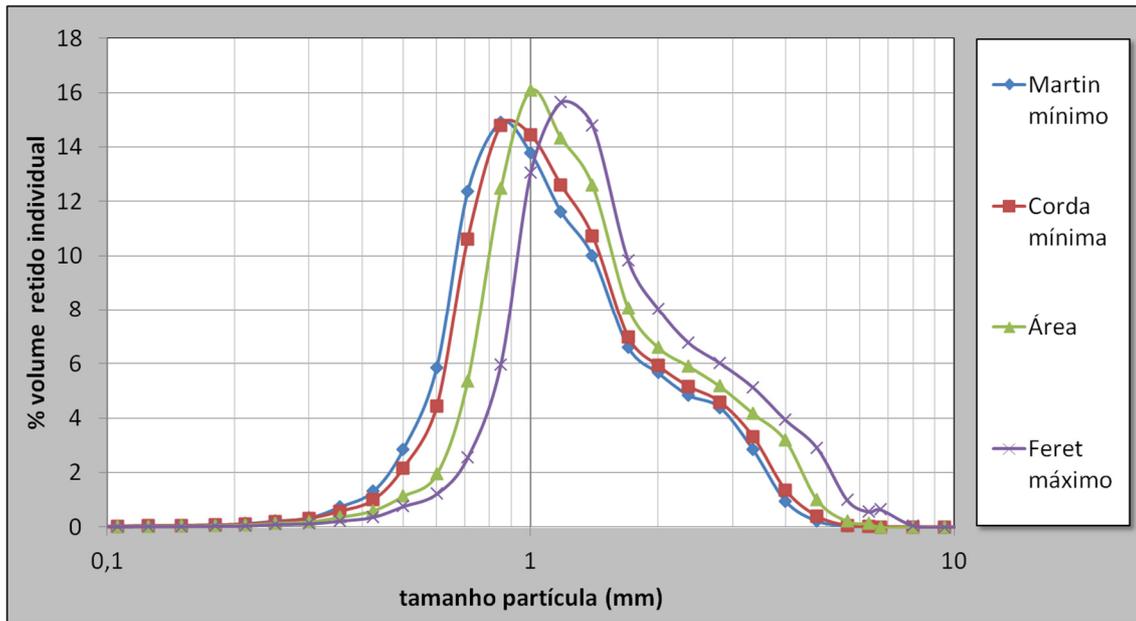


Figura 5 - Distribuição granulométrica por diversos critérios de tamanho na análise de imagens dinâmicas

A escolha de um diâmetro está relacionada à interpretação dos resultados. Por exemplo, na análise de fibras é de interesse a determinação do comprimento e da espessura das fibras, portanto devem-se analisar tanto parâmetros que resultem nas maiores dimensões (Feret máximo ou Length neste caso) e menores dimensões (corda mínima). Na comparação com ensaios de peneiramento, onde a definição se dá pelas dimensões passantes em uma malha, em geral quadrada, uma escolha mais adequada é a corda mínima. Na análise de sedimentação, mais natural é a escolha por um parâmetro que se relaciona com a resistência à sedimentação, como a área da seção transversal (projeção).

3.2.2 Morfologia

A morfologia dos grãos de agregados afeta a sua mobilidade na massa do concreto e tem relação com a quantidade de pasta necessária para envolvê-los afim de proporcionar a trabalhabilidade desejada. A morfologia afeta o empacotamento das partículas (OLIVEIRA et al., 2000) e consequentemente a densidade da mistura, porosidade, permeabilidade, entre outros. Também o consumo de água tem relação com o formato dos agregados. Agregados mais angulosos promovem menor fluidez, exigindo acréscimos de água para manter a fluidez da mistura. Partículas mais esféricas, além da redução do consumo de água em função da menor área específica, atuam como uma espécie de rolamentos entre os grãos maiores, propiciando maior trabalhabilidade para um mesmo consumo de água (LIBORIO, 2007).

Métodos tradicionais de avaliação da forma de agregados são pouco produtivos, de baixa reprodutibilidade, dependentes do operador e de baixa representatividade estatística. A ABNT 7809 (2008), por exemplo, avalia a relação entre a maior e menor dimensão de agregados graúdos através da medida direta com paquímetro de 200 partículas.

Uma maneira de avaliar a angulosidade de agregados miúdos é por meio do índice de empacotamento, ou inversamente, pelo índice de vazios (AASHTO T304-2008). Considera-se que agregados mais arredondados possuem índice de vazios próximo a 33 %. Quanto mais angulosos, maior será o índice de vazios. Em geral têm-se valores de 0 a 11 % acima deste limite mínimo (LIBORIO, 2007). Ressalta-se que este procedimento vale apenas para agregados com faixa granulométrica estreita. Caso contrário o efeito da angulosidade e do empacotamento se sobrepõe, invalidando este tipo de avaliação. Outra limitação se refere à dependência do operador, pois um grau diferente de compactação pode alterar o índice de vazios.

Como a Análise de Imagens Dinâmicas realiza a aquisição da imagem da projeção de partícula por partícula, pode-se utilizar estas para cálculo de diversas propriedades geométricas relacionadas à forma. Devido à alta representatividade estatística têm-se como resultado uma descrição geral da forma dos agregados. Diversos parâmetros de forma podem ser considerados. No Anexo 10.1 os principais estão descritos e exemplificados.

Detalhes adicionais sobre a aplicação da Análise de Imagens Dinâmicas encontram-se descritos no Apêndice 10.2, incluindo recomendações sobre o uso e alguns resultados de caracterizações de materiais diversos.

3.3 Modelos de empacotamento

Nesta pesquisa três modelos foram considerados, sendo duas variações do modelo de Westman e Hugill (1930) e o modelo denominado de Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999). A seguir descreve-se brevemente os fundamentos de empacotamento de partículas e os pontos principais de cada modelo, sugerindo-se a leitura das referências indicadas para maior detalhamento.

3.3.1 Fundamentos sobre empacotamento de partículas

O conceito de empacotamento é definido como “o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos

com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente” (MCGEARY, 1961).

O conceito de empacotamento é definido como “a seleção adequada de tamanhos e proporções de material particulado, de modo que os vazios maiores são preenchidos com partículas menores, e os vazios destes são, por sua vez preenchidos com partículas ainda menores, e assim por diante” (MCGEARY, 1961).

O parâmetro utilizado para quantificar o empacotamento é a densidade relativa de empacotamento (ρ_{emp}), definida como a razão entre o volume ocupado pelas partículas sólidas (V_{sol}) e o volume total do sistema particulado, incluindo espaços vazios (V_{tot}), conforme a Equação 1. Esta relação pode também ser expressa em termos da massa unitária (M_u) e densidade aparente das partículas (ρ_s).

$$\rho_{emp} = \frac{V_{sol}}{V_{tot}} = \frac{M_u}{\rho_s} \quad \text{Equação 1}$$

Uma outra forma de expressar o empacotamento é por meio do volume aparente (V_{ap}), isto é, o volume total ocupado por um volume unitário de sólidos (Equação 2).

$$V_{ap} = \frac{1}{\rho_{emp}} \quad \text{Equação 2}$$

A porosidade (ε) do sistema particulado corresponde à razão entre o volume de vazios entre as partículas (V_{vaz}) e o volume total do sistema (Equação 3).

$$\varepsilon = \frac{V_{vaz}}{V_{tot}} = 1 - \rho_{emp} = 1 - \frac{1}{V_{ap}} \quad \text{Equação 3}$$

Ao se analisar as distribuições granulométricas de materiais distinguem-se casos de distribuições monomodais (onde todas as partículas são estritamente de mesmo tamanho), distribuições discretas (onde as partículas possuem pequena variação de tamanho em torno de um valor médio, por exemplo, as partículas retidas entre duas peneiras de aberturas próximas) e polimodais (formadas por tamanhos variados de partículas).

A densidade de empacotamento pode chegar a 74% no caso de monodispersões esféricas perfeitamente ordenadas (HALES, 2005). Na prática onde se obtém apenas arranjos aleatórios, os

valores ficam entre 60% e 64% (FUNK; DINGER, 1994). Para alcançar valores superiores é necessário recorrer ao mecanismo de empacotamento com preenchimento dos vazios com partículas menores.

Os principais parâmetros que afetam o empacotamento são:

- Distribuição granulométrica, conforme a própria definição de empacotamento;
- Morfologia;
- Método de compactação;
- Restrições do contorno.

3.3.2 Modelos de empacotamento de Westman e Hugill

Em 1930, Westman e Hugill publicaram um algoritmo que parte da porosidade de frações discretas, semelhante ao trabalho fundamental de Furnas (1928). Este algoritmo avalia uma a uma as frações granulométricas presentes e calcula o volume aparente (volume total ocupado por um volume unitário de sólidos) da mistura, supondo que a fração que está sendo avaliada é a fração dominante do sistema (aquela que define a porosidade da mistura). O volume aparente ocupado pela fração dominante é o seu volume aparente discreto ponderado por sua fração volumétrica em relação ao total de sólidos. Todas as partículas maiores que a fração dominante contribuem apenas com o seu volume sólido e as partículas menores preenchem os vazios restantes, sem afetar o volume aparente. Para uma fração genérica, o volume aparente é calculado pela Equação 4.

$$V_{ai} = a_i \cdot x_i + \sum_{j=1}^{i-1} x_j \quad \text{Equação 4}$$

sendo:

a_i = volume aparente de uma distribuição discreta da classe de tamanho i , com i variando de 1 a n , sendo $i=1$ a classe mais grossa e n o total de classes da mistura;

x_i = fração volumétrica da classe de tamanho i ;

V_{ai} = volume aparente da mistura calculado com referência à classe de tamanho de partículas i ;

Este cálculo é efetuado para todas as frações presentes e aquela que resultar no maior volume aparente é a que representa a situação possível de ocorrer. Uma vez conhecido este volume aparente, a porosidade é calculada conforme a Equação 3.

Dada uma distribuição granulométrica, a fração volumétrica das classes é conhecida. O volume aparente das distribuições discretas pode ser medido experimentalmente ou, conforme a adaptação sugerida por Funk e Dinger (1994), ser calculada pela Equação 5.

$$a_i = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{CSR}\right)^{0,37}} \quad \text{Equação 5}$$

sendo:

CSR: razão de tamanhos entre duas classes sequenciais na distribuição granulométrica.

Esta correlação entre CSR e o volume aparente discreto, foi obtida por Funk e Dinger após análises de distribuições granulométricas extensas e contínuas, que seguiam a distribuição de Andreasen com máximo empacotamento. Estes autores reconhecem que a porosidade é superestimada no caso de distribuições estreitas. Para que o modelo também possa ser utilizado nestes casos, recomendam que a porosidade final seja reduzida para apenas 40% do calculado.

3.3.3 Modelo de Empacotamento Compressível (MEC)

O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999), foi desenvolvido tendo como foco a produção científica de concretos. Também se fundamenta no conceito de classe dominante, isto é, uma única classe será a que determinará o menor grau de empacotamento, o qual será o empacotamento resultante da mistura. No caso de misturas de várias classes em que as partículas possuem tamanhos muito distintos, a máxima densidade de empacotamento possível, caso a classe i seja a dominante, é calculada pela Equação 6.

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - (1 - \beta_i) \sum_{j=1}^{i-1} x_j - \sum_{j=i+1}^n x_j} \quad \text{Equação 6}$$

sendo β_i a máxima densidade de empacotamento virtualmente possível da classe i isolada (discreta) e x_i a proporção volumétrica da classe i . A densidade de empacotamento da mistura será a menor dentre os γ_i calculados para cada classe.

Esta abordagem não se diferencia muito dos modelos anteriores, no entanto, o MEC acrescenta alguns conceitos interessantes, atrelados à interferência entre partículas de tamanhos próximos e ao modo como a mistura é compactada.

Um conjunto de partículas de mesma dimensão (distribuição monomodal) apresenta certa porosidade quando em um volume infinito. No entanto, próximo a uma parede de recipiente a distribuição das

partículas é interrompida por esta parede, resultando em um acréscimo de porosidade nesta região. Dá-se a este efeito o nome de *efeito parede*, o qual ocorre tanto no contato com paredes de recipientes como na proximidade de partículas maiores.

Novamente considerando uma distribuição monomodal com certa porosidade, podem-se inserir partículas menores nos vazios restantes. Caso estas partículas acrescentadas sejam muito menores, as mesmas ocuparão estes volumes sem interferir na distribuição já existente. Porém, se estas partículas forem de tamanhos próximos, a inserção ocasionará uma perturbação e afastamento das partículas maiores, levando a um acréscimo de volume total. A este afastamento denomina-se de *efeito afastamento*.

Para ambos os efeitos, o MEC propõe equações empíricas (equações 7 e 8), obtidas em ensaios com grãos arredondados e lamelares.

Coeficiente efeito afastamento	$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}}$	Equação 7
-----------------------------------	---	-----------

Coeficiente efeito parede	$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50}$	Equação 8
---------------------------	--	-----------

sendo:

d_i : o diâmetro da partícula em consideração;

d_j : o diâmetro da partícula que está ocasionando a interferência (afastamento no caso da Equação 7 e parede no caso da Equação 8).

Nota-se que à medida que os diâmetros se aproximam, os coeficientes tendem à unidade, indicando interferência máxima. Já quando os diâmetros se afastam, os coeficientes tendem a zero, com cada vez menos interferência de uma partícula em relação á outra.

Acrescentando estas informações ao modelo, a Equação 6 é modificada resultando na Equação 9.

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i(1 - 1/\beta_j)]x_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j]x_j} \quad \text{Equação 9}$$

Em seguida, reconhecendo que os empacotamentos obtidos na realidade não atingem os virtuais, propõe um índice de compactação (K), que depende apenas do protocolo de compactação adotado. Quanto maior a energia aplicada na compactação, maior é o valor de K . Conhecendo-se o empacotamento virtual da mistura e o índice de compactação, pode-se estimar a densidade de empacotamento (\emptyset) que deve ocorrer na realidade após aplicação do processo de compactação. Para isto é necessário resolver a Equação 10 implícita.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{x_i/\beta_i}{1/\emptyset - 1/\gamma_i} \quad \text{Equação 10}$$

3.4 Programa experimental

Para avaliar os modelos de empacotamento considerados e observar o efeito da morfologia, três famílias de materiais, com morfologias distintas, foram selecionadas:

- Esferas de vidro;
- Areia Natural: optou-se pela areia de referência IPT (ABNT NBR 7214:2012), uma areia natural de quartzo;
- Areia Britada: areia de britagem de granito.

Estes materiais cobrem boa parte do espectro de formatos encontrados comumente nas aplicações para engenharia civil, desde grãos lamelares e angulosos (areias de britagem), grãos mais equiaxiais ainda angulosos (areias naturais) até materiais de alta esfericidade, como ocorre com algumas adições minerais (sílica ativa e cinza volante). As esferas foram incluídas também por permitirem comparação com resultados de outros pesquisadores com intuito de aferir e calibrar os modelos teóricos.

Os materiais foram peneirados em intervalos bem estreitos, compreendidos entre duas peneiras consecutivas de razão de abertura $\sqrt[4]{2}$, produzindo frações discretas próximas da monomodalidade. Deve-se, no entanto, salientar que não representam realmente distribuições monomodais (onde todos os grãos são exatamente do mesmo tamanho) pois todos os tamanhos estão representados entre os limites das duas peneiras utilizadas. Por este motivo emprega-se deste ponto em diante o termo

“discreto” quando se referir às partículas de uma única classe granulométrica com razão entre o limite superior e inferior de $\sqrt[4]{2}$.

A faixa de diâmetros escolhida (0,125 a 4,75 mm) compreende a extensão tradicionalmente denominada de areia na engenharia civil. Grãos acima desta faixa apresentam dificuldade para serem utilizados com o equipamento escolhido e grãos menores começam a ter maiores interferências devido às forças interpartículas. As frações escolhidas permitem formação de misturas bimodais, com razão de diâmetros 1:2, 1:4, 1:8 e 1:16.

Na Figura 6 mostram-se imagens obtidas em microscópio óptico digital de grãos das três famílias. Nota-se que os formatos são similares em uma mesma família, independentemente do tamanho. A areia natural possui grãos angulosos, porém aproximadamente equiaxiais. Já a areia britada possui grãos mais alongados. Como se trata de uma imagem obtida em microscópio, onde os grãos permanecem em repouso sobre uma superfície horizontal, é bem provável que a menor dimensão das partículas alongadas não seja visível, o que seria necessário para evidenciar um formato ainda mais lamelar.

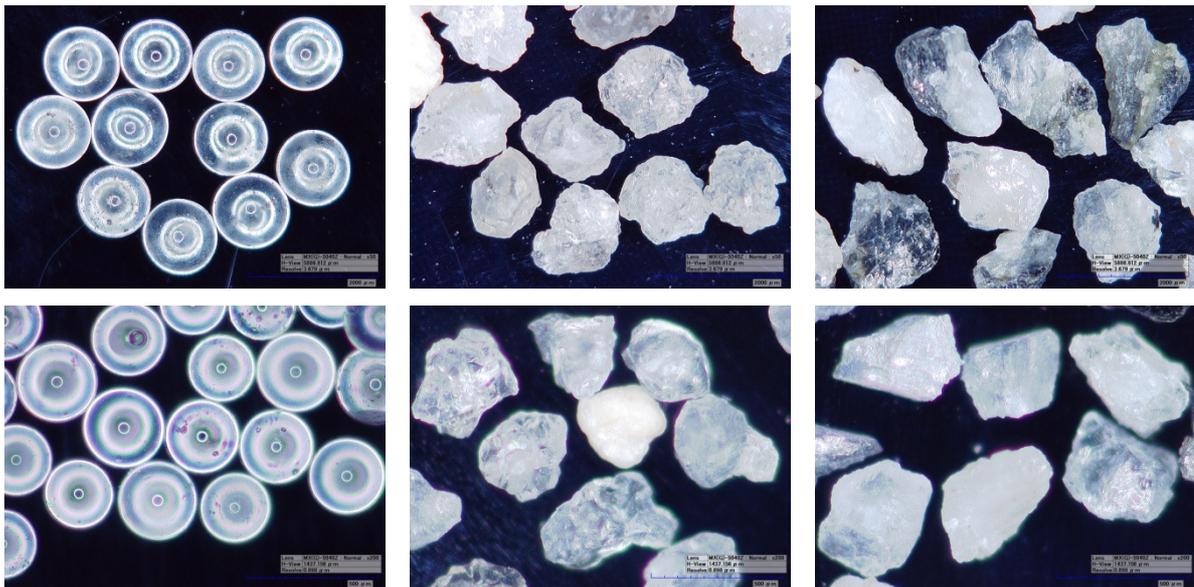


Figura 6 – Ilustração das partículas empregadas: Esferas (esquerda), Areia Natural (centro) e Areia Britada (direita). A imagem superior é da fração [1,00-1,18] com ampliação de 50x e a imagem inferior da fração [0,25-0,30] com ampliação de 200x

Cada fração teve sua granulometria determinada por meio de análise dinâmica de imagens utilizando o equipamento QicPic da Sympatec, com lente de resolução mínima de 10 microns e dispersão via seca apenas por ação de queda (unidade de dispersão gravitacional Gradis). Também se determinou a densidade por meio de picnometria a gás Hélio (densidade que considera o volume de sólidos da partícula e poros fechados). Na Tabela 2 estão resumidas as principais propriedades das frações analisadas, inclusive a porosidade intergranular discreta, conforme procedimento detalhado a seguir.

Tabela 2 – Caracterização das frações empregadas nos ensaios de empacotamento

Fração ⁽¹⁾	Intervalo peneiras (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	Densidade (g/cm ³)	Densidade Empacotamento Discreta
Esf4	[4,00-4,75]	4,096	4,478	5,224	2,473	62,5%
Esf2	[2,00-2,36]	2,039	2,198	2,357	2,474	63,8%
Esf1	[1,00-1,18]	1,026	1,131	1,338	2,484	64,2%
Esf0,5	[0,50-0,60]	0,514	0,574	0,681	2,470	64,3%
Esf0,25	[0,25-0,30]	0,259	0,294	0,346	2,475	63,8%
ArN2	[2,00-2,36]	2,222	2,595	3,090	2,650	58,5%
ArN1	[1,00-1,18]	1,137	1,312	1,590	2,656	59,3%
ArN0,5	[0,50-0,60]	0,580	0,672	0,814	2,657	59,3%
ArN0,25	[0,25-0,30]	0,292	0,340	0,413	2,668	59,1%
ArN0,125	[0,125-0,150]	0,157	0,191	0,232	2,698	57,0%
ArB4	[4,00-4,75]	4,566	5,704	7,214	2,683	55,9%
ArB2	[2,00-2,36]	2,427	3,023	3,792	2,682	55,7%
ArB1	[1,00-1,18]	1,188	1,445	1,738	2,672	56,8%
ArB0,5	[0,50-0,60]	0,612	0,758	0,943	2,667	57,1%
ArB0,25	[0,25-0,30]	0,306	0,379	0,471	2,679	56,4%
ArB0,125	[0,125-0,150]	0,157	0,196	0,242	2,722	54,7%

(1) Nomenclatura das frações: tipo de partícula (Esf=Esferas de vidro; ArN=Areia Natural; ArB=Areia Britada) + abertura da peneira em mm na qual a fração é retida.

3.4.1 Empacotamento experimental

Além das frações discretas, foram produzidas misturas em diferentes proporções, resultando em distribuições binárias e algumas ternárias (Tabela 3). Para cada mistura pesou-se proporções das frações de modo a completar cerca de 150 gramas, a qual foi homogeneizada manualmente com espátula e posteriormente inserida no recipiente de ensaio, dentro do qual foi novamente homogeneizada por meio de agitação manual (movimentos aleatórios nas três direções).

Tabela 3 – Proporção volumétricas das misturas binárias e ternárias

Misturas binárias						
Fração grossa	91.7%	83.4%	66.7%	50.0%	33,4%	16,7%
Fração fina	8.3%	16.6%	33.3%	50.0%	66,6%	83,3%
Misturas ternárias						
Fração grossa	33.3%	66.6%	16.7%	16.7%		
Fração média	33.3%	16.7%	66.6%	16.7%		
Fração fina	33.3%	16.7%	16.7%	66.6%		

O equipamento utilizado para determinar a densidade de empacotamento (Geopyc da Micromeritics) consiste de um recipiente cilíndrico de diâmetro 50,8 mm e altura útil máxima de cerca de 40 mm (Figura 7). Este recipiente fica na posição horizontal e rotaciona em torno do seu eixo longitudinal. Esta rotação ocorre na forma de pequenos passos, o que ocasiona pequenas vibrações no conjunto, promovendo a acomodação dos grãos. O adensamento sob rotação evita segregação entre as

partículas, conduzindo a resultados mais reprodutíveis. Ao mesmo tempo um êmbolo avança lentamente sobre uma das extremidades do cilindro, compactando a amostra. Este êmbolo é acoplado a um sistema de medição de força e deslocamento. Pode-se estipular a pressão máxima a ser exercida sobre a amostra. O ensaio prossegue até atingir esta pressão e, em seguida, o êmbolo retrocede para voltar a avançar. Este processo se repete por um número de vezes que pode ser escolhido pelo usuário, buscando uma situação final de máximo empacotamento. Optou-se neste trabalho por uma pressão máxima de 20 kPa e um total de 13 ciclos de compactação, sendo os primeiros 6 como preparação e os demais como medidas que compõe um valor médio utilizado nas análises. Esta configuração foi definida em um trabalho prévio (GRANDES; REBMANN; PILEGGI, 2013) e permitiu boa repetibilidade dos resultados. Tipicamente o intervalo de confiança da porosidade é menor que $\pm 0,2\%$ para frações discretas e $\pm 0,4\%$ para misturas, ao nível de confiança de 95%.



Figura 7 – Equipamento para medida do empacotamento experimental (GeoPyc 1360): vista frontal (esquerda) e detalhe da célula de 50,8 mm com êmbolo (direita)

A posição final do êmbolo é o resultado direto do ensaio. Com base em uma calibração prévia, o equipamento determina a altura final (h) compactada da amostra, a partir da qual, conhecendo-se o diâmetro do cilindro (D) e a massa (m) da amostra inserida, se calcula a massa unitária compactada (em geral em g/cm^3), conforme a Equação 11.

$$M_u = \frac{m}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h} \quad \text{Equação 11}$$

O Volume aparente (V_{ap}), isto é, volume total ocupado pela amostra (grãos + espaço intergranular) em relação ao volume de sólidos (apenas grãos), é um adimensional calculado conhecendo-se a massa unitária da mistura e a densidade aparente (ρ_s) dos grãos da mistura (Equação 12). Considerou-se que

a densidade aparente da mistura é uma média ponderada das densidades aparentes das frações discretas, utilizando como ponderadores as proporções volumétricas.

$$V_{ap} = \frac{\rho_s}{M_u} \quad \text{Equação 12}$$

A partir do volume aparente se obtém a densidade de empacotamento pela Equação 13 e a porosidade intergranular pela Equação 3 já citada.

$$\rho_{emp} = \frac{1}{V_{ap}} \quad \text{Equação 13}$$

3.5 Resultados e discussão

3.5.1 Resultados experimentais com esferas

Um resultado típico do ensaio de empacotamento com esferas é mostrado na Figura 8. Neste caso, a porosidade da fração mais grossa é de quase 38% enquanto que das demais frações é de cerca de 36%. Caso não houvesse empacotamento entre as duas frações, a porosidade seguiria a tendência da linha tracejada. É o que se obteria, por exemplo, se as duas frações fossem dispostas em duas camadas separadas, cada uma formada por uma das frações. Ao se promover a mistura das frações ocorre a ocupação dos espaços entre os grãos maiores com os grãos menores, resultando em uma redução da porosidade. Nota-se que, quanto maior a diferença de tamanhos, maior é a redução da porosidade. Inicialmente, na relação 2:1, apenas uma pequena redução ocorre, tendo a curva um aspecto abaulado. À medida que a relação aumenta a redução de porosidade se torna mais acentuada, destacando-se dois trechos praticamente retos nas pontas e apenas um pequeno abaulamento próximo ao ponto de mínimo. No limite, onde a dimensão da fração mais fina é muito menor que a fração mais grossa, tende-se a uma curva formada por dois trechos retos culminando em uma inversão de tendência abrupta no ponto de mínimo.

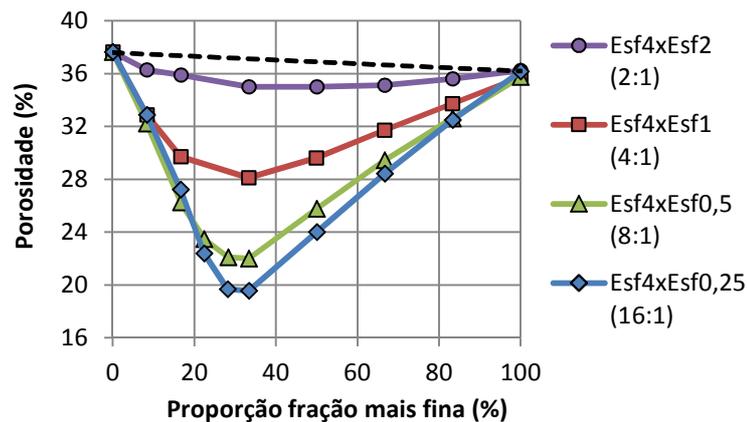


Figura 8 – Resultado de empacotamento das esferas da fração 4 mm com as frações de 2 a 0,25 mm.

Na parte próxima a 0% de fração fina (ramo esquerdo), o predomínio é de partículas grossas. São elas que definem a porosidade da mistura, enquanto as poucas partículas finas se inserem nos vazios deixados pelas mais grossas. Nota-se que esta inserção, porém, não ocorre sem perturbação. Caso fosse sem perturbação ter-se-ia o mesmo comportamento independente da relação de diâmetros. Quanto mais próximos os diâmetros, maior é a perturbação. Tem-se aqui a manifestação do efeito de afastamento. Este efeito não é considerado no modelo de Westman e Hugill. Analisando a Equação 4 observa-se que apenas a própria fração dominante e frações mais grossas contribuem com o volume aparente da mistura. Frações mais finas são sempre desconsideradas, independente do tamanho delas, pois se supõe que ocupem apenas espaços vazios sem perturbar o arranjo das partículas da fração dominante.

Na parte próxima a 100% de fração fina (ramo direito), o predomínio é de partículas finas. São elas que definem a porosidade da mistura, enquanto as poucas partículas grossas ficam isoladas imersas no volume das mais finas. A contribuição das mais grossas é apenas com seu volume real. Observando os resultados nota-se que este ramo direito não se comporta sempre da mesma maneira. A porosidade depende claramente também da relação de diâmetros das esferas. Manifesta-se aqui o efeito parede. Nas proximidades das partículas grandes, há uma perturbação no arranjo das partículas finas. Quanto mais próximos os tamanhos, maior é esta perturbação. Por este motivo as porosidades são maiores quando os diâmetros são próximos. Novamente observando a equação do modelo de Westman e Hugill, nota-se que não há nenhuma distinção para os casos em que as partículas mais grossas possuem diâmetros próximos da fração fina dominante.

Na Figura 9 mostram-se apenas misturas de esferas de mesma relação de diâmetros (4:1). Supondo-se que o empacotamento é uma propriedade decorrente apenas da geometria das partículas, esperar-

se-ia que para mesma relação de diâmetros se observe o mesmo comportamento. Para as misturas de (Esf2xEsf0,5) e (Esf1xEsf0,25) isto realmente foi observado. Porém para a mistura de (Esf4xEsf1), o ramo onde predominam as partículas grossas (4 mm), um comportamento distinto pode ser observado. Não apenas a porosidade discreta, mas também nas proporções seguintes, até 50 %, segue-se um comportamento diferenciado. Uma hipótese que pode justificar esta mudança é um segundo efeito parede, desta vez entre as partículas e o recipiente. Nas proximidades das paredes do recipiente, o arranjo de partículas é afetado, ocasionando um aumento de porosidade. Isto justifica o aumento da porosidade discreta. Como estes vazios gerados são maiores que os vazios no interior do volume, a inserção das partículas menores tende a preencher primeiro estes volumes, com menor perturbação do restante das partículas grossas, resultando em um volume aparente menor (menor porosidade).

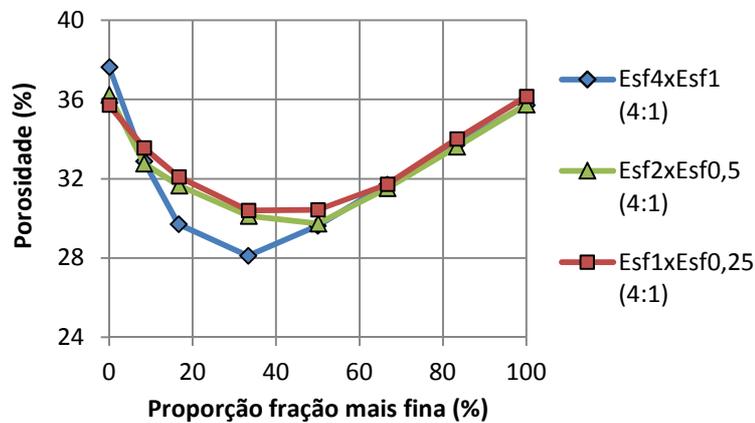


Figura 9 - Resultado de empacotamento binário de esferas com mesma relação de diâmetros (4:1).

A constatação de que o recipiente pode estar afetando o empacotamento é novamente analisado na Figura 10, onde apenas as porosidades das frações discretas são mostradas, em função do tamanho das partículas. Nota-se um valor mínimo para diâmetros próximos a 0,5 mm e aumentos das porosidades tanto quando se aumenta ou diminui o diâmetro. Atribui-se o aumento da porosidade com o aumento dos diâmetros ao efeito parede entre as partículas e as paredes do recipiente de ensaio. Já o aumento da porosidade com a diminuição do tamanho acredita-se que tenha relação com o aumento do número de partículas, o que aumenta o número de contatos por volume unitário. Também à medida que se diminui a dimensão das partículas, as forças superficiais tornam-se mais influentes, dificultando a aproximação das partículas.

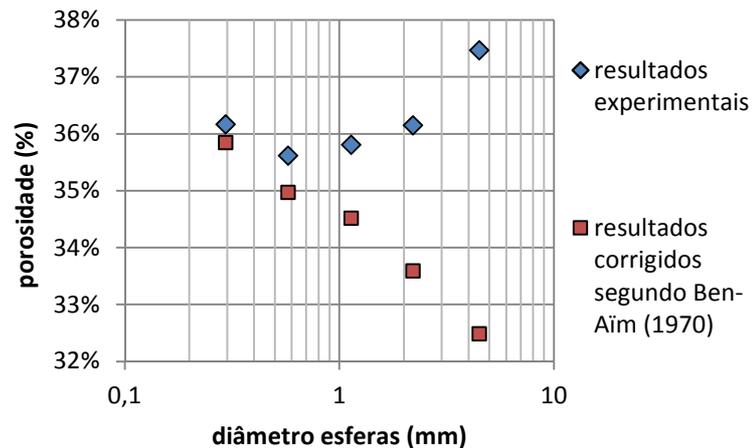


Figura 10 – Porosidade das frações discretas das esferas em função do diâmetro

Ben-Aïm (1970) propõe uma estimativa do efeito parede do recipiente. Sugere que existe um volume perturbado nas proximidades da parede. Este volume ocupa uma profundidade de metade do diâmetro das partículas ao longo de toda a área de parede do recipiente. Neste volume perturbado a densidade de empacotamento é apenas uma fração da densidade no restante do volume. Para partículas esféricas Ben-Aïm sugere um fator de $11/16$ para a densidade no volume perturbado em relação ao volume não perturbado. Aplicando este modelo aos ensaios realizados obtêm-se os pontos corrigidos, também mostrados na Figura 10. Fica mais nítida agora a influência da parede (diferença entre valor experimental e valor corrigido) e também do efeito da diminuição do tamanho.

Cabe salientar que a relação de tamanho do diâmetro do recipiente (50,8 mm) e do diâmetro da maior esfera (4 mm) é da ordem de 13:1. Em relação à altura útil (cerca de 40 mm) a relação é ainda menor (10:1). Razão de dimensão semelhante ocorre em várias situações práticas. São muito comuns concretos com agregados de dimensão máxima 19 mm (Brita 1) e tubos de bombeamento e seções de elementos estruturais da ordem de 20 cm, o que corresponde a relação de tamanhos de 11:1. Ao se analisar estas seções restritas, deve-se considerar que nas proximidades da parede ocorre mudança do grau de empacotamento o que perturba todo o projeto granulométrico no restante da seção.

Uma segunda observação que provém do resultado acima é a influência do tamanho dos grãos. Os modelos de empacotamento usuais não distinguem entre partículas de dimensões distintas. Assim, por exemplo, um modelo de empacotamento resultará em uma mesma porosidade para uma mistura binário de partículas de (1 micron / 10 micron) e de uma mistura de (1 mm / 10 mm). Embora coerente do ponto de vista geométrico, do ponto de vista físico e prático outros fatores precisam ser considerados. O surgimento de forças superficiais cada vez mais relevantes à medida que as dimensões

se reduzem e um limite para a energia de compactação aplicada ao sistema, independente da dimensão das partículas presentes, resultam em mudanças no grau de empacotamento obtido.

3.5.2 Efeito da forma

Os mesmos ensaios de empacotamento realizados com as esferas foram repetidos com duas areias de morfologias diferentes (areia natural e areia de britagem). Na Figura 11 (esquerda) mostra-se um dos resultados de misturas bimodais, com partículas de 2 e 0,25 mm. Tanto as porosidades discretas (extremidades das curvas) como as porosidades das diversas misturas são afetadas pela forma, e de modo mais acentuado para a areia de formato mais irregular (areia britada). Interessante notar que, apesar da mudança da porosidade, o ponto ótimo manteve-se na mesma posição, com cerca de 1/3 do material fino e 2/3 do material grosso neste caso.

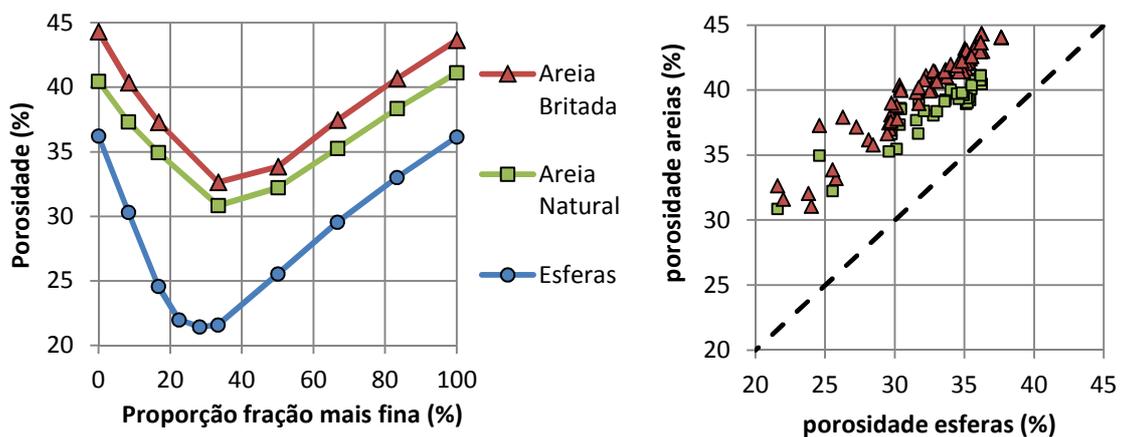


Figura 11 - Efeito da forma das partículas no empacotamento: misturas bimodais de partículas de 2mm e 0,25mm (esquerda); todas medidas (direita)

Na mesma figura do lado direito mostram-se todos os resultados encontrados. O eixo das abscissas se refere à porosidade encontrada com as esferas e no eixo das ordenadas a porosidade das respectivas areias. Inclui tanto frações discretas como misturas bimodais e algumas trimodais, sendo que cada ponto representa uma mesma granulometria. O desvio em relação à bissetriz corresponde ao efeito da forma sobre a porosidade. Os maiores desvios se referem à areia britada. Como se pôde observar na ilustração da Figura 6 esta areia possui grãos com forma mais alongada que a areia natural.

3.5.3 Previsão de porosidade pelos modelos

Com os resultados experimentais em mãos, verificou-se a adequação dos modelos em estimar a porosidade das misturas, inicialmente para as esferas. Foram considerados três modelos, com as seguintes condições de partida:

- Westman e Hugill original (WESTMAN; HUGILL, 1930): conforme a Equação 4 e fator de empacotamento discreto de esferas adotado igual a 60%. Segundo a revisão de literatura realizada por Funk e Dinger (1994), 60% é um valor médio de empacotamento real de mono-esferas;
- Westman e Hugill modificado (FUNK; DINGER, 1994): conforme a Equação 4, volume aparente das distribuições discreta de acordo com a Equação 5 e correção da porosidade final para apenas 40% do resultado calculado;
- MEC - Método de Empacotamento Compressível: conforme o modelo proposto por De Larrard (1999);, porosidades de empacotamento virtual de esferas igual a 0,74 e índice de compactação $K = 9$.

Os resultados ilustrados na Figura 12 indicam que que ambos os modelos de Westman e Hugill são praticamente insensíveis à mudança de relação de diâmetros. Isto concorda com o que já foi analisado anteriormente. No caso de altas relações de diâmetro, os dados experimentais se aproximam do previsto pelo modelo de Westman e Hugill original. Nos outros casos, quanto mais próximos os diâmetros das partículas, maior é a interferência e mais longe fica o modelo dos resultados experimentais.

O MEC mostra comportamento que acompanha melhor os dados experimentais. Quando os diâmetros das duas frações são próximos, apenas pouca redução de porosidade é prevista pelo modelo, o que concorda com os resultados experimentais. À medida que a relação de diâmetros aumenta a porosidade vai diminuindo, aproximando-se do previsto pelo modelo de Westman e Hugill original.

Na Figura 13 todas as combinações testadas estão mostradas. O modelo original de Westman e Hugill prevê porosidades inferiores às medidas experimentais, altamente dispersas e sem correlação. O modelo de Westman e Hugill modificado prevê porosidades em sua maioria superiores aos experimentais, pouco variáveis e não correlacionáveis com os valores experimentais. O MEC por sua vez apresenta resultados mais consistentes, acima dos experimentais, porém seguindo uma tendência que pode ser correlacionada com as porosidades experimentais.

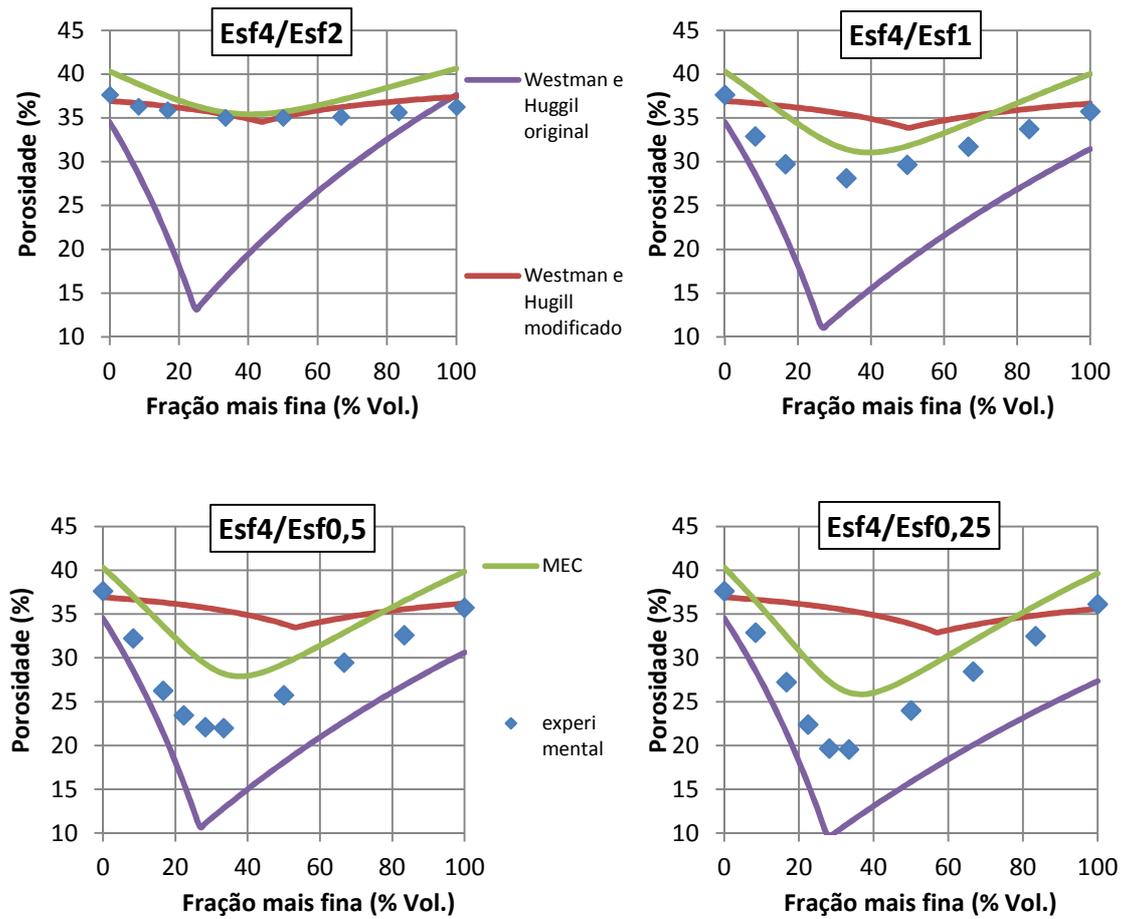


Figura 12 – Previsão dos modelos de empacotamento e dados experimentais de empacotamento de esferas

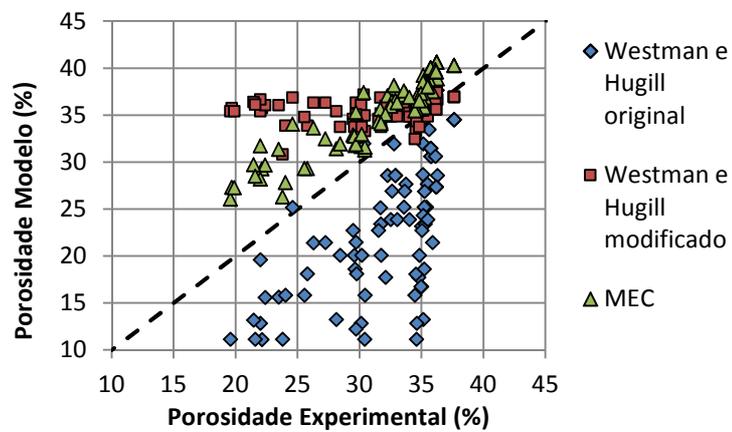


Figura 13 – Resultados experimentais e previstos pelos modelos para porosidade das esferas

Voltando aos resultados mostrados na Figura 12, nota-se que para o MEC, a porosidade do modelo é superior à experimental inclusive nas extremidades, onde se têm frações discretas. Isto pode ser explicado por duas razões. Primeiro, que as frações não são estritamente monomodais, com todas as partículas exatamente do mesmo tamanho. Embora se tenha utilizado frações bem estreitas, existe uma distribuição de tamanhos (ver Tabela 2). Frações discretas (não estritamente monomodais) empacotam de maneira diferente de frações monomodais, resultando em porosidade de empacotamento virtual diferente de 0,74.

Uma segunda razão está na calibração do índice de compactação K , que o MEC emprega para estimar a porosidade real, uma vez conhecida a porosidade virtual. A adoção de $K = 9$ pode não ser o valor mais adequado para o protocolo de compactação empregado. De fato, observando as porosidades das frações discretas mostradas na Figura 10, pode-se considerar que, para superar as barreiras impostas pelo aumento do número de contatos e forças de superfície, seria necessária mais energia para empacotar partículas menores no mesmo grau de compactação. Isto significaria um maior índice de compactação K . Isto é ilustrado na Figura 14, onde uma densidade de empacotamento virtual igual a 0,74 foi considerada para as esferas. Neste caso, K varia de 6,6 a 11,3. O MEC, no entanto, requer um valor único de K . Assim, em vez de variar K , a dificuldade de empacotar partículas menores é introduzida na densidade de empacotamento virtual. Por este motivo manteve-se $K = 9$, que está aproximadamente no centro do intervalo de 6,6 a 11,3

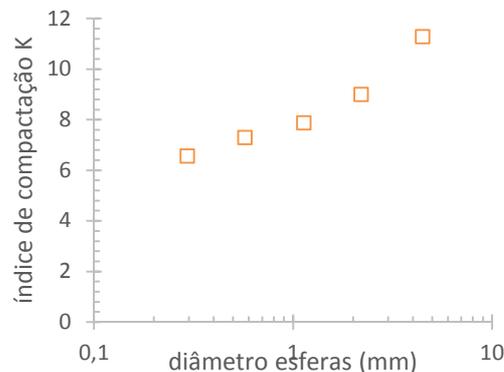


Figura 14 – Índice de compactação K necessário para compactar frações discretas de esferas de diferentes tamanhos, considerando porosidade virtual de empacotamento de 0,74.

Na Figura 15 mostram-se os resultados também das areias, agora apenas com a previsão por meio do MEC. Foram ainda utilizadas as mesmas condições para cálculo das porosidades pelo modelo. Nota-se o efeito da forma. Nas esferas o modelo estima uma porosidade superior à experimental. Com as areias já não ocorre o mesmo, a porosidade experimental sendo inferior à prevista caso não se faça nenhum ajuste nas condições de cálculo do modelo.

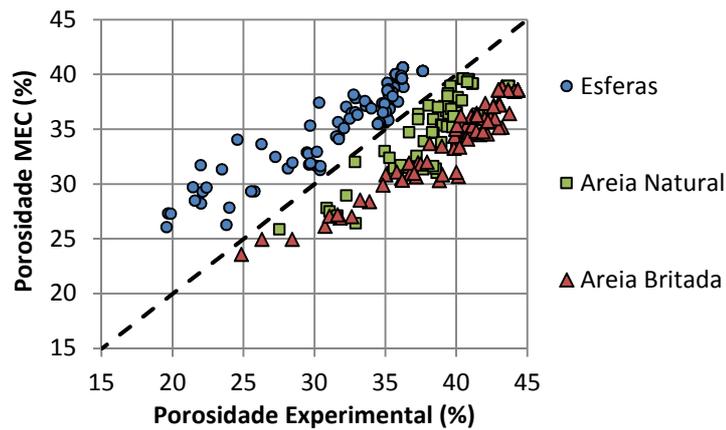


Figura 15 - Resultados experimentais e previstos pelo MEC para porosidade das esferas e areias

Fica evidente que ainda é necessário realizar ajustes nos parâmetros do modelo. Para isto ajustaram-se os valores das porosidades de empacotamento virtual (β) das partículas, de modo que as porosidades discretas do modelo (MEC) coincidissem com as porosidades discretas experimentais. Na Tabela 4 mostram-se os valores obtidos para as diversas frações. Pode-se dizer que estes valores são expressões numéricas da morfologia. Nota-se valores das esferas ainda próximos do valor teórico de 0,74 e para as outras partículas valores tanto menores quanto mais distante da forma esférica. No entanto, estes valores também incorporam efeitos secundários decorrentes do contato entre as partículas.

Tabela 4 - Densidade de empacotamento virtual das frações calculadas a partir dos dados de empacotamento experimental e índice de compactação $K=9$

Intervalo peneiras (mm)	Densidade de empacotamento virtual (β)		
	Esferas	Areia Natural	Areia Britada
[4,00-4,75]	0,712	-	0,618
[2,00-2,36]	0,732	0,671	0,616
[1,00-1,18]	0,730	0,666	0,631
[0,50-0,60]	0,728	0,664	0,631
[0,25-0,30]	0,721	0,659	0,623
[0,125-0,150]	-	0,627	0,603

Em seguida todos os valores das porosidades binárias e ternárias foram recalculados. Na Figura 16 mostra-se o resultado final após esta correção. Comparando com a Figura 15, nota-se uma adequação bem melhor, confirmando que é possível calibrar o modelo com base nas porosidades discretas das frações.

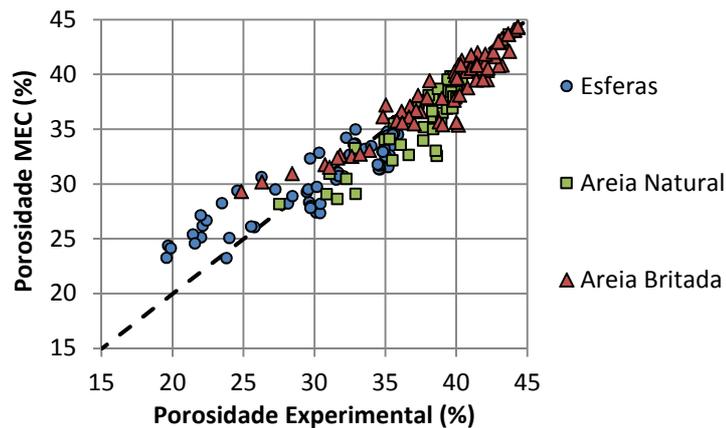


Figura 16 - Resultados experimentais e previstos pelo MEC (calibrado) para porosidade das esferas e areias

3.5.4 Modelagem da porosidade discreta a partir da forma e dimensão das partículas

Como ficou evidente, a porosidade discreta depende da morfologia das partículas. Para a criação de modelos seria interessante a correlação direta entre informações a respeito da forma das partículas com a porosidade, sem a necessidade de realizar ensaios de empacotamento semelhantes aos realizados nesta etapa do trabalho. Também é necessário considerar o tamanho das partículas e o efeito parede do recipiente, pois estes afetam o empacotamento.

Na Tabela 5 mostram-se, para cada fração discreta, o tamanho mediano, os parâmetros de forma *esfericidade* e *relação de aspecto*, determinados por meio de AID (QicPic), a porosidade discreta medida com Geopyc e a porosidade discreta corrigida por meio do modelo de Ben-Aïm (1970).

Tabela 5 – Caracterização dos materiais empregados no estudo de avaliação dos modelos de empacotamento

Nome	Intervalo peneiras (mm)	D ₅₀ (mm)	Esfericidade	Relação de aspecto	Porosidade discreta	Porosidade discreta corrigida
Esf4	[4,00-4,75]	4,478	0,945	0,950	37,5%	32,0%
Esf2	[2,00-2,36]	2,198	0,945	0,975	36,2%	33,4%
Esf1	[1,00-1,18]	1,131	0,945	0,972	35,8%	34,3%
Esf0,5	[0,50-0,60]	0,574	0,945	0,957	35,7%	34,9%
Esf0,25	[0,25-0,30]	0,294	0,946	0,953	36,2%	35,8%
ArN2	[2,00-2,36]	2,595	0,858	0,730	41,5%	40,4%
ArN1	[1,00-1,18]	1,312	0,844	0,716	40,7%	40,1%
ArN0,5	[0,50-0,60]	0,672	0,850	0,715	40,7%	40,4%
ArN0,25	[0,25-0,30]	0,340	0,866	0,713	40,9%	40,7%
ArN0,125	[0,125-0,150]	0,191	0,872	0,689	43,0%	43,0%
ArB4	[4,00-4,75]	5,704	0,820	0,658	44,1%	38,8%
ArB2	[2,00-2,36]	3,023	0,811	0,624	44,3%	41,5%
ArB1	[1,00-1,18]	1,445	0,814	0,630	43,2%	41,8%
ArB0,5	[0,50-0,60]	0,758	0,839	0,629	42,9%	42,2%
ArB0,25	[0,25-0,30]	0,379	0,854	0,630	43,6%	43,3%
ArB0,125	[0,125-0,150]	0,196	0,849	0,628	45,3%	45,2%

Realizando uma regressão linear multivariada pode-se estabelecer um modelo matemático com base nos dados empíricos. Antes, porém, realizou-se uma transformação de variável para D_{50} . Conforme a Figura 10, nota-se uma relação aproximadamente linear entre a porosidade de partículas esféricas e o diâmetro na escala logarítmica. Empregou-se, portanto, $\log(D_{50})$ na regressão. Embora não exista uma relação direta entre esfericidade e relação de aspecto (Figura 121, pg. 237), também não é possível dizer que são variáveis completamente independentes. Além disto, ao se realizar uma tentativa de regressão com ambos os parâmetros de forma, a esfericidade se mostrou não-significativa. Obteve-se então o modelo da Equação 14.

$$P_{corr} = 0,581 - 0,0280 \times \log(D_{50}) - 0,246 \times \left(\frac{b}{l}\right) \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

P_{corr} é a porosidade corrigida

D_{50} é a mediana do tamanho em mm

$\frac{b}{l}$ é a relação de aspecto

A análise dos resíduos não indicou nenhuma inadequação óbvia do modelo ou violação séria das considerações de normalidade. Tanto $\log(D_{50})$ como a relação de aspecto e o termo independente se mostraram altamente significativos e o modelo possui $R^2=0,97$, ou seja, 97% da variabilidade pode ser explicada pelo modelo de regressão.

Os coeficientes negativos confirmam o observado nas análises anteriores. A porosidade diminui com o aumento do tamanho das partículas e com aumento da relação de aspecto. Deve-se ter em mente que se trata de um modelo empírico, válido para as condições deste experimento e materiais similares aos analisados, de tamanho e relação de aspecto na faixa de variação dos citados na Tabela 5. Embora não avaliadas, devido às restrições geométricas do equipamento, partículas ligeiramente maiores possivelmente apresentem comportamento de empacotamento similar, uma vez que também estão sob efeito majoritariamente de forças gravitacionais, semelhante às partículas mais grossas avaliadas nesta etapa da pesquisa.

Na Figura 17 mostra-se a boa concordância entre os dados medidos e os calculados por este modelo.

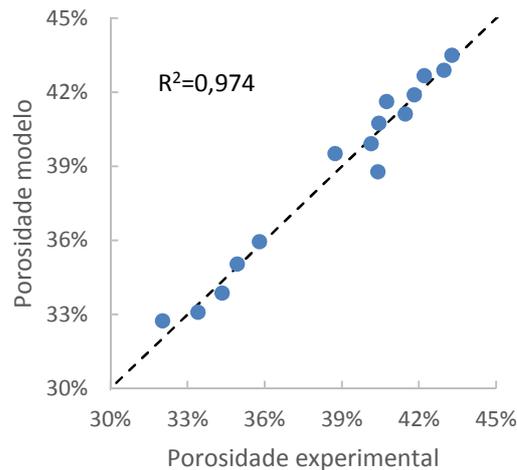


Figura 17 - Adequação aos dados experimentais do modelo de regressão para cálculo da porosidade de frações discretas

Vale lembrar mais uma vez que a porosidade medida no ensaio é afetada pelo efeito parede do recipiente. Empregando a modelo de Ben-Aïm (1970), citado anteriormente, pode-se calcular a porosidade esperada no ensaio a partir da geometria do recipiente e da porosidade calculada pelo modelo empírico.

Unindo os modelos obtêm-se enfim um modelo capaz de estimar a porosidade de uma distribuição de partículas que considera as principais características que afetam o empacotamento:

- Tamanho: modelo de regressão empírico
- Forma das partículas: modelo de regressão empírico
- Distribuição de tamanhos: MEC
- Influência do recipiente: Ben-Aïm (1970)
- Energia e forma de compactação: MEC

Assim, desejando-se calcular a porosidade de um sistema granular deve-se inicialmente realizar a sua caracterização granulométrica e morfológica por meio de AID. Para cada classe granulométrica (fração discreta) presente no sistema têm-se um tamanho (d_{50}) e relação de aspecto (b/l) medianos. Com estes valores calcula-se a porosidade corrigida, dada pelo modelo de regressão empírico (Equação 14), de cada fração discreta. Com estas porosidades calcula-se as densidades de empacotamento virtuais das classes granulométricas, as quais são parâmetros de entrada do MEC. A porosidade do sistema é então calculada conforme a proposta original do MEC, considerando a distribuição granulométrica e a energia de compactação conforme a aplicação. Caso se deseje ainda avaliar a perturbação causada pelas paredes no qual o sistema granular está contido, pode-se ainda realizar a correção conforme o modelo de Ben-Aïm (1970).

3.6 Considerações finais do capítulo

Analisou-se neste capítulo modelos de empacotamento, os quais foram confrontados com dados experimentais. Dentre os modelos considerados, tanto a versão original quanto a modificada do modelo de Westman e Hugill, desconsideram alguns efeitos claramente presentes, não sendo adequados para avaliação de misturas com distribuições granulométricas estreitas. Ressalva-se, no entanto, que a versão modificada deste método é aplicada com sucesso em distribuições contínuas e longas, particularmente na indústria cerâmica (FUNK; DINGER, 1994). Já o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) permitiu previsões de porosidade que podem ser correlacionados com os dados experimentais.

Observou-se um aumento da porosidade com a diminuição do tamanho das partículas. Acredita-se que tenha relação com o aumento do número de partículas e aumento da influência das forças superficiais. Os modelos se baseiam apenas em considerações geométricas, o que pode explicar diferenças entre valores de porosidade medidos e valores calculados.

Os resultados experimentais permitiram ainda observar a influência da morfologia sobre a porosidade. Os maiores desvios se referem à forma mais alongada (areia britada). Considerações simplificadas, baseadas apenas em partículas esféricas, não são suficientes para estimar com boa precisão a porosidade de materiais de formas distintas. Mesmo o modelo mais adequado (MEC) estimou porosidade superior à experimental nas esferas e inferior nas areias.

Realizando uma calibração do modelo com base nas porosidades discretas das frações permitiu previsões bem mais próximas dos valores observados experimentalmente. Neste caso o conhecimento da porosidade das frações individuais passa a ser necessário, o que pode ser obtido com uma etapa experimental adicional. Mostrou-se, no entanto, que é possível estabelecer um modelo matemático empírico capaz de calcular a porosidade a partir de informações geométricas que podem ser obtidas por meio de Análise de Imagens Dinâmicas.

A caracterização de granulometria e morfologia por meio de Análise de Imagens Dinâmicas foi analisada e considera-se que permite com rapidez e representatividade estatística determinar os parâmetros necessários para alimentar os modelos de empacotamento.

Desta forma, esta etapa do trabalho permitiu estabelecer um modelo de empacotamento que permite calcular a porosidade de misturas de materiais granulares de dimensões na região dos agregados e que leva em conta as principais características que afetam o empacotamento. Este modelo ajustado será utilizado no decorrer do trabalho para os cálculos de empacotamento de partículas.

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA GRANULAR DO CONCRETO E USO NA AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ

Este capítulo descreve um dos produtos desta pesquisa: o desenvolvimento de um sistema computacional que possui aplicação geral na área de suspensões cimentícias e específica na avaliação de robustez de concretos. Com auxílio do modelo de empacotamento ajustado no capítulo anterior se descreve a estrutura granular do concreto, sua porosidade intergranular e as distâncias que separam as partículas.

Na primeira parte se descreve o sistema em si, seus componentes, entradas e saídas de dados e possibilidades de aplicação. A segunda parte descreve os levantamentos de dados de variabilidade realizados e, na parte final, emprega-se o modelo computacional para avaliar os efeitos da variabilidade sobre alguns parâmetros microestruturais relevantes.

4.1 Desenvolvimento do software

A motivação para desenvolver um sistema computacional se deve à possibilidade de implementar todos os modelos matemáticos discutidos anteriormente e aplicá-los a uma grande quantidade de materiais que estão disponíveis para a formulação do concreto. Na avaliação de robustez pode-se assim simular matérias-primas afetadas pelas variabilidades e observar o reflexo nos parâmetros do concreto que podem ser modeladas.

As informações de entrada do sistema são as propriedades dos materiais constituintes, as quantidades de cada componente sólido, além dos teores de água, aditivos e ar.

Dentre as informações de saída destacam-se:

- Porosidade do sistema granular: é possível obter o valor total, dos finos e dos grossos, sendo que é possível especificar a transição entre finos e grosso;
- Fração crítica: a fração granulométrica que define a porosidade total do sistema, dos finos e dos grossos.
- Distâncias médias de separação de partículas (Figura 18): quando aplicada aos finos se refere ao IPS (*Interparticle Separation Distance* - Equação 15) e quando aplicado aos grossos se refere ao MPT (*Maximum Paste Thickness* - Equação 16), conforme descritos em Oliveira et al. (OLIVEIRA et al., 2000). O IPS está relacionado com o consumo de água e o MPT relacionado com o consumo de pasta. Ambos são de grande importância nas análises de comportamentos

reológicos de suspensões granulares (DAMINELI, 2013; FUNK; DINGER, 1994; OLIVEIRA et al., 2000; PILEGGI, 2001) e em especial nos concretos de baixo consumo de cimento, nos quais se deseja reduzir o consumo de água e pasta.

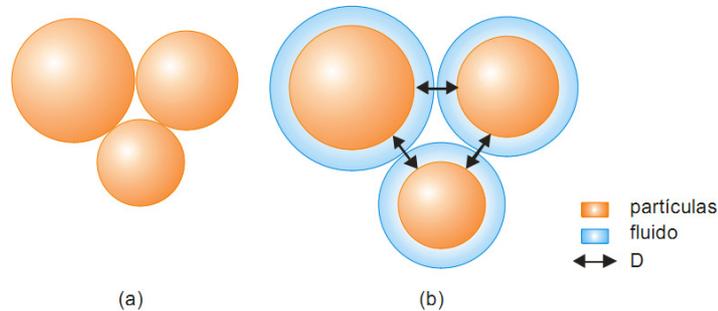


Figura 18 – Representação esquemática do conceito de distância média de separação entre partículas (D): (a) partículas em contato sem nenhum fluido, ou com o mesmo preenchendo exatamente o vazio entre estas, e (b) partículas separadas pelo fluido (fonte: Pileggi (2001)).

$$IPS = \frac{2}{VSA} \times \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right] \quad \text{Equação 15}$$

sendo VSA a área superficial volumétrica, V_s a fração volumétrica de sólidos na mistura e P_{of} a porosidade de empacotamento do sistema. Sendo VSA dado em m^2/cm^3 , IPS resulta em μm .

$$MPT = \frac{2}{VSA_g} \times \left[\frac{1}{V_{sg}} - \left(\frac{1}{1 - P_{ofg}} \right) \right] \quad \text{Equação 16}$$

sendo VSA_g a área superficial volumétrica da fração grossa, V_{sg} a fração volumétrica dos grossos no concreto e P_{ofg} a porosidade de empacotamento da distribuição das partículas grossas. Sendo VSA_g dado em m^2/cm^3 , MPT resulta em μm .

- Diagramas de fases dos componentes: podem ser expressos em termos de massa, volume, área específica ou custo. Os materiais podem ser divididos de acordo com a classificação tradicional (agregados graúdos, miúdos, ligantes, filer, água, aditivos e ar) ou conforme a granulometria (grossos, finos, água, aditivos e ar).

- Cálculos de quantidades: pode-se obter o consumo dos materiais por m³ ou por batelada de volume especificado;
- Parâmetros tradicionais de concretos, tais como teor de argamassa (seca ou úmida, em massa ou volume), diversas relações entre componentes (relação água/cimento, água/ligantes, água/finos, água/secos), densidade no estado saturado, estimativa de densidade após hidratação e secagem;
- Estimativa da resistência: nos casos em que se especifica uma dosagem experimental de referência. Uma das etapas futuras a ser desenvolvida dentro deste sistema é o aprimoramento desta estimativa, buscando-se reduzir ainda mais a necessidade de ensaios experimentais de maior vulto.

O sistema é composto pelos seguintes módulos:

1. Banco de dados: cadastro das matérias-primas e suas respectivas propriedades;
2. Formulação: combinação das matérias-primas para formação da composição;
3. Modelos de dosagem convencionais: modo alternativo para definição da composição com base em modelos de dosagem tradicionais;
4. Modelagem: cálculo dos parâmetros da formulação de acordo com os modelos disponíveis;
5. Relatórios: saída de dados a respeito da formulação e também ficha de pesagem para produção da formulação elaborada;
6. Robô: automatização de cálculos para simulação de cenários de variabilidade. Este é um dos módulos mais importantes relativo à avaliação de robustez, à medida que permite considerar grande número de situações concomitantemente.
7. Arquivo: as composições analisadas podem ser arquivadas e recuperadas individualmente.

Todos estes módulos foram criados dentro do ambiente de planilha eletrônica Microsoft Excel®. Os itens 1 e 3 na forma de planilhas independentes e os demais itens compõem a parte central do sistema. A estrutura do sistema está mostrada na Figura 19. A seguir cada parte é descrita sucintamente.

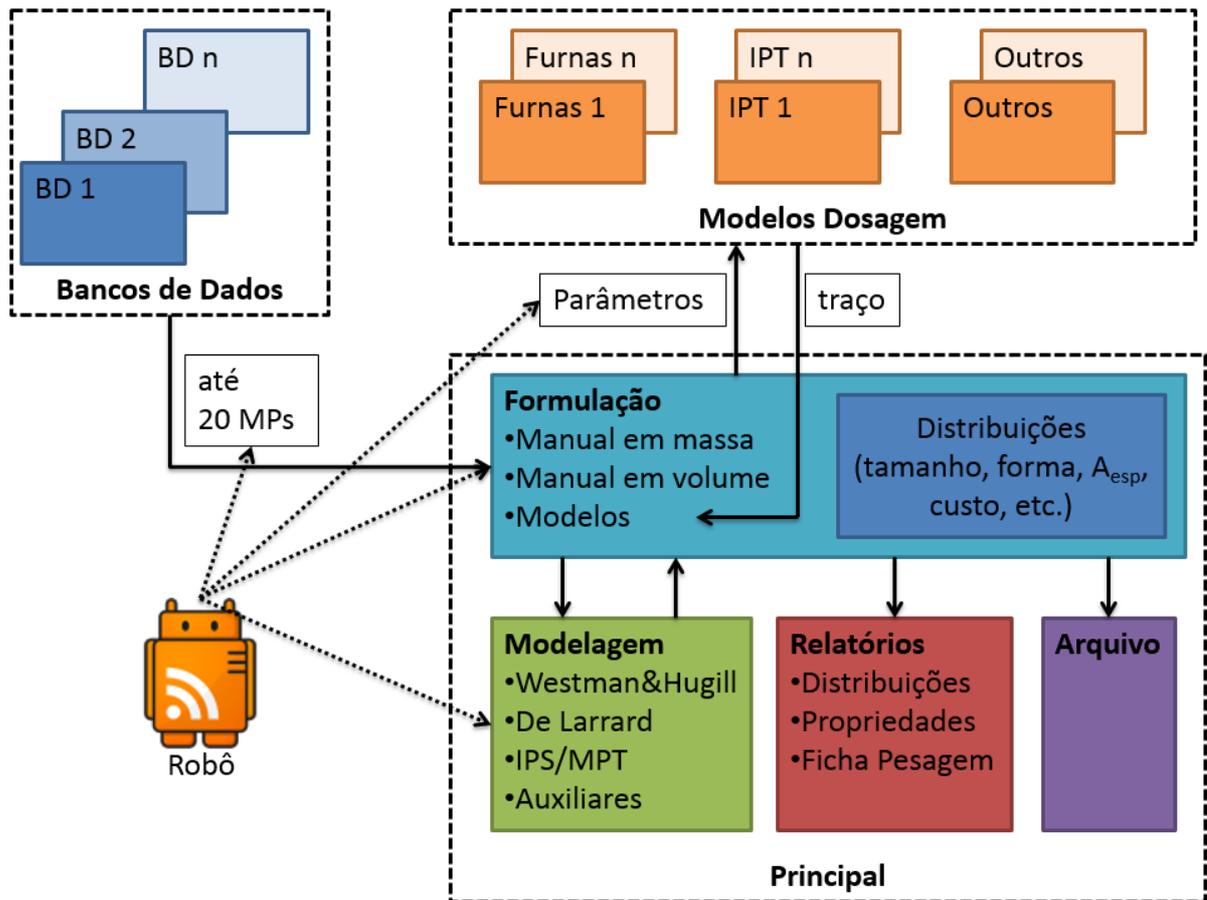


Figura 19 – Representação esquemática dos módulos do sistema computacional

4.1.1 Banco de dados

Todos os dados de caracterização dos materiais são armazenados nos bancos de dados. É possível criar quantos bancos de dados se desejar e os materiais a serem utilizados nas formulações podem vir de um ou mais bancos ao mesmo tempo.

Os dados armazenados são:

- Granulometria
- Densidade
- Área específica
- Custo
- Parâmetros de forma

Além de armazenar os dados, os bancos possuem uma estrutura completa de gerenciamento de materiais, lotes, amostras e ensaios, de modo que se torna possível rastrear a origem de qualquer informação e material. Também permite geração de etiquetas para identificação de amostras, inclusive com códigos de barras. Oferece ainda algumas ferramentas para comparação e manipulação de distribuições granulométricas, como, por exemplo, combinação de curvas, suavizações e conversão de séries de diâmetros. Na Figura 20 mostra-se parte do banco de dados, especificamente a parte central com os principais dados de caracterização dos diversos materiais.

	A	B	GO	GT	HH	MM	NO	NR	NS	NT
1		id_gran	194	199	213	348	376	379	380	381
2		Nome Material	Areia Grossa Fundição	Areia Fina Vidraria	Dolomita #3000	Cimento CPV C	PdrEngrLam	Areia 3 C	Areia 2 J	Areia 4 P
3										
4	+	Dados Cadastrais								
21										
22	-	Distribuição Granulométrica Discreta								
23										
24		tamanho partícula (mm)	% retida ind.	% retida ind.	% retida ind.	% retida ind.	% retida ind.	% retida ind.	% retida ind.	%
25		76,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26		63,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37										
38		8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,76	0,00	0,00	0,00
39		6,70	0,00	0,00	0,00	0,00	18,85	0,00	0,00	0,00
40		5,60	0,34	0,00	0,00	0,00	15,36	0,00	0,00	0,00
41		4,75	1,00	0,00	0,00	0,00	9,87	0,00	0,00	0,00
42		4,00	3,18	0,00	0,00	0,00	6,98	0,00	0,00	0,00
43		3,35	4,18	0,00	0,00	0,00	4,31	0,00	0,00	0,00
44		2,80	5,17	0,00	0,00	0,00	2,39	0,00	0,00	0,01
45		2,36	5,91	0,00	0,00	0,00	1,19	0,00	0,00	0,02
46		2,00	6,60	0,00	0,00	0,00	0,62	0,00	0,00	0,20
47		1,70	8,06	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,68
48										
105		0,0000739	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
106		0,0000621	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
107		0,0000523	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
108		Soma	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
109										
110										
111	-	Parâmetros granulométricos								
112										
113		Dméd	1,58330	0,28606	0,00755	0,01685	6,43484	0,28598	0,24072	0,87497
114		% ret ind max	16,08	12,39	7,41	8,28	18,85	18,81	13,57	23,87
115		DP (span)	0,9803	0,1382	0,0079	0,0135	2,4912	0,1069	0,1133	0,2295
116		CV	62%	48%	105%	80%	39%	37%	47%	26%
117		módulo de finura	3,29	1,37	0,00	0,00	5,11	1,46	1,16	2,97
118		área esp. teor. (m ² /cm ³)	0,0050	0,0252	2,0139	1,6615	0,0011	0,0228	0,0287	0,0075
125										
126	-	Outros ensaios e dados								
127										
129		massa específica (g/cm ³)	2,620	2,646	2,860	2,921	2,921	2,826	2,629	2,805
132		área esp. BET (m ² /g)	0,05	0,15	3,2907	1,833	0,005	0,4	0,2102	0,3397
133		fator forma	26,16	15,77	4,67	3,22	13,08	49,63	19,28	126,84
134		custo (R\$/kg)				0,38	0,05	0,05	0,05	0,05

Figura 20 - Ilustração de parte do Banco de Dados. Cada coluna se refere a um conjunto de caracterização de uma matéria-prima. A granulometria se estende da faixa nanométrica até 76,2mm, abrangendo assim todos materiais empregados, desde pós muito finos até agregados graúdos de grandes dimensões. Os parâmetros granulométricos são resultados de cálculos sobre a distribuição granulométrica. Nota: alguns trechos estão ocultos por questões de tamanho da imagem.

4.1.2 Formulação

A formulação, isto é, a combinação de diferentes materiais formando o concreto, é o objetivo principal de um modelo de dosagem. Inicia-se com a escolha dos materiais disponíveis nos bancos de dados e a indicação da quantidade de cada um deles. Esta etapa pode ser realizada de diferentes formas:

- Indicação manual da quantidade de cada componente em massa: esta opção é especialmente útil quando se tem uma composição já testada anteriormente ou originária de uma aplicação em uma obra/concreteira, onde em geral os traços são fornecidos em peso por m^3 ou por betonada/caminhão. Basta indicar as massas de cada componente, inclusive a água e o teor de ar incorporado;
- Indicação manual da quantidade de cada componente em volume: esta opção é particularmente interessante quando se pretende fazer substituições de materiais, o que em geral é feito com base em substituições de mesmo volume e não de mesma massa;
- Obtenção das quantidades com base em uma dosagem empírica convencional. Neste caso deve-se indicar qual a dosagem a ser considerada e quais os parâmetros de entrada que este modelo necessita, por exemplo, a resistência (f_{ck}) desejada. As quantidades são então calculadas pelo modelo de dosagem. Na sessão seguinte mais detalhes dos modelos de dosagem convencionais são explicados;
- Baseado em uma curva granulométrica alvo. Pode-se inserir uma curva granulométrica genérica, ou usar uma curva de empacotamento otimizado obtida a partir do modelo de Alfred (FUNK; DINGER, 1994), e aplicar um método de otimização (Solver) para ajustar as quantidades de modo que a curva granulométrica se aproxime do alvo (método dos mínimos quadrados). Durante o processo de otimização pode-se ainda inserir restrições que precisam ser respeitados pela composição otimizada.

Na Figura 21 mostra-se um trecho desta etapa de definição de quantidades.

Possui dosagem experimental acoplada? IPT Arquivo: Dosagem_IPT.xlsm id_dosag 1 Dosagem IPT 2 -28dias

materiais	Banco de Dados	BD_Mater	BD_Mater	BD_Mater	BD_Mater	BD_Mater						
	Número identificador	410	411	416	413	405						
	Nome Original no Banco de Dados	Brita 1	Brita 0	Areia Art	Areia Natural	Cimento						
proporções	Materiais secos	modo de entrada: automático pela dosagem experimental					f_{ck} (MPa)	30,0				
	Proporção em massa	78,19	19,55	modo de entrada: automático pela dosagem experimental			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Água adicionada	modo de entrada: automático pela dosagem experimental					Teor de ar		modo de entrada: automático			
	% do volume total	20,35%					% do volume total		1,00%			

Figura 21 - Ilustração da etapa de definição das formulações. As entradas podem ser feitas manualmente (em massa ou volume) ou ainda de forma automática com base em uma dosagem experimental acoplada.

Uma vez fornecidas estas informações, o Módulo de Formulação determina a curva granulométrica resultante e prossegue com os cálculos dos parâmetros da mistura. Para a descrição da curva granulométrica o sistema utiliza uma divisão de tamanhos em classes granulométricas que seguem uma progressão geométrica, com razão $\sqrt[4]{2}$. Nota-se que se trata de uma razão bem mais detalhada que, por exemplo, a série de peneiras normal especificada pela ABNT NBR NM 248 (2001), onde a razão é de 2. Na prática isto significa que o detalhamento das curvas granulométricas é 4 vezes superior, ou seja, cada intervalo da série normal é subdividido em 4 frações.

A separação das partículas por tamanho não é apenas utilizada para descrever o volume de materiais de cada tamanho. Várias outras características também são calculadas para cada classe de tamanho, resultando em diversas distribuições de propriedades. Citam-se: distribuições de forma por tamanho, densidade por tamanho, densidade por tamanho, custo por tamanho. Algumas destas distribuições são obtidas diretamente a partir de dados experimentais e outras são calculadas a partir de outras informações.

4.1.3 Modelos de dosagem convencionais

Foram implementados no momento duas opções de modelos de dosagem convencionais: método de FURNAS ou do módulo de finura (ANDRADE, 1997) e o método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1995). Os detalhes destes métodos estão bem descritos nas referências citadas. As planilhas elaboradas visam dar apoio em todas as etapas da dosagem experimental: informações necessárias dos materiais, ensaios preliminares, execução de traços com moldagem de corpos de prova, cálculo das resistências à compressão e demais parâmetros da dosagem, estabelecimento das curvas de correlação entre variáveis e cálculo automatizado das constantes de dosagem. Todas as informações necessárias são gravadas para posterior uso pelo Módulo de Formulação.

4.1.4 Modelagem

Uma vez estabelecida a formulação, as informações são enviadas para os modelos citados no capítulo anterior (ver item 3.3). Os dados de entrada dependem de cada modelo, mas compreendem basicamente as distribuições de granulometria, forma e área específica e parâmetros específicos do modelo, como, por exemplo, a constante de compactação no caso do MEC.

Em sua maioria, os cálculos constituem-se de cálculos matriciais, que podem ser implementados de duas formas: apenas com fórmulas nativas do Excel®, utilizando cálculos matriciais (Figura 22), e por meio de códigos de programação, utilizando a linguagem Visual Basic que acompanha o Microsoft

Excel®. Optou-se pela segunda opção, por ser de implementação mais simples e direta, além de ser de processamento mais rápido. Para que os cálculos sejam refeitos automaticamente a cada alteração dos dados de entrada, sem a necessidade de explicitamente invocar a execução dos cálculos manualmente, esta implementação é feita na forma de *Funções Definidas pelo Usuário*. Esta opção permite também o uso do método de otimização fornecido pelo Excel (Solver), que pode ser empregado para otimizar as formulações na busca por soluções com propriedades específicas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	CM	CN
1															
2													critical ratio of entrance	0,154	
3															
4								Mistura		Fração	Fração	Fração		Fração	Fração
5								Completa		76,2	63	53,5		0,000062	0,000052
6															
7															
94															
95															
189															
190															
277															
278															
366															
367															
454															
455															
547															
548															
635															
636															
725															
726															
813															
814															
903															
904															
913															
914															
915															
916															

Figura 22 - Ilustração da aplicação dos modelos de empacotamento. Mostram-se apenas as etapas de cálculo, que se compõe de uma série de cálculos matriciais. Na parte inferior mostra-se os três modelos disponíveis.

4.1.5 Relatórios

Os resultados obtidos, na forma de gráficos e tabelas podem ser emitidos para impressão e/ou gravação de arquivos externos. Um relatório especial, a ficha de pesagem, é útil caso a formulação modelada seja executada. Na Figura 23 mostra-se partes de relatórios.

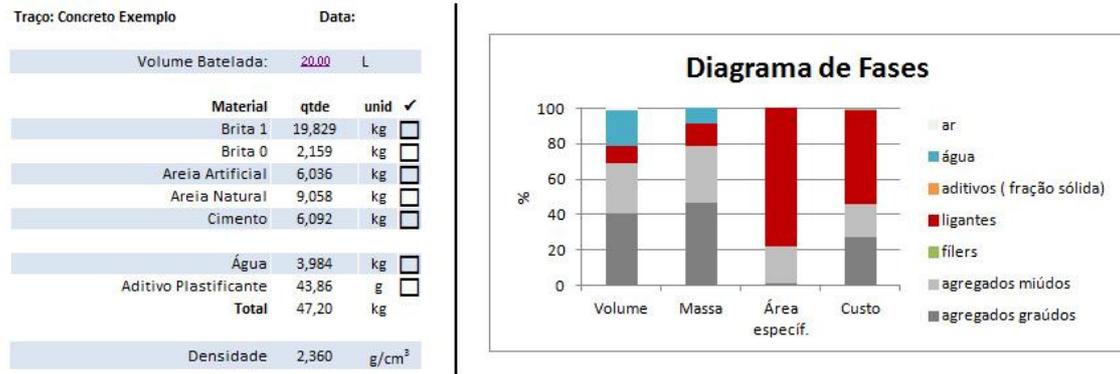


Figura 23 - Ilustrações de partes de relatórios. Na esquerda ficha de pesagem. Na direita diagrama de fases.

4.1.6 Arquivo

Todas as formulações testadas podem ser gravadas de modo que se possa recuperá-las posteriormente com facilidade. É possível criar uma nova formulação, salvar a atual, salvar a atual com novo nome, deletar, recarregar da memória e abrir qualquer uma das formulações já salvas anteriormente. Na Figura 24 mostra-se o menu que permite acesso a estas funções. Optou-se por este sistema de gravação por permitir que o sistema continue evoluindo sem que se percam as formulações já analisadas.

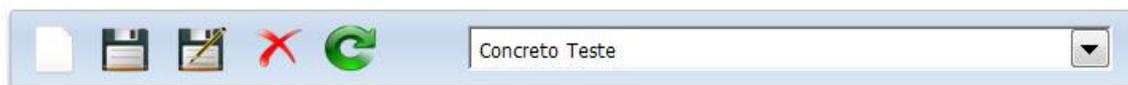


Figura 24 - Ilustração do menu de controle do Arquivo.

4.1.7 Robô

Um dos objetivos do sistema é aplicá-lo na análise de robustez, o que significa aplicar uma série de variações sobre as matérias-primas e/ou quantidades. Para que este processo possa ser realizado com facilidade foi criado um robô, o qual é configurado com as variações desejadas. Qualquer dado de entrada pode ser acessado e manipulado pelo robô. Ele então aplica todas as variações e grava os resultados para cada situação. Qualquer um dos resultados calculados pode ser avaliado e gravado pelo robô.

Na Figura 25 mostra-se um exemplo bem simples de aplicação do robô. Analisou-se o efeito da variação da proporção de dois materiais (colunas F e G) sobre as porosidades de acordo com 3 modelos de empacotamento (Colunas I a K).

	A	F	G	I	J	K
						
Nome Planilha	nelComar	nelComar	nelComar	nelComar	nelComar	nelComar
Nome Campo	prop1	prop2	Po W&H	Po Y&S	Po dLar	
11	90	10	36,6	38,5	38,6	
12	89	11	36,6	38,4	38,4	
13	88	12	36,5	38,3	38,2	
14	87	13	36,5	38,2	38,1	
15	86	14	36,4	38,1	37,9	
16	85	15	36,4	37,9	37,7	
17	84	16	36,3	37,8	37,6	
18	83	17	36,3	37,7	37,4	
19	82	18	36,3	37,6	37,3	
20	81	19	36,2	37,5	37,1	
21	80	20	36,2	37,4	37,0	

Figura 25 - Exemplo de aplicação do robô, onde se avaliou a influencia na porosidade de acordo com os modelos disponíveis, ao se variar as proporções dos materiais 1 e 2.

Deve-se salientar que a cada iteração do robô (cada situação analisada) é realizado um recálculo completo da planilha. Devido à complexidade que a planilha adquiriu, principalmente em função das operações matriciais que envolvem muitos cálculos, a duração deste processo é da ordem de segundos (cerca de 2 segundos em um computador de capacidade de processamento médio). Para os casos mais simples de análises esta duração é perfeitamente aceitável. Apenas em casos onde se deseje um processamento maior, como o caso de muitas matérias-primas com muitas variações simultâneas, levando a um número relativamente grande de combinações, o tempo de processamento passa a ser um fator importante. Até que ponto a implementação na forma de planilha Excel® continua sendo interessante é uma questão importante neste caso. Caso realmente um grande número de combinações necessite ser analisado, uma versão diferenciada do sistema precisa ser considerada, com cálculos otimizados e sem visualizações gráficas atualizadas a cada iteração.

4.2 Coleta de dados acerca de variabilidade

Na sessão 2.2.4 uma breve análise de fatores que afetam as características de concretos foi apresentada. Conforme prevê o escopo do trabalho, não é possível abranger todos os fatores. O foco principal desta pesquisa são os fatores que afetam a produção do concreto. A opção por dedicar atenção especial aos desvios de proporções (dosagem) e na granulometria/morfologia dos agregados se justifica por estes se tornam cada vez mais influentes à medida que o consumo de cimento é reduzido. Pesquisas adicionais, no entanto, são necessárias para cobrir os demais aspectos,

principalmente referentes à variabilidade físico-química dos finos (ligantes e fílers) e a interação com os aditivos.

Uma vez escolhidas as variáveis a serem analisadas, é necessário ter em mãos dados a respeito da variabilidade à qual estas estão sujeitas em uma aplicação real. Apresenta-se a seguir dados a este respeito.

4.2.1 Variabilidade de granulometria

Foram coletados dados de granulometria em uma grande obra de infraestrutura, onde se empregou três frações granulométricas: brita 25mm, brita 12,5mm e areia de britagem. As amostras foram coletadas na esteira que transporta os agregados para a central de concreto. A amostra primária equivale a um segmento da esteira de cerca de 1 metro, a partir da qual é obtida a amostra final para ensaio de peneiramento, o qual é executado segundo a ABNT NBR NM 248 (2001). A série de peneiras equivale à série normal acrescida da peneira 6,3mm (no caso da brita 12,5mm) e da peneira 25,4mm (no caso da brita 25mm). A coleta de dados se estendeu por um longo período, permitindo a obtenção de 5 a 6 mil ensaios de granulometria para cada fração.

A análise estatística dos dados compreendeu a seguinte sequência:

- eliminação de dados anômalos, oriundos possivelmente por erros de anotação/digitação;
- análise temporal com objetivo de verificar se houve alterações de maior porte ao longo do tempo;
- detecção e eliminação de outliers: aplicou-se uma única vez o teste de Chauvenet (1874) para eliminação de ensaios que apresentavam dados discrepantes da massa principal de dados.
- cálculos das medidas de posição e dispersão: média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, máximo, mínimo, quantis, etc.;
- construção de gráficos do tipo Box-Plot;

Uma análise temporal indicou que ao longo do tempo podem ocorrer mudanças sistemáticas. O caso mais explícito observou-se com a Brita 25. A Figura 26 mostra o valor da % retida acumulada na peneira 19mm para os mais de 5 mil ensaios. Nota-se nitidamente 3 estágios distintos, onde variou não somente a média, como também a dispersão dos resultados. Nos demais materiais também ocorreram mudanças, porém não tão drásticas quanto esta. Optou-se então por analisar o conjunto de dados dividido em 3 subconjuntos referentes aos intervalos de tempo dos 3 estágios detectados na brita 25.

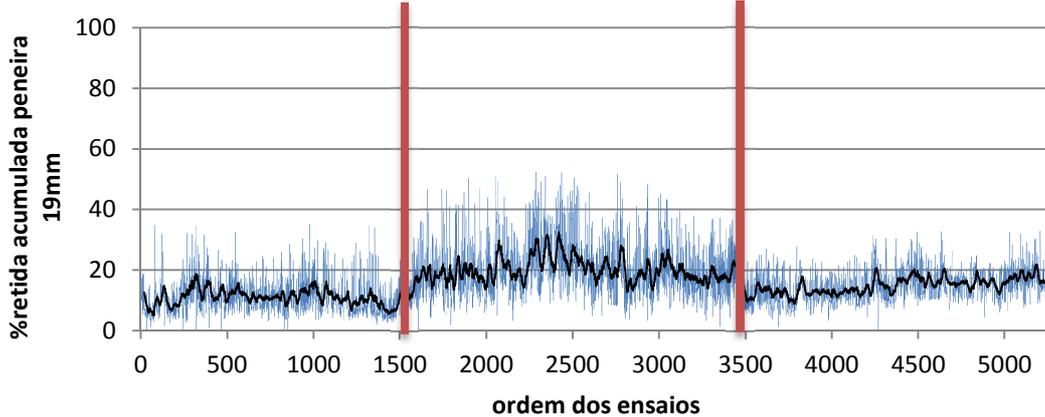


Figura 26 - Análise temporal da fração maior que 19mm da Brita 25 (média móvel em preto).

Na Figura 27 mostram-se os diagramas Box-Plot referentes à granulometria retida acumulada dos três materiais nos três períodos. A comparação entre os três períodos mostra que o processo foi otimizado com o passar do tempo, reduzindo o tamanho das caixas (redução do intervalo que compreende 90% dos resultados).

Na areia, os grãos são distribuídos ao longo de toda a série granulométrica de forma mais proporcional, com volumes relevantes em cinco classes e ainda abaixo da menor peneira (fundo). De igual forma também a variabilidade se mantém em limites próximos, independente da dimensão. O coeficiente de variação da porcentagem retida individual encontra-se basicamente entre 10 e 15%.

Nos agregados graúdos, a maior parte dos grãos se concentra em dois ou três intervalos granulométricos apenas, consequência do processo de produção, onde os grãos britados são separados por peneiramento para compor frações estreitas. A areia possui distribuição mais aberta, por corresponder a todo material passante abaixo da peneira 4,8 mm, que define o limite inferior da brita 12,5mm.

Nos agregados graúdos, é possível observar que a variabilidade do volume retido em cada peneira depende justamente de quanto material fica retido. Embora as peneiras com maior volume de material retido possuam também maior desvio padrão, o coeficiente de variação é menor à medida que o volume retido aumenta (Figura 28). Na ausência de dados de um processo de produção em particular, a regressão mostrada na Figura 28 pode ser empregada para uma estimativa inicial de variabilidade. Deve-se, no entanto, salientar que a variabilidade depende das particularidades de cada processo de produção (tipo e configuração dos equipamentos empregados, grau de desgaste, ritmo de produção,

entre outros) e o ideal é sempre obter dados a respeito da real variabilidade que estará presente nos materiais empregados na produção do concreto.

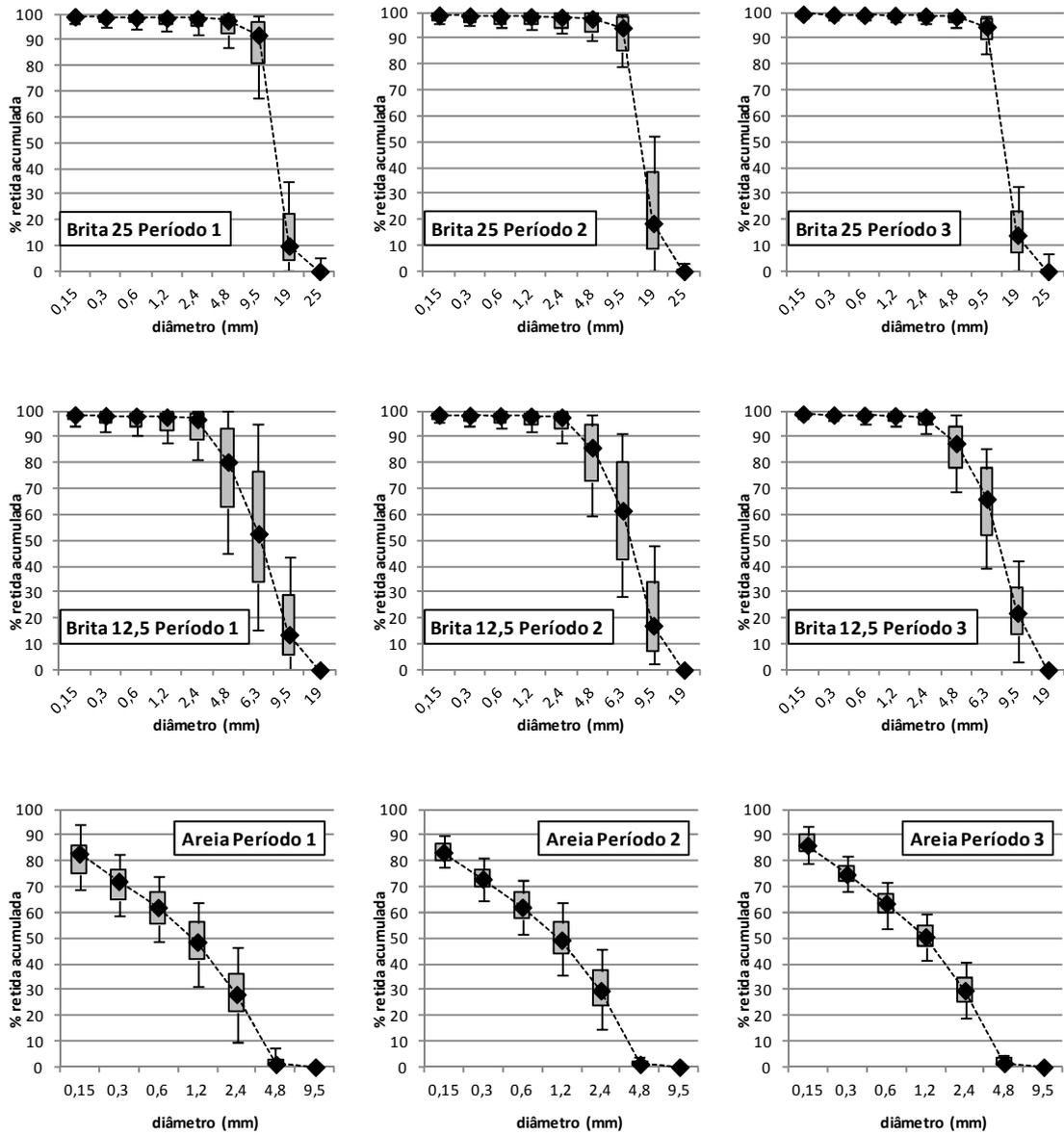


Figura 27 – Distribuições granulométricas acumuladas dos três agregados nos três períodos de análise. A caixa delimita os percentis 5% a 95%, com mediana representada pelo risco horizontal central. Ainda estão mostrados a média (losango) e os valores máximo e mínimo (barras externas).

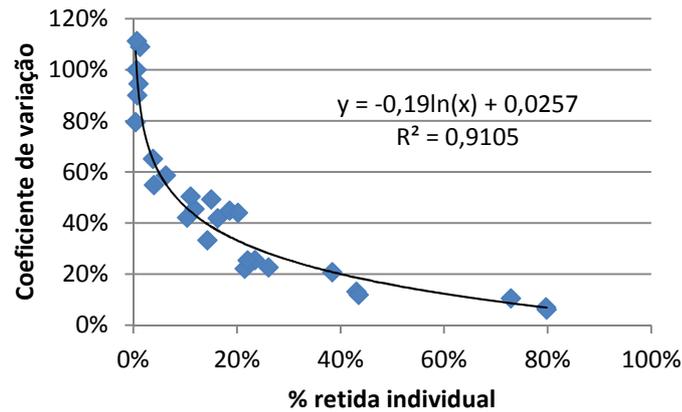


Figura 28 - Coeficiente de variação do volume retido individual em cada peneira, em função deste volume, para agregados graúdos.

Os dados anteriores se referem a agregados provenientes de processo de britagem. Na Figura 29 mostra-se ainda a avaliação de areia natural fina proveniente de extração de cava. Boa parte do material fica concentrado em três peneiras apenas. Comparando com a variabilidade dos agregados graúdos mostrado anteriormente nota-se que as variabilidades não são muito menores.

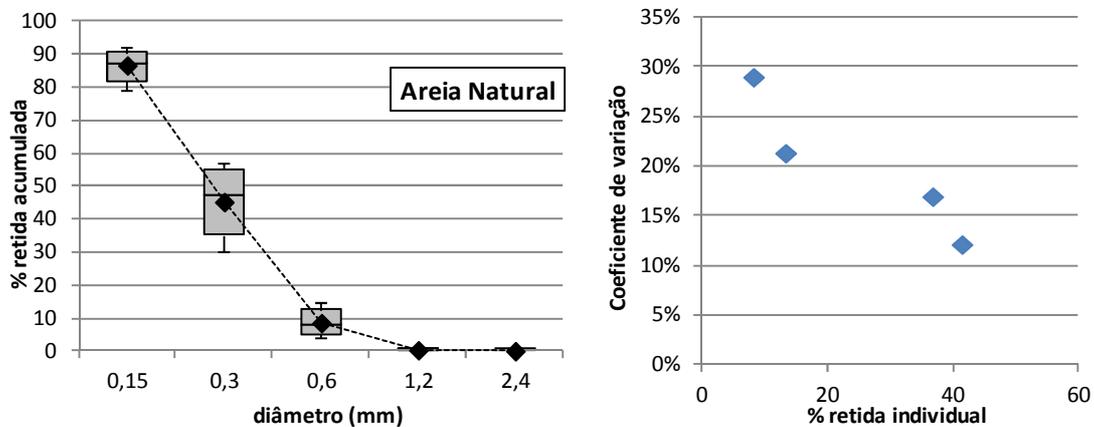


Figura 29 - Variabilidade granulométrica de areia natural

4.2.2 Variabilidade de umidade

O levantamento de dados anterior também incluiu uma avaliação de umidade, cujo resumo é mostrado na Figura 30. Variações de umidade ocorrem inclusive em pequenos intervalos de tempo. Observou-se que este fato foi bastante comum e um exemplo típico é o mostrado na Figura 31, onde 30 ensaios de umidade foram realizados em um mesmo dia. Os resultados encontram-se dentro dos limites da variabilidade geral e podem variar do limite máximo ao mínimo entre ensaios consecutivos.

As umidades dos agregados graúdos é inferior à da areia, porém são sujeitos a variabilidades de mesma ordem de grandeza. O fato da umidade variar repentinamente indica heterogeneidade nos materiais armazenados em pilhas a céu aberto e constitui-se em um problema para a dosagem uniforme. Na prática recorre-se à experiência dos operadores para ajustes visuais do teor final de água e empregam-se testes de trabalhabilidade, como o abatimento, como parâmetro de controle.

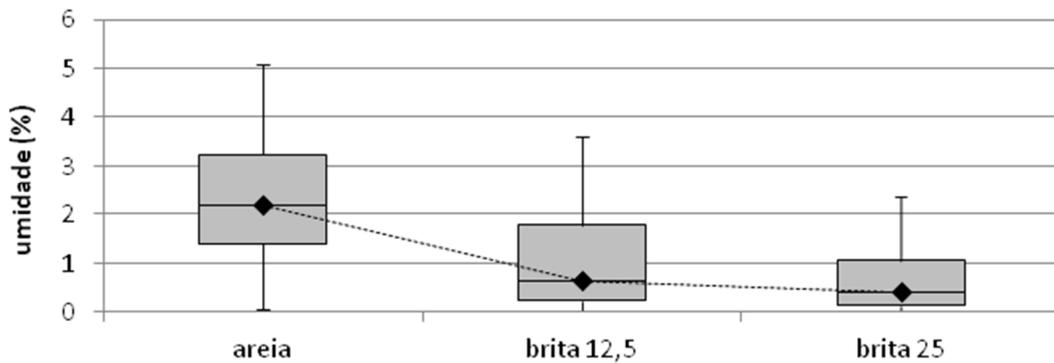


Figura 30 - Variabilidade de umidade dos agregados

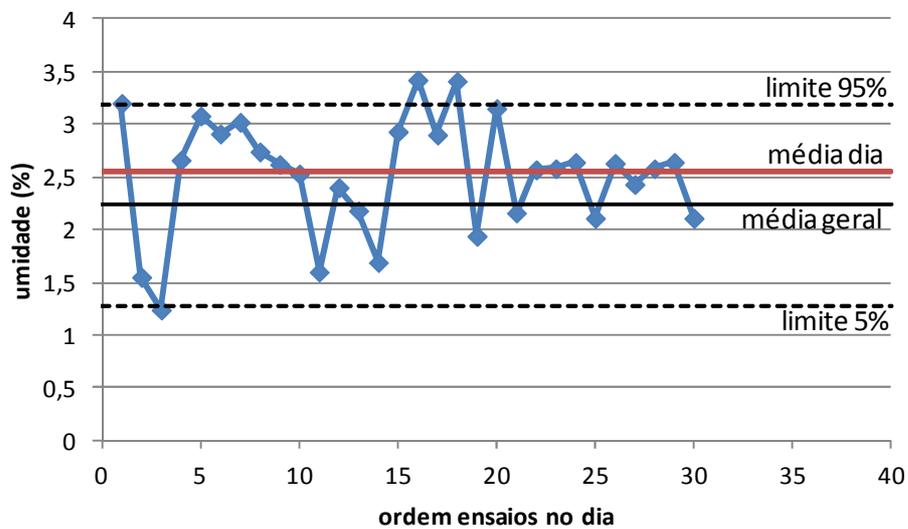


Figura 31 - Variações de umidade da areia britada em um único dia.

4.2.3 Variabilidade de pesagem

A variabilidade de pesagem foi avaliada em uma central de concreto comercial. Foram analisadas duas semanas de produção, perfazendo 417 amostras. A central é composta de uma unidade de pesagem de agregados alimentada por até quatro silos de agregados e três silos de cimento cada qual com

balança própria. O aditivo também possui balança própria. Na Figura 32 mostram-se os desvios absolutos (diferença entre a massa que foi de fato empregada e a massa teórica da formulação) e na Figura 33 os desvios relativos.

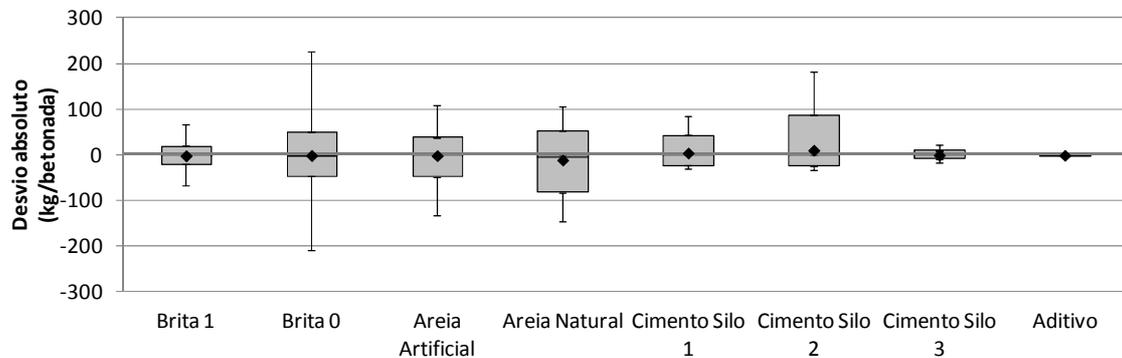


Figura 32 - Variabilidade do desvio absoluto na pesagem de materiais em uma central de concreto comercial

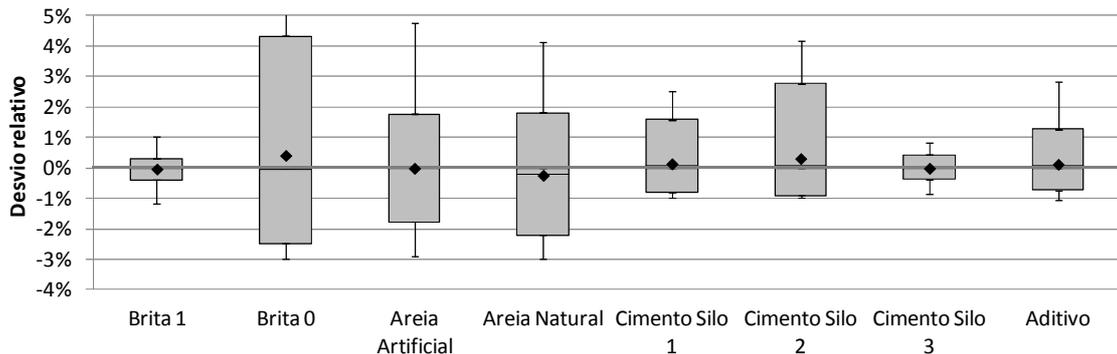


Figura 33 - Variabilidade do desvio relativo na pesagem de materiais em uma central de concreto comercial

Nota-se que a usina é bem calibrada para a média (média próxima de zero), porém apresenta alguma variabilidade. Com exceção da brita 0, os desvios relativos se encontram predominantemente abaixo de $\pm 2\%$. A origem dos desvios se dá em função de retardos no fechamento das comportas dos silos que alimentam as balanças. Para um mesmo silo/material espera-se que este retardo não seja muito variável, resultando assim em erros absolutos dentro de um limite mais constante. Já o desvio relativo, o qual é limitado por prescrição normativa (ABNT NBR 7212:2012), depende também da quantidade total de material pesado. Por este motivo os menores desvios relativos são observados na Brita 1, que corresponde aos maiores volumes nesta central de concreto, e o desvio relativo da Brita 0, usada em menor proporção, é bem maior que das areias, embora o desvio absoluto seja bem parecido.

4.2.4 Variabilidade de forma

Os ensaios tradicionais para descrever e quantificar a forma de grãos são laboriosos, tediosos, de baixa representatividade estatística e dependentes dos operadores. Por esta razão a morfologia raramente é avaliada e poucos modelos a consideram como dado de entrada. Quando muito, para agregados graúdos se avalia a relação de aspecto e para agregados miúdos se utiliza de comparações subjetivas com “gabaritos” que descrevem a morfologia de maneira qualitativa.

Sabe-se, no entanto, que a morfologia é um parâmetro importante a ser considerado. Um estudo de caso, onde se avaliou o efeito da forma dos agregados graúdos sobre o comportamento no estado fresco de concreto autoadensável com baixo consumo de cimento (REBMANN et al., 2012), mostrou que a forma mais irregular do agregado lamelar dificultou tanto a mistura (aumentando em 20% a energia associada ao processo) quanto o fluxo do concreto. A tensão de escoamento foi o parâmetro reológico mais influenciado, sofrendo um aumento de 156% em decorrência da utilização dos agregados lamelares. A forma, portanto, é um parâmetro que deve ser incluído no estudo de robustez.

Com a possibilidade de empregar Análise de Imagens Dinâmicas (AID), boa parte das restrições à avaliação quantitativa de forma de grãos foi superada e abre-se a possibilidade de incluir informações quantitativas nos estudos experimentais e em modelos numéricos, como foi feito neste trabalho (ver 3.5.4, pg. 77).

Com vistas à aplicação em estudos de robustez, são necessários dados de variabilidade dos parâmetros morfológicos, semelhante ao realizado nas sessões anteriores para granulometria, umidade e pesagem. Inicialmente, apenas um levantamento preliminar destas informações foi realizado, com intuito de mapear de forma geral o comportamento. Foram coletados agregados de diversas granulometrias e origens mineralógicas, provenientes de diferentes pedreiras e mineradoras localizadas predominantemente no estado de São Paulo, totalizando cerca de 40 amostras entre agregados miúdos e graúdos, de origem britada e naturais. Observa-se que o parque de equipamentos destes fornecedores é diverso, e sabe-se que a forma dos materiais britados depende do tipo e ajuste dos equipamentos utilizados e da mineralogia das rochas. Desta maneira este levantamento visa fornecer um mapa geral de variação da forma. Posteriormente um breve levantamento da variabilidade de um mesmo fornecedor ao longo do tempo foi realizado (Figura 35).

Na Figura 34 mostram-se resultados de ensaios de AID de agregados miúdos e graúdos. Restringe-se a análise à relação de aspecto, embora outros parâmetros de forma também tenham sido analisados. A relação de aspecto mostrou-se mais significativa para a estimativa do empacotamento (ver 3.5.4, pg. 77).

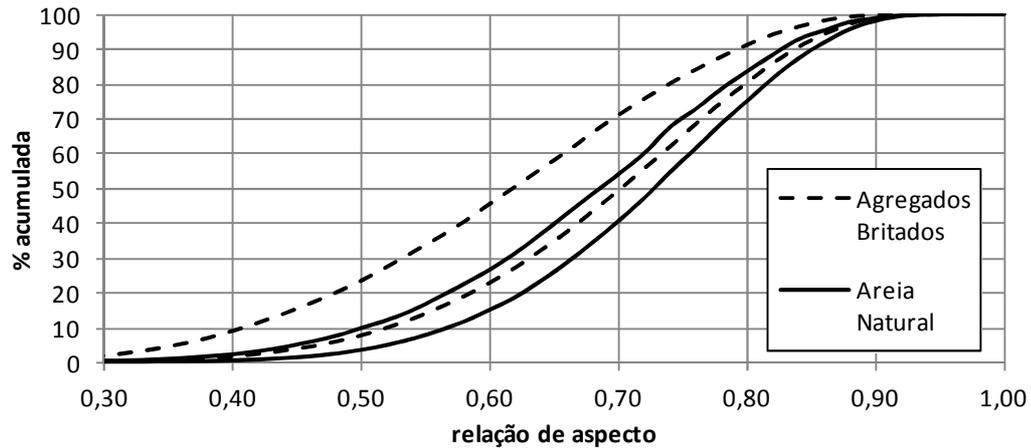


Figura 34 - Casos extremos de distribuição de forma (relação de aspecto) de agregados

Quanto mais à esquerda a curva, mais alongadas são as partículas (menor relação de aspecto). Os agregados britados compreendem desde britas com $D_{max} = 25$ mm até areias de britagem. Independente da granulometria, estes agregados ocupam toda a região compreendida entre as curvas tracejadas da Figura 34. A mediana da relação de aspecto variou para os agregados britados entre 0,61 e 0,70. Já as areias naturais ocupam uma região mais à direita (partículas mais equiaxiais), com mediana da relação de aspecto entre 0,68 e 0,74. É interessante notar que existem agregados britados comerciais que possuem forma similar a grãos de areias naturais, tidos como grãos de formatos que favorecem uma melhor trabalhabilidade.

Após o mapeamento inicial, foram ainda analisados agregados de um mesmo fornecedor comercial ao longo de um período de 2 meses. Um total de 14 amostras foram obtidas de cada agregado, as quais foram submetidas a análise granulométrica e morfológica por AID. Na Figura 35 mostram-se as distribuições de forma das areias britadas. A mediana da relação de aspecto variou entre 0,612 e 0,636 e a esfericidade entre 0,808 e 0,827. A variação para os agregados graúdos foi ligeiramente superior, com mediana da relação de aspecto variando entre 0,620 e 0,653 para a brita 0 e entre 0,646 e 0,672 para a brita 1. Já a areia natural variou menos, com mediana da relação de aspecto compreendida entre 0,726 e 0,741.

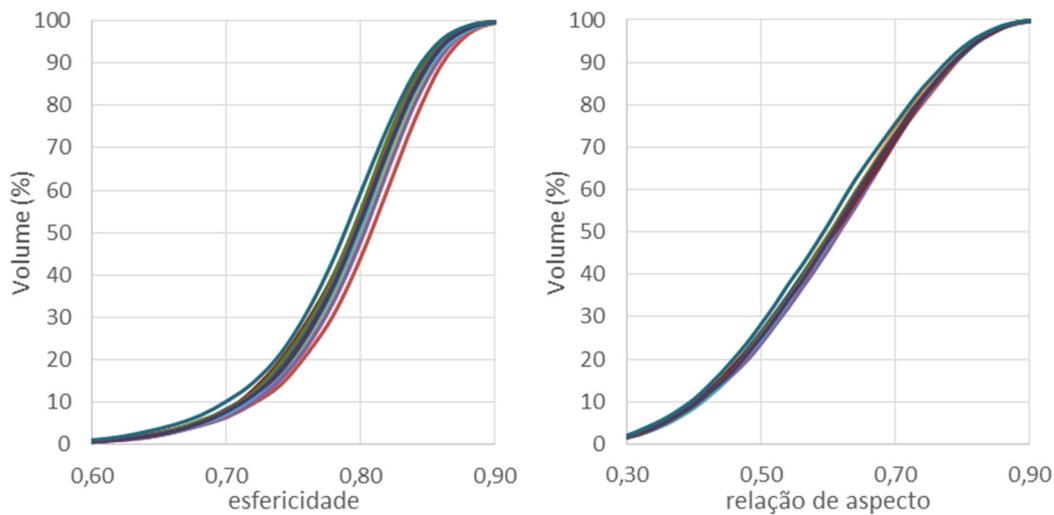


Figura 35 – Levantamento da variabilidade da morfologia de areias britadas ao longo de um período de 2 meses.

4.2.5 Síntese do levantamento de variabilidade

Na sessão seguinte é mostrada a simulação de cenários de variabilidade sobre algumas famílias de concreto, utilizando o sistema computacional desenvolvido. Com base nos dados levantados, os seguintes limites foram considerados:

- Granulometrias (concretos que usam os materiais do levantamento de variabilidade): foram consideradas a granulometria mediana e os limites superiores (quartil 95%) e inferiores (quartil 5%), representando materiais mais grossos e mais finos, respectivamente.
- Granulometrias (concretos que usam outros materiais): os dados de coeficientes de variação calculados em função da massa retida individual em cada peneira (Figura 28) foram empregados para construir os limites superiores e inferiores.
- Umidade: foram considerados desvios de umidade conforme a Figura 30, resultando em modificações do teor total de água.
- Pesagem de agregados: foram considerados desvios relativos de $\pm 2\%$ ou ± 50 kg por carregamento de caminhão de 8m^3 , o que resultar maior.
- Pesagem de cimento: foram considerados desvios relativos de -1% a $+2\%$ ou -25 a $+75$ kg por carregamento de caminhão de 8m^3 , o que resultar maior.
- Morfologia de agregados britados: relação de aspecto de 0,62 e 0,70, de modo a abranger o espectro usual de morfologias encontradas no mercado;

- Morfologia areia natural: relação de aspecto de 0,68 e 0,73, de modo a abranger o espectro usual de morfologias encontradas no mercado.

4.3 Efeito teórico das variabilidades em concretos de diferentes famílias

O objetivo final deste capítulo é utilizar o sistema computacional para analisar os efeitos das variabilidades levantadas sobre alguns parâmetros de diferentes concretos. Serão considerados inicialmente concretos convencionais, dosados conforme os modelos de dosagem convencionais que integram o sistema desenvolvido. Em seguida um concreto otimizado com reduzido teor de cimento é considerado também.

4.3.1 Concreto bombeável convencional

Como referência inicial da análise de variabilidade escolheu-se uma família de concretos bombeáveis (abatimento = 12 ± 1 cm), cujos diagramas de dosagem, segundo o método de dosagem de Furnas, encontram-se na Figura 36. Estes diagramas foram obtidos pelo Módulo de Dosagem Convencional, na versão do Método de Furnas, aplicados a uma dosagem experimental executada para a mesma obra de onde são provenientes os dados de variabilidade de granulometria e umidade dos agregados apresentados anteriormente.

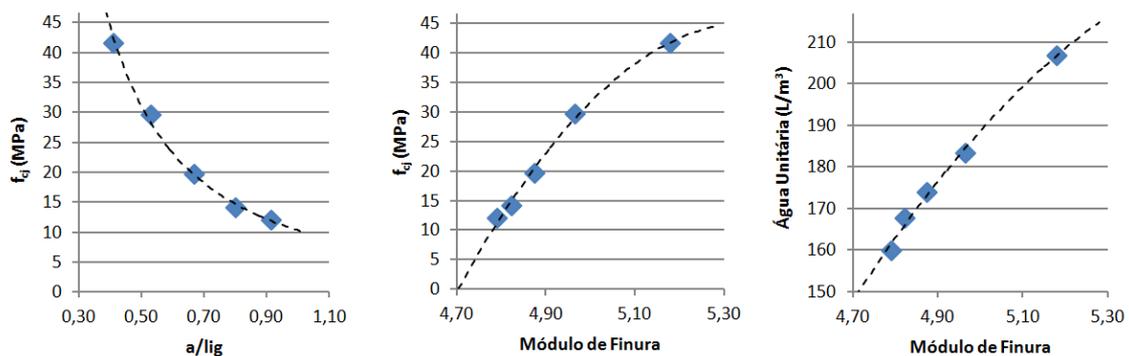


Figura 36 - Diagramas de dosagem da família de concretos de referência, segundo o método de dosagem de FURNAS.

Uma vez definida a resistência característica (f_{ck}) e o desvio padrão calcula-se a resistência média (f_{c_j}). A partir dos diagramas obtém-se inicialmente a relação água/ligante e módulo de finura dos agregados

e a partir do módulo de finura a água unitária (água por m³ de concreto). A partir do módulo de finura também é possível calcular a relação entre agregados miúdos e graúdos. O consumo de ligantes é facilmente calculado, pois já se conhece a relação água/ligantes e o consumo de água. O restante dos cálculos são meros cálculos de volumes e transformações de volume em massa com base nas densidades de cada material.

Na Tabela 6 mostram-se a composição de três concretos desta família e alguns parâmetros usualmente empregados na tecnologia de dosagem de concreto.

Tabela 6 – Concretos convencionais: composição e parâmetros tradicionais na tecnologia de dosagem de concreto

		C15	C25	C35
f_{ck} (MPa)		15	25	35
f_{cj} (MPa)		21,6	31,6	41,6
Composição em massa (kg/m ³)	Brita 25	725	714	708
	Brita 12,5	217	213	211
	Areia	891	775	633
	Cimento	278	381	495
	Água	175	189	206
Parâmetros	Teor de argamassa	55,4%	55,5%	55,1%
	Relação agregados/ligantes	6,60	4,47	3,13
	Relação água/ligantes	0,629	0,495	0,416
	Proporção água/materiais secos	8,3%	9,2%	10,2%
	Densidade saturada teórica (g/cm ³)	2,282	2,268	2,249

A mesma composição, porém, expressa em termos de proporção volumétrica, e alguns parâmetros adicionais encontram-se na Tabela 7

Tabela 7 - Concretos convencionais: composição volumétrica e parâmetros adicionais

		C15	C25	C35
Proporção volumétrica dos sólidos (%)	Brita 25	34,7	34,3	34,6
	Brita 12,5	10,5	10,2	10,3
	Areia	42,8	37,2	30,9
	Cimento	12,1	18,3	24,2
Proporção do Volume total (%)	Água	17,5	18,9	20,6
	Ar	4,0	4,0	4,0
Porosidade granular (%)	Finos	32,2	32,5	32,7
	Grossos	19,9	19,9	20,1
	Total	14,9	15,1	15,8
Distância média interpartículas (µm)	Finos (IPS)	0,156	0,129	0,110
	Grossos (MPT)	4,61	6,74	10,09
Intensidade de Ligantes 28 dias (kg/m ³ /MPa)		12,9	12,1	11,9

Nota-se que o método de dosagem escolhido (FURNAS) mantém o consumo de agregados graúdos praticamente constante, isto é, o teor de argamassa seca é mantido. Na argamassa há substituição da areia por cimento quando se deseja alcançar resistências superiores. Para manter a trabalhabilidade isto leva a um aumento de consumo de água. Em termos de distância média entre partículas isto significa que a troca de um material mais grosso (areia) por um mais fino (cimento) reduz o IPS, o que é parcialmente compensado por um aumento de água. A consequência é um aumento considerável de volume de pasta (mais cimento e mais água), aumentando de forma significativa o MPT. Por fim, nota-se que este aumento de consumo de cimento possibilita quase nenhum ganho de ecoeficiência, com a intensidade de ligantes variando de 12,9 a 11,9 kg de cimento por m³ de concreto por MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

Sobre estes concretos aplicou-se a avaliação teórica de variabilidade dos seguintes fatores:

- Variação da granulometria dos agregados (3 fatores);
- Desvio de pesagem dos agregados e do cimento (4 fatores);
- Variação da umidade dos agregados, resultando em variação do consumo de água (3 fatores);
- Morfologia dos agregados (3 fatores).

Têm-se um total de 13 fatores independentes para avaliar. Se em cada um forem analisados apenas 2 níveis, têm-se um total de $2^{13} = 8192$ combinações. Realizar esta avaliação completa experimentalmente é inviável, porém pode ser realizado com o sistema computacional proposto. Na Tabela 8 mostram-se os fatores e os níveis em que foram variados. O nível 0 corresponde aos fatores não afetados pela variabilidade. Está apenas indicado como referência, pois a inclusão no processamento elevaria o número de combinações de 2^{13} para 3^{13} , o que elevaria em cerca de 200 vezes o tempo de processamento, tornando inviável a análise. Como as variações propostas não são muito grandes, espera-se que o comportamento entre os níveis -1 e +1 seja aproximadamente linear, possibilitando assim apenas a simulação com as situações extremas.

Foram geradas todas as combinações (fatorial completo) entre os fatores e posteriormente executou-se o robô para aplicar as combinações no sistema e calcular os parâmetros de saída (respostas). Para cada resposta calculou-se então um modelo de regressão linear multivariado e com base na análise de variância julgou-se a adequação do modelo e significância dos fatores. A seguir mostram-se os resultados para os parâmetros que mais são afetados para os fatores em questão e que possuem forte relação com as características do concreto no estado fresco (reologia).

Tabela 8 - Fatores e níveis empregados na análise teórica da influência da variabilidade

nível	Granulometria			Desvio na pesagem			
	Brita 25	Brita 12,5	Areia	Brita 25	Brita 12,5	Areia	Cimento
+1	+ Grossa	+ Grossa	+ Grossa	+2%	+2%	+2%	+2%
0	Normal	Normal	Normal	0%	0%	0%	0%
-1	+ Fina	+ Fina	+ Fina	-2%	-2%	-2%	-1%

nível	Umidade			Forma (relação de aspecto)		
	Brita 25	Brita 12,5	Areia	Brita 25	Brita 12,5	Areia
+1	1,05	1,77	3,24	0,70	0,70	0,70
0	0,40	0,63	2,18	0,66	0,66	0,66
-1	0,12	0,23	1,4	0,62	0,62	0,62

4.3.1.1 Porosidade intergranular das partículas grossas

A dispersão dos resultados de porosidade intergranular das partículas grossas (maiores que 100 μm) é sintetizada na Figura 37. Independente da classe do concreto, a variabilidade tem efeito similar. 95% dos resultados se encontram entre os limites $\pm 1,3\%$ de porosidade, o que representa cerca de 7% de desvio em relação à mediana.

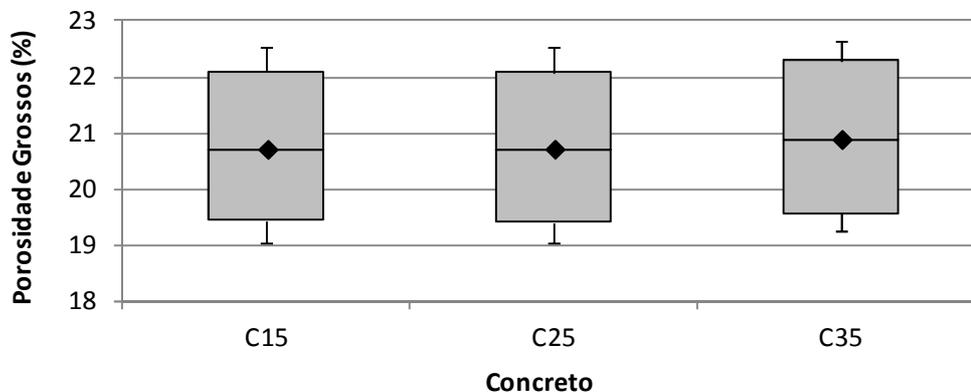


Figura 37 – Variabilidade da porosidade intergranular das partículas grossas após aplicação de todas as variabilidades dos fatores considerados

Como era de se esperar, a pesagem do cimento e as umidades não são significativas, pois não afetam a porosidade intergranular das partículas grossas. A influência dos demais fatores está mostrada na Tabela 9, por meio dos coeficientes da regressão linear. Coeficientes grandes em valores absolutos são mais influentes. Um sinal negativo do coeficiente indica que ao se passar do nível de fator -1 para o +1 há redução do valor da resposta analisada.

Tabela 9 - Coeficientes dos fatores na regressão linear para a porosidade das partículas grossas (> 100 µm) nos concretos convencionais

Fator	Coeficiente			
	C15	C25	C35	
média	20,732	20,735	20,908	
Granulometria	Brita 25	-0,294	-0,291	-0,267
	Brita 12,5	-0,130	-0,097	-0,018
	Areia	0,524	0,541	0,543
Desvio de pesagem	Brita 25	-0,015	-0,005	0,013
	Brita 12,5	0,009	0,012	0,016
	Areia	0,006	-0,007	-0,029
Morfologia	Brita 25	-0,212	-0,245	-0,303
	Brita 12,5	-0,093	-0,105	-0,124
	Areia	-0,467	-0,434	-0,379

Uma maneira mais clara de avaliar a participação de cada fator é calculando a relação entre o coeficiente e a média (Tabela 10 e Figura 38).

Tabela 10 - Influência relativa dos fatores sobre a porosidade das partículas grossas (> 100 µm) nos concretos convencionais

Fator	Coeficiente			
	C15	C25	C35	
Granulometria	Brita 25	-1,4%	-1,4%	-1,3%
	Brita 12,5	-0,6%	-0,5%	-0,1%
	Areia	2,5%	2,6%	2,6%
Desvio de pesagem	Brita 25	-0,1%	0,0%	0,1%
	Brita 12,5	0,0%	0,1%	0,1%
	Areia	0,0%	0,0%	-0,1%
Morfologia	Brita 25	-1,0%	-1,2%	-1,4%
	Brita 12,5	-0,4%	-0,5%	-0,6%
	Areia	-2,3%	-2,1%	-1,8%

Desvios na pesagem tem pouca influência sobre a porosidade dos grãos grossos. Morfologias menos alongadas propiciam redução da porosidade. Modificações granulométricas possuem impacto diverso. Nos agregados graúdos as granulometrias mais grossas reduzem a porosidade enquanto nos agregados miúdos causam aumento. A classe de resistência afeta pouco a porosidade. Caso se deseje atuar na direção de reduzir a variabilidade da porosidade dos materiais grossos, os fatores mais influentes são a granulometria e morfologia da brita 25 e areia.

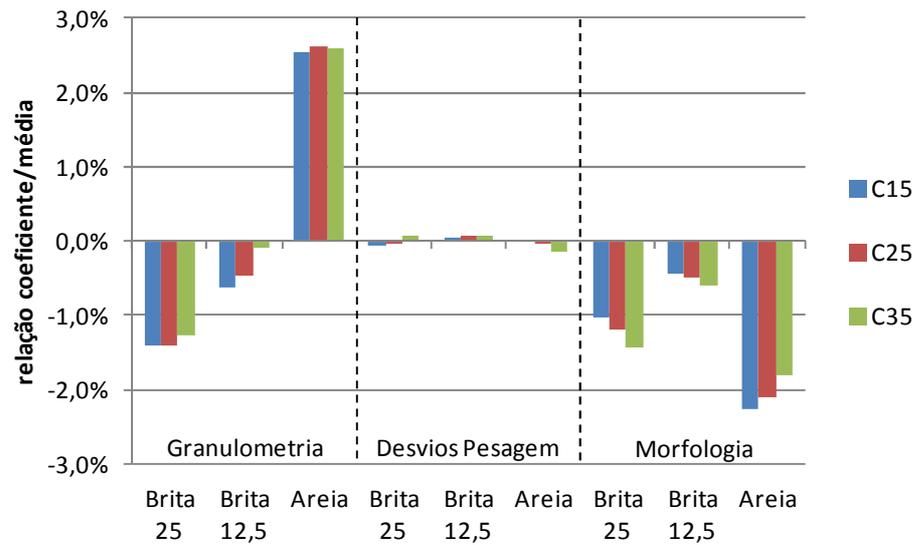


Figura 38 - Influência relativa dos fatores sobre a porosidade das partículas grossas (> 100 μm) nos concretos convencionais

Salienta-se que estas conclusões são particulares à família de concretos avaliados. Outras famílias, com outras propostas granulométricas poderão se comportar de forma diferenciada, o que ressalta o valor da análise realizada por meio do sistema computacional.

4.3.1.2 IPS

A dispersão dos resultados obtidos é sintetizada na Figura 39. Nota-se a redução do IPS com o aumento da resistência, já comentado anteriormente e também a redução da variabilidade.

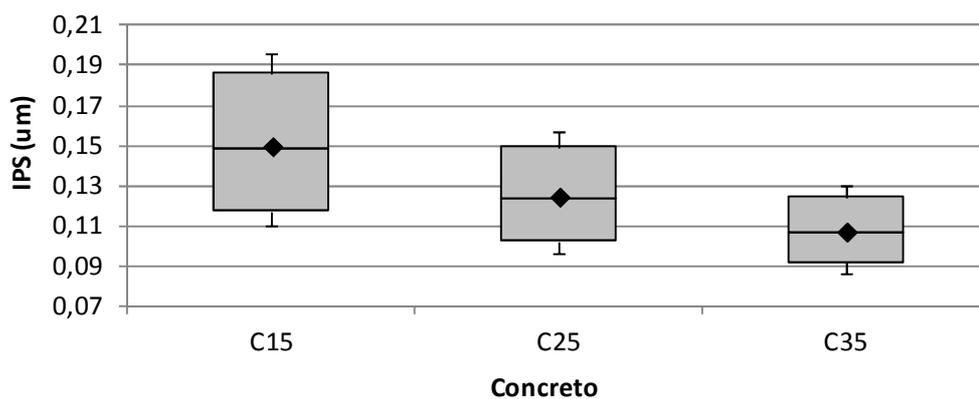


Figura 39 Variabilidade do IPS nos concretos convencionais, após aplicação de todas as variabilidades dos fatores considerados

A ANOVA indicou que os desvios na pesagem e de morfologia dos agregados graúdos podem ser desconsiderados. De fato o IPS analisa apenas as partículas finas (menores que $100\ \mu\text{m}$) e os agregados graúdos contribuem apenas com pouco volume de partículas nesta faixa granulométrica (apenas o material pulverulento). A influência dos demais fatores está ilustrada na Figura 40.

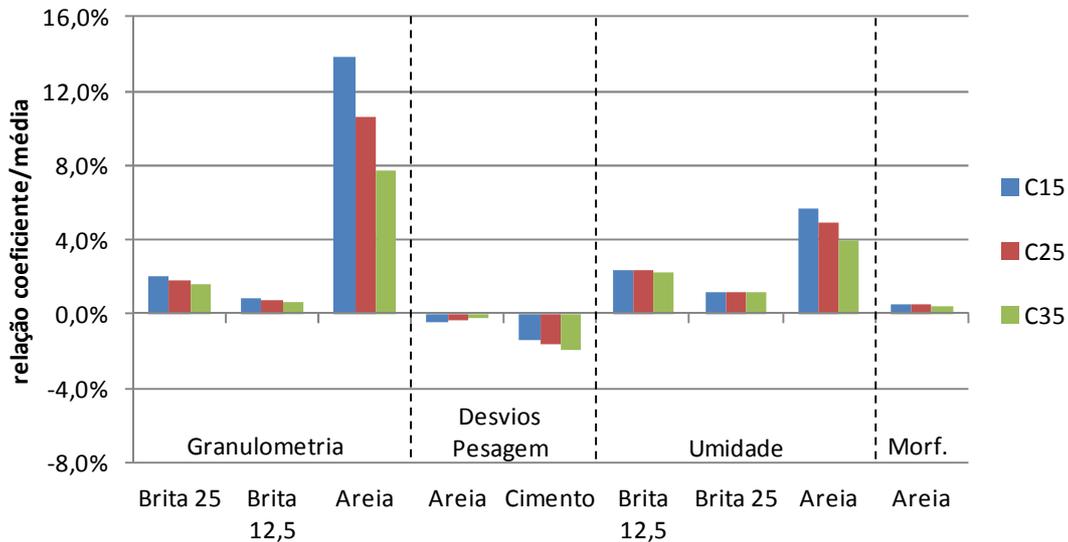


Figura 40 - Influência relativa dos fatores sobre o IPS nos concretos convencionais

A morfologia e desvios na pesagem da areia são pouco influentes. Já a granulometria da areia é o fator de maior impacto. Encontra-se a explicação para isto ao observar a presença de finos nesta areia (ver Figura 27), em maior ou menor teor conforme o nível escolhido para este fator. À medida que se avança para classes de maior consumo de cimento a influência vai diminuindo, pela redução do volume da areia e seus finos. Um segundo fator importante é a umidade da areia. Todos demais possuem impacto menor (no máximo 2%). Caso se deseje atuar na direção de reduzir a variabilidade do IPS, ações que atuem sobre redução da variabilidade da umidade e do volume de pulverulentos na areia são as medidas mais efetivas. Na prática atual, desvios de umidade são corrigidos por meio do ajuste de água na etapa final da produção, empregando um ensaio de trabalhabilidade (geralmente o ensaio de abatimento) como referência. Embora seja uma prática que permita a redução dos impactos devido à variabilidade da umidade, pode introduzir desvios adicionais, quando a mudança de trabalhabilidade é decorrente de outros fatores.

É interessante notar que o cimento atua neste caso como uma espécie de *buffer*. Na Figura 39 observa-se que a classe de maior consumo apresenta menor variabilidade total e pela Figura 40 observa-se que os dois fatores mais importantes são atenuados quando se utiliza consumos de cimento maiores.

4.3.1.3 MPT

A dispersão dos resultados obtidos é sintetizada na Figura 41. Nota-se o claro efeito do aumento de consumo de cimento com aumento da classe de resistência, refletindo em aumento de volume de pasta e consequente aumento do MPT. Frente a esta mudança as variabilidades são relativamente pequenas, além de serem relativamente constantes (90% dos resultados desviam da mediana em no máximo $\pm 20\%$).

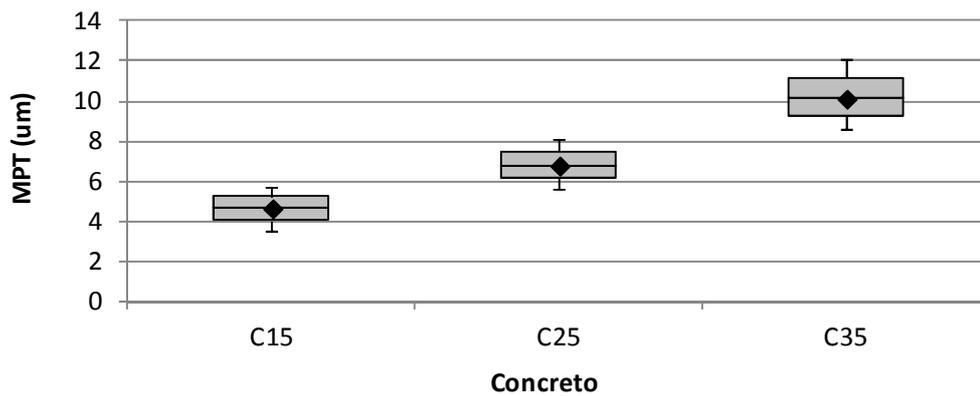


Figura 41 Variabilidade do MPT nos concretos convencionais, após aplicação de todas as variabilidades dos fatores considerados

Segundo a ANOVA todos os fatores possuem significância e a influência de cada um está ilustrada na Figura 42.

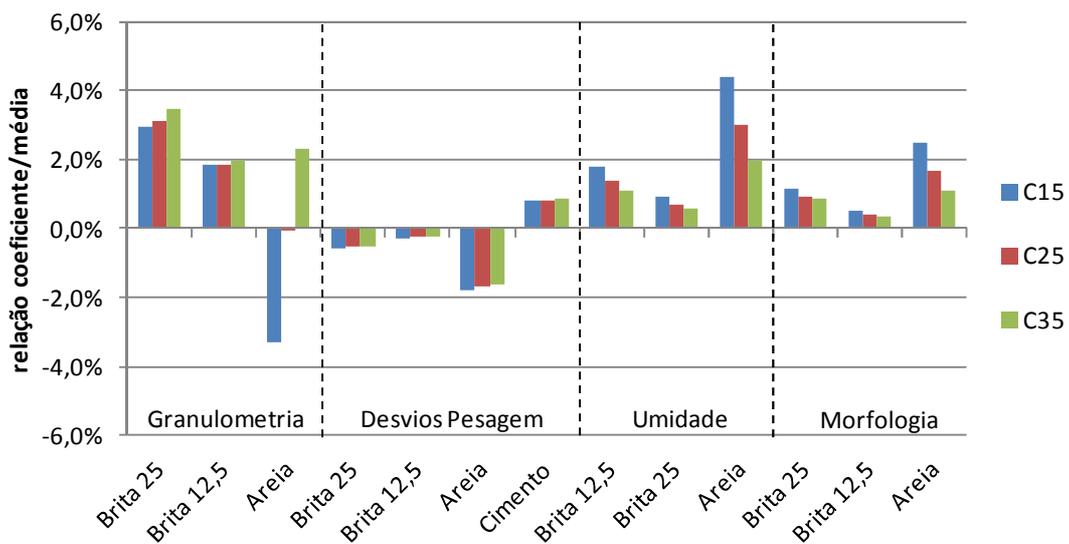


Figura 42 - Influência relativa dos fatores sobre o MPT nos concretos convencionais

A morfologia e desvios na pesagem dos agregados graúdos são pouco influentes. Os fatores da areia são os que mais impactam em cada grupo. Na granulometria possui inclusive forte dependência da classe de resistência, podendo-se ter efeito positivo ou negativo quando se troca uma granulometria por outra. A umidade da areia também exerce grande importância, principalmente nas dosagens de menor resistência, onde há presença de maior volume de areia.

4.3.2 Concreto de baixo consumo de cimento

O concreto analisado nesta sessão se refere a um concreto desenvolvido no trabalho de Damineli (2013). O foco principal deste trabalho foi a aplicação de conceitos tais como controle reológico e empacotamento e dispersão de partículas na busca de concretos de maior eficiência, graças a um reduzido consumo de ligantes. Todas as caracterizações necessárias dos materiais empregados podem ser encontradas no trabalho de Damineli. A composição e os principais parâmetros deste concreto estão listados na Tabela 11. Este concreto, denominado de C17 na referência original (DAMINELI, 2013), será aqui denominado de CBC (Concreto de Baixo consumo de Cimento), para não gerar confusão com classe de resistência.

Uma análise inicial das propriedades apresentadas mostra uma concepção completamente diferenciada em termos granulométricos. Mesmo optando por reduzir a extensão granulométrica (razão entre o tamanho da maior e menor partícula da distribuição granulométrica), ao trabalhar com menor proporção e dimensão máxima dos agregados graúdos, obteve-se um concreto com ótimo desempenho se comparado aos concretos anteriores. A porosidade dos finos é similar ao dos concretos anteriores, porém graças à maior atenção à dispersão pôde-se reduzir o consumo de água e mesmo assim obter IPS maior, possibilitando uma pasta com viscosidade adequada para a trabalhabilidade requerida. Nota-se também um MPT bem inferior aos concretos convencionais. A presença de pasta dispersa e com viscosidade adequada e granulometria adequada dos agregados permitiram, no entanto, que se atingisse espalhamento de 600 mm, valor geralmente encontrado apenas em concretos auto adensáveis. Não se trata, no entanto, de um concreto auto adensável, visto que a sua viscosidade é elevada, fato demonstrado pelo alto tempo para atingir espalhamento de 500 mm ($t_{50} = 19,7$ s). Cabe chamar atenção ainda ao consumo de cimento (191 kg/m^3) e relação água/ligantes (0,84), ambos valores que extrapolam os limites atualmente prescritos por norma (ABNT NBR 12.655:2006).

Tabela 11 – Concreto de baixo consumo de cimento: composição e parâmetros do concreto de baixo consumo de cimento

Denominação	CBC	
f_{cj} (MPa)	34,9	
Composição em massa (kg/m ³)	Cimento CPV1	191
	Fíler F1	168
	Fíler F5	85
	Areia 2RS	476
	Areia 4Pr	416
	Areia AG	515
	Agregado Graúdo PL	339
	Água	160
	Superplastificante (em pó)	1,4
Proporção volumétrica dos sólidos (%)	Cimento CPV1	8,0
	Fíler F1	8,0
	Fíler F5	4,0
	Areia 2RS	22,6
	Areia 4Pr	18,5
	Areia AG	23,4
	Agregado Graúdo PL	15,6
Proporção do Volume total (%)	Água	16,0
	Ar	4,0
Parâmetros Tradicionais	Teor de argamassa	85%
	Relação agregados/ligantes	9,1
	Relação água/ligantes	0,84
	Proporção água/materiais secos	7,3%
	Densidade saturada teórica (g/cm ³)	2,349
Porosidade granular (%)	Finos	33,53
	Grossos	23,35
	Total	16,02
Distância média interpartículas (microns)	Finos (IPS)	0,249
	Grossos (MPT)	2,412
Intensidade de Ligantes 28 dias (kg/m ³ /MPa)	5,5	

Com esta formulação de concreto realizou-se uma avaliação similar à feita com os concretos anteriores, com a finalidade de observar os impactos da variabilidade dos fatores. Para tanto utilizou-se os mesmos níveis de variação já citados (Tabela 8), agora, no entanto, sobre um total de 17 fatores, pois têm-se um agregado adicional. Os finos (cimento e fílers) foram considerados em conjunto. No caso das areias naturais o índice de forma variou entre 0,68 e 0,73. As granulometrias mais fina e mais grossa de cada material foram obtidas após aplicar variações de volumes retidos nas diversas classes granulométricas conforme os dados de variabilidade levantados (Figuras 27 a 29).

A seguir descreve-se os resultados obtidos nos principais parâmetros.

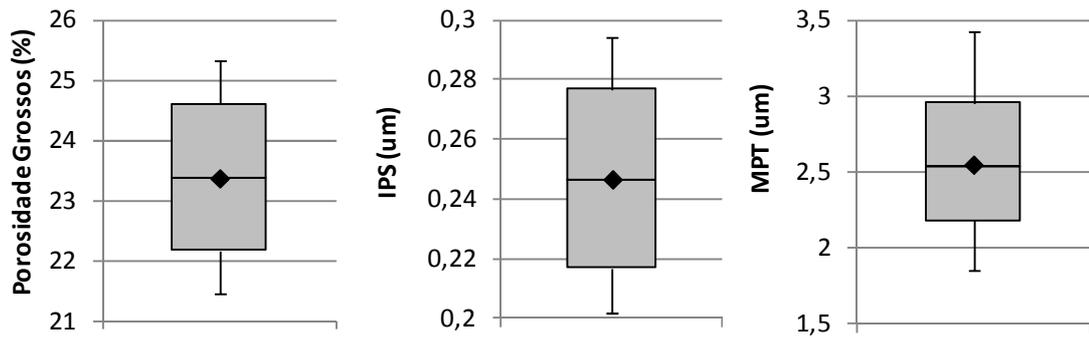


Figura 43 - Efeitos da variabilidade dos fatores sobre a porosidade dos grossos, IPS e MPT em um concreto com baixo consumo de cimento

A variabilidade da porosidade dos grossos (Figura 43 - esquerda) é semelhante aos concretos convencionais. Comparando com o concreto C35, que possui resistência mais parecida com o concreto de baixo consumo, observa-se que o IPS (Figura 43 - centro) é mais sensível às variabilidades. De fato a sensibilidade é próxima à do concreto C15, que possui cerca de 50% a mais de cimento. No MPT (Figura 43 - direita) o impacto da variabilidade é menor que nos concretos convencionais.

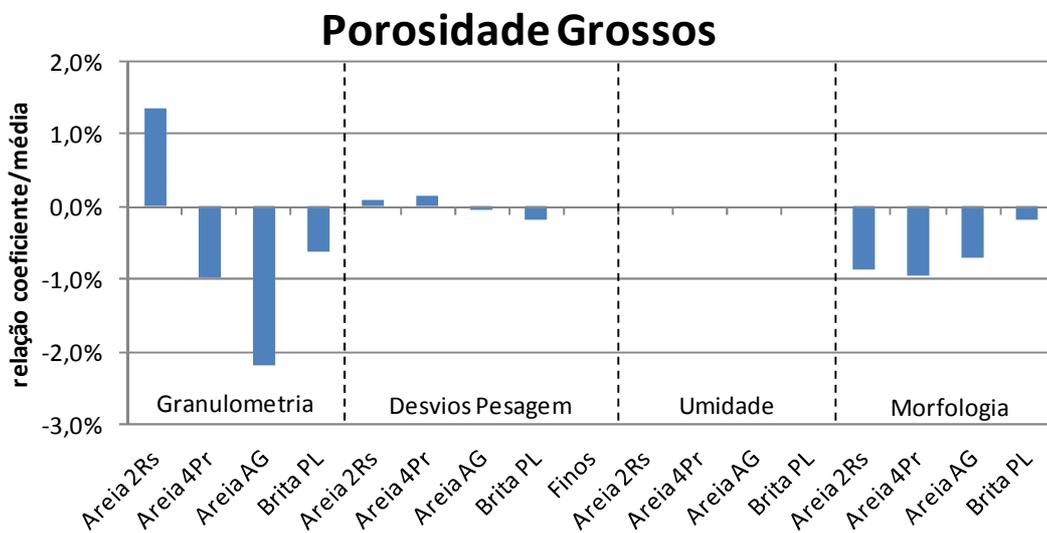


Figura 44 - Influência relativa dos fatores sobre a porosidade das partículas grossas (>100um) no concreto de baixo consumo de cimento

Como já esperado, novamente pesagem de cimento e umidade não influenciam a porosidade dos grossos (Figura 44). Desvios na pesagem tem pouca influência. Morfologias menos alongadas propiciam redução da porosidade. Alterações granulométricas são os fatores de maior impacto,

podendo ser positivos ou negativos, dependendo do agregado. Comparando com os concretos convencionais (Figura 38) a ordem de grandeza dos desvios é semelhante.

No IPS (Figura 45) a morfologia não tem influência significativa e as variações de granulometria e pesagem dos agregados possuem pequena influência. As variações de umidade e pesagem dos finos são os mais impactantes, chegando a 4%. Comparando com os concretos convencionais (Figura 40) notam-se desvios de mesma ordem de grandeza.

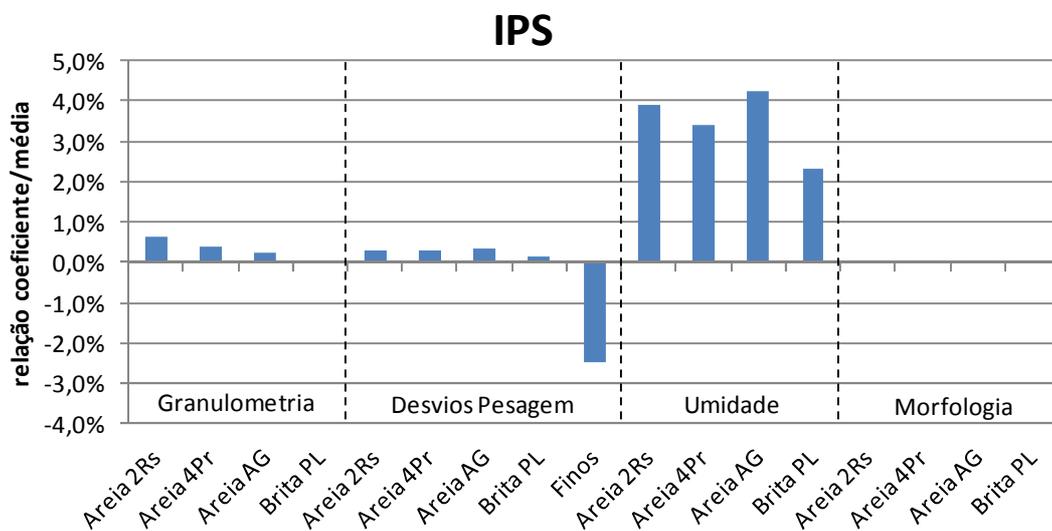


Figura 45 - Influência relativa dos fatores sobre o IPS no concreto de baixo consumo de cimento

No MPT (Figura 46) a morfologia e desvios na pesagem do agregado gráudo são pouco influentes. Variações granulométricas das areias são os fatores que mais impactam nesta propriedade, chegando a 5% de desvio. A umidade também tem contribuição considerável na variabilidade do MPT. Em geral não ocorrem variações acima do encontrado nos concretos convencionais (Figura 42).

De forma geral pode-se dizer que as propriedades que foram avaliadas não sofrem mais com as variabilidades dos fatores do que os concretos analisados anteriormente, o que pode ser consequência positiva de um método de formulação adequado, conforme foi proposto no trabalho do qual este concreto é oriundo.

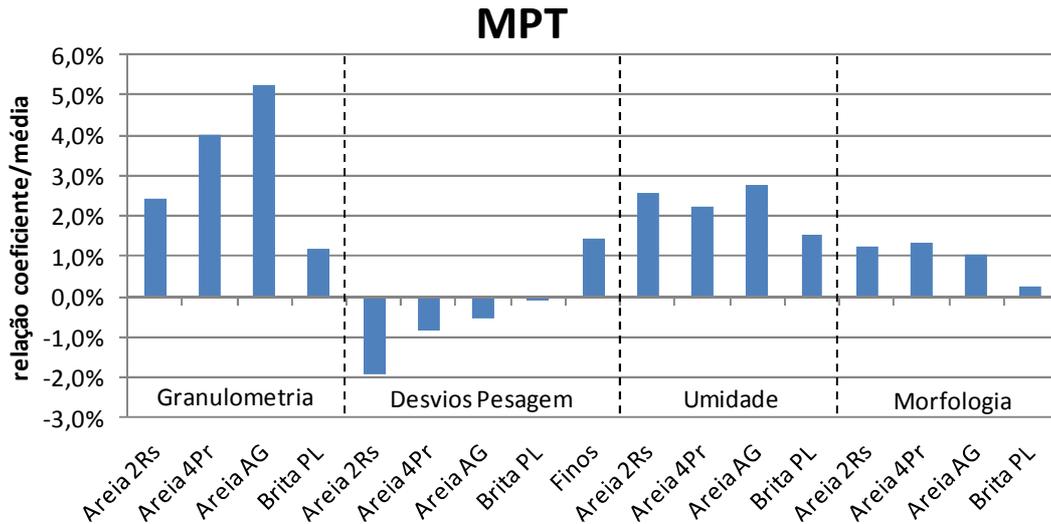


Figura 46 – Influência relativa dos fatores sobre o MPT no concreto de baixo consumo de cimento

4.4 Considerações finais do capítulo

Apresentou-se neste capítulo o desenvolvimento de um sistema computacional que permite calcular uma série de parâmetros de formulações de concretos. Aplicou-se o sistema desenvolvido para um estudo de simulação das consequências da variabilidade originária de variações granulométricas, morfológicas e de umidade dos agregados, bem como desvios de pesagem de todos os materiais. As características analisadas foram a porosidade de empacotamento e a distância de separação de partículas finas e grossas, parâmetros estes que, segundo a literatura, afetam a reologia de concretos. A metodologia para avaliação dos dados permitiu detectar quais os fatores mais influentes em cada resposta.

Caso haja uma definição de limites de aceitabilidade de cada parâmetro, esta metodologia pode inclusive ser utilizada para avaliações quantitativas de robustez. A frequência com que todos os parâmetros se encontram dentro dos limites pode ser considerada como indicador de robustez de uma dada formulação.

Deve-se reforçar a ideia de que as conclusões a respeito da importância de cada fator sobre as diversas respostas são específicas das formulações de concreto consideradas e das situações de variabilidade consideradas. Este fato torna o sistema ainda mais valioso, pois permite, sem custo experimental, realizar julgamentos a respeito da importância que cada fator tem sobre as respostas e a respeito da robustez de uma dada formulação de concreto. Pode-se assim comparar diferentes formulações e também avaliar impactos de mudanças no processo de produção.

5 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DE CONCRETOS DE BAIXO CONSUMO DE CIMENTO E PRODUÇÃO DO CONCRETO BASE

Neste capítulo apresentam-se informações sobre concretos com baixo consumo de cimento, sua importância no contexto técnico e ambiental atual, formas de reduzir o consumo e resultados já obtidos. Em seguida este capítulo trata do desenvolvimento de um concreto com baixo consumo de cimento, o qual será utilizado como base para o programa experimental de investigação de robustez. Embora o foco desta pesquisa não seja estudar métodos de dosagem que conduzem a menores consumos de cimento, julgou-se necessário apresentar as práticas empregadas e os resultados obtidos.

5.1 Introdução

5.1.1 Dados sobre consumo de cimento

Estima-se o consumo mundial de concreto em $10 \text{ km}^3/\text{ano}$ (FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012), o que o torna o produto fabricado pelo homem de maior consumo. Junto com outros produtos, como argamassas e fibrocimentos, o concreto demanda uma crescente fabricação de cimento. De 2005 a 2015 a produção mundial duplicou, e atualmente supera 4,6 bilhões de toneladas anuais, com expectativas de atingir 6 bilhões nas próximas décadas. Prognósticos realizados há poucos anos já se mostram superados, confirmando o forte ritmo de produção e consumo de cimento (Figura 47).

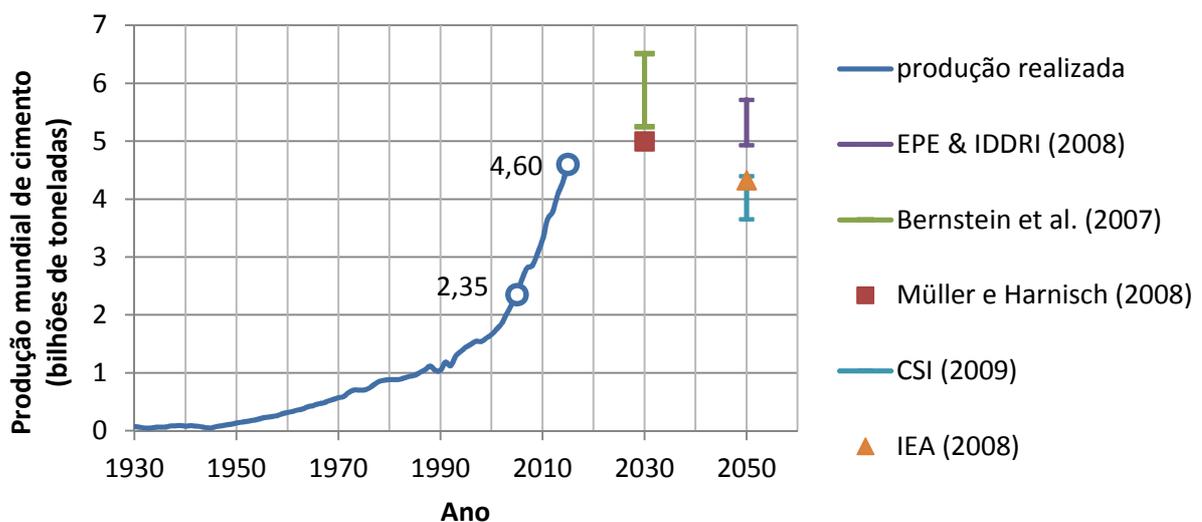


Figura 47 - Produção mundial de cimento e prognósticos. Rótulos numéricos indicam produção em 2005 e 2015. Fontes: (CEMBUREAU, 2015; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2010) (demais fontes indicadas no gráfico)

Concretos têm sido empregados desde a antiguidade e, na sua forma atual, empregando cimento Portland, é o material de construção de mais larga aplicação. Este sucesso se deve à facilidade de preparo, grande disponibilidade de materiais para fabricação, relativamente baixo custo destes materiais, facilidade de aplicação, liberdade de formatos dos elementos produzidos e obtenção de um material capaz de suportar esforços com boa resistência e durabilidade. Apesar de estudos sistemáticos sobre a dosagem e comportamento do concreto nas diversas fases de vida datarem do últimos cem anos apenas, têm-se aplicado concreto com muito sucesso, a despeito das variabilidades inerentes aos materiais que o constituem e aos processos de produção e uso posterior. Comparado ao volume de obras executadas, são muito raros os casos de falhas graves atribuídas essencialmente ao material concreto. Assim, pode-se dizer que se trata de um material robusto, graças à própria natureza do material potencializado pelo conhecimento que se tem a seu respeito, muito bem traduzido na forma de normatizações abrangentes.

Pelo ponto de vista ambiental, o concreto, se comparado com outros materiais estruturais, pode até ser considerado ambientalmente amigável, com baixo consumo de energia e emissão de CO₂ por volume de material. No entanto, a escala em que é consumido transforma-o em um dos principais atores no cenário de impactos ambientais, sendo responsável por 5 a 8% de todo CO₂ emitido pela humanidade (SHARP; GARTNER; MACPHEE, 2010) e que podem chegar a 30% em alguns cenários pessimistas (DAMINELI, 2013). Outros desafios ainda se apresentam neste cenário de consumo crescente de cimento: a redução da longevidade das atuais jazidas de matérias-primas e necessidade de licenciamento de novas fontes, necessidade de novas instalações industriais, maiores consumos de energia demandando investimentos na geração, maiores custos de distribuição e impactos na logística de transporte.

Não é possível enfrentar estas questões buscando um material que substitua o concreto, ou reduzir o ritmo de construção necessário para atender às demandas da sociedade. É preciso buscar soluções no próprio contexto do concreto, fazendo uso otimizado dos materiais, substituindo clínquer por materiais cimentícios suplementares, desenvolvendo ligantes com maior ecoeficiência, especificando materiais mais duráveis para novas estruturas, reabilitando as estruturas atuais e reciclando as antigas (FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012).

Neste cenário, vislumbra-se um grande potencial na redução do impacto ambiental por meio da redução do consumo de cimento, o constituinte responsável pela maior parte do impacto ambiental do concreto.

5.1.2 O que pode ser considerado concreto com baixo consumo de cimento

Em todo este trabalho, quando se cita concretos com baixo consumo de cimento, não se faz referência à massa de cimento empregada por unidade volumétrica do concreto, mas sim a um parâmetro de desempenho.

De forma bem geral, índices de desempenho relacionam Custos ou Impactos (C) com Benefícios ou Desempenho (B):

$$I_d = \frac{C}{B}$$

Particularizando para concretos, como custo pode-se considerar o consumo de cimento por m³ de concreto. O principal parâmetro de desempenho dos concretos estruturais, e o mais controlado, é a resistência à compressão, sendo a idade de 28 dias aceita como padrão na maioria dos casos. Assim, um índice de desempenho que leva em consideração a resistência à compressão é a quantidade de cimento em um m³ de concreto necessário para produzir 1 MPa de resistência à compressão.

Outros índices podem ser propostos, conforme o interesse particular de cada situação. Custos podem compreender além dos consumos de materiais ainda consumos de energia, custos financeiros, emissão de poluentes e resíduos, etc. Os benefícios podem considerar diferentes aspectos de desempenho do concreto, tais como diversas propriedades mecânicas (em pisos, por exemplo, a resistência à tração é de maior interesse), de durabilidade, vida útil, etc.

Damineli et al. (2010) realizaram um extenso levantamento de publicações nacionais e internacionais para avaliar em que níveis de consumo se encontram os concretos atualmente produzidos. Consideraram dois índices de desempenho: *Binder intensity* (bi) e *CO₂ intensity* (ci), onde *Binder intensity* (intensidade de ligantes) é o consumo relativo de todos os materiais ligantes em função da resistência à compressão aos 28 dias e *CO₂ intensity* (intensidade de CO₂) é a relação entre o total de CO₂ emitido na produção e transporte dos materiais que compõe o concreto e a resistência à compressão aos 28 dias. Por simplificação, devido à falta de informações detalhadas nas publicações pesquisadas, para a estimativa da emissão de CO₂ considerou-se apenas a quantidade relativa à produção da fração de clínquer presente nos traços. Esta é a parcela majoritária na emissão de CO₂. Também, por carência de informações detalhadas sobre a produção de cada cimento utilizado nas diversas publicações pesquisadas, assumiu-se neste levantamento emissão de 1 (uma) tonelada de CO₂ por tonelada de clínquer. A quantidade de clínquer no cimento foi estimada com base em médias dos limites estabelecidos pelas normas que controlam a fabricação de cimento. Portanto, este índice acaba refletindo apenas o consumo de clínquer, negligenciando as outras contribuições e a eficiência

da produção do fabricante de cimento, que pode ter emissões de CO₂ inferiores aos adotados, conforme a eficiência energética e combustível utilizado.

O resultado do levantamento mostrou valores de intensidade de ligantes variando de 4,3 a 29 kg.m⁻³.MPa⁻¹, sendo que a maior parte dos concretos se encontra entre 5 e 15 kg.m⁻³.MPa⁻¹. O resultado deste levantamento, juntamente com dados de outro trabalho recente, já foi apresentado anteriormente (Figura 1, pg.27). Damini et al. (2010) prevêem que consumos de ligantes abaixo de 5 kg.m⁻³.MPa⁻¹ sejam possíveis para concretos abaixo de 50 MPa em um futuro não muito distante. Sugerem, porém, que avaliações sistemáticas de durabilidade e comportamento na ruptura sejam realizadas, pois a resistência à compressão pode não ser o único parâmetro a definir o consumo mínimo de cimento.

Mantendo-se as resistências nos níveis que atualmente são empregadas na grande parte das obras (f_{ck} de 25 a 40 MPa), ao se promover a redução da intensidade de ligantes a consequência imediata é a redução do consumo total de cimento, atingindo-se assim o objetivo de reduzir o impacto ambiental atribuído à fabricação do grande volume de cimento.

5.1.3 O que esperar de um concreto com baixo consumo de cimento

A princípio, mantida a relação água/cimento, espera-se que a maior parte das propriedades não seja afetada ao se reduzir o consumo de cimento (FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012).

De fato, vários trabalhos já demonstraram a possibilidade de produzir concretos com baixo consumo de ligantes e características mecânicas adequadas para aplicações estruturais (CATOIA et al., 2008a, 2008b; DAMINELI, 2013; REBMANN, 2011). Vale ressaltar que muitos destes concretos apresentam inclusive relações água/ligantes maiores que a de concretos convencionais, indicando que nestes parte do cimento pode estar sendo subutilizado. Melhor dispersão e empacotamento da pasta de cimento, propiciando uma microestrutura com porosidade refinada e com menores defeitos críticos, contribuem para esta melhora de desempenho, mesmo com maiores relações água/ligantes.

Trabalhos recentes mostraram que é possível a redução no consumo de cimento sem que a durabilidade seja afetada. Em alguns aspectos é possível inclusive observar melhorias (REBMANN, 2011; WASSERMAN; KATZ; BENTUR, 2009). A redução do volume de água utilizado e sistemas de poros com maior tortuosidade, resultante de um esqueleto granular mais bem empacotado e de microestrutura hidratada refinada, possibilitam mecanismos alternativos que favorecem a durabilidade.

Há ainda aspectos específicos favorecidos com a redução do consumo de cimento, tais como redução do calor de hidratação, redução da retração plástica, redução da retração por secagem. Uma revisão sobre estes aspectos pode ser encontrada em Rebmann (2011).

Para alcançar estas condições de adequadas propriedades mecânicas e de durabilidade é primordial que se reduza ao máximo a porosidade do concreto, ou seja, deve-se manter a relação água/ligantes a mais baixa possível. Isto é necessário inclusive para que se obtenham resistências iniciais suficientes para evitar fissuração por secagem e retração. Assim, menores consumos de cimento exigem menores consumos de água. Enquanto houver água disponível para recobrir as partículas, preencher os espaços entre elas e proporcionar um afastamento, será possível obter misturas com mobilidade. A tecnologia de aditivos de alto desempenho tem proporcionado boas condições de dispersão das partículas, possibilitando altas reduções de água. Concretos com baixíssimas tensões de escoamento (tensão de cisalhamento mínima para iniciar o movimento) podem ser obtidos mesmo com baixos teores de água. Isto tem possibilitado a produção de concretos auto adensáveis com baixo consumo de cimento (CATOIA et al., 2008b; PEREIRA, 2010).

Porém, no estado fresco um segundo aspecto precisa ser considerado. A redução drástica de água eleva sobremaneira a concentração de sólidos, amplificando o contato direto entre as partículas. Nestas condições são necessárias tensões maiores para manter o fluxo do concreto, isto é, observa-se um aumento na viscosidade. Este aspecto não pode ser superado apenas com uso de aditivos superplastificantes.

O controle da reologia é, portanto, um dos maiores desafios no campo de baixos consumos de cimento. Sem comprometer o estado endurecido devem-se garantir as propriedades necessárias para a mistura, transporte e aplicação no estado fresco. Condições inadequadas no estado fresco podem inviabilizar a aplicação ou conduzir a decisões equivocadas, como adição indiscriminada de água, comprometendo assim as propriedades no estado endurecido.

5.1.4 Formas de reduzir o consumo de cimento

A produção de concretos com baixo consumo de cimento se baseia na sinergia de diversos fatores. Não é objetivo desta tese apresentar detalhes pormenorizados. Para tanto se recomenda a leitura do trabalho de Daminieli (2013). De forma resumida, as estratégias que possibilitam reduzir o consumo de cimento, sem comprometer as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, devem passar por:

- Dispersão das partículas: as partículas devem se encontrar dispersas, disponibilizando assim o máximo de água para promover a mobilidade dos grãos. Isto é obtido com o uso de aditivos dispersantes, que devem ser compatíveis com o tipo de cimento empregado. Deve-se trabalhar com teores adequados de aditivo para que se obtenha a máxima dispersão e que esta seja mantida por tempo adequado para a aplicação do concreto.
- Empacotamento de partículas: o máximo de espaço vazio deve ser preenchido por partículas, de modo que a água disponível seja empregada primordialmente para afastar as partículas. Para que o empacotamento seja efetivo presume-se que se tenha uma boa dispersão das partículas finas, pois a formação de aglomerados compromete o empacotamento, além de aprisionar água no seu interior.
- Uso de finos inertes: fílers de calcário ou quartzo podem ser empregados para aprimorar o empacotamento da pasta de cimento (quando são mais finos que o cimento) ou atuar como substituintes do cimento (quando são da mesma granulometria), não comprometendo assim o volume de pasta. Flatt, Roussel e Cheeseman (2012) comentam que o uso de fílers de calcário deve crescer em todos os lugares, enquanto que o de outros materiais dependerá da disponibilidade local. Como estes materiais não são calcinados, o seu uso em substituição ao clínquer contribui para reduções do gasto energético, da emissão de CO₂ e até do consumo de jazidas, uma vez que na calcinação de calcário cerca de 44% da massa é perdida na forma de CO₂.
- Uso de materiais pozolânicos: ao reagirem com hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento, permitem a geração de produtos hidratados adicionais, melhoria da zona de interface agregados/pasta e refinamento da estrutura de poros.
- Escolha adequada dos finos: além da granulometria e característica química, a morfologia dos grãos é fundamental para que a inclusão destes finos contribua com o projeto granulométrico e não cause aumento de demanda de água. Grãos mais esféricos apresentam menor área específica, requisitando menos água.
- Escolha adequada de agregados: a granulometria, proporção e morfologia dos agregados afetam o empacotamento. Portanto, escolhas adequadas podem reduzir o consumo de pasta necessária para promover a mobilidade dos grãos de agregados. Grãos de formato mais angular e alongado podem aumentar a viscosidade plástica do concreto, exigindo maior volume de pasta (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).
- Mistura adequada: tanto a sequência de mistura como o tipo e tamanho do misturador afetam a reologia do concreto fresco (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011). Portanto, opções que propiciem a homogeneidade e dispersão das partículas, tendem a produzir concretos que podem ser

executados com menores consumos de água, levando à redução de cimento. O momento mais adequado para adicionar aditivos também pode afetar a trabalhabilidade (CASTRO, 2007; HSU et al., 1999).

- Uso de técnicas de caracterização reológica: diversas técnicas podem ser empregadas, tanto durante as etapas iniciais da dosagem para estabelecer consumos de aditivos e proporções de materiais, na caracterização reológica em diferentes taxas de cisalhamento durante a confecção de traços experimentais, bem como no controle de qualidade posterior.
- Tipos de cimento: as propriedades físicas e químicas impactam no empacotamento da pasta e na cinética de hidratação.

5.2 Materiais e métodos aplicados no desenvolvimento de um concreto de baixo consumo de cimento

Apresenta-se a seguir os materiais e métodos aplicados no desenvolvimento de um concreto com baixo consumo de cimento, o qual será posteriormente sujeito a variabilidades induzidas dos fatores para avaliação da sua robustez.

5.2.1 Materiais

O intuito desta pesquisa é contribuir com a geração de conhecimento a respeito de concretos de baixo consumo de cimento que possibilite leva-los do laboratório de pesquisa para aplicações de campo. Uma adequada escolha de materiais pode propiciar maior redução de consumo de cimento, porém, se isto levar à escolha de materiais especiais, que possivelmente não estão disponíveis em muitos locais, a aplicação em larga escala se inviabiliza. Por este motivo partiu-se de um conjunto básico de materiais que são encontrados atualmente no mercado. Os agregados são os mesmos empregados por concreteiras da região de São Paulo e os cimento e aditivos são facilmente encontrados comercialmente. Além deste conjunto básico, têm-se ainda disponível um conjunto de materiais que possibilita promover as alterações que se deseja aplicar sobre o concreto básico. Todos estes são materiais disponíveis no mercado, porém não necessariamente de um mesmo fornecedor.

Para a produção do concreto base, foram empregados os seguintes materiais:

- Brita 1: proveniente de britagem comercial de granito;
- Brita 0: proveniente de britagem comercial de granito;

- Areia britada: proveniente de britagem comercial de granito, a mesma das britas acima;
- Areia natural: areia de quartzo de cava de granulometria fina;
- Cimento: CPV-ARI, produzido pela Holcim Brasil;
- Fíler P5: proveniente de moagem comercial de calcário e que possui granulometria próxima do cimento;
- Fíler P1: proveniente de moagem comercial de calcário e que possui granulometria mais fina que o cimento.

5.2.1.1 Amostragem e quarteamento

Atenção especial foi dada à amostragem dos materiais. Esta etapa muitas vezes negligenciada e que deveria ser rotina em todas as pesquisas se torna ainda mais importante neste caso onde se pretende avaliar uma série de desvios em relação a uma referência. Pretende-se, por exemplo, avaliar desvios de granulometria. Sabe-se que é natural ocorrer segregação em materiais granulares de tamanhos heterogêneos. A tendência dos materiais mais finos é percolar pelos vazios existentes entre os mais grossos, se concentrando no fundo do volume armazenado. A retirada de alíquotas destes recipientes com uma concha ou pá resulta em amostras com granulometria variada. (ALLEN, 1997; PETERSEN; MINKKINEN; ESBENSEN, 2005). É bem possível que esta variabilidade seja maior que a pretendida intencionalmente, influenciando fortemente os resultados e inviabilizando as análises.

O conjunto principal de agregados consistiu de uma amostra inicial de aproximadamente 2 toneladas de material. Todo material foi estendido em uma camada fina para secagem ao ar e em seguida realizou-se o quarteamento por meio de pilha alongada. Neste processo o material é acondicionado em baldes que são derramados lentamente ao longo da extensão da pilha. A pilha possuía cerca de 10 metros de comprimento, 90cm de largura e 30cm de altura. Após todo material da amostra inicial ter sido depositado na pilha seccionou-se com auxílio de chapas metálicas as duas pontas da pilha que foram redistribuídas sobre o corpo central. Finalmente o corpo central foi seccionado em 8 partes, sendo cada parte acondicionada em um tambor. A segunda etapa de quarteamento consistiu em reduzir o volume de cada tambor em volumes menores. Para isto utilizou-se um quarteador do tipo Jones (*Riffle Splitter*) composto de 16 calhas que alternadamente direcionam material para duas caixas distintas, separando a alíquota em duas partes. O volume total de cada tambor foi assim dividido inicialmente em duas metades, repetindo-se o processo até chegar a alíquotas equivalentes a 1/16 do volume do tambor, as quais foram armazenadas em sacos plásticos. A partir destas amostras foram obtidas as amostras para os ensaios de caracterização e ensaios do programa experimental. Novos quarteamentos com quarteador Jones foram utilizadas para obter os volumes de material necessário para cada ensaio. Na Figura 48 mostram-se etapas deste processo.



Figura 48 – Procedimento de quarteamento: deposição do material na pilha alongada (esquerda); seccionamento da pilha (centro); quarteamento secundário com quarteador tipo Jones (direita).

Uma avaliação da adequação do processo de quarteamento é mostrada na Figura 49. Para cada material foram realizados ensaios de granulometria de duas amostras. A sobreposição das curvas indica que o processo de quarteamento empregado contribuiu para produção de amostras similares. No entanto, algumas diferenças ainda são observadas. A maior diferença observada é do material mais grosso (Brita 1). Neste caso, a largura das calhas do quarteador, próxima da dimensão máxima das partículas, dificultou o fluxo e pode ter afetado ligeiramente a divisão do material. Foi necessário alimentar com menor velocidade e promover a desobstrução de calhas quando partículas travavam dentro das calhas³. No caso da brita 0 foi utilizado o equipamento Qicpic para obtenção da granulometria. Observa-se um desvio nas partículas acima de 10 mm, região onde este equipamento possui limitações devido à estatística reduzida de partículas. Poucas partículas entram na contagem pois a chance de se enquadrarem no campo de aquisição da imagem é tanto menor quanto maior é o seu tamanho. No caso da brita 0 apenas poucas partículas possuem esta dimensão e em uma das amostras a contagem destas partículas foi ligeiramente maior, afetando o resultado. Seria necessário um ensaio com maior volume para obter mais estabilidade no resultado nesta dimensão.

³ Em função desta dificuldade sugeriu-se a aquisição de um equipamento de maior porte ou outro tipo de quarteador para melhorar os resultados. Optou-se por um quarteador rotativo de maior porte, capaz de dividir lotes de cerca de 300 kg em 16 alíquotas. Este equipamento, porém, ficou disponível apenas após a conclusão da maior parte das etapas experimentais desta pesquisa.

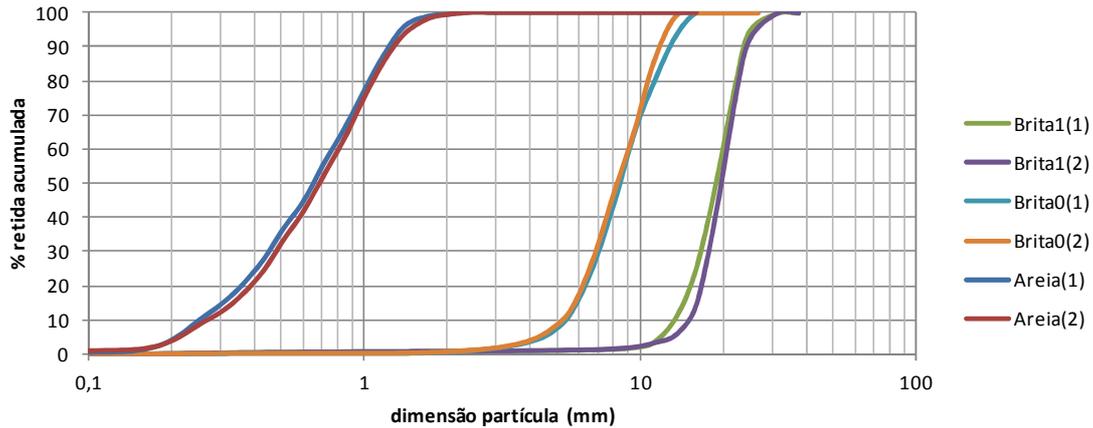


Figura 49 – Ensaio de granulometria de duas amostras diferentes do mesmo material, para Brita 1, Brita 0 e Areia britada.

5.2.1.2 Caracterização dos materiais

Na Tabela 12 citam-se os ensaios de caracterização física dos materiais empregados.

Tabela 12 - Caracterização física dos agregados e finos: técnicas, equipamentos e tamanho das amostras ensaiadas

Caracterização	Técnica	Equipamento (Fabricante)	Tamanho aproximado das amostras
Granulometria e morfologia de partículas	Análise de Imagens Dinâmicas	Brita 1: Camsizer (Retsch) Demais agregados: Qicpic (Sympatec)	Brita 1: 5 kg Brita 0: 2 kg Areias: 200 g
	Difração Laser	Helos (Sympatec)	1 g
Granulometria	Peneiramento	Série de peneiras conforme ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010 (a bronzinox)	Britas: 5 kg Areias: 500 g
Área superficial específica	BET com Nitrogênio	Belsorp (Bel Japan)	2 g
Densidade	Picnometria Hélio	MultiPycnometer (Quantachrome)	150 g

Na Figura 50 mostram-se as distribuições granulométricas dos agregados empregados para produção do concreto base. Foi empregada análise dinâmica de imagens, com dispersão via seca por ação apenas da gravidade, sendo o equipamento Camsizer para a Brita 1 e o equipamento Qicpic para os demais. A fração mais fina, inferior a 150 micrometros, foi analisada por difração laser. É possível empregar análise dinâmica de imagens para esta fração também, porém, seriam necessários acessórios de dispersão via úmida e lentes de maior ampliação, os quais não estavam disponíveis. Por este motivo optou-se por analisar esta fração por difração laser, compondo-se os resultados das duas técnicas, ponderando os resultados de cada uma pela fração volumétrica de material correspondente. Para compatibilizar os critérios de dimensões, optou-se na AID pelo diâmetro de área equivalente, isto é, o

diâmetro do círculo que possui mesma área que a área das projeções das partículas detectadas no ensaio. Este é o parâmetro de dimensão mais próximo do observado pela técnica de difração laser.

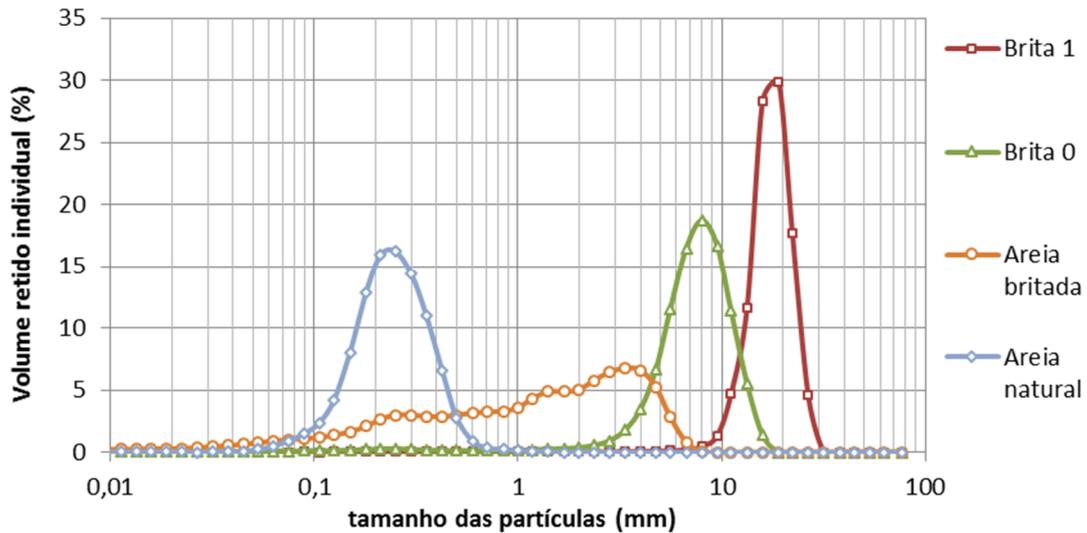


Figura 50 – Distribuição granulométrica discreta dos agregados empregados na dosagem do concreto base

Na Figura 51 mostram-se as distribuições granulométricas dos finos empregados, obtidas por difração laser. Dentre as opções de filer disponíveis, optou-se pelo P5 por possuir granulometria próxima do cimento, sendo, portanto, um material que pudesse substituir o cimento sem alterar significativamente o projeto granulométrico. O filer P1 foi escolhido por apresentar granulometria mais fina, sendo assim possível emprega-lo para modificar o empacotamento da pasta.

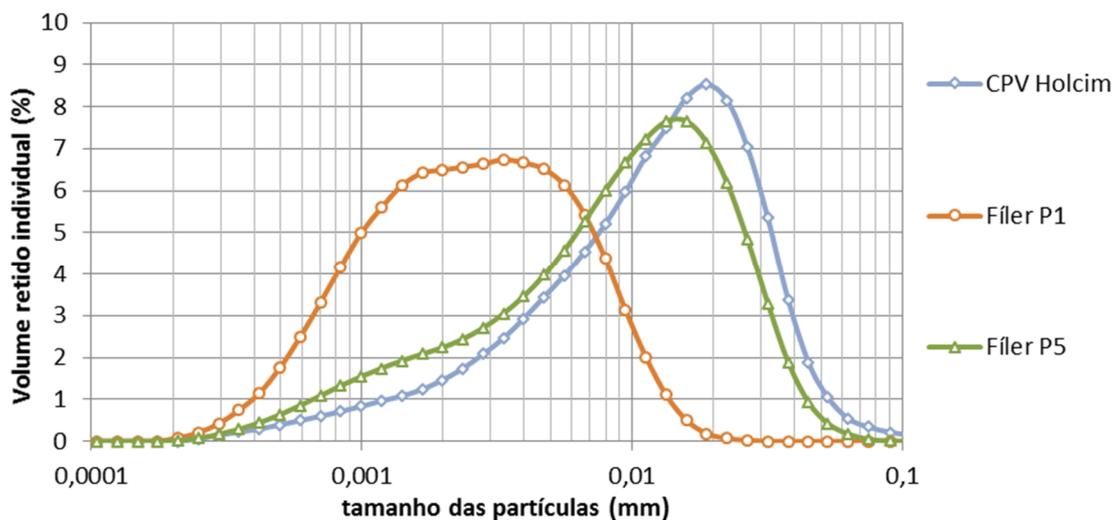


Figura 51 - Distribuição granulométrica discreta dos finos empregados

A distribuição de forma dos agregados está mostrada na Figura 52. Quanto mais à direita, mais próximo de um formato esférico são as partículas. Quanto mais à esquerda, mais alongado é o formato das partículas. Nota-se que, embora sejam oriundas da mesma jazida, o processo de britagem afetou o formato das partículas, sendo que a brita 1 possui partículas com formatos menos alongados que a brita 0 e a areia artificial.

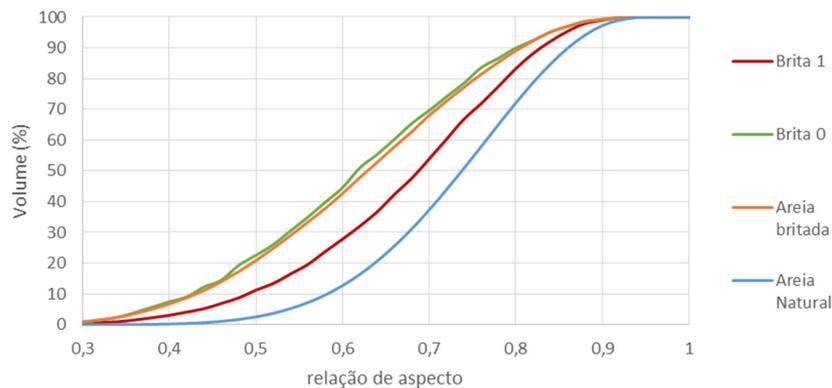


Figura 52 - Distribuição dos grãos em função do parâmetro morfológico “relação de aspecto”

Na Tabela 13 resumem-se alguns parâmetros granulométricos e morfológicos, além dos valores de densidade e área específica. Pela técnica BET, não é possível determinar a área específica dos agregados graúdos. Os seus valores são muito baixos, e se referem primordialmente à área superficial da pequena parcela de materiais finos (pó) que acompanha estes agregados. Para as situações avaliadas nesta pesquisa, estas áreas superficiais podem ser desprezadas.

Tabela 13 –Parâmetros granulométricos e morfológicos, densidade e área específica dos materiais empregados para produção do concreto base

Material	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	Módulo de finura	Relação de aspecto médio	Densidade (g/cm ³)	Área específica (m ² /g)
CPV-ARI	0,0023	0,0119	0,0296	-	-	3,091	1,54
Fíler P1	0,00070	0,0023	0,0071	-	-	2,799	3,73
Fíler P5	0,0014	0,0089	0,0236	-	-	2,790	1,16
Areia natural	0,127	0,218	0,353	1,28	0,728	2,651	0,26
Areia britada	0,101	1,16	3,87	3,31	0,621	2,704	0,20
Brita 0	3,82	6,99	10,5	6,09	0,608	2,702	-
Brita 1	11,5	16,1	21,3	7,46	0,672	2,705	-

Notas:

- D₁₀, D₅₀ e D₉₀, se referem ao percentil de 10%, 50% e 90%, isto é, 10%, 50% e 90%, respectivamente, do volume de partículas possui dimensão inferior a estes valores.
- Módulo de finura conforme definição da ABNT NM 248(2001)

5.2.2 Otimização da pasta por meio de ensaios reológicos

A redução do consumo de água ao máximo possível é um dos pilares para obtenção de concretos com menores consumos de cimento. Reduções progressivas de água conduzem a pastas cada vez mais concentradas, o que pode levar a condições reológicas críticas. Um projeto granulométrico otimizado e a dispersão o mais completa e estável possível são os mecanismos que possibilitam a redução do consumo de água sem resultar em pastas com trabalhabilidade inadequada.

Por ser a reologia a chave que permite a redução de consumo de água, e conseqüentemente de cimento, optou-se por desenvolver a pasta com base em conceitos e ensaios reológicos. Os seguintes aspectos foram avaliados por meio de ensaios reológicos:

- avaliação da compatibilidade cimento-aditivo, permitindo escolher dentre diversos aditivos disponíveis o mais eficiente;
- determinação do teor de saturação do aditivo;
- avaliação da estabilidade reológica no tempo;
- avaliação do efeito do teor de fílers sobre as propriedades reológicas.

O tipo de ensaio escolhido para avaliar estes quesitos foi o ensaio de reometria de fluxo com geometria de placas paralelas. Neste ensaio uma pequena amostra de pasta é depositada entre duas placas (discos) planas. Enquanto uma das placas permanece em repouso, à placa oposta é aplicada uma rotação. O equipamento (reômetro) controla esta rotação e obtém como resultado o torque necessário para mantê-la. Os dados de rotação e torque são convertidos em taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento, respectivamente, permitindo avaliar as tensões necessárias para manter o cisalhamento em diferentes taxas.

O procedimento de ensaio adotado seguiu as seguintes etapas:

1. Pesagem da amostra de finos (100 gramas), da água (conforme a relação água/cimento adotada) e do aditivo (conforme o teor avaliado);
2. Diluição do aditivo na água e adição ao cimento, misturando mecanicamente com hélice naval em uma rotação branda (400 rpm) por 60 segundos;
3. Mistura da pasta em um dispersor de alta rotação (9.000 rpm) com hélice tipo cowles (Figura 53-esquerda) por 120 segundos, para dispersão mecânica dos aglomerados e homogeneização;
4. Com ajuda de uma seringa, dois mililitros da pasta são transferidos para a base de ensaio do reômetro;

5. Aproximação da placa superior sobre a amostra, esmagando-a até atingir a espessura de ensaio (1000 micrometros);
6. Estabilização da temperatura com ajuda de uma placa Peltier integrada ao reômetro;
7. Em seguida inicia-se o ensaio de fluxo com base no programa de fluxo pré-programado. Optou-se por um programa compostos por dois ciclos de aceleração e desaceleração sequenciais, com taxa de cisalhamento variando linearmente entre 0 e 300 s^{-1} , aquisição linear de pontos a cada 1 segundo e duração de 30 segundos para cada rampa.

O reômetro utilizado foi um DHR-3 (TA Instruments) (Figura 53-centro) com geometria de placa paralela de 40mm de diâmetro com revestimento superficial rugoso (Figura 53-direita).



Figura 53 - Ensaio de reologia de pasta: misturador cowles usado para dispersar a pasta em alta rotação (esquerda); reometro DHR-3 (centro); geometria de placa paralela (direita)

A primeira etapa da otimização da pasta consistiu na escolha do aditivo. Para possibilitar altas reduções de água, optou-se por aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos. Foram avaliados três produtos comerciais: Glenium 51, Adva 518 e Adva 527. Manteve-se a relação água/cimento fixa em 0,30 e avaliaram-se as propriedades reológicas para teores crescentes de aditivo. Na etapa inicial apenas se avaliou a reologia para baixos tempos de vida (7 minutos após o contato do cimento com a água). Analisaram-se diversos parâmetros reológicos, tais como tensão de cisalhamento em baixas taxas de cisalhamento, viscosidade aparente em altas taxas, cálculo de áreas de histerese. Também foram ajustados modelos reológicos aos pontos experimentais, obtendo os parâmetros destes modelos.

Dentre os aditivos buscou-se aqueles que proporcionaram menores tensões de escoamento e viscosidades, bem como menores áreas de histerese. Após os testes iniciais, nos teores próximos dos que se julgou como sendo os teores de saturação realizou-se ainda medidas em tempos de vida superiores (até 60 minutos após a mistura), buscando avaliar a estabilidade no tempo.

Após esta etapa, optou-se por um dos aditivos, com o qual prosseguiu-se a otimização da granulometria da pasta. Para cada material (cimento, fíler P5 e fíler P1) determinou-se o teor de saturação do aditivo, isto é, o teor a partir do qual um acréscimo de aditivo proporciona alteração reológica irrelevante. A seguir avaliaram-se misturas binárias e ternárias de cimento com os dois fílers, nas seguintes proporções em volume:

- 50% de cimento, fíler P5 variando de 0 a 50% em intervalos de 10% e fíler P1 para complementar o volume de 100%;
- 40% de cimento, fíler P5 variando de 0 a 60% em intervalos de 10% e fíler P1 para complementar o volume de 100%;
- 30% de cimento, fíler P5 variando de 0 a 70% em intervalos de 10% e fíler P1 para complementar o volume de 100%.

Nestas misturas, manteve-se o teor de aditivo total equivalente ao necessário para obter a dispersão ótima de cada um dos componentes, isto é, calculou-se o teor de aditivo com base na média ponderada do teor de saturação de cada material pelo seu volume presente na mistura.

5.2.3 Mistura e ensaios reológicos do concreto

Os concretos produzidos ao longo de toda esta pesquisa foram misturados em um reômetro de concreto o qual permite adquirir informações reológicas ao longo de todo o processo de mistura. Mais informações sobre as características do reômetro e geometria de misturas estão descritos na sessão 7.1.1. Com a finalidade de avaliar a reologia em dois níveis de escala, adotou-se uma sequência de mistura que forma primeiro a argamassa, à qual em seguida é adicionado o agregado graúdo para formar o concreto. A sequência de mistura é composta pelas seguintes etapas:

1. posicionamento da geometria de mistura a 1 mm do fundo do recipiente;
2. adição da argamassa seca (areias e finos): duração = 1 minuto;
3. homogeneização da argamassa seca: duração = 3 minutos;
4. adição da água com o aditivo diluído: duração = 1 minuto;
5. homogeneização inicial da argamassa: duração = 2 minutos;

6. paralização por 1,5 minutos para raspagem de porções secas aderidas às paredes do recipiente;
7. homogeneização final da argamassa: duração = 3,5 minutos;
8. ciclo de cisalhamento da argamassa: duração total = 2 minutos;
9. reposicionamento da geometria de ensaio a 30 mm do fundo do recipiente para evitar o travamento (esmagamento) de partículas de agregado graúdo entre o fundo do recipiente e a geometria de mistura;
10. adição dos agregados graúdos: duração = 30 segundos;
11. homogeneização do concreto: duração = 5 minutos;
12. ciclo de cisalhamento do concreto: duração total = 2 minutos.

Ao longo da mistura a rotação é mantida constante em 126 rpm. As etapas citadas estão ilustradas na Figura 54. O processo de mistura é relativamente longo, o que, no entanto, se mostrou necessário para que se alcançasse estabilidade nas diversas etapas, afim de possibilitar análises reológicas em condições estáveis nesta pesquisa.

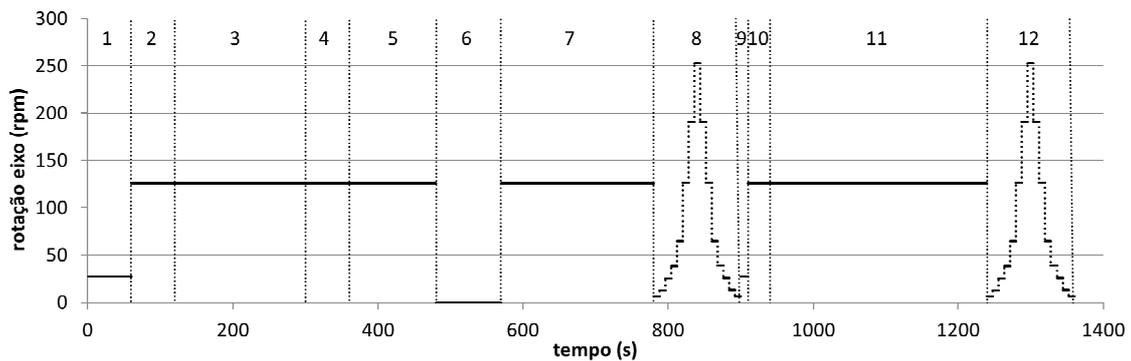


Figura 54 – Sequência completa de mistura, incluindo dois ciclos de cisalhamento (ver detalhes dos ciclos na Figura 55)

Avaliar o torque em rotações variadas permite analisar o comportamento reológico do concreto quando submetido a taxas de cisalhamento variáveis, desde baixas deformações até cisalhamentos intensos. Assim é possível observar a tensão de escoamento (representada aqui por torques em rotações muito baixas) e a viscosidade aparente (representada aqui como a relação entre o torque e a rotação) em variados níveis de rotação. Para avaliar o comportamento reológico os ciclos de cisalhamento constituíram-se de um trecho de aceleração, com 8 patamares de 8 segundos cada um, seguido de um trecho de desaceleração, também com 8 patamares. Na Figura 55 está ilustrado o ciclo de cisalhamento empregado, o qual é o mesmo para a argamassa e para o concreto, respectivamente as etapas 8 e 12 da Figura 54.

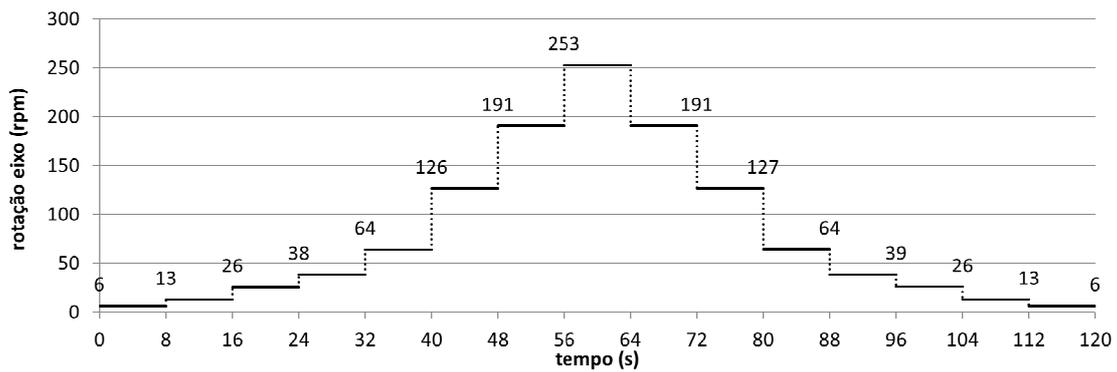


Figura 55 – Programação do ciclo de cisalhamento

Além da caracterização reológica por meio de reometria, avaliou-se ainda o espalhamento pelo método do cone de Abrams (*slump flow test*), ensaio tradicionalmente aplicado a concretos autoadensáveis (ABNT NBR 15823-1:2010). Por meio deste ensaio mediu-se o diâmetro médio de espalhamento e o tempo até atingir um espalhamento de 500 mm. Nos casos em que se observou uma separação de fases entre a argamassa e os agregados graúdos, avaliou-se ainda a distância média entre as bordas do espalhamento da argamassa e a posição até onde foram transportados os agregados graúdos.

Determinou-se ainda a densidade no estado fresco e o teor de ar pelo método pressométrico.

5.2.4 Caracterização mecânica do concreto endurecido

Para cada concreto foram moldados oito corpos de prova cilíndricos 10x20, adensados por meio de vibração com mesa vibratória, curados em câmara úmida por 28 dias.

A caracterização mecânica compreendeu ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias de idade em corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm. Foram utilizados três corpos de prova para determinação do módulo de elasticidade e cinco para determinação da resistência à compressão. Antes do ensaio de ruptura, as faces superiores e inferiores foram retificadas por meio de retífica.

Os ensaios de compressão e módulo de elasticidade seguiram às recomendações das normas ABNT NBR 5939 (2007) e NBR 8522 (2008), respectivamente.

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Desenvolvimento da pasta

Iniciou-se o desenvolvimento do concreto pela pasta. O objetivo foi obter uma pasta com reduzido teor de cimento e baixo consumo de água, empregando os conceitos de dispersão e empacotamento de partículas e aplicação de técnicas reológicas.

5.3.1.1 Estudo de dispersão da pasta de cimento

Um resultado típico do ensaio reológico da pasta, conforme descrito anteriormente, é mostrado na Figura 56. Trata-se da pasta produzida com teor de 0,6%⁴ do aditivo Glenium® 51.

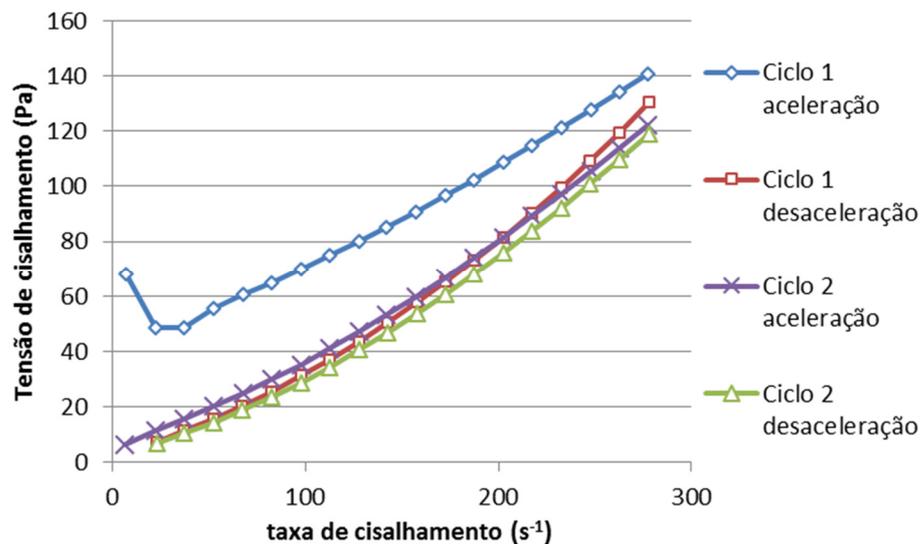


Figura 56- Resultado típico do ensaio reológico de fluxo com pastas aditivadas com superplastificante

Observa-se os dois ciclos com suas rampas de aceleração e desaceleração. Nota-se claramente um trecho inicial da aceleração do ciclo 1 com tensões que divergem do comportamento do restante da curva. Também toda a rampa de aceleração do ciclo 1 possui tensões superiores às demais rampas. Graças à alta energia de mistura e ao efeito de dispersão do aditivo, pode-se considerar que ao fim do processo de mistura, a pasta encontra-se em boa situação de dispersão. Porém, até o início do ciclo 1 no reômetro decorrem cerca de 4 minutos, tempo necessário para colocação da amostra no reômetro, posicionamento da geometria de ensaio sobre a pasta até obter uma lâmina de 1mm de espessura e retirada de eventuais excessos de pasta. Nos casos em que a ação dispersante do aditivo não é

⁴ O consumo de aditivo neste texto sempre se refere ao teor total de aditivo (sólidos + líquidos).

suficiente, seja por falta de eficiência do aditivo ou por emprego de um teor inadequado, uma reaglomeração pode ocorrer, elevando as tensões de cisalhamento. Ao longo do ensaio estes aglomerados vão sendo gradativamente quebrados, razão pela qual há uma redução nas tensões de cisalhamento, resultando em um segundo ciclo no qual as tensões na aceleração são muito próximas das tensões na desaceleração.

O ensaio reológico por meio de reômetro conforme realizado nesta pesquisa permite obter uma diversidade de parâmetros reológicos. Considerou-se os seguintes:

- Para cada rampa, a tensão de cisalhamento em baixa taxa de cisalhamento. Esta tensão pode ser correlacionada a situações em que se inicia (no caso das rampas de aceleração) ou finaliza (no caso das rampas de desaceleração) o movimento do concreto. O ensaio de abatimento de concreto, por exemplo, é um caso onde o concreto passa de uma situação de baixa taxa de cisalhamento (deformação devido ao seu peso próprio) para o repouso.
- Para cada rampa, a viscosidade aparente (razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento) em diferentes taxas de cisalhamento. Em especial há interesse em avaliar a viscosidade aparente em altas taxas de cisalhamento, as quais podem ocorrer durante a mistura em misturadores de maior energia ou em situações de bombeamento;
- Para cada rampa se ajustou os modelos reológicos de Bingham (Equação 17) e Herschel-Bulkley (Equação 18) aos dados experimentais, determinando os correspondentes parâmetros (BINGHAM, 1916; HERSCHEL; BULKLEY, 1926);
- Para cada ciclo calculou-se a área compreendida entre as rampas de aceleração e desaceleração, no gráfico tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento. Esta área possui relação com a estabilidade da pasta, expressando a energia necessária para quebrar os aglomerados durante o ciclo, conforme já discutido. Os fenômenos de aglomeração e desaglomeração em pastas de cimento, junto com outros fatores, são os responsáveis pelos comportamentos tixotrópicos ou reopéxicos (PILEGGI, 2001). Esta área é geralmente denominada de área de histerese, sendo que áreas positivas se referem a comportamentos tixotrópicos (quando a desaglomeração é mais rápida que a reaglomeração, ao longo do ciclo) e áreas negativas se referem a comportamentos reopéxicos (quando a aglomeração é mais rápida que a desaglomeração);
- É possível também calcular a área de histerese entre trechos correspondentes dos dois ciclos, isto é, a área entre a rampa de aceleração do ciclo 1 e 2 ou entre a rampa de desaceleração do ciclo 1 e 2;

(Bingham) $\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$ Equação 17

(Herschel-Bulkley) $\tau = \tau_0 + K_H \dot{\gamma}^n$ Equação 18

sendo

τ : tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$: taxa de cisalhamento (s^{-1})

τ_0 : tensão de escoamento (Pa)

η_p : viscosidade plástica (Pa.s)

n : índice de comportamento de fluxo (adimensional)

K_H : índice de consistência ($Pa \cdot s^n$), segundo modelo de Herschel-Bulkley

Pode-se assim avaliar pelo menos sete parâmetros diferentes para cada rampa, além das áreas de histerese, totalizando 32 parâmetros numéricos.

Na Figura 57 mostram-se alguns dos parâmetros avaliados em função do tipo e teor de aditivo. Os ensaios foram conduzidos com três aditivos diferentes, com relação água/cimento fixa (0,30) e em teores de aditivo variando desde baixa até alta concentração, extrapolando inclusive o teor recomendado pelos fabricantes. Nota-se que em todos os casos apresentados ocorre uma redução do parâmetro à medida que se aumenta o teor de aditivo. A partir de certo ponto, teores maiores não trazem mais alteração significativa. Este ponto é denominado de ponto de saturação. Baixos valores de viscosidade, tensão de escoamento e área de histerese indicam que em valores iguais ou superiores aos pontos de saturação a pasta encontra-se bem dispersa e estável.

Comparando os três aditivos, nota-se um desempenho superior dos Advas, em especial o 527. O teor de saturação varia de acordo com o aditivo e o parâmetro escolhido. O Adva 527 atinge o ponto de saturação com 0,6 % a 0,8% para a maioria dos parâmetros. Já o Adva 518 necessita de um pouco mais para atingir o teor de saturação.

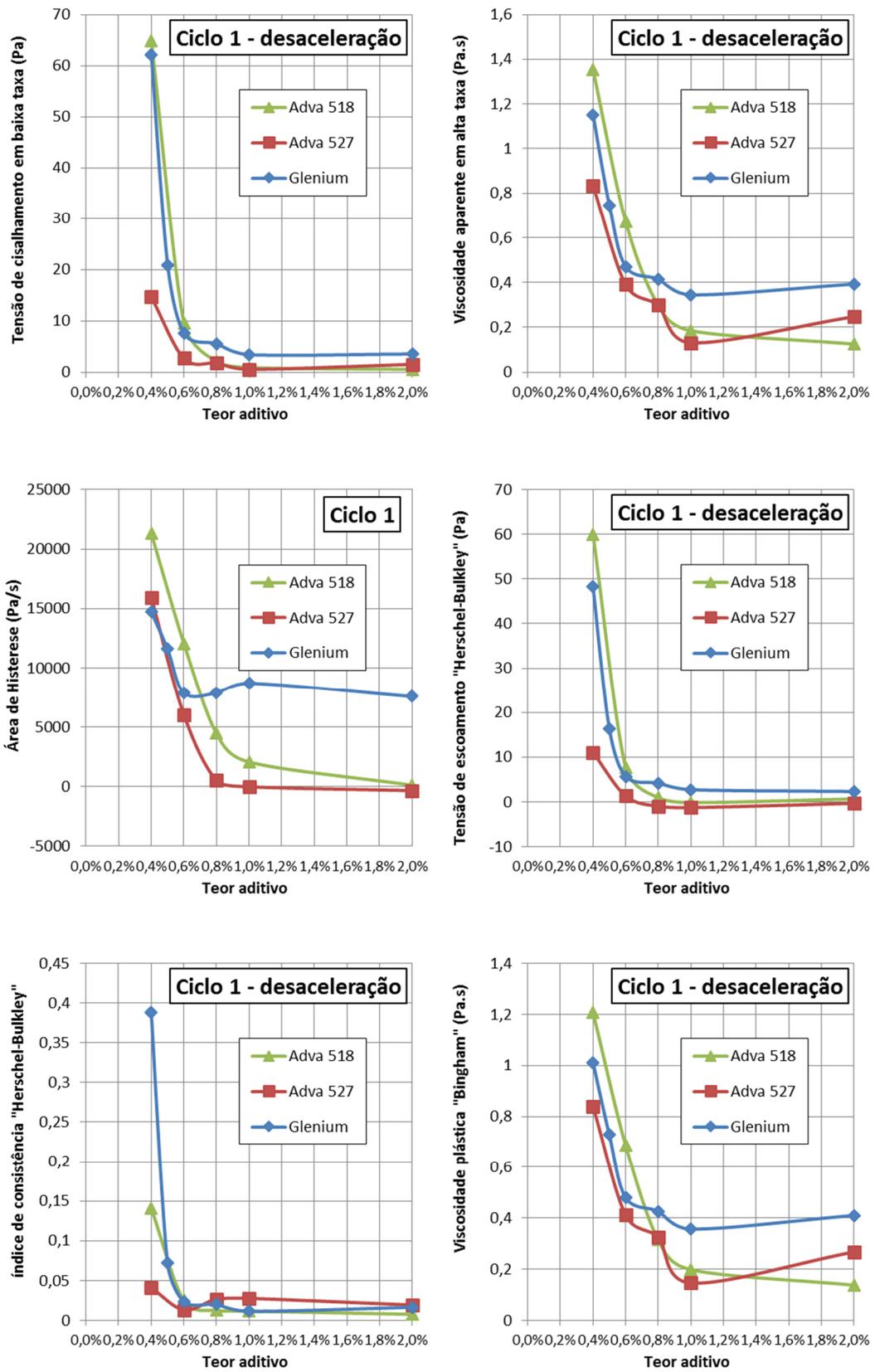


Figura 57 – Evolução dos parâmetros reológicos em função do tipo e teor do aditivo. Os teores indicados se referem ao teor total de aditivo (sólidos + líquido) em relação à massa do cimento.

Observa-se também que a definição do teor de saturação depende do parâmetro analisado. Por este motivo, ensaios reológicos como este apresenta vantagens em relação aos ensaios mais simples, como ensaios de espalhamento (ensaio de Kantro) e de fluxo em funis (Marsh). Ensaios de espalhamento, por exemplo, se relacionam mais com a tensão de escoamento. No caso do aditivo Adva 527 a tensão de escoamento indica teor de saturação de 0,6% de aditivo. A área de histerese neste ponto indica, porém, que ainda existem aglomerados em maior proporção e que o teor de saturação deve ser 0,8%.

Os dados anteriores se referem ao tempo de análise de 7 minutos após a mistura. É necessário ainda avaliar o comportamento em tempos superiores. Para tanto detalhou-se os pontos com 0,6% e 0,8% do Adva 527 e os pontos de 0,8% e 1,0% do Adva 518 até 1 hora após a mistura (Figura 58). Nota-se que a estabilidade no tempo demanda um teor adicional de aditivo, além do teor determinado em ensaios rápidos. Também se percebe que algumas propriedades são mais sensíveis ao tempo que outras. A tensão de escoamento, por exemplo, chega a quadruplicar ao se passar de 7 para 60 minutos. Já a viscosidade aparente não sofre este mesmo aumento.

Baseado neste conjunto de resultados, optou-se pelo aditivo Adva 527 no teor de 0,8% em relação à massa de cimento.

A metodologia empregada permitiu obter esta diversidade de resultados com pouco gasto de material e tempo, mostrando-se ser uma ferramenta útil na produção de pastas com propriedades reológicas (tensões de escoamento, viscosidade) reduzidas e estáveis, condição necessária para possibilitar reduções expressivas de água. Convém comentar que, por se tratar de um equipamento caro, reômetros de pasta são pouco disseminados. Ensaios mais simples são muitas vezes empregados e sugere-se que ao menos sejam aplicados ensaios que possibilitem avaliar a tensão de escoamento (como, por exemplo, ensaios de espalhamento) e a viscosidade (como, por exemplo, ensaios de fluxo em funis).

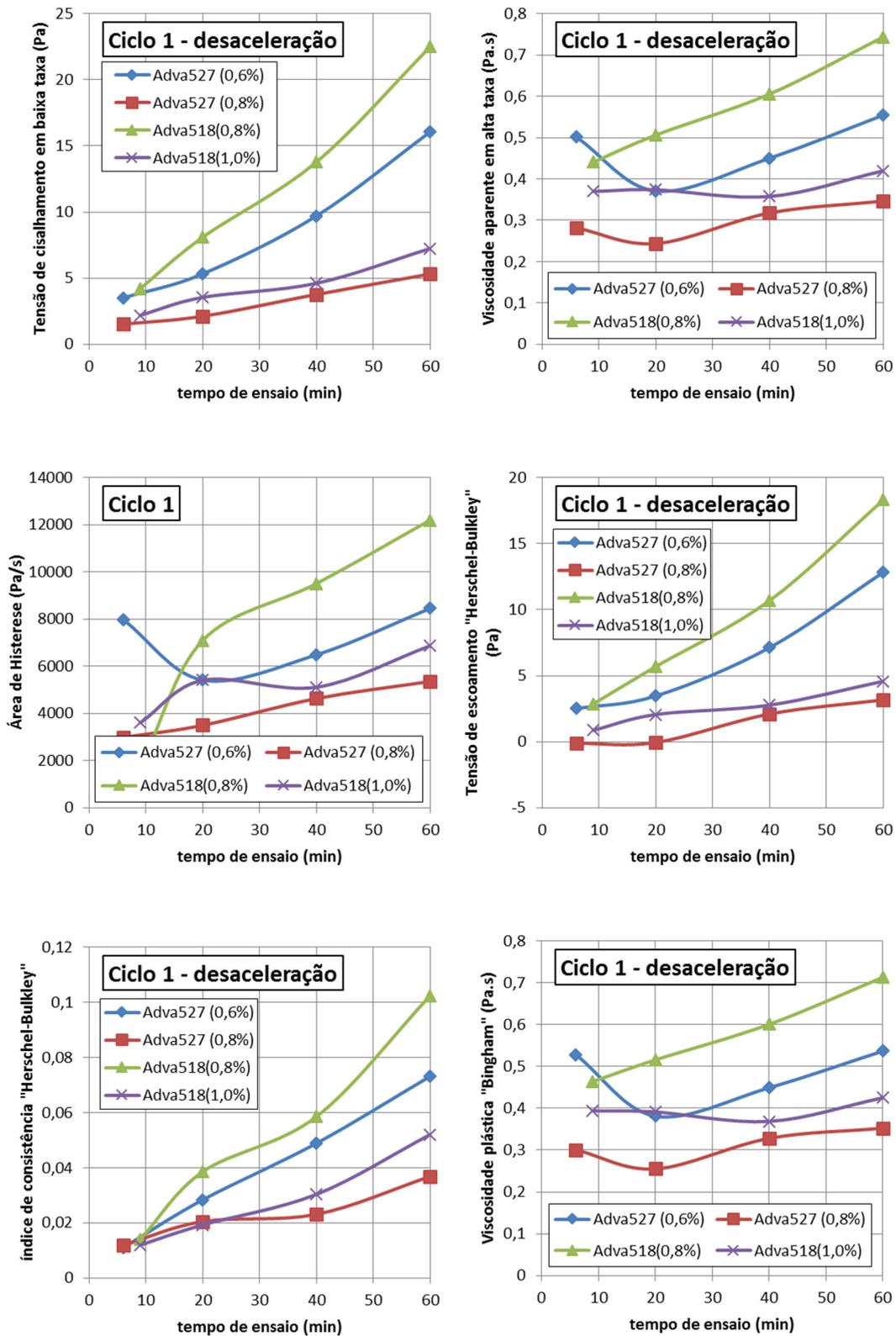


Figura 58 - Evolução dos parâmetros reológicos em função tempo para dois aditivos superplastificantes em teores próximos ao teor de saturação

5.3.1.2 Estudo de dispersão de fílers

Vista a necessidade de um volume adequado de pasta para preencher o esqueleto granular dos agregados, e tendo-se como objetivo reduzir o consumo de cimento, torna-se necessário incluir outros materiais à pasta. Optou-se por materiais considerados não ligantes, denominados genericamente de fílers. Conforme a sua natureza e granulometria, estes materiais também possuem tendência de aglomeração e, portanto, necessitam ser dispersos.

Para determinar o teor de saturação para cada fíler empregou-se ensaios reológicos similares aos empregados para o cimento, com o aditivo escolhido para o cimento (Adva 527). Na Figura 59 mostra-se como um crescente teor de aditivo reduz tanto a tensão de cisalhamento em baixas taxas de cisalhamento como a viscosidade aparente em altas taxas de cisalhamento. De acordo com estes resultados, tomou-se 0,5% para o fíler P1 e 0,3% para o fíler P5 como sendo os teores de saturação. Nota-se um consumo de aditivo inferior nos fílers, quando comparado ao cimento. No caso do fíler P5, que possui granulometria próxima do cimento, o teor de saturação é de menos de 40% do teor de saturação no cimento, evidenciando a diferença na natureza superficial dos grãos. A diferença nas forças superficiais demanda um maior teor de aditivo para garantir a dispersão das partículas de cimento.

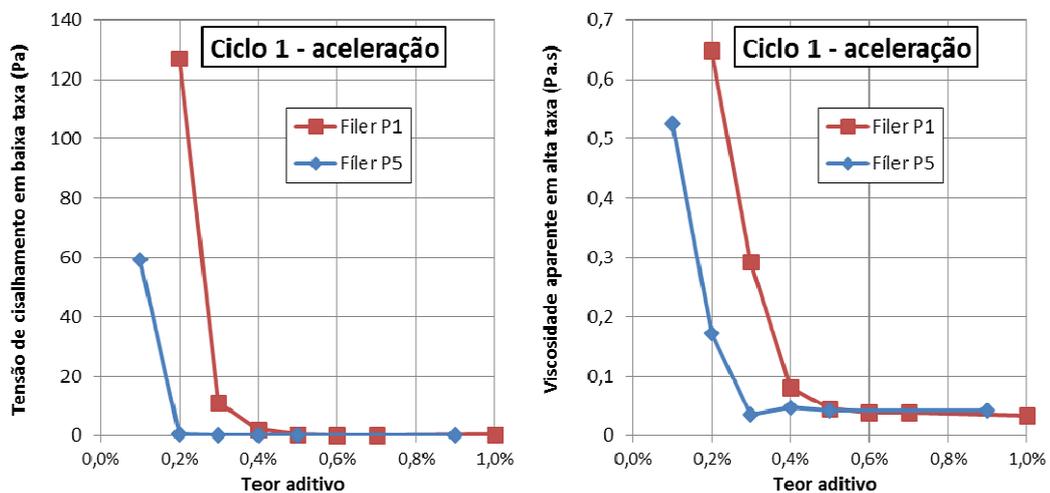


Figura 59 – Efeito do teor de aditivo sobre propriedades reológicas de pastas de fílers

5.3.1.3 Estudo de empacotamento da pasta

Além da dispersão, um segundo mecanismo que permite a redução do consumo de água é o empacotamento do esqueleto granular da pasta. Para avaliar o efeito do empacotamento considerou-

se o uso de dois fílers, sendo um com granulometria similar ao cimento e outro com granulometria mais fina (ver Figura 51, pg. 123).

Ensaio exploratórios iniciais indicavam a necessidade de cerca de 300 litros de pasta por m^3 de concreto, dos quais 150 litros de água. Em função destes volumes, e estando o consumo de cimento fixado em $200 \text{ kg}/m^3$, restava cerca de 60% do volume de finos a ser ocupado por fílers. Avaliou-se então a reologia de pastas contendo 50%, 60% e 70% do volume de sólidos na forma de fílers, variando-se a relação entre os dois fílers escolhidos, desde composições apenas com fíler P5, apenas com fíler P1, além de misturas em diferentes proporções intermediárias. Foi mantida fixa a relação volumétrica água/sólidos = 0,75 e o teor de aditivo utilizado em cada mistura foi calculado a partir da ponderação do teor de saturação de cada material pela sua quantidade.

Na Figura 60 mostram-se as principais propriedades reológicas em função do teor do fíler P1, para teores de cimento de 30%, 40% e 50%.

Análise de regressão múltipla indicou que o teor de cimento é uma variável não significativa, sendo que a maior parte da variância pode ser explicada apenas pelo teor de P1. Desta forma, as regressões indicadas na Figura 60 compreendem todos os dados experimentais, independente do teor de cimento.

As boas correlações ($R^2 \geq 0,87$, exceto para a tensão de cisalhamento em baixa taxa) indicam que a substituição de cimento por fíler P5 não afeta significativamente as propriedades reológicas analisadas. É possível, portanto, empregar o fíler P5 como um fíler de substituição, isto é, ao se substituir cimento por um volume equivalente do fíler P5, as propriedades reológicas não são perturbadas de modo significativo. Esta é uma constatação de grande importância pois possibilita a produção de pastas com propriedades reológicas similares, porém com diferentes relações água/cimento. Torna-se possível desta maneira produzir concretos com trabalhabilidades semelhantes em diferentes faixas de resistência.

Dentre as propriedades analisadas, a tensão de cisalhamento em baixa taxa é a única que não é afetada significativamente com o aumento do teor de P1. Para as demais, nota-se redução considerável até teores de pelo menos 30% de P1. A incorporação deste fíler de granulometria mais fina aumenta a densidade de empacotamento o que por sua vez modifica a distância de separação entre as partículas da pasta (IPS), já que não há mudança no teor de água na pasta. Com mais água disponível para afastar as partículas, observa-se uma considerável redução na viscosidade, maior estabilidade (menores áreas de histerese) e comportamento menos dilatante (menores valores de n no modelo de Herschel-Bulkley).

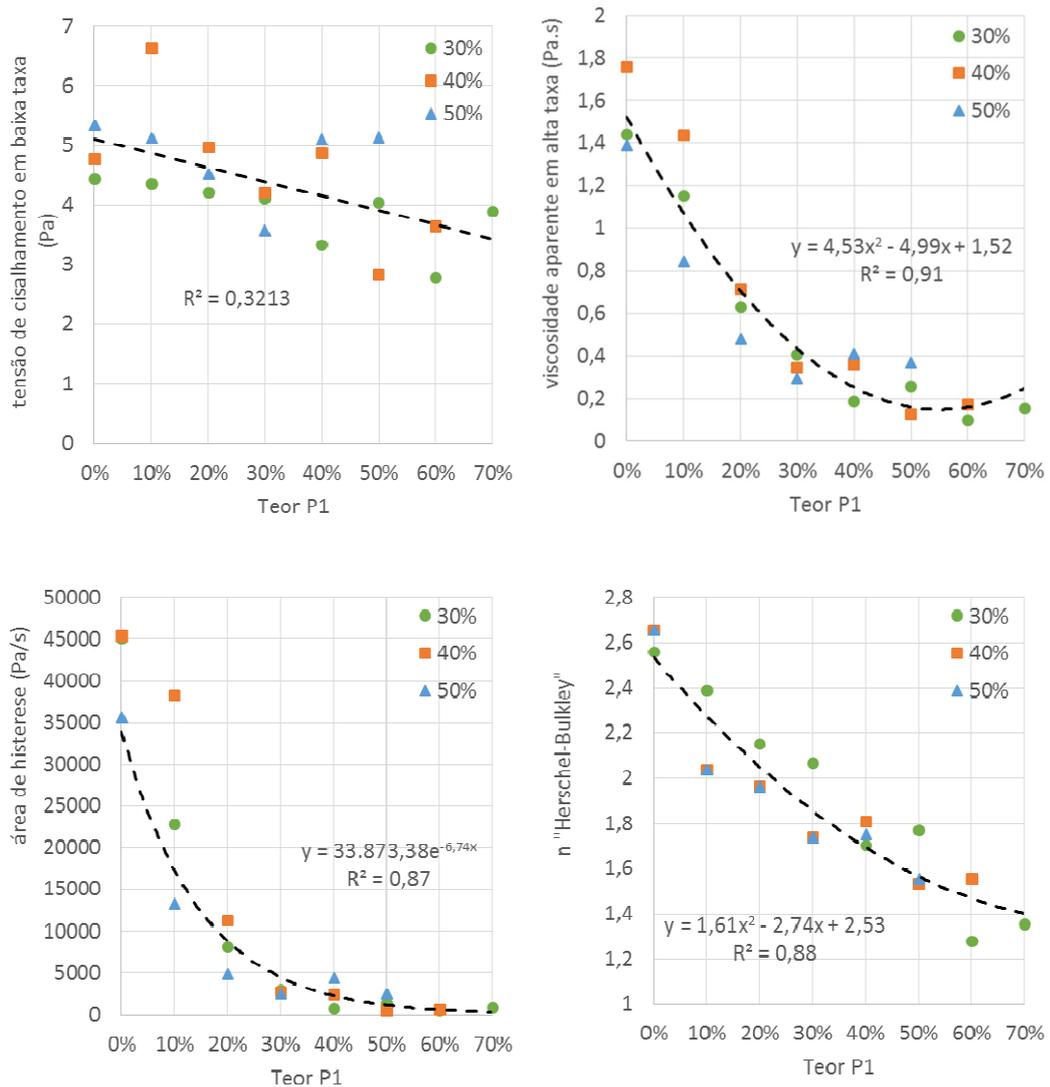


Figura 60 – Propriedades reológicas de pastas mistas (cimento + filers) em função dos teores de cimento (30, 40 e 50%) e filer P1. O teor do filer P5 corresponde ao complemento para totalizar 100% (P5=100%-P1-cimento)

A busca por pastas de menor viscosidade, mais estáveis e menos dilatantes tem por objetivo permitir a redução do teor final de água, de modo a se obter concretos trabalháveis e com boas características mecânicas e de durabilidade. Portanto, com base nestes resultados definiu-se que o teor mínimo de P1 deveria ser de 30% e que ajustes em teores maiores que 30% não trazem efeitos reológicos desfavoráveis.

5.3.2 Empacotamento do esqueleto granular de agregados

Optou-se por trabalhar em condições similares às encontradas em muitas concreiteiras comerciais no Brasil. Uma situação bastante corriqueira é o uso de agregados graúdos de britagem em duas

granulometrias (brita 1 e brita 0), areia artificial oriunda do mesmo processo de britagem dos agregados graúdos, e uma areia natural de quartzo. Na Figura 50 (pg. 123) mostram-se as granulometrias dos materiais empregados neste trabalho.

Para determinar a proporção de cada agregado, empregou-se o modelo de empacotamento aprimorado neste trabalho. O software descrito no capítulo 4 permite calcular a densidade de empacotamento segundo o modelo de empacotamento aprimorado descrito no capítulo 3. Dada a granulometria, morfologia e proporção de um conjunto de materiais obtém-se a porosidade de empacotamento. Empregou-se um processo de otimização matemática (ferramenta Solver presente no software Microsoft Excel®), o qual por meio de um processo iterativo ajustou o teor de cada agregado de modo a minimizar a porosidade de empacotamento. Obteve-se assim a seguinte composição de agregados em massa:

- Brita 1 = 47,6%
- Brita 0 = 9,8%
- Areia Britada = 28,0%
- Areia Natural = 14,7%

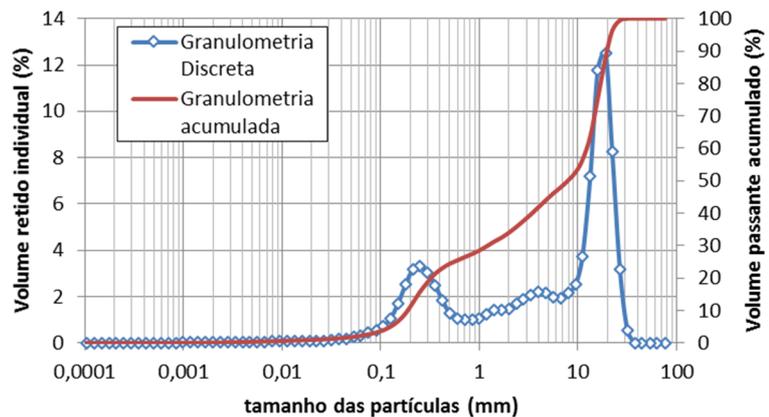


Figura 61 - Distribuição granulométrica dos agregados do concreto base

Nestas proporções a porosidade teórica, calculado pelo modelo de empacotamento, entre os grãos de dimensões superiores a 100 micrometros corresponde a 19,1%. Isto significa que 191 litros de pasta a cada 1 m³ de concreto são necessários para preencher os vazios deixados entre os grãos de agregados. O excesso de pasta acima deste volume é o responsável por afastar os grãos, promovendo assim a mobilidade da suspensão.

5.3.3 Consumo de água e ajuste do teor de fílers

A determinação do teor de água adequado foi realizada tendo em vista atender os requisitos no estado fresco sem comprometer as propriedades do estado endurecido. Na busca por concretos com menores consumos de ligantes é absolutamente necessário reduzir o consumo de água. Isto conduz a

suspensões cada vez mais concentradas, tornando as condições no estado fresco muitas vezes determinantes para a aplicação.

Para determinar o teor de água adequado foram produzidos alguns concretos com finalidade exploratória, com consumos de água de 130, 140 e 150 L/m³, com avaliação reológica durante e após a mistura e posterior moldagem de corpos de prova para determinação da resistência à compressão. Na Figura 62 mostram-se as resistências obtidas, em função da relação água/cimento. O intervalo testado, em especial entre 0,70 e 0,75 atendeu às resistências desejadas, para o consumo de cimento de 200 kg/m³. Portanto, consumos de água de no máximo 150 L/m³ são adequados para obter as resistências desejadas (f_{ck} 30 a 50 MPa). Ressalta-se que tanto o consumo de cimento, como a relação água/cimento, extrapolam os limites atualmente estabelecidos por norma para produção de concretos estruturais (ABNT NBR 12655:2006). Uma vez que os mecanismos que controlam as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos com menores consumos de ligantes estejam bem entendidos, será necessário revisar estes limites normativos para não impedir a aplicação destes concretos.

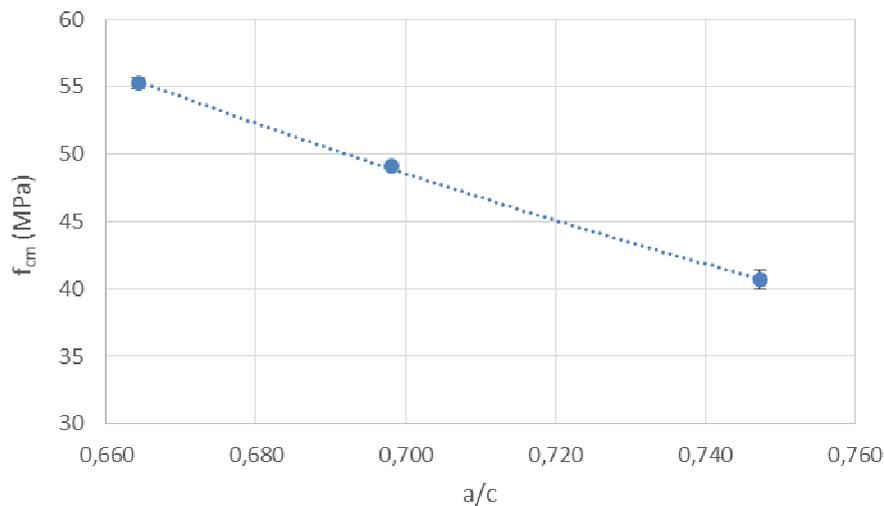


Figura 62 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da relação água/cimento

Além da resistência, alterações no consumo de água afetam a reologia do concreto, conforme pode ser visto na Figura 63. Tanto o torque de escoamento como a viscosidade aparente elevam-se ao se reduzir o consumo de água, aumentando o esforço necessário para que ocorra o fluxo do material nas diferentes velocidades.

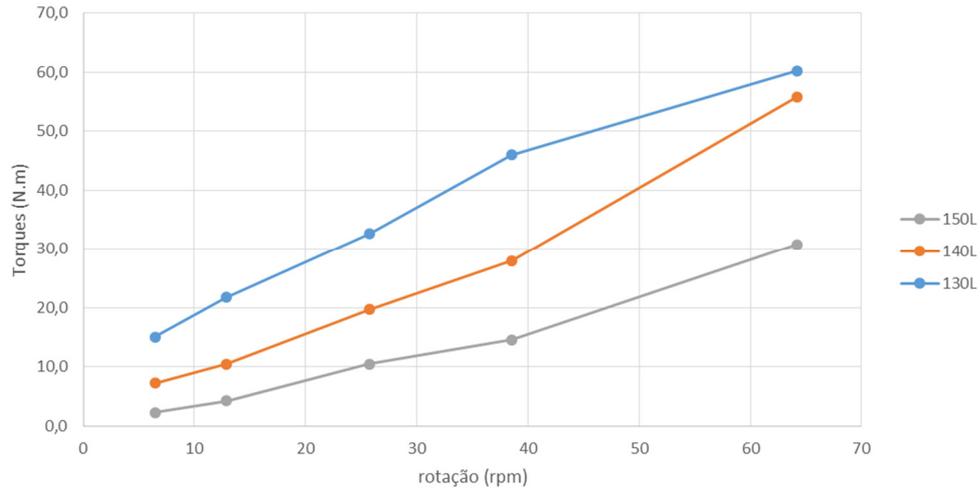


Figura 63 - Perfil reológico dos concretos com consumos variados de água

Por outro lado, observou-se que em consumos de água mais elevados há maior tendência à separação de fases. A pasta tendo viscosidade muito reduzida não é capaz de transferir energia cinética suficiente aos grãos maiores de agregados, o que pode ser observado visualmente durante o ensaio de slump-flow (Figura 64).

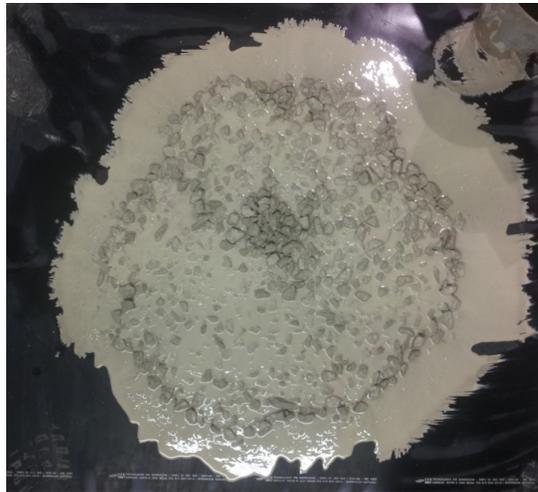


Figura 64 - Ensaio de slump-flow com teor de água de 150 L/m³, evidenciando separação de fases

A separação de fases é um fenômeno complexo, que envolve uma série de propriedades, tais como densidade dos agregados, densidade da pasta, propriedades reológicas da pasta, distribuição granulométrica e morfologia dos agregados, entre outros. Uma vez definido o consumo de cimento e água, é possível alterar as propriedades da pasta modificando o teor de fíler. Mantendo-se o consumo de água e cimento, acréscimos gradativos de fíler conduzem a pastas mais densas e mais concentradas,

e assim mais viscosas, o que é favorável para reduzir a tendência à segregação. Com base nos resultados mostrados na Figura 60, optou-se por usar o fíler P1 neste acréscimo. Como ele impacta menos na viscosidade foi possível acrescentar maior volume, e assim atingir uma densidade mais alta.

Estudou-se então o efeito de aumento de teor de fíler P1 em um concreto com 200 kg/m^3 de cimento, 150 L/m^3 de água e 30% do volume de sólidos da pasta constituído pelo fíler. Para este concreto adotou-se um volume de pasta de 300L, o que resultou em uma proporção volumétrica de 45% de cimento, 30% de fíler P1 e 25% de fíler P5. Este concreto foi misturado no reômetro, avaliando-se a reologia por reometria e por slump-flow. Após a primeira avaliação adicionou-se teores crescentes de fíler P1, avaliando o efeito sobre a separação de fases. Na Figura 65 mostra-se imagens dos concretos com 30, 35, 39 e 43% de P1. Com 39% os agregados graúdos já praticamente são levados até a borda da área espalhada. Com 43% não se observa mais separação de fases, embora também se tenha notado uma redução significativa na área de espalhamento.

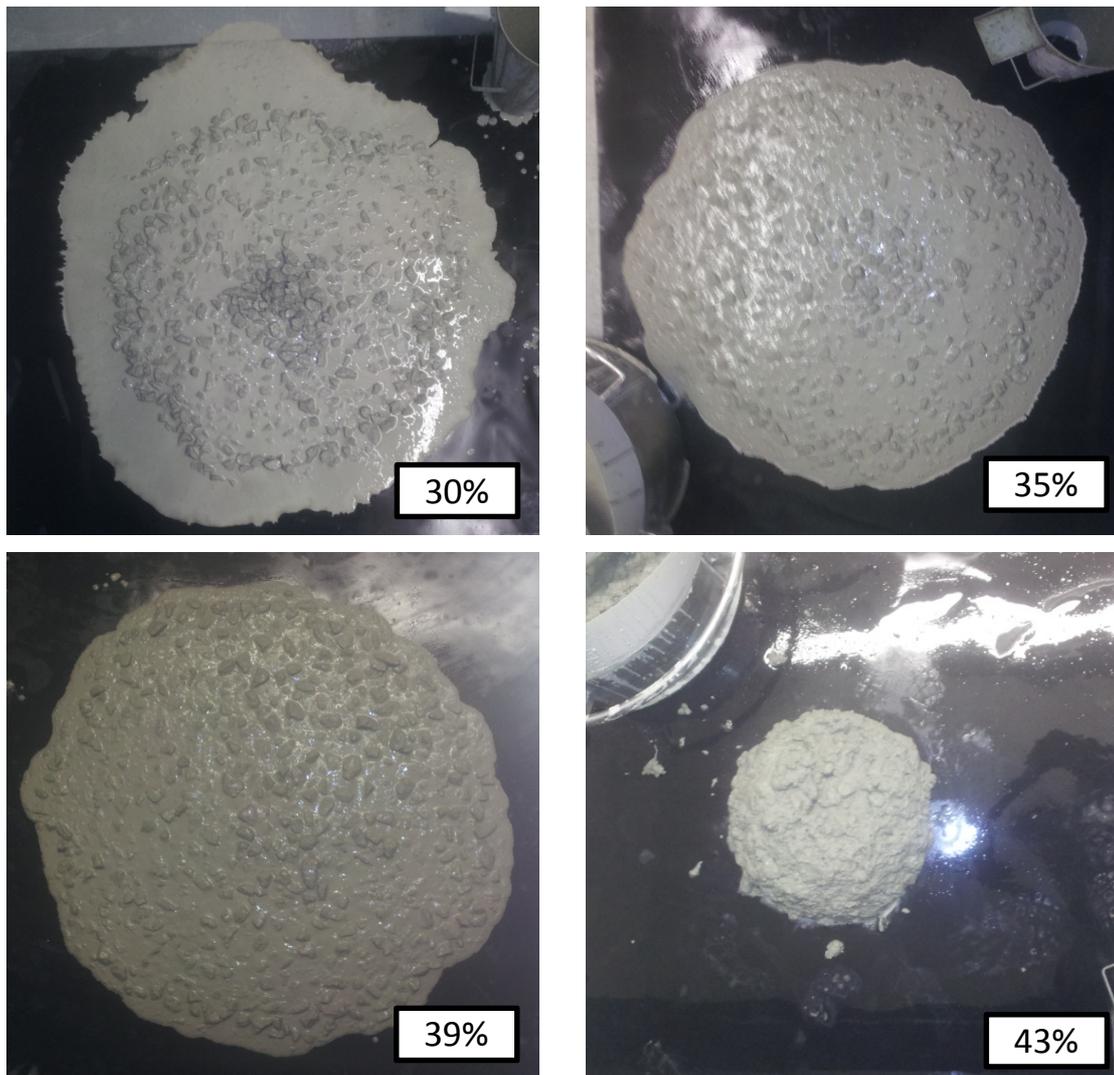


Figura 65 – Efeito do aumento de teor de P1, de 30 a 43% sobre o espalhamento e separação de fases.

Com base nestes resultados adotou-se um teor de 40% de P1, o que resultou em teores ajustados de cimento e P5 de 38 % e 22%, respectivamente. O teor final de água, após o acréscimo do volume de P1, foi de 145 L/m³.

5.3.4 Concreto de referência

5.3.4.1 Composição

Os principais parâmetros definidos nas etapas anteriores estão resumidos abaixo:

- Consumo de cimento: 200 kg/m³, equivalente a 38% do volume sólido da pasta;
- Consumo de fíler P1: 40% do volume sólido da pasta;
- Consumo de fíler P5: 22% do volume sólido da pasta;
- Consumo de água: 145 L/m³;
- Teor de aditivo: 0,8% sobre a massa dos finos. Apesar dos ensaios reológicos dos filers puros indicarem menor necessidade de aditivo, optou-se por empregar no concreto 0,8% sobre a massa total de finos. Isto eleva o consumo de aditivo acima do teor de saturação, não promovendo mudanças reológicas, porém garantindo a dispersão. É preciso considerar que no concreto, parte do aditivo pode ser consumido pelos agregados, especialmente a parcela mais fina, o que é de difícil mensuração. Para aplicações práticas pode-se realizar etapas de refinamento do teor de aditivo, principalmente tendo em vista o custo final do concreto, o que se julgou ser desnecessário nesta etapa da pesquisa;
- Brita 1 = 47,6% do volume dos agregados;
- Brita 0 = 9,8% do volume dos agregados;
- Areia Britada = 28,0% do volume dos agregados;
- Areia Natural = 14,7% do volume dos agregados;
- Teor de ar incorporado/aprisionado = 1% do volume total. Este valor foi adotado, com base em dados observados em alguns concretos exploratórios já executados.

Na Tabela 14 apresenta-se o consumo de materiais, para 1 m³ do concreto e também 17 L (volume para mistura no reômetro).

Tabela 14 - Composição do concreto de referência (kg)

Volume	1 m ³	17 L
Brita 1	861	14,632
Brita 0	177	3,001
Areia Britada	505	8,591
Areia Natural	265	4,505
Filer P5	105	1,786
Filer P1	191	3,252
Cimento	200	3,408
Água	145	2,465
Aditivo Adva 527	4,0	0,068

5.3.4.2 Mistura

O concreto de referência foi produzido empregando o reômetro como misturador. Na Figura 66 mostra-se a curva de mistura do mesmo (comparar com a Figura 54, pg. 128). Nota-se inicialmente um trecho com torques crescentes, correspondente à introdução do material seco da argamassa, após o qual segue um patamar relativo à homogeneização. Aos 300 s inicia-se a introdução da água, elevando o torque até um máximo (torque de virada), após o qual ocorre rápida redução do torque, seguido de um trecho de homogeneização da argamassa. Entre 510 e 600 s ocorre uma pausa na mistura, durante à qual é realizado a raspagem das paredes do recipiente para eliminação de porções que porventura estejam ainda secas. Aos 600 s é retomada a homogeneização da argamassa até 840 s. Segue-se então o primeiro ciclo de cisalhamento, no caso apenas da argamassa. Ao fim do ciclo inicia-se a introdução dos agregados graúdos, o que eleva grandemente o torque. Após a introdução de todo agregado graúdo segue a homogeneização do concreto.

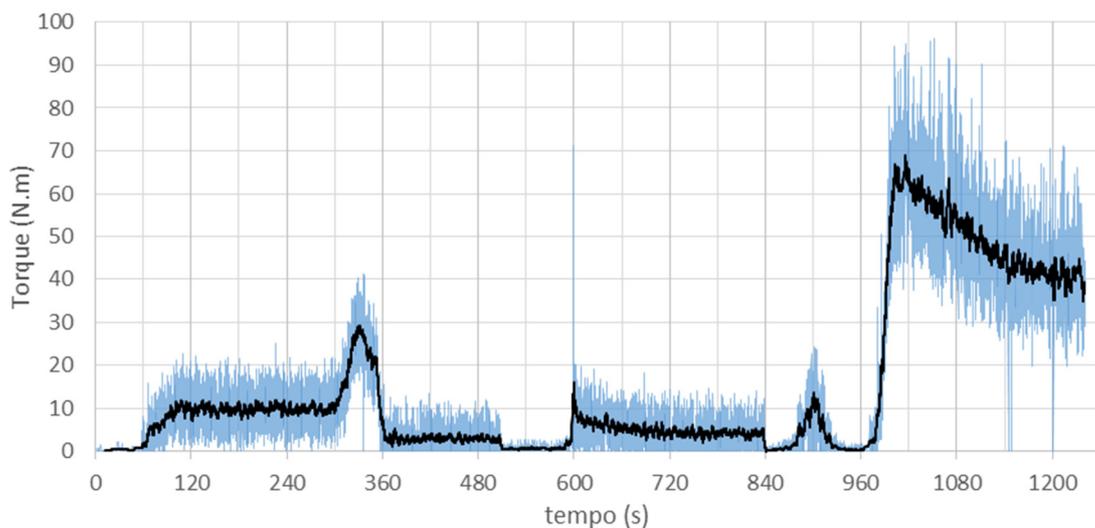


Figura 66 - Curva de mistura completa do concreto de referência

A seguir mostram-se detalhadamente algumas das etapas da mistura e os parâmetros que foram avaliados em cada trecho.

Na mistura da argamassa seca (Figura 67) calculou-se o torque nos 30 segundos finais da mistura ($T_{argsec}^{final} = 9,9 \pm 0,6 \text{ N.m}$). Indica-se também na figura a média móvel do torque calculada para um período de 5 segundos.

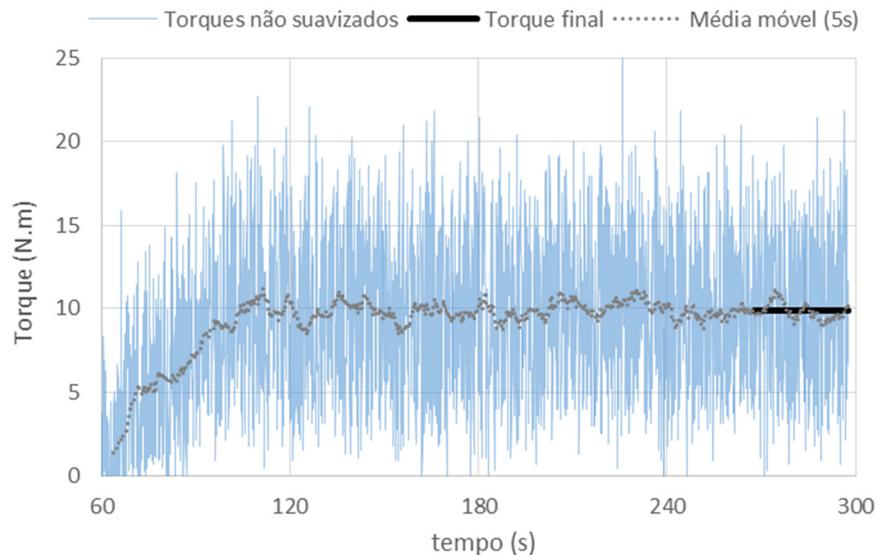


Figura 67 – Evolução dos torques ao longo da mistura da argamassa seca

Na mistura da argamassa úmida (Figura 68) determinou-se os pontos de máxima coesão e ponto de fluidez. O ponto de máxima coesão ($T_{arg}^{max\ coes} = 28,5 \pm 1,7 \text{ N.m}$ aos 330 segundos) corresponde ao ponto em que se observa o torque máximo enquanto que o ponto de fluidez ($T_{arg}^{fluid} = 2,5 \pm 0,8 \text{ N.m}$ aos 365 segundos) corresponde ao ponto em que ocorre a inversão da tendência no ramo decrescente após o ponto de máxima coesão, a partir do qual se inicia a homogeneização. Também se calculou o torque médio nos 30 segundos que antecedem à raspagem das paredes do recipiente ($T_{arg}^{pré-rasp} = 2,8 \pm 0,4 \text{ N.m}$). Sabe-se que a área abaixo da curva “torque x tempo” pode ser correlacionada com a energia de mistura (PILEGGI, 2001). Calculou-se a área compreendida entre o início da adição de água e o ponto de coesão máxima ($A_{arg}^{ág-max} = 568 \text{ N.m.s}$) e deste ponto até o ponto de fluidez ($A_{arg}^{max-fluid} = 663 \text{ N.m.s}$).

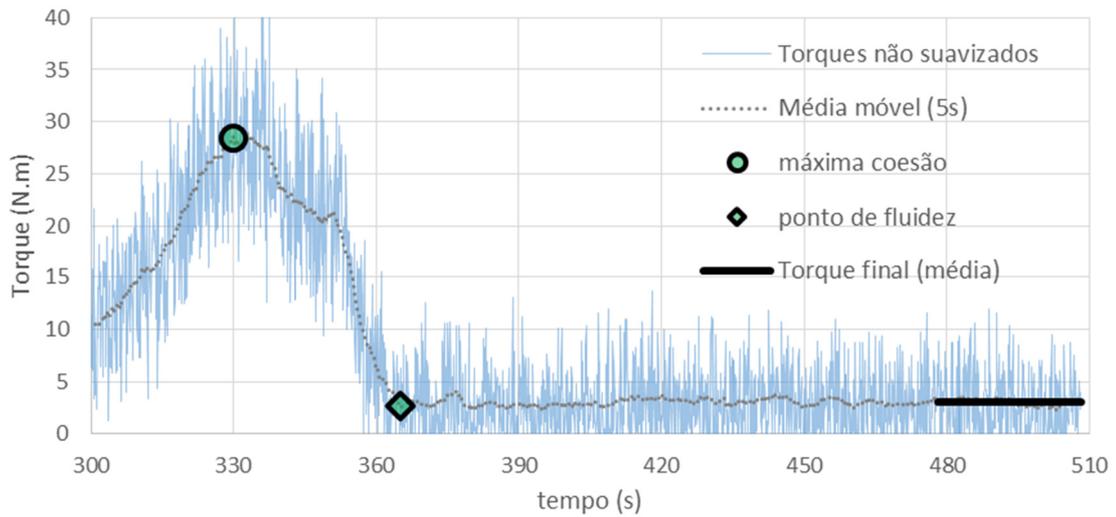


Figura 68 – Evolução dos torques ao longo da mistura da argamassa úmida

Após a raspagem das paredes do recipiente retorna-se para a homogeneização final da argamassa (Figura 69). Nesta etapa determinou-se os torques médios em trechos iniciais ($T_{arg}^{pós-rasp} = 6,1 \pm 0,4 \text{ N.m}$) e finais ($T_{arg}^{final} = 4,3 \pm 0,3 \text{ N.m}$).

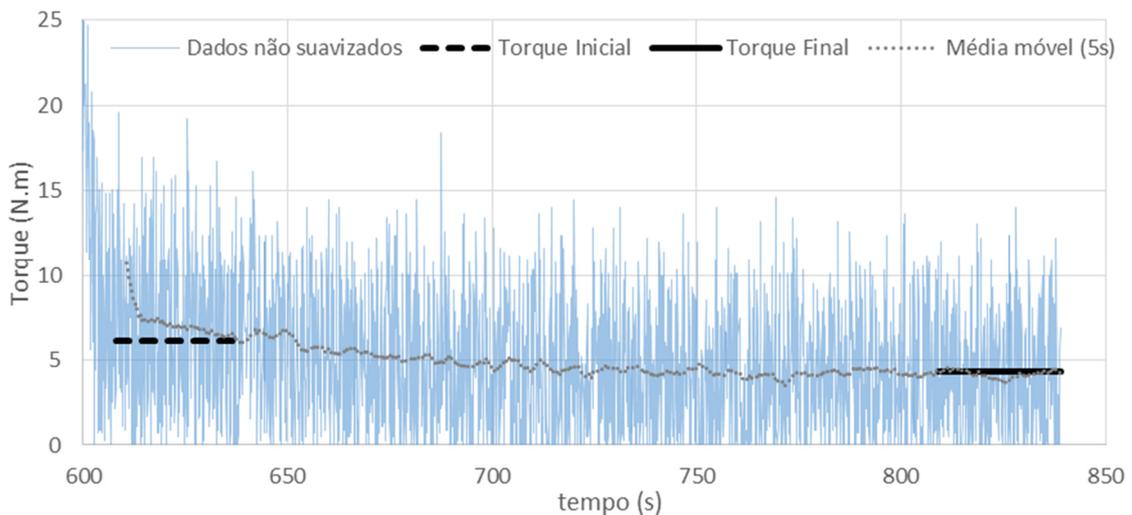


Figura 69 - Evolução dos torques na homogeneização final da argamassa

A última etapa da mistura compreende a introdução dos agregados graúdos (Figura 70). Nesta etapa identificou-se o torque máximo ($T_{concr}^{max} = 66,3 \pm 3,2 \text{ N.m}$) e médio nos 30 segundo finais da homogeneização ($T_{concr}^{final} = 40,3 \pm 1,0 \text{ N.m}$). Também se calculou a área abaixo da curva desde a

introdução dos agregados até o ponto de máximo torque ($A_{conc}^{graud-max} = 1669 \text{ N.m.s}$) e deste ponto até o final da homogeneização ($A_{conc}^{max-final} = 10897 \text{ N.m.s}$).

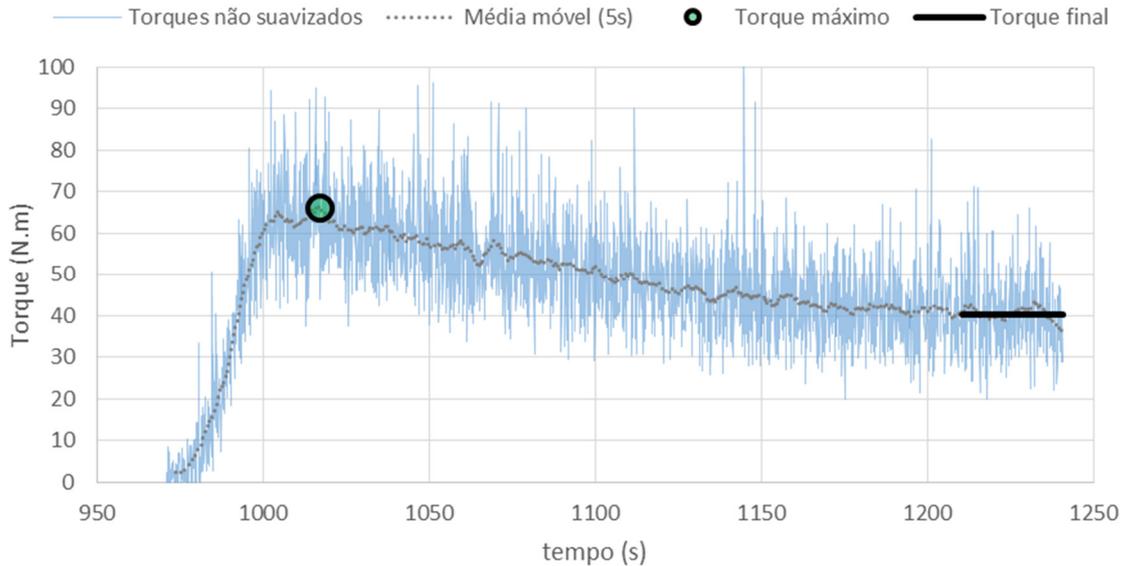


Figura 70 - Evolução dos torques após a introdução dos agregados graúdos

5.3.4.3 Comportamento reológico

O comportamento reológico foi avaliado em três momentos. Ainda durante a etapa de mistura, ao final da homogeneização da argamassa, foi executado um ciclo de cisalhamento da argamassa. Após a homogeneização final do concreto foi executado um primeiro ciclo de cisalhamento do concreto. E 20 minutos após o primeiro ciclo foi executado um segundo ciclo de cisalhamento.

Cada ciclo de cisalhamento avaliou os torques necessários para manter rotações entre 6 e 253 rpm (ver Figura 55, pg. 129). Os seguintes parâmetros foram calculados para cada rampa (aceleração e desaceleração):

- Torque em baixa taxa: torque na menor rotação (6 rpm);
- Viscosidade aparente em alta taxa: relação torque/rotação na maior rotação do ensaio (253 rpm);
- Ajuste de modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley, com determinação dos respectivos parâmetros. Tratam-se de modelos equivalentes aos descritos respectivamente pela Equação 17 e Equação 18, porém, empregando rotação e torque, em vez de taxa e tensão

de cisalhamento (Equação 19, Equação 20). Embora o concreto seja muitas vezes descrito como tendo comportamento de um fluido de Bingham, a avaliação por meio do modelo mais amplo de Herschel-Bulkley permite quantificar o grau de dilatância ($n > 1$) ou pseudoplasticidade ($n < 1$) da suspensão;

(Bingham) $T = T_0 + h_B R$ Equação 19

(Herschel-Bulkley) $T = T_0 + h_{HB} R^n$ Equação 20

sendo:

T : torque (N.m)

R : rotação (rpm)

T_0 : torque de escoamento (N.m)

h_B : constante equivalente à viscosidade plástica no modelo de Bingham (N.m/rpm)

h_{HB} : constante equivalente ao índice de consistência no modelo de Herschel-Bulkley (N.m/rpm ^{n})

n : índice de comportamento de fluxo (adimensional)

Para o ciclo completo calculou-se ainda a área (área de histerese) compreendida entre as rampas de aceleração e desaceleração.

Na Figura 71 mostram-se os resultados dos três ciclos para o concreto de referência. A argamassa apresenta perfil reológico com indícios de dilatância, principalmente na desaceleração. No concreto, porém, o perfil é mais próximo ao de um fluido de Bingham com tensão de escoamento muito baixa. Do primeiro para o segundo ciclo observa-se um ligeiro aumento de viscosidade. As áreas de histerese são pequenas e positivas (comportamento tixotrópico).

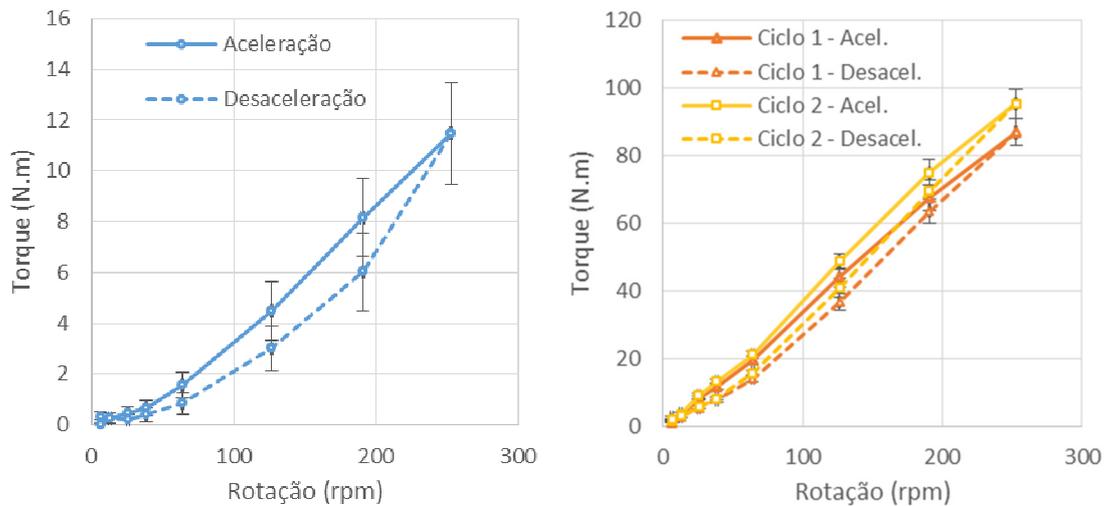


Figura 71 – Concreto base: ciclos de cisalhamento da argamassa (esquerda) e do concreto (direita)

Os parâmetros reológicos considerados estão apresentados na Tabela 15. Nota-se valores negativos no torque de escoamento do modelo de Bingham. Isto é comum ocorrer quando os torques de escoamento são muito baixos. Um único modelo matemático aplicado a toda extensão de rotações avaliada, não é capaz de descrever com boa adequação os torques em baixas rotações. O índice de comportamento de fluxo “ n ” do modelo de Herschel-Bulkley indica que a argamassa possui comportamento dilatante. Esta dilatância, porém, reduz-se fortemente nos concretos, que especialmente nas rampas de aceleração se comportam de modo bastante linear (n próximos de 1).

Tabela 15 - Parâmetros reológicos do concreto base

Parâmetro	Argamassa		Concreto Ciclo 1		Concreto Ciclo 2	
	Acel.	Desacel.	Acel.	Desacel.	Acel.	Desacel.
Torque baixa taxa (N.m)	0,03	0,29	1,13	2,49	1,53	2,07
Viscosidade aparente alta taxa (N.m/rpm)	0,05	0,05	0,34	0,34	0,38	0,38
Área Histerese (N.m.rpm)	269		1068		1220	
T_0 (Bingham) (N.m)	-0,81	-1,02	-1,45	-3,87	-1,49	-4,53
h_B (Bingham) (N.m/rpm)	0,05	0,04	0,35	0,35	0,39	0,39
T_0 (Herschel-Bulkley) (N.m)	0,00	0,00	0,00	0,78	0,00	0,11
h_{HB} (Herschel-Bulkley) (N.m/rpm ^{n})	0,01	0,00	0,27	0,07	0,30	0,09
n (Herschel-Bulkley)	1,38	2,02	1,05	1,29	1,04	1,26

Notou-se que, apesar da boa estabilidade da pasta, no concreto houve modificação reológica entre o primeiro e segundo ciclo de cisalhamento, com aumento dos torques, viscosidades e áreas de histerese. Isto foi percebido também nos ensaios de espalhamento (flow-test), executados após cada ciclo. No primeiro ensaio obteve-se espalhamento médio de 84 cm, tempo para abertura de 50 cm de 3 segundos e espessura média de segregação de 9 cm. Já no segundo, o espalhamento reduziu-se para 74 cm, o tempo de abertura de 50cm aumentou para 4s e praticamente não havia mais separação de fases (Figura 72).



Figura 72 - Ensaio de espalhamento (flow-test) após o primeiro ciclo de cisalhamento (esquerda) e após o segundo ciclo (direita), evidenciando a mudança na tendência de separação de fases. O tempo entre os ensaios é de cerca de 20 minutos.

5.3.4.4 *Propriedades mecânicas e intensidade de ligantes*

Aos 28 dias de idade foram ensaiados 5 corpos de prova à compressão, obtendo-se $51,3 \pm 0,3$ MPa de resistência. No ensaio de módulo de elasticidade obteve-se $35,3 \pm 0,4$ GPa.

Segundo a análise termogravimétrica (Figura 125, pg. 251), 5,8% da massa do cimento corresponde a carbonato de cálcio, adicionado na fabricação. Assim, o teor efetivo de ligante no concreto de referência equivale a 188 kg/m^3 , o que resulta em uma intensidade de ligantes de $3,66 \text{ kg/m}^3/\text{MPa}$. Comparando com os dados apresentados por Daminieli (2013) observa-se um desempenho excepcional, mesmo não empregando agregados especiais e materiais pozzolânicos (Figura 73).

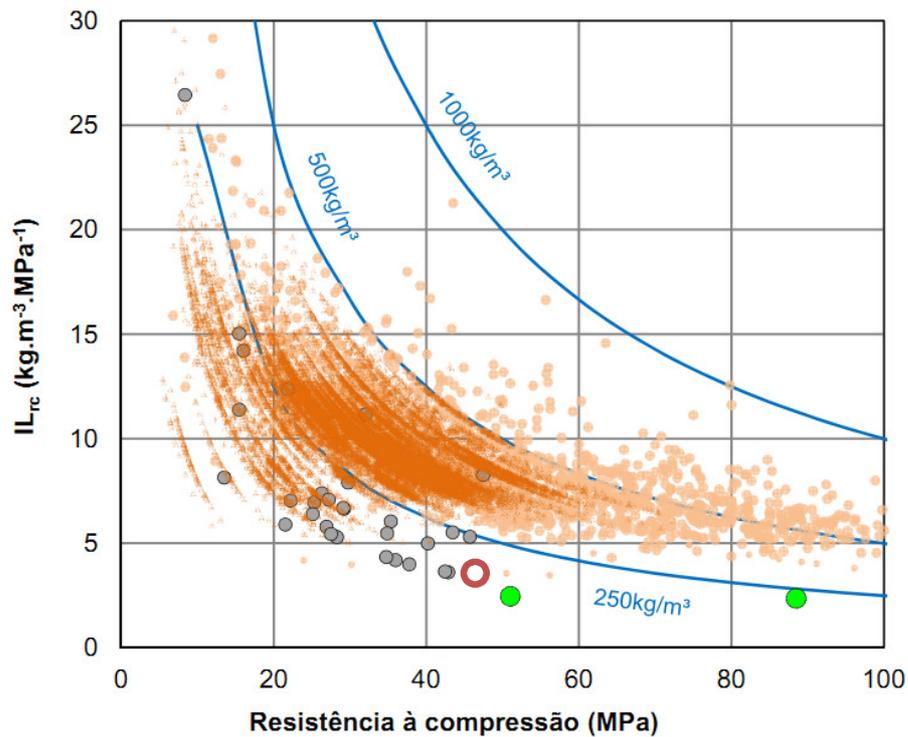


Figura 73 - Intensidade de ligantes do concreto desenvolvido (circulo vermelho). Pontos em laranja, cinza e verde oriundos de Daminieli (2013).

5.4 Considerações finais do capítulo

Foi possível elaborar um concreto comprovadamente de baixo consumo de cimento. Ao se obter 51 MPa de resistência à compressão média aos 28 dias, com consumo de apenas 200 kg de cimento por m^3 de concreto (corresponde a $188 \text{ kg}/m^3$ de ligantes, descontando o teor de fíler adicionado na produção do cimento), obteve-se uma intensidade de ligantes de apenas $3,66 \text{ kg}/m^3/\text{MPa}$. Nesta faixa de resistência, são muito raras as citações de literatura de concretos com intensidade de ligantes abaixo de $5 \text{ kg}/m^3/\text{MPa}$.

O desenvolvimento deste concreto foi possível graças à aplicação de conceitos de empacotamento e dispersão de partículas, e ao emprego de métodos reológicos para o desenvolvimento da pasta e do concreto.

Para obter a necessária redução de água, empregou-se um aditivo superplastificante em teor equivalente ao de saturação. A escolha do aditivo e a determinação dos teores de saturação foi realizada empregando reometria de fluxo de pastas. Diversos parâmetros reológicos, tais como viscosidade, tensão de escoamento e área de histerese, podem ser determinados por esta técnica,

sendo que os valores dos parâmetros variam em função do tipo e teor de aditivo e do tempo decorrido após a mistura. O teor de saturação deve ser estabelecido levando em consideração a minimização e estabilização dos diversos parâmetros.

A composição da pasta também foi determinada a partir do seu comportamento reológico. Avaliou-se o efeito da substituição de cimento por dois fílers, sendo um de granulometria próxima do cimento e outro de granulometria mais fina. Observou-se que o fíler de granulometria próxima proporciona pouca alteração reológica. Pode, portanto, ser empregado como um fíler de substituição, isto é, pode-se substituir volumes de cimento por volumes equivalentes deste fíler sem causar alterações relevantes na reologia da pasta. Já o fíler mais fino pode ser considerado um fíler de desempenho, pois a sua inclusão reduz a viscosidade e dilatância, além de proporcionar maior estabilidade de dispersão à pasta.

A composição dos agregados foi obtida por aplicação do método de empacotamento ajustado descrito em capítulos anteriores. Os ajustes de água e teores finais de fílers se deram para atender à resistência desejada e reduzir a tendência à separação de fases. A separação de fases é um aspecto importante a ser considerado nos concretos cujas pastas possuem baixa tensão de escoamento e viscosidade. Considera-se que o concreto se encontra em um estado crítico quanto à separação de fases. Optou-se por prosseguir o estudo de robustez com o concreto desenvolvido, inclusive para avaliar este aspecto.

Para a mistura do concreto propôs-se uma sequência especial. Realizada em um reômetro que permite avaliar os torques ao longo de todo o processo de mistura, foi proposta uma sequência de mistura que gera primeiramente a argamassa à qual posteriormente são adicionados os agregados graúdos. Desta maneira, é possível analisar separadamente os efeitos de desvios nos agregados miúdos e graúdos. Aliado à caracterização reológica por meio de ciclos de cisalhamento, onde se avalia o torque em função da aplicação de taxas de cisalhamento em uma larga extensão, o método proposto permite a aquisição de um grande número de parâmetros reológicos, avaliando assim diversos aspectos da reologia do concreto.

No próximo capítulo apresenta-se o estudo experimental de robustez, aplicado sobre o concreto desenvolvido.

6 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE ROBUSTEZ

Encontra-se na literatura técnica muitos trabalhos onde se estuda o “Efeito da variável X na propriedade Y do concreto”. Embora estes trabalhos permitam elucidar aspectos importantes que afetam as diversas propriedades do concreto, não podem ser considerados estudos de robustez. Em um estudo de robustez, as variações dos fatores precisam ser semelhantes às que irão ocorrer no dia-a-dia da produção e não variações intencionais de composição ou troca de materiais.

Muitos trabalhos também seguem o método de tentativa e erro variando os fatores individualmente. Um sistema robusto precisa ser pouco sensível a mudanças de parâmetros individuais, porém, isto pode não ser suficiente caso existam interações entre os diversos parâmetros. Na prática, muitos dos parâmetros diferem dos seus valores nominais simultaneamente e estudos com variáveis individuais podem mascarar os efeitos combinados.

Neste sentido, o objetivo deste capítulo é avaliar a possibilidade de empregar estudos multivariados para medir a robustez em casos reais, quantificando os impactos que diversos fatores têm sobre as principais propriedades do concreto de baixo consumo de cimento desenvolvido no capítulo anterior.

6.1 Planejamento experimental

6.1.1 Fundamentos⁵

Quando se pretende investigar um dado problema, geralmente se deseja determinar quais as variáveis que influenciam uma ou mais propriedades de interesse. Além disto, deseja-se obter alguma função que permita relacionar as variáveis com as propriedades de interesse.

Em estatística denominam-se as variáveis de **fatores** e as propriedades de interesse de **respostas**. Os fatores podem assumir diferentes estados. Fatores contínuos podem assumir qualquer valor dentro de um dado intervalo. Fatores discretos ou categóricos podem assumir alguns valores específicos apenas. Os valores pré-fixados que os fatores podem assumir denominam-se de **níveis**. Quando se fixa uma configuração de níveis para os fatores e se submete esta configuração à avaliação experimental tem-se um **ensaio**.

⁵ Os breves fundamentos abordados nesta sessão são fartamente detalhados em diversos textos acerca de planejamento de experimentos, como, por exemplo, Box, Hunter e Hunter (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005), Montgomery (MONTGOMERY, 2009) e Barros Neto, Scarminio e Bruns (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Quando muitos fatores precisam ser considerados simultaneamente inevitavelmente um maior número de ensaios se faz necessário. Caso se deseje analisar todas as possíveis combinações, a quantidade de ensaios aumenta de forma fatorial, razão pela qual planejamentos experimentais deste tipo são denominados de **planejamentos fatoriais**. De forma geral, onde se tem k fatores e cada um pode assumir n níveis, necessita-se de n^k ensaios. Por exemplo, caso se tenha 4 fatores e cada um será avaliado em 2 níveis, necessita-se de $2^4 = 16$ ensaios. Neste caso diz-se que um **planejamento completo** foi utilizado, ou seja, todas as possíveis combinações foram testadas. A decisão da quantidade de fatores e níveis impacta diretamente na quantidade de ensaios necessários (custos e tempo). Portanto, deve-se fazer escolhas criteriosas, lembrando que reduzir excessivamente o número de fatores e níveis pode comprometer o sentido da pesquisa.

Para reduzir o esforço experimental muitos pesquisadores se veem tentados a fazer análises de fatores isolados. Reduz-se enormemente a quantidade de ensaio, porém esta proposta não reflete as condições reais. Na prática os fatores variam concomitantemente e pode haver **interações** entre eles, ou seja, a resposta a um fator depende do nível em que outros fatores se encontram. Por este motivo análises uni variadas possuem validade apenas restrita, pois apenas os **efeitos principais** de cada fator podem ser observados. Por exemplo, nestes casos não é possível afirmar que o melhor valor dentre os valores ótimos determinados individualmente corresponde ao valor ótimo quando todos são variados simultaneamente.

Um ensaio fatorial completo permite analisar todas as interações. Não apenas as interações de dois fatores (de segunda ordem), mas também de ordens superiores podem ser analisadas. À medida que se aumento o número de fatores, a quantidade de efeitos de ordens altas aumenta drasticamente. A importância destas interações vai diminuindo à medida que a ordem aumenta. Assim um aumento de ensaios se reflete basicamente na obtenção de dados de menor importância para o problema analisado. Tendo isto em vista, **planejamentos fracionários** podem ser utilizados (Box, Hunter, Hunter, 1978). Nestes casos apenas uma **fração** dos ensaios do planejamento completo são executados. Reduz-se o número de experimentos ao custo de perder informações de interações de ordens mais altas, o que muitas vezes é plenamente aceitável. Por exemplo, um estudo com 4 fatores, sendo que cada fator varia em 2 níveis, pode ser executado com apenas $2^{4-1} = 8$ ensaios. Trata-se neste caso de uma fração $\frac{1}{2}$, isto é, apenas metade de um fatorial completo foi empregado.

Não cabe a esta sessão discutir as formas como se chega ao conjunto de ensaios e os níveis que se deve adotar em cada ensaio para que a análise dos fatores principais e das interações possa ser realizada adequadamente. Existem tabelas prontas para alguns casos particulares (PLACKETT;

BURMAN, 1946; TAGUCHI; KONISHI, 1987) e técnicas gerais descritas fartamente na literatura (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010; BOX; HUNTER; HUNTER, 2005).

Embora ainda sejam pouco empregados na área de concretos, alguns estudos que empregam planejamentos fatoriais podem ser encontrados.

Khayat, Ghezal e Hadriche (2000) utilizaram um planejamento fatorial fracionado com 5 fatores (relação água/cimento, consumo de ligantes, teor de aditivo superplastificante, teor de aditivo modificador de viscosidade e volume de agregados) para obter modelos estatísticos capazes de descrever parâmetros reológicos e resistência à compressão em concretos auto adensáveis.

Estudos semelhantes foram conduzidos por Nunes et al (2006) e Rigueira (2008), ambos já descritos anteriormente (ver sessão 2.2.1). Neste caso os modelos estatísticos obtidos foram empregados para avaliação quantitativa da robustez dos concretos.

Yahia e Khayat (2001) utilizaram um planejamento fatorial completo com 3 fatores (relação água/cimento, teor de aditivo superplastificante e teor de aditivo anti-lavagem) para obter modelos estatísticos lineares capazes de descrever o abatimento, perda de massa por lavagem e resistência à compressão em micro concretos submersos. Estudo semelhante foi conduzido por Sonebi (2001), acrescentando algumas respostas adicionais (tempo de fluxo em cone de Marsh e densidade do concreto), empregando também um maior número de experimentos de modo que foi possível gerar modelos estatísticos quadráticos.

Bayramov, Taşdemir e Taşdemir (2004) utilizaram modelos quadráticos, provenientes de um planejamento fatorial, para otimizar concretos reforçados com fibras metálicas. Avaliaram o efeito da relação de aspecto e consumo de fibras sobre parâmetros de fratura.

Na sequência deste capítulo apresenta-se a aplicação da técnica de planejamento fatorial fracionado para avaliar a robustez do concreto de baixo consumo de cimento desenvolvido no capítulo anterior, frente a variações que podem ocorrer na sua produção.

6.1.2 Parâmetros do planejamento

Um estudo de robustez deve inicialmente definir um conjunto adequado de fatores independentes e respostas relevantes do concreto que serão avaliadas. É necessário ainda coletar dados de variação dos fatores para que se possam estabelecer os níveis de variação dos fatores. Por fim, para que seja possível julgar os resultados obtidos com relação à aceitação ou não, será necessário estabelecer limites de aceitação das respostas.

6.1.2.1 Fatores e níveis

Nos capítulos anteriores já foi detalhado o foco principal da avaliação de robustez desta pesquisa: as principais variações nos agregados (granulometria e morfologia) e os desvios de proporcionamento que surgem no processo de pesagem. Em função da quantidade de diferentes materiais presentes no concreto definem-se o número de fatores que precisam ser avaliados. O concreto de referência (concreto base) desenvolvido no capítulo anterior é constituído de dois agregados graúdos (brita 1 e brita 0) e dois agregados miúdos (areia de britagem e areia natural), além dos finos (cimento e dois filers). Para reduzir o número de ensaios, os dois agregados graúdos foram tomados em conjunto. Visto que a quantidade de Brita 0 é pequena, esta é uma decisão aceitável. Por exemplo, no caso da avaliação de morfologia, mostrou-se em um trabalho recente (REBMANN et al., 2016) que é possível estimar a contribuição da morfologia de cada componente a partir da ponderação do seu fator de forma por sua fração volumétrica. Como o teor de brita 0 é pequeno, considerou-se ser possível avaliar seu impacto morfológico em conjunto com a brita 1. Na etapa de avaliação de granulometria considerou-se ainda o pó proveniente dos agregados britados como um fator que pudesse trazer um impacto significativo, visto que apresenta alta área específica decorrente da sua finura e morfologia. Os finos (cimento e filers) foram avaliados em conjunto, pois considerou-se que os mesmos podem ser fornecidos pré-misturados. Desta forma, o conjunto de fatores que foi considerado está descrito na Tabela 16.

Tabela 16 – Conjunto de fatores avaliados no estudo experimental de robustez

Etapa	Material	Fator	Valor dos Níveis	
			+1	-1
Desvios de Pesagem	Agregados graúdos	PeS _{Gr}	+4%	-4%
	Agregado miúdo 1	PeS _{M1}	+4%	-4%
	Agregado miúdo 2	PeS _{M2}	+4%	-4%
	Finos	PeS _{Fin}	+5%	-2%
Granulometria (MF=módulo de finura)	Agregados graúdos	Gr _{Gr}	7,00	6,77
	Agregado miúdo 1	Gr _{M1}	3,76	3,26
	Agregado miúdo 2	Gr _{M2}	1,22	0,90
	Pó de brita	Gr _{Pó}	5,4%	2,4%
Morfologia (b/l =relação de aspecto)	Agregados graúdos	Mf _{Gr}	0,693	0,648
	Agregado miúdo 1	Mf _{M1}	0,678	0,631
	Agregado miúdo 2	Mf _{M2}	0,735	0,710

Nota: Agregados graúdos = Brita 1 + Brita 0; Agregado miúdo 1 = Areia de Britagem; Agregado miúdo 2 = Areia Natural; Pó de brita = fração <150 µm oriunda da areia de britagem e das britas

As análises foram conduzidas em dois níveis de variação para cada fator. Como as variações propostas não foram muito grandes espera-se que o comportamento entre estes dois níveis seja aproximadamente linear, possibilitando assim apenas a simulação com as situações extremas. Os modelos de regressão obtidos no capítulo 4 são todos lineares, com R² próximo da unidade, e não se

encontrou nenhuma indicação de não linearidade para os fatores considerados, confirmando a possibilidade de se manter apenas dois fatores.

Nas duas últimas colunas da Tabela 16 indicam-se os níveis de variação empregados no estudo experimental.

Os níveis fixados para desvios de pesagem consideram os dados de variabilidade descritos na sessão 4.2, dados de literatura (RIGUEIRA, 2008) e limites citados na ABNT NBR 7212 (2012). Para variação da granulometria considerou-se valores representativos obtidos no levantamento de dados sintetizados pelas figuras 27 e 29, além da recomendação da antiga ABNT NBR 7211 (1984) que admite variação de MF de areias de no máximo $\pm 0,20$.

Para a morfologia carece-se de dados estatísticos representativos de um mesmo produtor ao longo do tempo. Análise morfológica por análise dinâmica de imagens é algo muito recente, e ainda não adotada por produtores de agregados. Ensaio tradicionais, tais como os que medem manualmente a relação de aspecto por meio de paquímetros ABNT NBR 7809 (2008b) são muito trabalhosos e aplicáveis apenas a agregados graúdos. Por estes motivos não se encontrou levantamentos de dados de produtores ou consumidores de agregados. Um pequeno levantamento de variabilidade de produtos comerciais de um mesmo produtor permitiu fixar os níveis de variação da morfologia (ver 4.2.4, pg. 97).

6.1.2.2 Respostas e limites de aceitação

As respostas se referem às propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, conforme detalhado na Tabela 17.

Tabela 17 - Respostas e limites de aceitação no estudo experimental de robustez

Etapa	Resposta	Limites de aceitação
Estado Fresco	Torque de escoamento	$\pm 30\%$
	Viscosidade aparente em alta rotação	$\pm 30\%$
	Torque na mistura	$\pm 30\%$
	Abertura no ensaio de flow	$\pm 50\text{mm}$
	Teor de ar	$\pm 1\%$
Estado endurecido: propriedades mecânicas	Resistência à compressão	$\pm 5\text{MPa}$
	Módulo de elasticidade	$\pm 2,5\text{GPa}$
Estado endurecido: durabilidade	Carga passante (penetração de cloretos)	Mesma classe da Tabela 39
	Coefficientes de permeabilidade ao ar	Mesma ordem de grandeza

Algumas respostas possuem limites que podem ser fixados baseados em prescrições normativas ou indicações em pesquisas. Outras não encontram referências prescritas, tendo sido fixadas com base na experiência do pesquisador.

Para os parâmetros medidos no reômetro considerou-se uma faixa de variação ($\pm 30\%$) baseada em experiências anteriores e que resultassem em condições nitidamente alteradas de trabalhabilidade. O espalhamento considerou-se de acordo com as classes de espalhamento definidas para concretos auto adensáveis na ABNT NBR 15823-1 (2010b)

Para a resistência à compressão adotou-se o intervalo de $\pm 1,65 s_d$, com desvio padrão $s_d = 3$ MPa, condição frequentemente encontrada em concretos executados em centrais de concreto comerciais. O módulo de elasticidade pode ser estimado a partir da resistência à compressão, por exemplo, conforme o modelo descrito na ABNT NBR 6118 (2014). Assim, com base na faixa de variação da resistência, estimou-se a faixa de variação do módulo de elasticidade.

Para os dados de durabilidade não se encontra facilmente limites estabelecidos, decorrente principalmente pela falta de padronização dos ensaios. No ensaio de penetração de cloretos deve-se permanecer na mesma categoria conforme a Tabela 39 (pg. 241). No ensaio de permeabilidade deve-se manter os coeficientes de permeabilidade na mesma ordem de grandeza.

6.1.3 Projeto do planejamento experimental fracionado

O grande número de fatores descritos impossibilita a consideração simultânea, mesmo se planejamentos fracionados forem empregados. Por este motivo a análise foi realizada em etapas. Em cada etapa foi considerado um grupo de fatores e um planejamento fatorial fracionado que permitisse avaliar os efeitos principais e interações de dois fatores. Interações de ordem três e superior foram considerados desprezíveis.

Por exemplo, no caso do primeiro grupo (desvios de pesagem) têm-se um total de 4 fatores, o que representaria $2^4 = 16$ ensaios no caso de um planejamento completo. Pode-se, no entanto, empregar inicialmente um planejamento fracionado 2^{4-1} , resultando em 8 ensaios apenas. Para gerar a tabela com definição dos níveis para cada ensaio escolhe-se os fatores que farão parte de um fatorial completo, neste caso $4 - 1 = 3$ fatores. Os demais fatores são calculados a partir da definição de relações geradoras.

No caso da etapa de avaliação de desvios de pesagem, as primeiras três variáveis constituem um fatorial completo ($2^3 = 8$ ensaios), e a quarta variável tem seus níveis definidos pelo produto das três

primeiras (Equação 21). De forma semelhante, nas etapas de avaliação de alterações granulométricas e alterações morfológicas, as relações geradoras são descritas pelas Equações 22 e 23, respectivamente. Portanto, as etapas de desvios de pesagem e granulometria necessitaram de apenas 8 ensaios e a etapa de mudanças morfológicas de 4 ensaios.

$$P_{S_{Fin}} = P_{S_{Gr}} P_{S_{M1}} P_{S_{M2}} \quad \text{Equação 21}$$

$$Gr_{P6} = Gr_{Gr} Gr_{M1} Gr_{M2} \quad \text{Equação 22}$$

$$Mf_{M2} = Mf_{Gr} Mf_{M1} \quad \text{Equação 23}$$

6.1.4 Detalhamento dos ensaios

6.1.4.1 Etapa de avaliação de desvios de pesagem

Foram produzidos 8 concretos, conforme o planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} . Nas tabelas 18 a 23 mostra-se a sequência para determinação da composição de cada ensaio.

Inicialmente definiu-se os níveis genéricos para cada fator (Tabela 18). $P_{S_{Gr}}$, $P_{S_{M1}}$ e $P_{S_{M2}}$ formam um fatorial completo e $P_{S_{Fin}}$ é determinado pela relação geradora da Equação 21.

Tabela 18 – Definição dos níveis genéricos para os fatores de avaliação de desvios de pesagem

Ensaio	$P_{S_{Gr}}$	$P_{S_{M1}}$	$P_{S_{M2}}$	$P_{S_{Fin}}$
1	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	-1	-1	+1
5	-1	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1	+1
7	-1	-1	+1	+1
8	-1	-1	-1	-1

Os níveis genéricos foram então convertidos em seus valores (Tabela 19) de acordo com a Tabela 16.

Tabela 19 – Definição dos desvios percentuais para os fatores de avaliação de desvios de pesagem

Ensaio	ΔP_{SGr}	ΔP_{SM1}	ΔP_{SM2}	ΔP_{SFin}
1	4%	4%	4%	5%
2	4%	4%	-4%	-2%
3	4%	-4%	4%	-2%
4	4%	-4%	-4%	5%
5	-4%	4%	4%	-2%
6	-4%	4%	-4%	5%
7	-4%	-4%	4%	5%
8	-4%	-4%	-4%	-2%

Na Tabela 20 têm-se o desmembramento para os distintos materiais e na Tabela 21 mostra-se a aplicação de cada desvio de pesagem sobre a composição do concreto base (descrita na Tabela 14, pg. 144).

Tabela 20 – Definição dos desvios percentuais de pesagem de cada material, na etapa de avaliação de desvios de pesagem

Ensaio	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Filer P5	Filer P1	Cimento
1	4%	4%	4%	4%	5%	5%	5%
2	4%	4%	4%	-4%	-2%	-2%	-2%
3	4%	4%	-4%	4%	-2%	-2%	-2%
4	4%	4%	-4%	-4%	5%	5%	5%
5	-4%	-4%	4%	4%	-2%	-2%	-2%
6	-4%	-4%	4%	-4%	5%	5%	5%
7	-4%	-4%	-4%	4%	5%	5%	5%
8	-4%	-4%	-4%	-4%	-2%	-2%	-2%

Tabela 21 – Composições (kg por batelada), com aplicação dos desvios percentuais de pesagem sobre cada material, na etapa de avaliação de desvios de pesagem

Ensaio	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Filer P5	Filer P1	Cimento
Base	14,632	3,001	8,591	4,505	1,786	3,252	3,408
1	15,217	3,121	8,935	4,685	1,875	3,415	3,578
2	15,217	3,121	8,935	4,325	1,750	3,187	3,340
3	15,217	3,121	8,247	4,685	1,750	3,187	3,340
4	15,217	3,121	8,247	4,325	1,875	3,415	3,578
5	14,047	2,881	8,935	4,685	1,750	3,187	3,340
6	14,047	2,881	8,935	4,325	1,875	3,415	3,578
7	14,047	2,881	8,247	4,685	1,875	3,415	3,578
8	14,047	2,881	8,247	4,325	1,750	3,187	3,340

Note-se que até o momento nada foi dito a respeito da água e do aditivo. Como os erros avaliados são de pesagem dos sólidos, manteve-se o consumo de água e aditivo fixo, respectivamente em 2,465 kg e 0,068 kg. Os volumes totais obtidos, após a aplicação dos desvios de pesagem, resultam diferentes dos 17 L do concreto base. Assim, foi realizada a normalização para manter o volume da mistura em 17 L (Tabela 22), incluindo-se agora os consumos de água e aditivo, que também sofrem ajustes devido à normalização. Desta forma, mudanças na relação água/cimento e água/sólidos puderam ser consideradas na análise dos resultados.

Tabela 22 – Composições dos concretos (kg) da etapa de avaliação de desvios de pesagem para volume de ensaio (17 L)

Composição	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Fíler P5	Fíler P1	Cimento	Água	Adva 527
Base	14,632	3,001	8,591	4,505	1,786	3,252	3,408	2,465	0,068
1	14,694	3,014	8,627	4,524	1,811	3,297	3,455	2,380	0,065
2	14,985	3,073	8,798	4,259	1,724	3,138	3,289	2,427	0,067
3	15,090	3,095	8,178	4,646	1,736	3,160	3,312	2,444	0,067
4	15,030	3,083	8,146	4,272	1,852	3,373	3,534	2,435	0,067
5	14,152	2,903	9,002	4,720	1,763	3,211	3,365	2,483	0,068
6	14,095	2,891	8,965	4,340	1,882	3,426	3,591	2,473	0,068
7	14,195	2,911	8,334	4,735	1,895	3,451	3,616	2,491	0,068
8	14,490	2,972	8,508	4,461	1,806	3,288	3,445	2,543	0,070

Os consumos expressos por m³ de concreto estão na Tabela 23.

Tabela 23 – Composições dos concretos (kg) da etapa de avaliação de desvios de pesagem para volume de 1 m³

Composição	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Fíler P5	Fíler P1	Cimento	Água	Adva 527
Base	861	177	505	265	105	191	200	145	4,0
1	864	177	507	266	107	194	203	140	3,8
2	881	181	518	251	101	185	193	143	3,9
3	888	182	481	273	102	186	195	144	3,9
4	884	181	479	251	109	198	208	143	3,9
5	832	171	530	278	104	189	198	146	4,0
6	829	170	527	255	111	202	211	145	4,0
7	835	171	490	279	111	203	213	147	4,0
8	852	175	500	262	106	193	203	150	4,1

6.1.4.2 Etapa de avaliação de mudanças granulométricas

Foram produzidos 8 concretos, conforme o planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} .

Inicialmente foram definidos os níveis genéricos para cada fator (Tabela 24), conforme a relação geradora da Equação 22.

Tabela 24 – Definição dos níveis genéricos dos fatores (etapa de variações granulométricas)

Ensaio	GrGr	GrM1	GrM2	GrPó
1	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	-1	-1	+1
5	-1	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1	+1
7	-1	-1	+1	+1
8	-1	-1	-1	-1

O nível +1 se refere à granulometria mais grossa, enquanto que o nível -1 se refere à mais fina, no caso dos agregados. No pó, variado em $\pm 1,5\%$ do volume total de sólidos, o nível +1 se refere ao teor mais alto (5,4%) e o nível -1 ao teor mais baixo (2,4%). As granulometrias foram obtidas por peneiramento seletivo, a partir dos materiais básicos empregados na produção do concreto base, de modo a obter as alterações desejadas. A Figura 74 mostra as curvas granulométricas obtidas e os parâmetros granulométricos correspondentes estão descritos na Tabela 25.

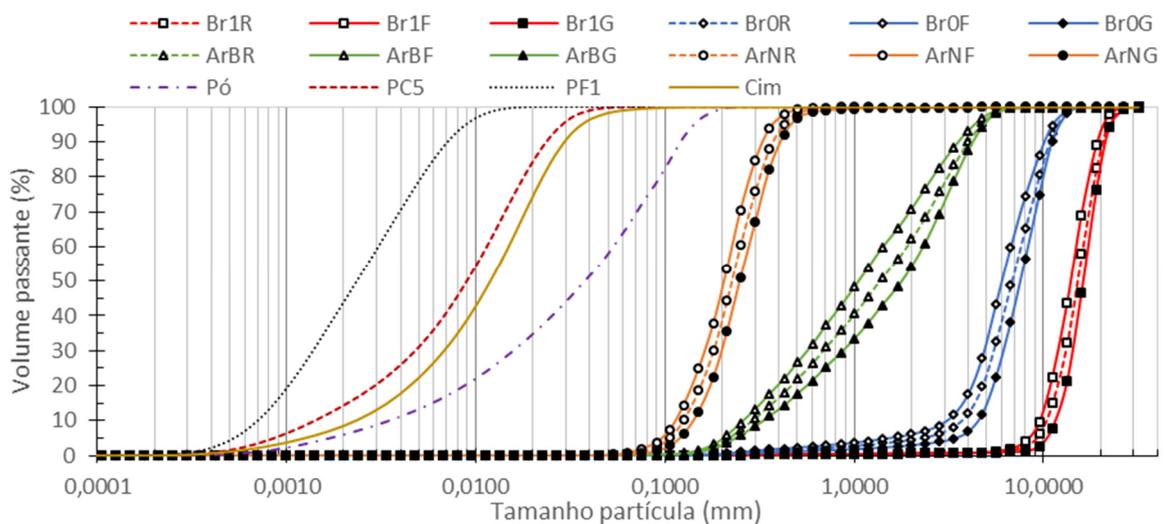


Figura 74 - Granulometrias dos agregados empregados na etapa de avaliação dos efeitos de mudanças granulométricas. Para cada agregado (Brita 1 = Br1; Brita 0 = Br0; Areia Britada = ArB; Areia Natural = ArN) foi produzida uma versão mais fina (F) e mais grossa (G) em relação à Referência (R).

Tabela 25 - Parâmetros granulométricos das versões grossa e fina de cada agregado empregado na fase de avaliação de mudanças granulométricas

Parâmetro	Br1F	Gr1G	Br0F	Br0G	ArBF	ArBG	ArNF	ArNG	Pó
D ₁₀ (mm) ⁽¹⁾	9,56	11,45	3,05	4,45	0,258	0,329	0,112	0,140	0,004
D ₅₀ (mm) ⁽¹⁾	13,92	16,21	6,03	7,53	1,05	1,78	0,204	0,248	0,045
D ₉₀ (mm) ⁽¹⁾	19,33	21,45	10,18	11,09	3,55	4,25	0,330	0,409	0,144
MF	6,99	7,19	5,70	6,06	3,26	3,76	0,90	1,22	
VSA ⁽²⁾ (m ² /cm ³)	0,00046	0,00041	0,00147	0,00103	0,00802	0,00596	0,02780	0,02245	0,5972

(1) Percentis 10% (D₁₀) e 90% (D₉₀) e mediana (D₅₀) por AID (agregados) e difração laser (pó de britas);

(2) Área específica volumétrica foi calculada a partir da distribuição granulométrica;

As composições dos concretos (Tabelas 26 e 27) se diferenciam em dois grupos quanto ao volume de pó. O concreto de referência é o mesmo desenvolvido no capítulo 5, tendo apenas sido apresentado o pó separado dos agregados britados.

Tabela 26 – Composições dos concretos (kg), na etapa de variação granulométrica, para volume de ensaio (17 L)

Composição	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Pó Pedra	Fíler P5	Fíler P1	Cimento	Água	Adva 527
Referência	14,515	2,943	7,259	4,505	1,508	1,786	3,252	3,408	2,465	0,068
1, 4, 6 e 7	14,469	2,920	6,740	4,505	2,095	1,786	3,252	3,408	2,465	0,068
2, 3, 5 e 8	14,561	2,966	7,778	4,505	0,920	1,786	3,252	3,408	2,465	0,068

Tabela 27 – Composições dos concretos (kg), na etapa de variação granulométrica, para volume de 1 m³

Composições	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Pó Pedra	Fíler P5	Fíler P1	Cimento	Água	Adva 527
Referência	854	173	427	265	89	105	191	200	145	4,0
1, 4, 6 e 7	851	172	396	265	123	105	191	200	145	4,0
2, 3, 5 e 8	857	174	458	265	54	105	191	200	145	4,0

6.1.4.3 Etapa de avaliação de mudanças morfológicas

Foram produzidos 4 concretos, conforme o planejamento fatorial fracionado 2³⁻¹. Acrescentou-se a estes ainda um ponto central, no qual se empregou misturais iguais das duas morfologias, de modo a obter morfologias médias. Os níveis de cada ensaio estão indicados na Tabela 28. O nível +1 se refere ao material com relação de aspecto mais alto, isto é, mais arredondado, enquanto que o nível -1 se refere ao material com partículas mais alongadas.

Tabela 28 – Definição dos níveis genéricos dos fatores (etapa variações morfológicas)

Ensaio	Mf _{Gr}	Mf _{M1}	Mf _{M2}
Mf0	0	0	0
Mf1	+1	+1	+1
Mf2	+1	-1	-1
Mf3	-1	+1	-1
Mf4	-1	-1	+1

No caso dos agregados graúdos foi possível produzir os materiais mais e menos esféricos a partir dos materiais originais, por meio de processo de catação manual. Para os dois agregados miúdos foram selecionados outros de origem similar, que, porém, apresentavam morfologia distinta. Para que o efeito avaliado fosse apenas da morfologia, os materiais com morfologias distintas tiveram suas granulometrias ajustadas por peneiramento seletivo (separação em diversas frações e recomposição), de modo que as granulometrias fossem mantidas. A parcela fina dos agregados britados (< 150 μm) foi retirada por peneiramento. Todos finos assim coletados foram misturados, homogeneizados e então empregados em proporções idênticas em todos concretos, de modo que os finos não representassem uma variável no estudo. As distribuições granulométricas, morfológicas e dados da caracterização física dos agregados se encontram na Figura 75, Figura 76 e Tabela 29, respectivamente.

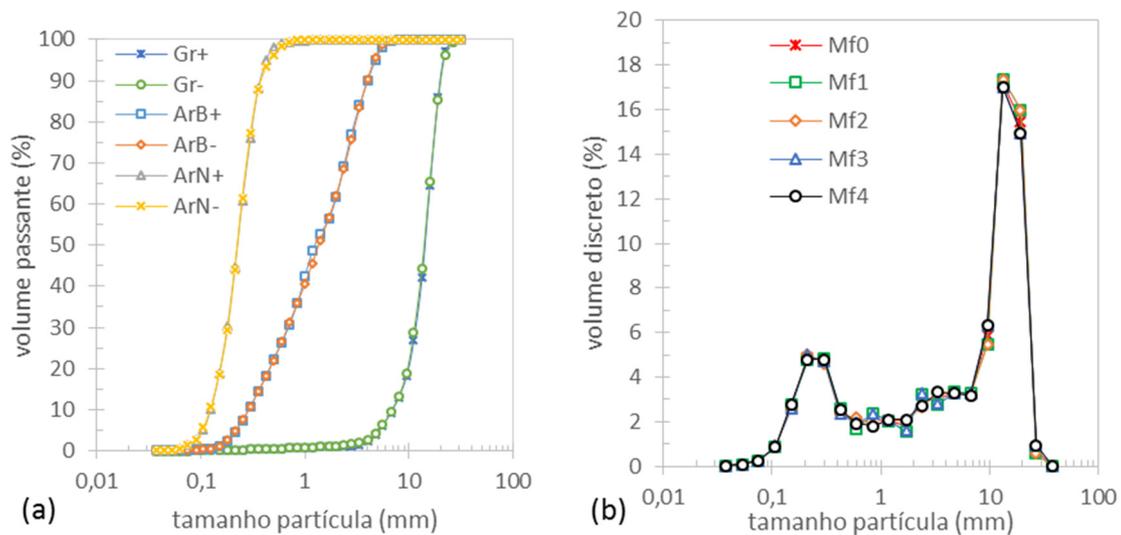


Figura 75 – Granulometrias: (a) distribuição acumulada passante dos agregados individuais, sendo que Brita 1 e Brita 0 já estão compostas em um único agregado graúdo Gr; (b) distribuição granulométrica discreta do conjunto de agregados nos concretos.

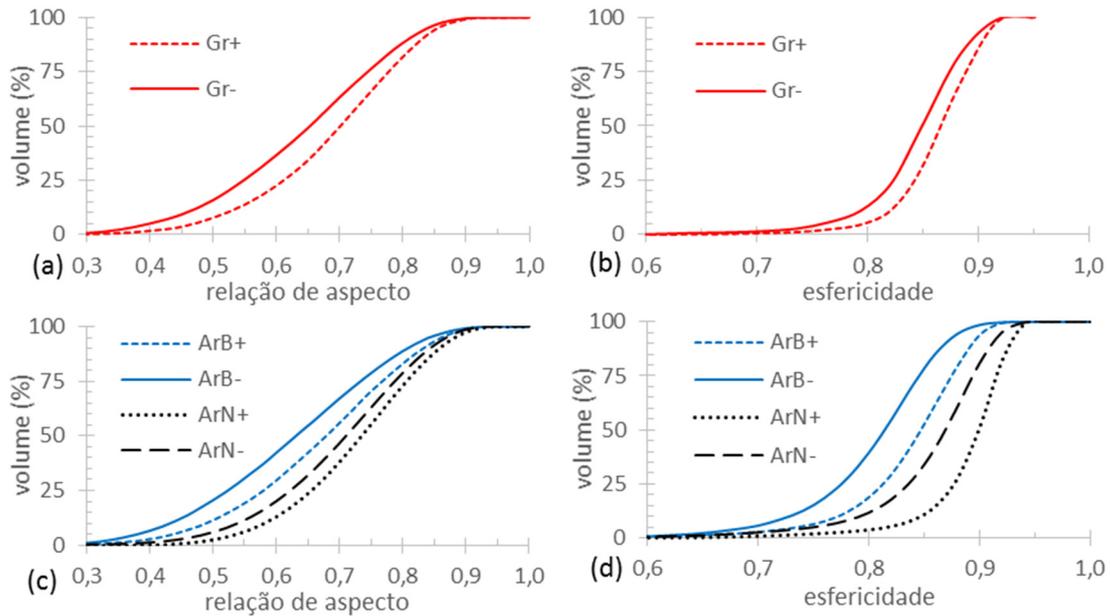


Figura 76 - Distribuição de morfologia dos agregados graúdos (a e b) e miúdos (c e d): relação de aspecto (a e c) e esfericidade (b e d)

Tabela 29 – Caracterização física dos agregados empregados na etapa de avaliação de mudança morfológica

Agregado	Densidade ⁽¹⁾ (g/cm ³)	D ₁₀ ⁽²⁾ (mm)	D ₅₀ ⁽²⁾ (mm)	D ₉₀ ⁽²⁾ (mm)	A _{esp} Vol. ⁽³⁾ (m ² /cm ³)	Esfericidade ⁽⁴⁾	Relação de aspecto ⁽⁴⁾
Graúdo Gr+	2,709	6,932	14,17	20,14	0,00066	0,868	0,693
Graúdo Gr-	2,704	6,854	13,97	20,36	0,00068	0,852	0,648
Areia Britada ArB+	2,797	0,289	1,253	4,007	0,0070	0,848	0,678
Areia Britada ArB-	2,704	0,287	1,353	3,960	0,0070	0,816	0,631
Areia Natural ArB+	2,651	0,124	0,224	0,374	0,0251	0,899	0,735
Areia Natural ArB-	2,651	0,122	0,224	0,381	0,0252	0,870	0,710
Pó de britas	2,704	0,004	0,045	0,144	3,633 ⁽³⁾		

(1) Por picnometria de gás Hélio;

(2) Percentis 10% (D₁₀) e 90% (D₉₀) e mediana (D₅₀) por AID (agregados) e difração laser (pó de britas);

(3) Área específica volumétrica foi calculada a partir da distribuição granulométrica obtida por AID (agregados) e BET N₂ para o pó de brita;

(4) Valores medianos obtidos por AID.

Todos os concretos desta etapa deveriam ter a mesma composição volumétrica. Devido às ligeiras mudanças de densidade entre os pares de materiais com morfologia distinta a composição em massa resultou ligeiramente diferente uma da outra (Tabela 31). Os materiais não indicados seguem o concreto referência (ver Tabela 14, pg. 144).

Tabela 30 - Composições dos concretos (kg), na etapa de variação morfológica, para volume de ensaio (17 L)

Material	Mf0	Mf1	Mf2	Mf3	Mf4
Graúdo Gr+	8,704	17,493	17,493	-	-
Graúdo Gr-	8,687	-	-	17,374	17,374
Areia Britada ArB+	3,740	7,514	-	7,463	-
Areia Britada ArB-	3,621	-	7,259	-	7,259
Areia Natural ArB+	2,244	4,505	-	-	4,505
Areia Natural ArB-	2,244	-	4,505	4,505	-
Pó de britas	1,513	1,513	1,513	1,513	1,513

Tabela 31 - Composições dos concretos (kg), na etapa de variação morfológica, para volume de 1 m³

Material	Mf0	Mf1	Mf2	Mf3	Mf4
Graúdo Gr+	512	1029	1029	-	-
Graúdo Gr-	511	-	-	1022	1022
Areia Britada ArB+	220	442	-	439	-
Areia Britada ArB-	213	-	427	-	427
Areia Natural ArB+	132	265	-	-	265
Areia Natural ArB-	132	-	265	265	-
Pó de britas	89	89	89	89	89

6.2 Resultados e análise

6.2.1 Forma de análise

Foram considerados modelos de regressão lineares para descrever as respostas com base nos fatores (Equação 24).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Equação 24}$$

Onde y é a resposta; x_i e x_j são as variáveis independentes (fatores); β_0 é o termo independente ; β_i e β_{ij} são os coeficientes relativos aos efeitos principais e interações de dois fatores , respectivamente; ε é o resíduo onde se incluem o resíduo aleatório e os efeitos de ordem superior a dois.

Os coeficientes do modelo são estimados por meio de técnicas de regressão, sendo válidas para as faixas de variação nos quais os fatores foram variados. Nesta etapa empregou-se o software estatístico Minitab® 17.1.0 para conduzir a análise dos resultados, fornecendo gráficos resumos dos dados, tabelas de regressão, análise de variância (ANOVA) e ferramentas numéricas e gráficas para detecção

de tendências nos resíduos, presença de *outliers* e adequação do modelo obtido comparando, por exemplo, valores previstos com medidos.

Pôde-se assim, de maneira simultânea, avaliar a influência de todos os fatores, com os níveis considerados no trabalho, sobre cada uma das propriedades medidas nos ensaios, permitindo determinar a importância dos fatores, suas interações e identificação de fatores não significativos, ao nível de significância escolhido. A significância foi avaliada por meio do *teste-t de Student*. Fatores com *valor-p* altos, superiores ao nível de significância escolhido (adotou-se $\alpha=0,05$), foram eliminados em etapas, permitindo uma reavaliação dos demais e obtenção de modelos apenas com os fatores significativos.

Para quantificar numericamente a robustez foi empregado o método de reamostragem *Bootstrap* (EFRON; TIBSHIRANI, 1994). Neste método são formadas amostras a partir de amostragem aleatória dentre os dados de variabilidade dos fatores considerados. Aplicando os modelos matemáticos obtidos na análise de regressão sobre estas amostras obtém-se uma distribuição de resultados para cada propriedade modelada. A partir desta distribuição é possível construir intervalos de confiança, os quais foram comparados com os limites admissíveis, podendo-se assim julgar a grau de robustez obtido.

6.2.2 Desvios de pesagem

6.2.2.1 Efeito dos desvios de pesagem sobre os parâmetros reológicos

Os concretos da Tabela 22 foram produzidos empregando o reômetro para mistura, com a sequência de mistura e análise reológica já detalhada para o concreto de referência (ver 5.2.3, pg. 127). A Figura 77 ilustra as diferenças observadas durante a mistura dos diversos concretos. Principalmente no torque final é possível observar que os desvios de pesagem afetam as propriedades reológicas. Também durante a adição de água à argamassa (300 a 400 segundos) nota-se alterações na cinética de mistura.

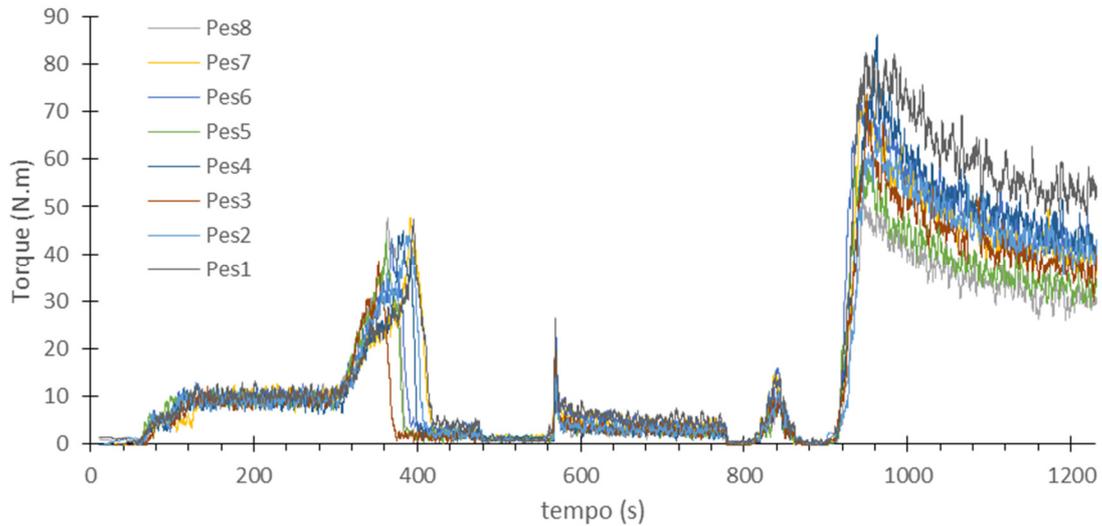


Figura 77 - Curvas de mistura obtidas na fase de avaliação de desvios de pesagem

Após a mistura inicial é avaliado o perfil reológico por meio de um ciclo de cisalhamento. Na Figura 78 mostra-se o resultado referente ao trecho de desaceleração. Os torques de escoamento são praticamente nulos, não podendo-se notar relação com os desvios de pesagem. A viscosidade é alterada. O concreto com todos desvios positivos (Pes_1) apresenta os maiores torques nas altas taxas, enquanto o Pes_8, com todos desvios negativos, apresentou os menores torques.

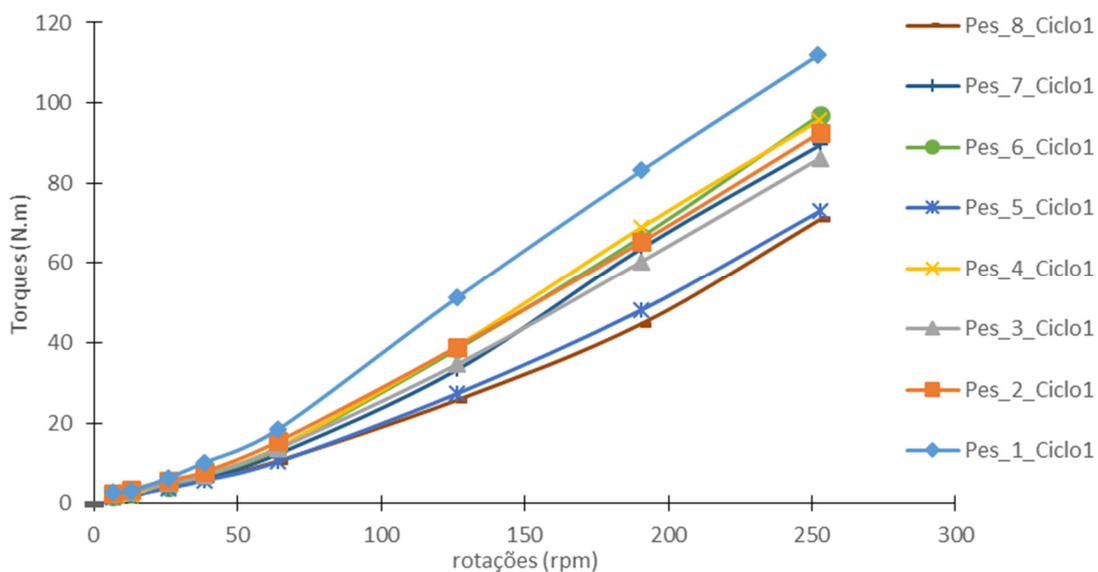


Figura 78 - Perfil reológico dos concretos da fase de avaliação de desvios de pesagem, obtidos logo após a mistura inicial (trecho de desaceleração)

Os parâmetros reológicos de maior interesse obtidos nos ensaios estão listados na Tabela 32.

Tabela 32 – Parâmetros reológicos principais obtidos na etapa de avaliação de desvios de pesagem

Parâmetro	Composição							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Torque de escoamento (N.m) ⁽¹⁾	0,36	0,42	0,02	0,02	0,00	0,57	0,03	0,00
	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,32	0,25	0,21	0,22	0,26	0,30	0,24	0,25
Viscosidade aparente em alta taxa (N.m/rpm) ⁽²⁾	0,444	0,366	0,341	0,379	0,289	0,384	0,354	0,281
	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,020	0,018	0,015	0,012	0,021	0,015	0,018	0,019
Energia de mistura na fase de concreto (N.m.s) ⁽³⁾	19330	14797	13872	16283	12432	16244	14885	11276
Torque mistura (N.m) ⁽⁴⁾	59,5	44,3	38,5	46,0	34,7	45,4	42,1	30,5
	±	±	±	±	±	±	±	±
	1,2	1,0	1,2	1,2	0,9	1,0	1,0	0,9

(1) Calculado a partir da extrapolação de um modelo de Herschel-Bulkley aplicado sobre os dados de torque nas três menores rotações da rampa de aceleração do ciclo de cisalhamento executado imediatamente após a mistura.

(2) Relação torque/rotação na maior taxa de cisalhamento do ciclo de cisalhamento (253 rpm);

(3) Área sob a curva torque x tempo nas etapas de mistura do concreto (etapas 10 e 11 na Figura 54, pg. 128);

(4) Torque médio tomado no intervalo de 30 a 60 segundos após o início da mistura complementar (ver 6.2.2.2, pg. 173, para detalhes sobre a mistura adicional).

Os torques de escoamento possuem valores próximos a zero. Os valores determinados estão dentro da margem de erro dos resultados, não havendo diferença significativa entre eles. Portanto, os torques de escoamento, próximos de serem nulos, não são afetados significativamente pelos desvios de pesagem.

Para os demais parâmetros, a análise de variância (ANOVA) aplicada sobre o planejamento fatorial indicou que o desvio de pesagem do agregado miúdo 2 (Areia Natural) e as interações dos demais fatores não são significativos, ao nível de confiança de 90%. As regressões lineares resultantes com os termos significativos, expressas em termos de desvios de pesagem (em %) são descritas pelas equações 25 a 27. Indica-se também o valor do coeficiente de determinação R^2 , que expressa a proporção da variação da resposta explicada pelos modelos de regressão.

$$V_{ap} = 0,340 + 0,697\Delta P_{S_{Gr}} + 0,401\Delta P_{S_{M1}} + 1,013\Delta P_{S_{Fin}}$$

$$(R^2 = 0,939)$$

Equação 25

$$E_{concr}^{mist} = 14120 + 29516\Delta P_{S_{Gr}} + 20275\Delta P_{S_{M1}} + 51298\Delta P_{S_{in}}$$

$$(R^2 = 0,967)$$

Equação 26

$$T_{mist} = 40,2 + 111\Delta P_{S_{Gr}} + 84\Delta P_{S_{M1}} + 161\Delta P_{S_{Fin}}$$

$$(R^2 = 0,939)$$

Equação 27

sendo:

 V_{ap} : viscosidade aparente em alta taxa (N.m/rpm) E_{concr}^{mist} : energia de mistura na fase de concreto (N.m.s) T_{mist} : torque de mistura (N.m) $\Delta P_{S_{Gr}}, \Delta P_{S_{M1}}, \Delta P_{S_{Fin}}$: desvios relativos de pesagem, respectivamente dos agregados graúdos, areia britada e finos (%)

Deve-se manter em mente que os modelos empíricos descritos possuem validade para concretos oriundos do concreto base acometidos por desvios de pesagem dentro do intervalo de desvios testados. Nota-se nos modelos empíricos que os coeficientes do agregado graúdo são superiores aos da areia britada, e que a areia natural não se mostrou significativa. Como os desvios são percentuais, esta constatação é compreensível, pois o mesmo erro percentual se torna tanto mais significativo quanto maior for o volume do material em questão. Os finos possuem efeito mais acentuado que os agregados. Mesmo tendo consumo próximo da areia britada, o efeito sobre os parâmetros estudados é cerca de 2 a 2,5 vezes maior. Com base nestas constatações, avaliou-se a possibilidade de considerar todos os agregados em conjunto, obtendo-se modelos empíricos (equações 28 a 30) tão significativos quanto os anteriores. Na Figura 79 ilustra-se a boa adequação destes modelos empíricos aos dados experimentais.

$$V_{ap} = 0,340 + 1,213\Delta P_{S_{Agr}} + 1,013\Delta P_{S_{Fin}}$$

$$(R^2 = 0,929)$$

Equação 28

$$E_{concr}^{mist} = 14120 + 54751\Delta P_{S_{Agr}} + 51298\Delta P_{S_{in}}$$

$$(R^2 = 0,968)$$

Equação 29

$$T_{mist} = 40,2 + 213\Delta P_{S_{Agr}} + 161\Delta P_{S_{Fin}}$$

$$(R^2 = 0,938)$$

Equação 30

sendo, $\Delta P_{S_{Agr}}$: desvio relativo de pesagem do total de agregados (%)

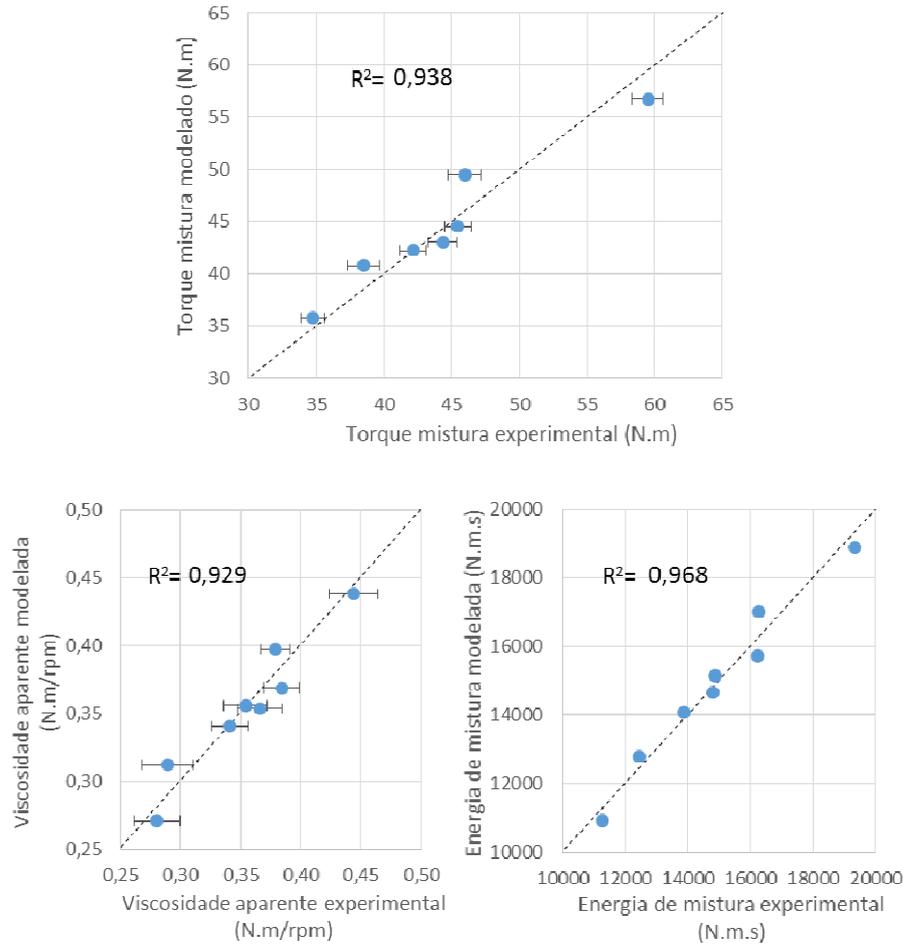


Figura 79 – Comparação entre os parâmetros reológicos experimentais e os previstos pelos modelos empíricos

Assim, no que diz respeito à reologia, com base nestes resultados, pode-se reduzir a análise inicialmente de quatro fatores para apenas dois: desvio de pesagem de agregados e de finos.

De fato, como o volume de água é mantido constante, enquanto os sólidos são acometidos de desvios, pode-se também avaliar as respostas em função da variação das relações volumétricas água/agregados e água/finos. Obtêm-se neste caso modelos empíricos muito próximos dos obtidos anteriormente, apenas com mudança de sinal dos coeficientes, uma vez que desvios positivos de pesagem levam a desvios negativos das relações água/sólidos.

$$V_{ap} = 0,341 - 1,206\Delta \frac{a}{agr} - 1,042\Delta \frac{a}{fin} \quad \text{Equação 31}$$

$$(R^2 = 0,923)$$

$$E_{concr}^{mist} = 14209 - 54512\Delta \frac{a}{agr} - 52771\Delta \frac{a}{fin} \quad \text{Equação 32}$$

$$(R^2 = 0,965)$$

$$T_{mist} = 40,5 - 211\Delta\frac{a}{agr} - 165\Delta\frac{a}{fin} \quad \text{Equação 33}$$

$$(R^2 = 0,932)$$

sendo,

$\Delta\frac{a}{agr}$: variação percentual da relação volumétrica de água e agregados (%)

$\Delta\frac{a}{fin}$: variação percentual da relação volumétrica de água e finos (%)

Observou-se ainda que regressões equivalentes podem ser obtidas usando simplesmente as relações volumétricas água/agregados e água/finos, ao invés das variações percentuais.

$$V_{ap} = 2,589 - 5,48\frac{a}{agr} - 1,206\frac{a}{fin} \quad \text{Equação 34}$$

$$(R^2 = 0,923)$$

$$E_{concr}^{mist} = 121492 - 247657\frac{a}{agr} - 61101\frac{a}{in} \quad \text{Equação 35}$$

$$(R^2 = 0,965)$$

$$T_{mist} = 417 - 959\frac{a}{agr} - 191\frac{a}{fin} \quad \text{Equação 36}$$

$$(R^2 = 0,932)$$

sendo,

a : volume de água

agr : volume total de agregados

fin : volume total de finos

Os volumes são os efetivamente presentes na batelada de concreto produzido, isto é, os volumes previstos acometidos pelos desvios de pesagem.

Destas equações é possível obter expressões que permitem estimar o volume de água necessário para atingir um dado parâmetro reológico, conhecidos os volumes efetivos de agregados e finos empregados.

$$a = \frac{2,589 - V_{ap}}{\left(\frac{5,48}{agr} + \frac{1,206}{fin}\right)} \quad \text{Equação 37}$$

$$a = \frac{121492 - E_{concr}^{mist}}{\left(\frac{247657}{agr} + \frac{61101}{fin}\right)} \quad \text{Equação 38}$$

$$a = \frac{417 - T_{mist}}{\left(\frac{959}{agr} + \frac{191}{fin}\right)} \quad \text{Equação 39}$$

6.2.2.2 Efeito do ajuste de água com base em critério reológico

Na produção comercial de concreto é prática usual realizar o ajuste final da água com base em algum critério de trabalhabilidade, por exemplo, o abatimento de tronco de cone para concretos convencionais ou o ensaio de espalhamento (*flow-test*) para concretos auto adensáveis. Assim, as mais diversas fontes de variação, que de alguma forma afetam a reologia medida por estes ensaios simples, são atribuídos a desvios no consumo de água. A tomada de decisão de ajustar o teor de água, para atender ao parâmetro reológico adotado como critério de aceitação, pode afetar outras propriedades, em especial as do estado endurecido.

Para avaliar as consequências desta prática, empregou-se o reômetro para realizar o ajuste de água após a etapa de mistura e análise reológica inicial. Fixou-se como critério de ajuste o torque observado durante uma etapa de mistura complementar (rotação de 126 rpm), após as caracterizações reológicas iniciais. De acordo com a Figura 71 (pg. 149), no segundo ciclo do concreto, os torques em 126 rpm estão no intervalo de 45 ± 6 N.m. Adotou-se este intervalo como critério de aceitação para o ajuste do teor de água. Aos concretos com torques acima deste intervalo foi adicionada água até atingir o limite de aceitação. Nos concretos que apresentaram torques abaixo do limite inferior não foi possível realizar ajustes, pois os mesmos já apresentavam excesso de água. Estes concretos foram produzidos uma segunda vez, com menos água e então foi feito o ajuste para que o torque de aceitação fosse atingido. Na Figura 80 mostram-se os torques de mistura para as 8 composições testadas, antes e após o ajuste. A composição 1 apresentou torque acima do limite, e, portanto, teve seu teor de água corrigido. As composições 5 e 8 apresentaram torques abaixo do limite estabelecido, sendo produzidos uma segunda vez com teor de água reduzido. As composições finais por m^3 dos três concretos corrigidos estão apresentadas na Tabela 33.

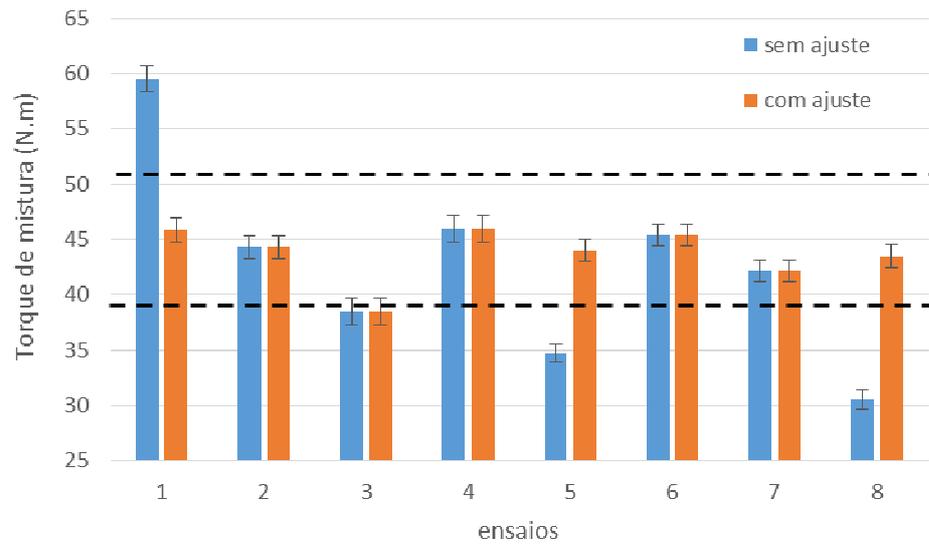


Figura 80 - Efeito do ajuste de água sobre o torque de mistura (etapa de desvios de pesagem)

Tabela 33 – Consumo de materiais por m³ dos concretos ajustados na etapa de desvios de pesagem

Composição	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Fíler P5	Fíler P1	Cimento	Água	Adva 527
1	863	177	507	266	106	194	203	143	3,8
5	836	172	532	279	104	190	199	142	4,0
8	860	176	505	265	107	195	204	142	4,1

As regressões obtidas anteriormente foram ajustadas de modo a incluir também os dados oriundos destes concretos ajustados. Pela Equação 40 pode-se prever o efeito que os volumes de água, agregados e finos efetivamente empregados possuem sobre o torque de mistura. Ou, conhecendo-se os desvios de pesagem dos sólidos, é possível estimar o consumo de água necessário para alcançar o torque de mistura desejado (Equação 41). Na Figura 81 ilustra-se como esta regressão se ajusta aos valores experimentais.

$$T_{mist} = 378 - 843 \frac{a}{agr} - 176 \frac{a}{fin} \quad \text{Equação 40}$$

$$(R^2 = 0,872)$$

$$a = \frac{378 - T_{mist}}{\left(\frac{843}{agr} + \frac{176}{fin}\right)} \quad \text{Equação 41}$$

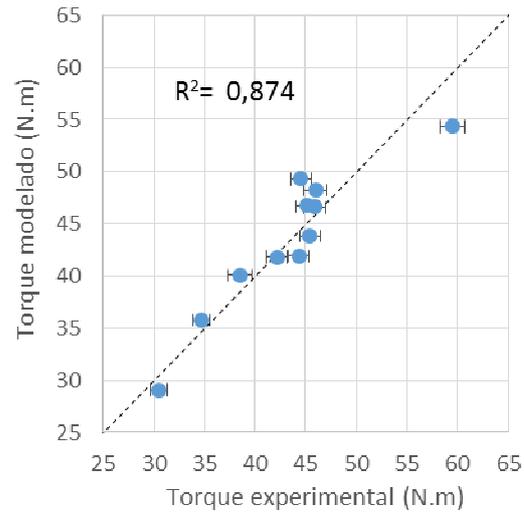


Figura 81 – Adequação do modelo empírico de previsão do torque de mistura na etapa de desvios de pesagem

Por fim, avaliou-se o impacto das alterações de composição sobre as propriedades no estado endurecido.

Na Figura 82 mostram-se as resistências aos 28 dias dos concretos cujos torques de mistura se encontravam no intervalo de aceitação estabelecido. Em função da relação água/cimento, a resistência pode ser descrita pela Equação 42.

$$f_{cm,28} = 166,08 e^{-1,614 \frac{a}{c}} \quad \text{Equação 42}$$

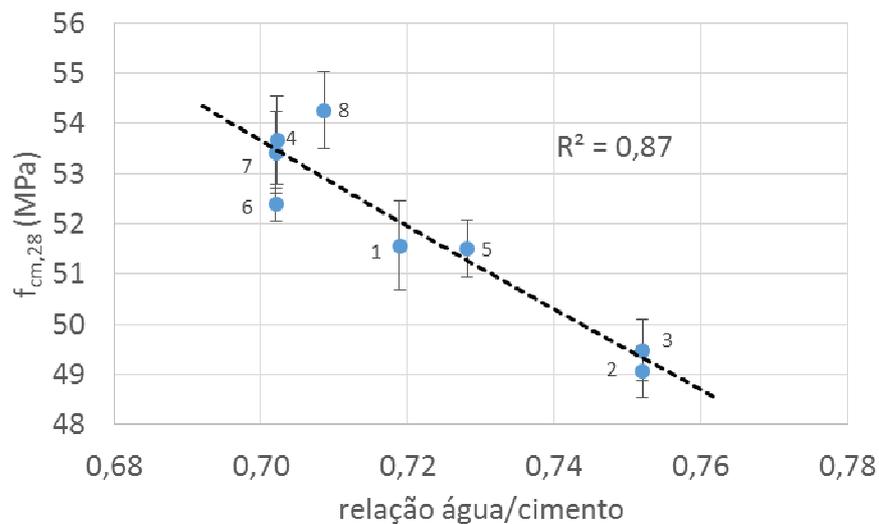


Figura 82 - Resistência à compressão aos 28 dias em função da relação água/cimento na etapa de desvios de pesagem

Para o módulo de elasticidade não se observou resultados com diferenças significativas entre os concretos avaliados. As variâncias observadas nos ensaios são superiores aos efeitos oriundos dos desvios de pesagem. Analisando os concretos em conjunto, observou-se média de 36,7 GPa e desvio padrão de 0,9 GPa. Espera-se assim que 90% dos resultados estejam entre 35,1 e 38,2 GPa. É importante salientar que esta dispersão se dá em virtude da variação natural no ensaio, e não devido às influências dos desvios de pesagem, que se mostraram não significativas.

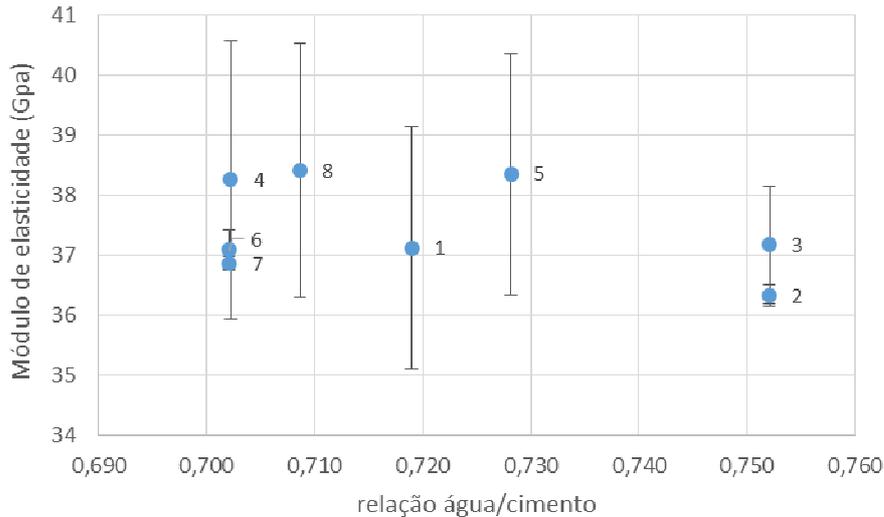


Figura 83 – Módulo de elasticidade aos 28 dias em função da relação água/cimento na etapa de desvios de pesagem

6.2.2.3 Simulação do efeito da variabilidade de pesagem

Tendo-se à disposição dados de variabilidade de pesagem, é possível empregar os modelos empíricos determinados nas sessões anteriores para simular o efeito que os desvios de pesagem possuem sobre a reologia e resistência à compressão. Para isto empregou-se o método de Bootstrap (EFRON; TIBSHIRANI, 1994), aplicado sobre os dados de variabilidade levantados (Figura 32, pg. 96). Foram gerados conjuntos (amostras) com 415 elementos (equivalente ao tamanho da amostra de variabilidade coletada), retirados aleatoriamente com reposição a partir dos dados originais de desvios absolutos de pesagem. Para cada elemento, calculou-se o desvio de pesagem de agregados e finos, e a partir destes estimou-se o impacto sobre os parâmetros reológicos, em especial o torque de mistura (Equação 40), pois é este o critério adotado para ajuste de água.

Na sequência, por meio da Equação 41, calculou-se o ajuste de água necessários para manter o torque no centro do intervalo de aceitação ($T_{mist} = 45N.m$). O ajuste de água, juntamente com o desvio de pesagem dos finos, resulta em alteração da relação água/cimento. Esta mudança afeta a resistência (Equação 42).

Estes cálculos foram realizados para cada um dos 415 elementos da amostra, obtendo-se a seguir a média e desvio padrão sobre este conjunto. Replicou-se então este processo para um total de 1000 amostras. A partir das 1000 médias e desvios-padrão obtidos construiu-se intervalos de confiança para nível de confiança de 90%.

Considerando produção de bateladas de 5 m³ de concreto, cujos materiais são pesados em uma única etapa, estima-se um torque de mistura médio de 40,1±0,2 N.m, com desvio padrão de 2,2±0,1 N.m. Assim, em 90% dos casos, o torque de mistura estará compreendido entre 36,0 e 44,2 N.m, ou seja, os desvios não ultrapassam 10%.

Para a viscosidade aparente na maior rotação estima-se valor médio de 0,341±0,001 N.m/rpm, com desvio padrão de 0,015±0,001 N.m/rpm. Assim, em 90% dos casos, a viscosidade aparente estará compreendida entre 0,314 e 0,368 N.m/rpm, ou seja, os desvios não ultrapassam 8%.

Para a energia de mistura na fase de concreto estima-se valor médio de 14189±60 N.m.s, com desvio padrão de 720±39 N.m.s. Assim, em 90% dos casos, a energia de mistura estará compreendida entre 12879 e 15498 MPa, ou seja, os desvios não ultrapassam 9%.

Na mesma situação, ajustando-se a trabalhabilidade com base no torque de mistura, estima-se que a resistência à compressão média obtida é de 51,58±0,04 MPa, com desvio padrão de 0,46±0,03 MPa. Assim, em 90% dos casos, a resistência à compressão aos 28 dias estará compreendida entre 50,8 e 52,4 MPa, ou seja, os desvios não ultrapassam 2%.

O reflexo sobre a intensidade de ligantes é correspondente à resistência obtida e aos desvios no consumo de cimento. Espera-se que em 90% dos casos, a intensidade de ligantes se encontre entre 3,63 e 3,71 kg/m³/MPa.

É claro que os desvios serão tão mais influentes, quanto menor for o volume de concreto produzido, pois um mesmo desvio absoluto de pesagem conduz a um maior desvio relativo. Na Figura 84 mostra-se como aumenta o intervalo de variação da resistência quando se reduz o volume da batelada. Os dados de desvios de pesagem obtidos são de uma central comercial de concreto, que realiza a mistura do material em caminhões betoneira e os desvios de pesagem se referem ao material total para o volume de concreto deste caminhão. Um produtor de concreto que opera com volumes menores ou que pesa cada material em mais de uma operação, deverá necessariamente ter à disposição um sistema de pesagem mais preciso, para evitar aumento da variabilidade em função dos desvios de pesagem.

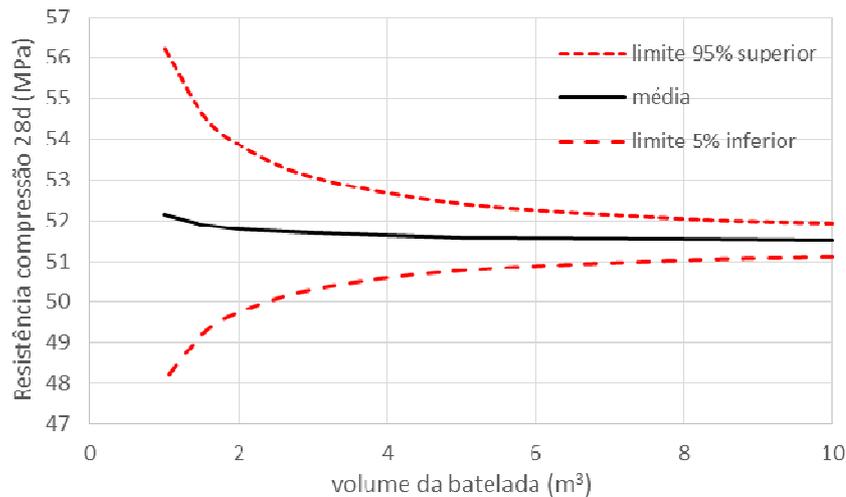


Figura 84 - Efeito do volume da batelada sobre a faixa de variação da resistência do concreto em virtude dos desvios de pesagem

6.2.3 Variações Granulométricas

6.2.3.1 Efeito das variações granulométricas sobre os parâmetros reológicos

Os concretos da Tabela 26 (pg. 163) foram produzidos seguindo a mesma metodologia já descrita na etapa de desvios de pesagem (6.2.2). Os parâmetros reológicos de maior interesse estão listados na Tabela 34.

Tabela 34 – Parâmetros reológicos principais do concreto (fase variações granulométricas)

Parâmetro	Composição							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Torque escoamento (N.m) ⁽¹⁾	1,5 ±	4,6 ±	2,4 ±	1,9 ±	1,0 ±	1,5 ±	0,9 ±	1,2 ±
	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2
T_{mist}^1 - Torque final mistura (N.m) ⁽²⁾	46,7 ±	34,5 ±	34,8 ±	54,8 ±	34,5 ±	52,2 ±	49,4 ±	36,9 ±
	1,3	1,1	1,1	1,4	1,0	1,2	1,1	1,0
E_{concr}^{mist} - Energia de mistura na fase de concreto (N.m.s) ⁽³⁾	18.461	13.972	13.713	21.115	14.135	21.149	19.580	14.546
V_{ap} - Viscosidade aparente em alta taxa (N.m/rpm) ⁽⁴⁾	0,411 ±	0,343 ±	0,286 ±	0,454 ±	0,326 ±	0,456 ±	0,420 ±	0,339 ±
	0,021	0,019	0,016	0,020	0,017	0,016	0,017	0,016
T_{mist}^2 - Torque início mistura adicional (N.m) ⁽⁵⁾	52,3 ±	36,0 ±	38,3 ±	63,2 ±	37,2 ±	63,8 ±	56,4 ±	41,0 ±
	1,2	1,0	1,3	1,4	1,0	1,2	1,2	1,0

(1) Calculado a partir da extrapolação de um modelo de Herschel-Bulkley aplicado sobre os dados de torque nas cinco menores rotações da rampa de desaceleração do ciclo de cisalhamento executado imediatamente após a mistura.

(2) Torque médio nos 30 s finais da etapa 11 da mistura inicial;

(3) Relação torque/rotação na maior taxa de cisalhamento do ciclo de cisalhamento (253 rpm);

(4) Área sob a curva torque x tempo nas etapas de mistura do concreto (etapas 10 e 11 na Figura 54);

(5) Torque médio tomado no intervalo de 30 a 60 segundos após o início da mistura complementar.

Os torques de escoamento apresentaram valores baixos, não se observando nenhuma relação significativa com os parâmetros estudados. ANOVA aplicada ao planejamento fatorial indicou que apenas o teor de pó e a granulometria da areia natural afetaram de forma significativa os demais parâmetros reológicos, ao nível de confiança de 90%. Destes dois, o fator preponderante é o teor de pó que, nos intervalos de variação avaliados, apresenta efeito cerca de 3 a 5 vezes superior ao da areia natural.

Para os parâmetros reológicos considerados foram ajustadas regressões lineares (Equações 43 a 46), expressas em termos do módulo de finura da areia natural (MF_{M2}) e do volume de pó ($V_{pó}$, expresso como fração do volume total de materiais secos).

$$T_{mist}^1 = 33,73 - 10,17MF_{M2} + 513,4V_{Pó} \quad \text{Equação 43}$$

$$(R^2=0,962)$$

$$E_{concr}^{mist} = 13456 - 3821MF_{M2} + 196947V_{Pó} \quad \text{Equação 44}$$

$$(R^2=0,968)$$

$$V_{ap} = 0,361 - 0,118MF_{M2} + 3,683V_{Pó} \quad \text{Equação 45}$$

$$(R^2=0,970)$$

$$T_{mist}^2 = 38,23 - 15,47MF_{M2} + 684,6V_{Pó} \quad \text{Equação 46}$$

$$(R^2=0,942)$$

Nas Equações 43 a 46, os sinais negativos dos coeficientes da areia e positivos do volume de pó indicam que aumentos dos parâmetros reológicos decorrem de redução do módulo de finura (mais fino) e do aumento do volume de pó na mistura. Tanto areia mais fina, como maior volume de pó, representam aumentos de área superficial das partículas no sistema. Regressões equivalentes às anteriores podem ser obtidas a partir destas áreas superficiais. Considerando que os agregados graúdos e a areia britada também contribuem com área superficial para o sistema, obtém-se as regressões expressas pelas Equações 47 a 50, onde a área superficial é calculada pela ponderação da área superficial específica (Tabela 25, pg. 163, em m^2/cm^3) de cada componente por sua fração volumétrica em relação aos materiais granulares.

$$T_{mist}^1 = 4.800AS_{agr} + 906,9AS_{pó} \quad \text{Equação 47}$$

$$(R^2=0,978)$$

$$E_{concr}^{mist} = 1.946.941AS_{agr} + 352.523AS_{Pó} \quad \text{Equação 48}$$

$$(R^2=0,967)$$

$$V_{ap} = 48,60AS_{agr} + 6,770AS_{Pó} \quad \text{Equação 49}$$

$$(R^2=0,919)$$

$$T_{mist}^2 = 4.683AS_{agr} + 1.172AS_{Pó} \quad \text{Equação 50}$$

$$(R^2=0,947)$$

Os valores dos coeficientes de determinação R^2 obtidos são, com exceção do V_{ap} , equivalentes ou até superiores que nas regressões anteriores. O ajuste aos dados experimentais é ilustrado na Figura 85. Nota-se a formação de dois grupos de pontos, sendo cada um relativo a um teor de pó, pois é este o parâmetro mais relevante. Dentro de cada um destes grupos, a área específica dos agregados determina o comportamento reológico.

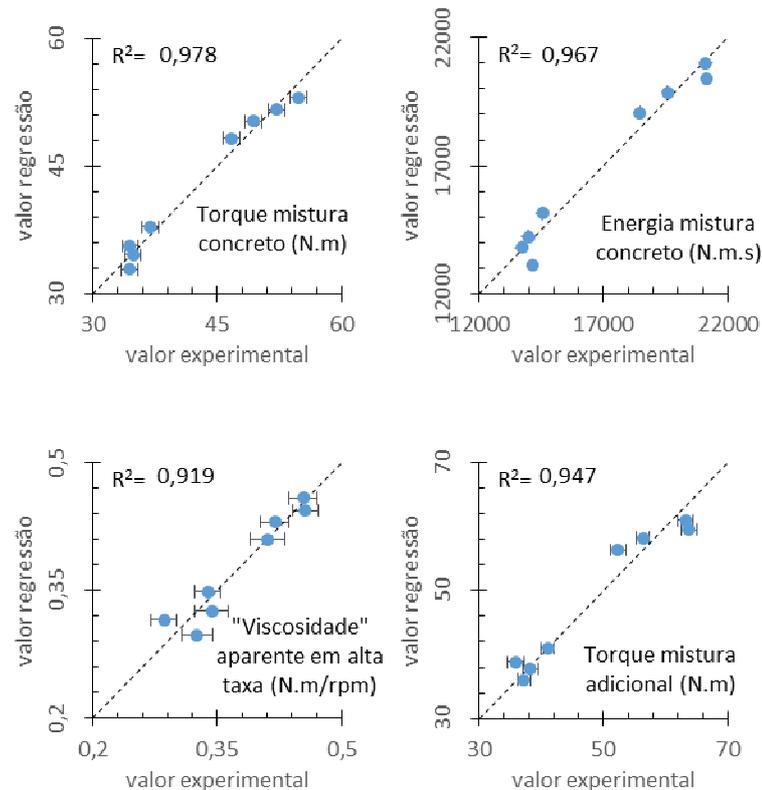


Figura 85 – Ajuste das regressões lineares (Equações 47 a 50) aos resultados reológicos experimentais (etapa de desvios de granulometria)

Assim, no que diz respeito à reologia, com base nos resultados obtido, pode-se reduzir a análise inicialmente de quatro fatores para apenas dois: alteração da área superficial dos agregados e alteração do volume de pó (representada nas equações de regressão por sua área superficial no sistema).

6.2.3.2 Efeito do ajuste de água com base em critério reológico

A mesma estratégia, descrita anteriormente para os desvios de pesagem, foi aplicada também nesta etapa. Em uma etapa de mistura adicional, após decorridos 30 segundos de mistura para homogeneização, monitorou-se o torque de mistura por 30 segundos adicionais. Este torque foi comparado com o intervalo de aceitação (45 ± 6 N.m.) e aos concretos com torques acima do limite superior foi adicionada água até que o torque atendesse ao critério de aceitação. Isto foi necessário nos concretos Gr4, Gr6 e Gr7. Estes são os concretos com teor alto de pó. O outro concreto com teor alto (Gr1) ficou no limite de aceitação e não foi ajustado. Os demais concretos (Gr2, Gr3, Gr5 e Gr8) apresentaram torques significativamente menores, próximo ou abaixo do limite inferior de aceitação. Estes, que correspondem aos concretos com baixo teor de pó, foram produzidos novamente, com teor reduzido de água. Na Figura 86 mostram-se os torques no começo da mistura adicional (sem correção) e ao fim da mistura adicional (com correção). A Tabela 35 descreve as composições dos concretos corrigidos.

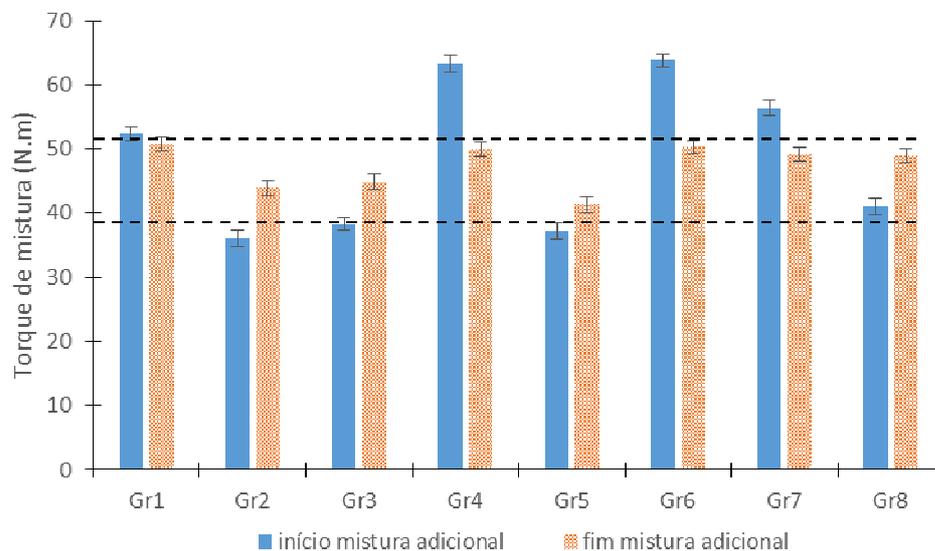


Figura 86 – Torques de mistura dos concretos da etapa de variação granulométrica: no início (sem correção) e no fim (com correção) da mistura adicional.

Tabela 35 – Composição dos concretos (kg/m³) após os ajustes de água (fase de avaliação de mudanças granulométricas)

Composições	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	Pó Pedra	Fíler P5	Fíler P1	Cimento	Água	Adva 527
2	857	174	458	265	54	105	191	200	145	4,0
3	857	174	458	265	54	105	191	200	145	4,0
4	851	172	396	265	123	105	191	200	145	4,0
5	857	174	458	265	54	105	191	200	145	4,0
6	851	172	396	265	123	105	191	200	145	4,0
7	851	172	396	265	123	105	191	200	145	4,0
8	857	174	458	265	54	105	191	200	145	4,0

No âmbito dos concretos avaliados nesta etapa são, portanto, três as principais variáveis que impactam as propriedades reológicas: teor de água, teor de pó e área superficial dos agregados.

Os teores de pó e água afetam diretamente a composição da pasta. Já foi mostrado na etapa de desvios de pesagem que a alteração na relação a/finos afeta as propriedades reológicas do concreto. Maior volume de água na pasta resulta em afastamento das partículas que a compõe. Estando mais afastadas, reduzem-se as interações (choques, atritos) entre elas, o que reduz a dissipação de energia durante o movimento, isto é, diminui-se a viscosidade. Apesar de haver relação entre redução dos torques de mistura e aumento da relação a/finos (tendências decrescentes na Figura 87a), este não é o único parâmetro que governa o comportamento reológico. Torques próximos são observados em concretos com relações água/finos distintos e concretos com mesma relação água/finos podem apresentar torques diferentes.

Além da composição da pasta, alterações no volume de pó e água afetam o volume total de pasta. Assim como a água afasta os grãos da pasta, promovendo mobilidade, a pasta afasta os grãos de agregados, também afetando a mobilidade destes. A Figura 87b mostra que há uma relação entre torque de mistura e volume de pasta, no entanto, o volume de pasta sozinho não explica muitos dos resultados.

A terceira variável que precisa ser considerada é a granulometria dos agregados. Um mesmo volume de pasta afasta de maneira diferente as partículas em esqueletos granulares com granulometrias distintas. Tanto o empacotamento, quanto a área superficial dos agregados, conduzem a diferentes distâncias entre partículas para um mesmo volume de pasta. O volume de pasta disponível deve ser suficiente para preencher os vazios deixados pelo empacotamento dos agregados. Enquanto estes vazios não forem preenchidos, os grãos de agregados permanecem em contato e não há mobilidade. Apenas se um excesso de pasta estiver disponível, haverá um afastamento dos agregados e a suspensão passa a fluir. A distância média que separa as partículas depende, portanto, deste volume

específica calculada com base na granulometria obtida por AID (valores na Tabela 29, pg. 165), o empacotamento foi calculado pelo MEC e considerou-se o ar como parte do volume de pasta.

$$T_{mist}^2 = 245,8 - 0,282MPT - 1365IPS$$

$$(R^2=0,912)$$

Equação 51

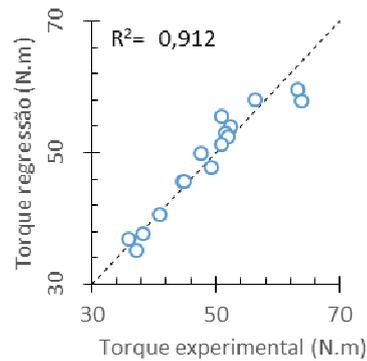


Figura 88 – Adequação da regressão da Equação 51 aos valores experimentais de torques de mistura

A regressão da Equação 51 aplica-se ao estudo de robustez deste trabalho. Tendo-se uma composição granulométrica de agregados e o volume de pó, é possível acoplar esta equação às equações de IPS e MPT e assim calcular o teor de água para obter um determinado torque de mistura pré-fixado.

$$T_{mist}^2 = 245,8 - 0,282 \frac{2}{VSA_g} \times \left[\frac{1}{V_{sg}} - \left(\frac{1}{1 - P_{ofg}} \right) \right]$$

$$- 1365 \frac{2}{VSA} \times \left[\frac{1}{V_s} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right]$$

Equação 52

onde

$$V_s = \frac{V_{finos}}{V_{pasta}} = \frac{V_{finos}}{V_{finos} + V_{\acute{a}gua} + V_{aditivos} + V_{ar}}$$

Equação 53

$$V_{sg} = \frac{V_{grossos}}{V_{concreto}} = \frac{V_{grossos}}{V_{s\acute{o}lidos} + V_{\acute{a}gua} + V_{aditivos} + V_{ar}}$$

Equação 54

Substituindo as Equações 53 e 54 na Equação 52 obtém-se a Equação 55, que explicita o volume de água. Todos os termos necessários podem ser obtidos da composição do concreto, do empacotamento e da caracterização física dos materiais.

$$V_{\text{água}} = \left[245,8 - T_{\text{mist}}^2 + \frac{0,564}{VSA_g} \times \left(\frac{1}{1 - P_{ofg}} - \frac{V_{\text{sólidos}} + V_{\text{aditivos}} + V_{ar}}{V_{\text{grossos}}} \right) + \frac{2730}{VSA} \times \left(\frac{1}{1 - P_{of}} - \frac{V_{\text{finos}} + V_{\text{aditivos}} + V_{ar}}{V_{\text{finos}}} \right) \right] / \left(\frac{0,564}{VSA_g \times V_{\text{grossos}}} + \frac{2730}{VSA \times V_{\text{finos}}} \right)$$

Equação 55

Por fim, avaliou-se o impacto das alterações de composição sobre as propriedades no estado endurecido. Na Figura 89 mostram-se as resistências aos 28 dias dos concretos cujos torques de mistura se encontravam no intervalo de aceitação estabelecido. Em função da relação água/cimento, a resistência pode ser descrita pela Equação 56

$$f_{cm,28} = 259,9 e^{-2,220 \frac{a}{c}}$$

Equação 56

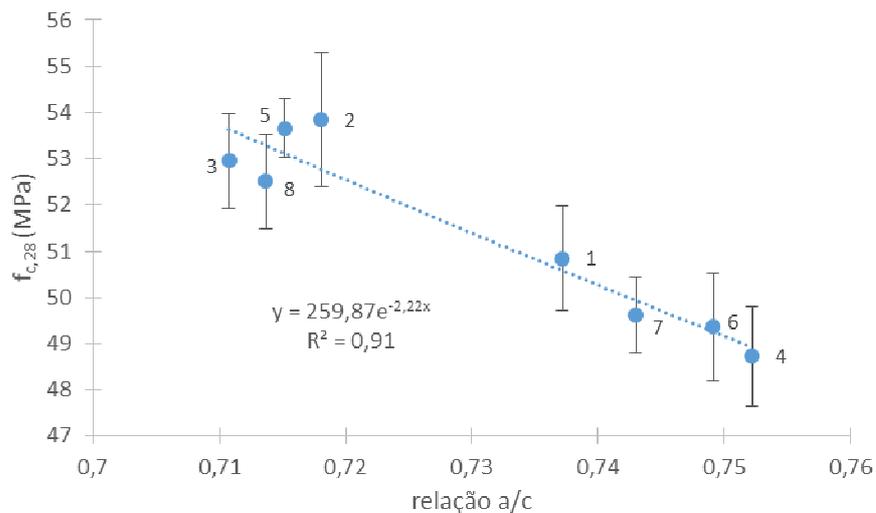


Figura 89 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a relação água/cimento (etapa de variação granulométrica).

6.2.3.3 Simulação do efeito das variações granulométricas

Tendo-se à disposição dados de variabilidade de granulometria, é possível empregar os modelos empíricos determinados nas sessões anteriores para simular o efeito que os desvios de granulometria possuem sobre a reologia e resistência à compressão. Os dados apresentados a seguir foram obtidos pela técnica de Bootstrap, aplicados sobre os dados de variabilidade levantados (sessão 4.2.1). Foram gerados conjuntos (amostras) com 113 elementos retirados aleatoriamente com reposição de um

subconjunto dos dados originais de variabilidade granulométrica. Cada elemento é composto de quatro curvas granulométricas (Brita 1, Brita 0, Areia Britada e Areia Natural). Determinou-se então todos os parâmetros necessários para avaliar o impacto nas propriedades reológicas por meio das Equações 47 a 50 e o teor de água (Equação 55) necessário para manter o torque de mistura no centro do intervalo de aceitação ($T_{mist} = 45N.m$). Após o cálculo do teor de água utilizou-se a curva de Abrams (Equação 56) para estimar a influência da variabilidade granulométrica sobre a resistência.

Estes cálculos foram realizados para cada um dos elementos da amostra, obtendo-se a seguir a média e desvio padrão deste conjunto. Replicou-se então este processo para um total de 1000 amostras. A partir das 1000 médias e desvios-padrão obtidos construiu-se intervalos de confiança para nível de confiança de 90%.

Ao final da mistura inicial estima-se um torque de mistura médio de $38,1 \pm 0,6$ N.m com desvio padrão de $4,0 \pm 1,4$ N.m. Assim, em 90% dos casos, o torque de mistura estará compreendido entre 31,5 e 44,7 N.m, ou seja, os desvios chegam a 17%.

No início da mistura adicional têm-se um torque médio de $43,4 \pm 0,8$ N.m com desvio padrão de $5,1 \pm 1,8$ N.m. Assim, em 90% dos casos, o torque de mistura estará compreendido entre 35,1 e 51,8 N.m, ou seja, os desvios chegam a quase 20% e extrapolam em alguns casos a faixa de aceitação adotada neste trabalho (± 6 N.m). Apenas 75% dos concretos apresentariam torques neste intervalo de aceitação. Os demais demandariam alguma intervenção com ajuste de água, o que pode comprometer as propriedades no estado endurecido.

Para a viscosidade aparente na maior rotação estima-se valor médio de $0,333 \pm 0,005$ N.m/rpm, com desvio padrão de $0,030 \pm 0,010$ N.m/rpm. Assim, em 90% dos casos, a viscosidade aparente estará compreendida entre 0,284 e 0,383 N.m/rpm, ou seja, os desvios chegam a 15%.

Para a energia de mistura na fase de concreto obtém-se valores entre 12580 e 17658 N.m.s em 90% dos casos, representando desvios da média de até 17%.

Ajustando-se a trabalhabilidade com base no torque de mistura, estima-se que a resistência à compressão média obtida é de $52,3 \pm 0,2$ MPa, com desvio padrão de $1,4 \pm 0,2$ MPa. Assim, em 90% dos casos, a resistência à compressão aos 28 dias estará compreendida entre 50,0 e 54,6 MPa, ou seja, os desvios chegam a 4,3%.

O reflexo sobre a intensidade de ligantes é correspondente à resistência obtida. Espera-se que em 90% dos casos, a intensidade de ligantes se encontre entre 3,45 e 3,76 kg/m³/MPa.

6.2.4 Variações Morfológicas

6.2.4.1 Efeito das variações morfológicas sobre os parâmetros reológicos

Nesta etapa foram produzidos cinco concretos (composições detalhadas na Tabela 30, pg. 166) seguindo o mesmo procedimento de mistura e ensaios reológicos empregados nas etapas anteriores. Na Figura 90 mostram-se as curvas de mistura, com detalhamento de algumas etapas.

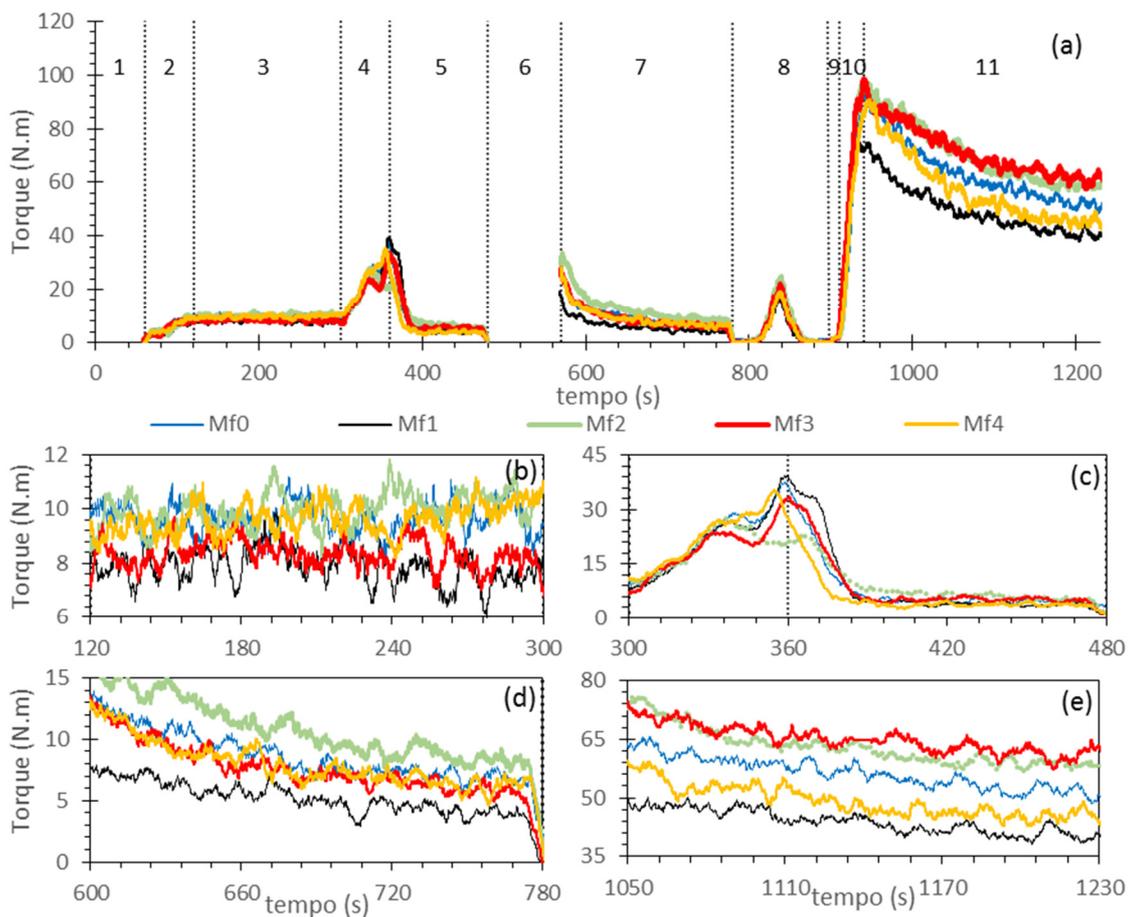


Figura 90 – Reometria de mistura em rotação constante (126 rpm) de concretos com agregados de morfologias diferentes. Mistura completa (a). Trechos detalhados: (b) argamassa seca (etapa 3); (c) adição de água (etapa 4) e homogeneização inicial da argamassa úmida (etapa 5); (d) homogeneização final argamassa; (e) homogeneização final concreto. Descrição completa das etapas é mostrada na Figura 54 (pg. 128).

Até o final do passo 8, apenas argamassa está sendo misturada. Observando a Tabela 28 nota-se que isto representa um planejamento fatorial completo com um ponto central.

A diferença da morfologia das areias já manifesta seus efeitos durante a mistura da argamassa seca. Medido nos últimos 30 s do passo 3, o torque mais elevado (Mf2: ArB-/ArN-) é quase 37% superior ao torque da composição com ambas as areias na configuração mais arredondada (Mf1: ArB+/ArN+).

No final do passo 7, quando se finaliza a homogeneização da argamassa úmida, o torque mais elevado observado é mais do que o dobro do menor. Os torques mais altos também significam maiores consumos de energia para promover a mistura. Calculando a área abaixo da curva *torque x tempo* das etapas 4 + 5 + 7, pode-se estimar que a argamassa com areias com grãos menos arredondados exigiu 34% mais energia que a mesma argamassa produzida com as areias com grãos mais arredondados.

O efeito da introdução de agregados graúdos é notado após o passo 9. Qualquer um dos concretos com agregados menos arredondados resultou em maior torque máximo e final, se comparado ao concreto com todos os agregados mais arredondados. A quantificação da área sob a curva, desde a adição dos agregados graúdos até o fim da mistura (passos 10 + 11), mostra que o uso de agregados menos esféricos pode aumentar em até 41% a energia de mistura. Os maiores aumentos referem-se aos concretos em que se empregou a areia natural menos esférica.

O comportamento reológico das argamassas e concretos é ilustrado nas Figuras 91 e 92, respectivamente.

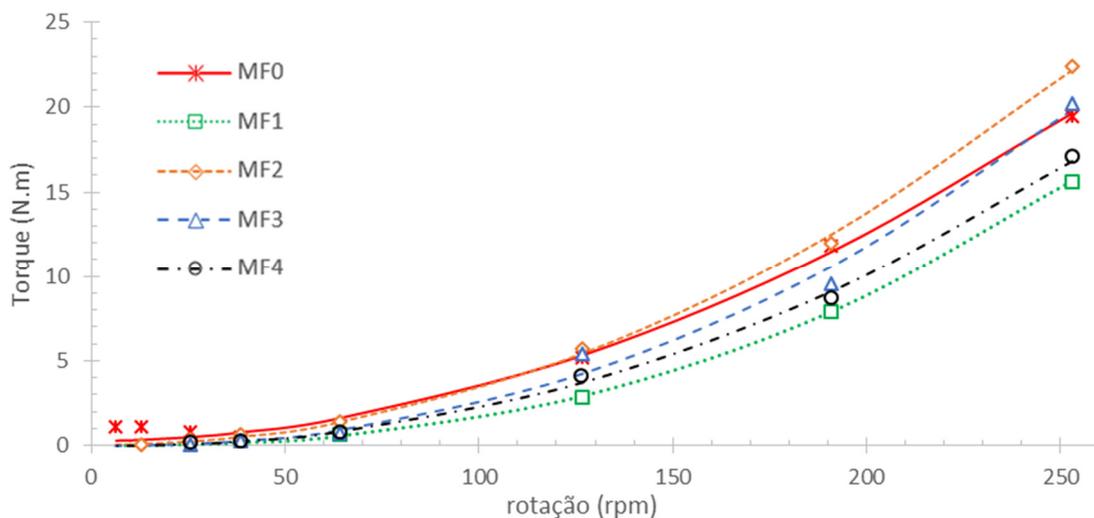


Figura 91 – Comportamento reológico das argamassas, obtido na rampa de desaceleração (etapa de variações morfológicas)

A argamassa apresenta comportamento não linear com dilatância, isto é, a “viscosidade” aparente (razão torque/rotação) aumenta à medida que se avança para maiores taxas de cisalhamento. As

curvas de tendência plotadas na Figura 91 foram ajustadas conforme o modelo de Herschel-Bulkley (Equação 20, pg. 148).

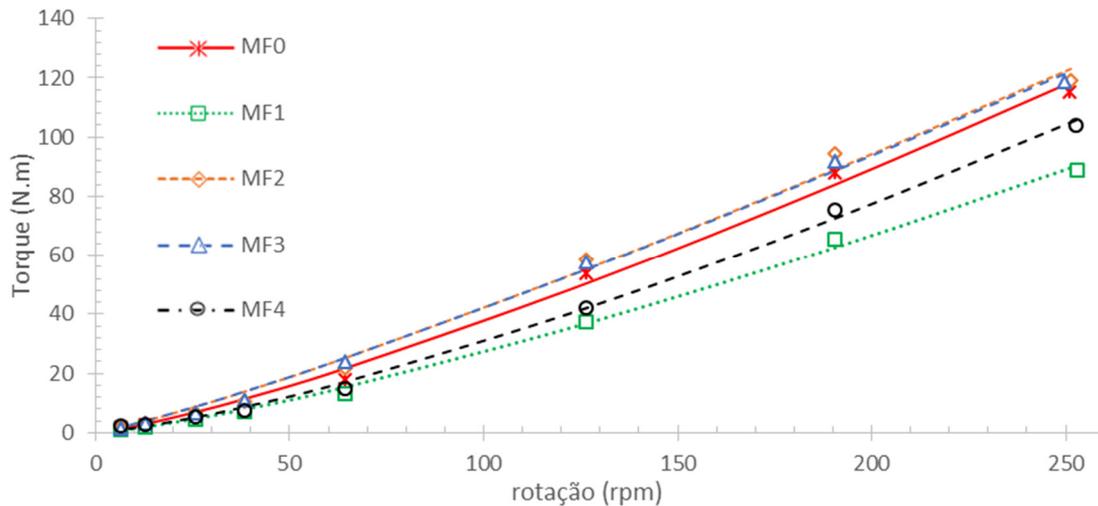


Figura 92 - Comportamento reológico dos concretos na etapa de variações morfológicas, obtido na rampa de desaceleração

Após a introdução dos agregados graúdos e homogeneização, foi executado o ciclo de cisalhamento no concreto, no qual já se observa um comportamento menos dilatante. O índice de comportamento de fluxo (n no modelo de Herschel-Bulkley) varia de $n = 1,16$ a $1,34$ para o concreto, enquanto que para argamassa variou de $n = 1,94$ a $2,43$. Quanto mais alto o valor de n , mais dilatante é o fluido.

Um resumo dos principais parâmetros reológicos da argamassa e do concreto são mostrados na Tabela 36.

ANOVA aplicada ao planejamento fatorial indicou que apenas a morfologia da areia natural afetou de forma significativa a reologia dos concretos.

$$T_{mist}^1 = 536,7 - 671,7b/l_{ArN} \quad (R^2=0,970) \quad \text{Equação 57}$$

$$E_{concr}^{mist} = 177.422 - 217.524b/l_{ArN} \quad (R^2=0,921) \quad \text{Equação 58}$$

$$T_{mist}^2 = 924,4 - 1191b/l_{ArN} \quad (R^2=0,966) \quad \text{Equação 59}$$

sendo b/l_{ArN} a relação de aspecto da areia natural.

Tabela 36 – Parâmetros reológicos das argamassas e concretos da etapa de avaliação da mudança de morfologia

Parâmetro reológico	MF0	MF1	MF2	MF3	MF4
Torque argamassa seca [N.m] ⁽¹⁾	9,7 ± 0,7	7,5 ± 0,6	10,3 ± 0,6	8,1 ± 0,6	10,2 ± 0,6
Torque argamassa úmida [N.m] ⁽¹⁾	6,7 ± 0,6	3,9 ± 0,5	8,2 ± 0,6	5,7 ± 0,5	6,3 ± 0,6
T_{mist}^1 - Torque concreto [N.m] ⁽¹⁾	51,3 ± 1,2	41,1 ± 1,2	59,1 ± 1,3	60,6 ± 1,3	45,0 ± 1,2
T_{mist}^2 - Torque concreto início mistura adicional [N.m] ⁽²⁾	64,3 ± 1,4	47,5 ± 1,1	74,7 ± 1,4	82,0 ± 1,4	49,7 ± 1,2
Energia de mistura argamassa [N.m.s] ⁽³⁾	4307	3577	4781	4054	3913
Energia de mistura concreto [N.m] ⁽³⁾	20480	16387	22744	23106	18586
Viscosidade aparente argamassa [N.m/rpm] ⁽⁴⁾	0,077 ± 0,010	0,062 ± 0,009	0,088 ± 0,009	0,080 ± 0,009	0,068 ± 0,009
Viscosidade aparente concreto [N.m/rpm] ⁽⁴⁾	0,46 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,47 ± 0,02	0,48 ± 0,02	0,41 ± 0,02

- (1) Torques: obtidos como médias nos últimos 30 s das etapas de mistura 3 (argamassa seca), 7 (argamassa úmida) e 11 (concreto);
- (2) Média de torque no intervalo entre 30 e 60 segundos após o início da mistura adicional;
- (3) Energia de mistura: obtida como a área abaixo da curva torque x tempo para as etapas 4+5+7 (argamassa) e 10+11 (concreto);
- (4) Viscosidade aparente: calculado como a razão entre o torque e a rotação na mais alta rotação (253 rpm).

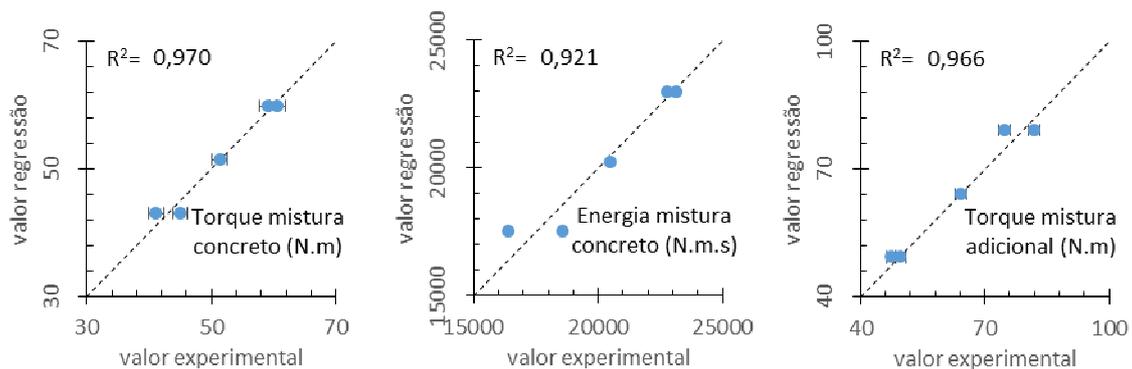


Figura 93 – Ajuste das regressões das Equações 57 a 59 aos parâmetros reológicos experimentais na fase de avaliação de alterações morfológicas.

Tendo em vista a forte influência da areia natural, foi realizada uma análise da etapa anterior ao concreto, onde há a presença apenas da argamassa.

Para determinar a correlação entre a morfologia e as propriedades reológicas, calculou-se um parâmetro de forma ponderado sh_m para o conjunto (areia britada + areia natural), segundo a Equação 60.

$$sh_m = \sum_{i=1}^n w_i sh_i \quad \text{Equação 60}$$

onde sh_i é o parâmetro de forma (esfericidade ou relação de aspecto) do n -ésimo material presente na mistura e w_i é o respectivo peso normalizado ($\sum w_i = 1$). Assumindo que w_i corresponde à proporção volumétrica dos agregados, obteve-se as correlações da Figura 94. Os torques de mistura, tanto no estado seco como úmido correlacionam bem com os parâmetros de forma de uma forma inversamente linear. Energia de mistura e viscosidade aparente mostram correlações fracas.

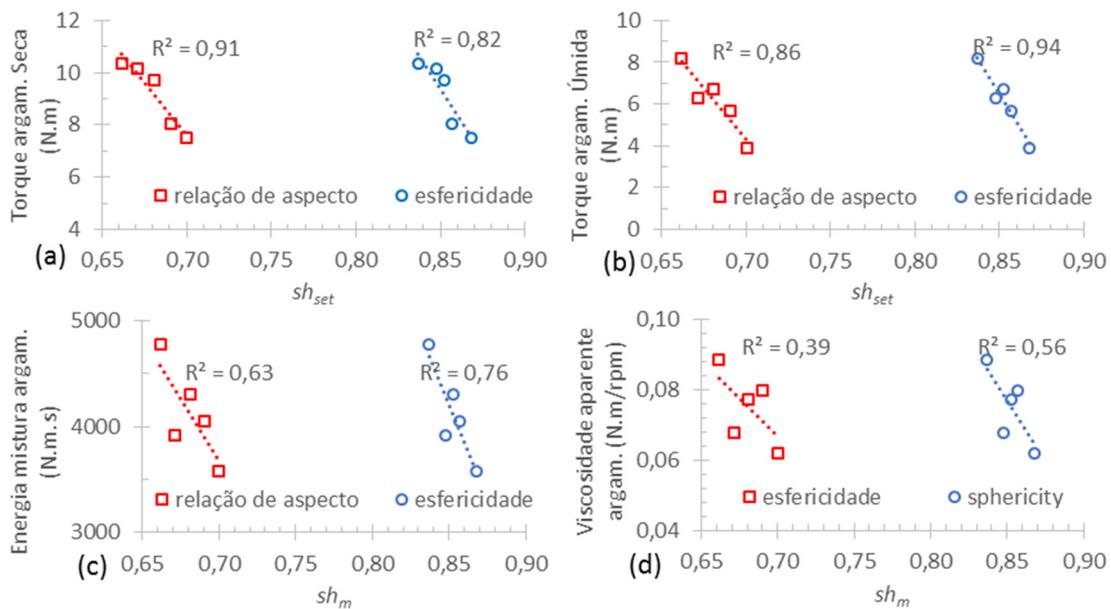


Figura 94 – Correlação entre parâmetro de forma ponderado e parâmetros reológicos da argamassa: (a) torque de mistura no estado seco; (b) torque de mistura no estado úmido; (c) energia de mistura; (d) “viscosidade” aparente na rotação de 253 rpm.

Vale a pena notar que as variações do parâmetro de forma ponderado do conjunto de agregados parecem quantitativamente pequenas (de 0,66 a 0,70 para a relação de aspecto e de 0,84 a 0,87 para esfericidade), mas a influência desta ordem de variação foi significativa sobre os parâmetros de mistura e comportamento reológico das argamassas.

Correlações ainda melhores podem ser obtidas caso outros pesos w_i forem empregados. Utilizando uma abordagem de mínimos quadrados, o w_i para cada material foi determinada a fim de maximizar o coeficiente de determinação R^2 da regressão linear entre a forma e os parâmetros reológicos. Na Figura 95 os valores encontrados para a Areia Natural são apresentados, com os valores de R^2 obtidos marcado no topo das barras.

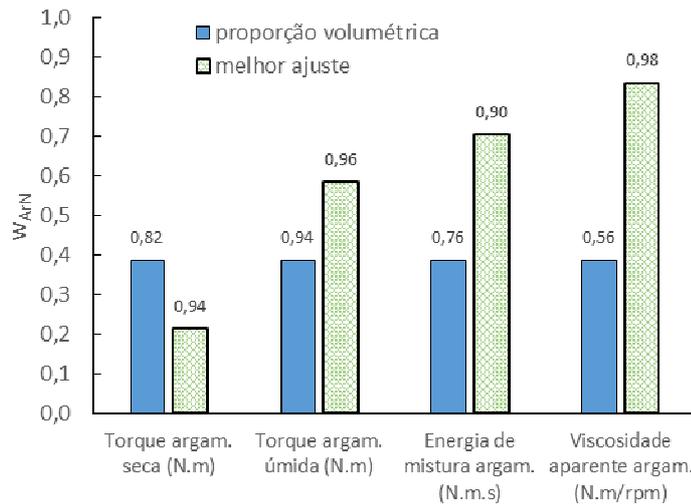


Figura 95 – Pesos normalizados da areia natural. Os valores marcados no topo das colunas correspondem aos R^2 das regressões lineares obtidas.

Valores de w_i de melhor ajuste próximos às proporções volumétricas indicam que para o parâmetro reológico em questão, a morfologia tem comportamento atrelado ao seu volume. Materiais presentes em maior volume teriam mais influência caso a sua morfologia variasse. Valores de w_i de melhor ajuste diferentes da proporção volumétrica indicam que outras questões contribuíram com a mudança reológica. Os resultados mostram que no estado seco o efeito da areia natural é menos importante que sua proporção volumétrica. Neste caso, a morfologia da areia britada é preponderante. Em todos os outros casos a influência da morfologia da areia natural se sobrepõe à sua proporção volumétrica. No caso mais extremo (viscosidade aparente) mais de 80% do impacto se deve à morfologia da areia natural, embora sua proporção volumétrica seja de apenas 39%.

Usando a mesma estratégia para as propriedades reológicas do concreto novamente a areia natural se mostrou como sendo o fator preponderante. Calculando os valores w_i de melhor ajuste, agora para o conjunto de agregados graúdos e miúdos, valores entre 0,54 e 0,89 foram obtidos para a areia natural. Apesar de representar apenas 16% do volume de agregados, o efeito desta areia é tão intenso que regressões com a presença apenas do fator de forma resultam em boas correlações (Figura 96).

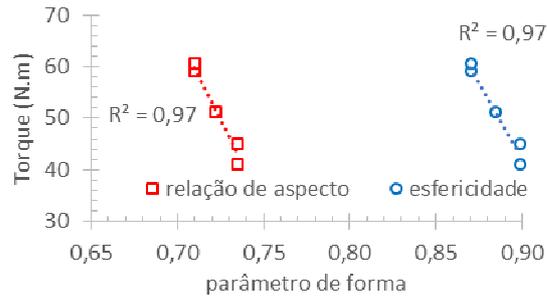


Figura 96 – Correlação entre os parâmetros de forma da areia natural e o torque de mistura T_{mist}^1

Uma razão para este forte efeito da areia natural pode ser encontrada no empacotamento das partículas. Aplicando o MEC para avaliar o empacotamento do esqueleto granular de agregados, pode-se determinar a fração dominante do empacotamento das partículas. Nos concretos avaliados, a fração dominante corresponde à fração [0,25-0,30 mm], que é precisamente a faixa de tamanho com maior presença da areia natural e onde, na distribuição granulométrica discreta (Figura 75b, pg. 164) é responsável por gerar o pico esquerdo. Aparentemente, a morfologia da fração dominante tem maior efeito sobre os parâmetros reológicos do que outras frações, chegando ao ponto de ser determinante do comportamento do concreto como um todo. Portanto, as propriedades reológicas dependem da morfologia dos materiais granulares, mas o grau desta dependência está relacionado com a formulação do concreto, pois esta determina o empacotamento.

Investigações complementares mais profundas se fazem necessárias para comprovar esta hipótese, permitindo assim explicar como a morfologia, o empacotamento e a reologia se relacionam.

6.2.4.2 Efeito do ajuste de água

Os torques no início e fim da mistura adicional são mostrados na Figura 97. Ambos concretos com a areia natural menos esférica (Mf2 e Mf3) e o concreto com esfericidade média (Mf0) apresentaram torques acima do intervalo de aceitação (45 ± 6 N.m.) e, portanto, receberam acréscimos de água até que o torque atendesse ao critério de aceitação. Nenhum concreto apresentou torques abaixo do limite inferior.

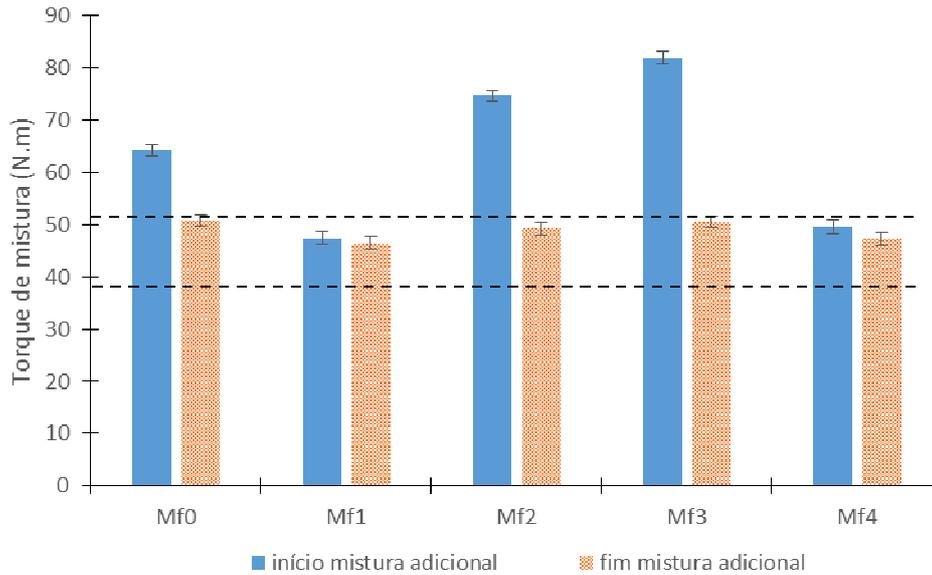


Figura 97 - Torques de mistura dos concretos da etapa de variação morfológica: no início (sem correção) e no fim (com correção) da mistura adicional.

Como os torques dependem predominantemente da morfologia da areia natural, e os torques mais elevados exigem maior adição de água, o que aumenta a relação a/c, é de se esperar que exista uma relação entre resistência e a morfologia da areia natural. De fato, uma correlação muito boa é observada (Figura 98).

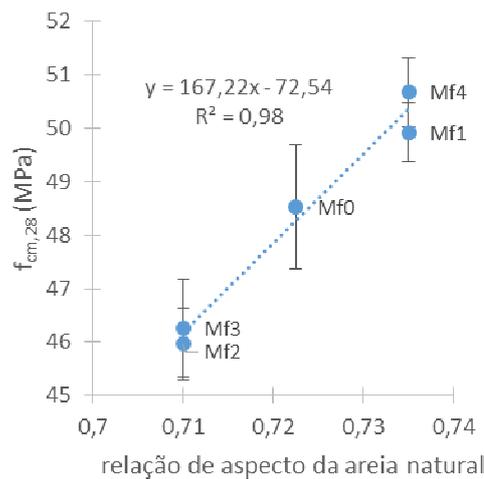


Figura 98 – Relação entre morfologia da areia natural e resistência do concreto na etapa de variações morfológicas

Aplicando a técnica de bootstrap ao levantamento de dados de morfologia de areia natural, obteve-se média de relação de aspecto de $0,736 \pm 0,002$ com desvio padrão de $0,005 \pm 0,001$. Em 90% dos casos

isto corresponde a relação de aspecto entre 0,724 e 0,747, o que conduz a resistências entre 48,5 e 52,4 MPa. O cenário de morfologia apresenta, portanto, impacto menor que o de granulometria, porém maior que o de desvios de pesagem. Esta conclusão depende da formulação. Escolher um material com maior estabilidade de forma, como é o caso da areia natural, para fração dominante do empacotamento é uma estratégia que propicia a robustez. No entanto, caso ocorram mudanças na formulação ou mudanças relevantes na granulometria pode haver alteração da fração dominante, e, caso a nova fração dominante corresponda a um material com menor uniformidade morfológica, deve-se esperar modificações mais intensas na reologia e conseqüentemente também nas propriedades no estado endurecido.

6.3 Considerações finais do capítulo

As mudanças na formulação do concreto, originadas por desvios de pesagem dos diversos materiais e mudanças granulométricas e morfológicas, afetaram diversos parâmetros reológicos do concreto, o que pôde ser observado já na etapa de mistura. Esta constatação sugere a possibilidade de se empregar instrumentação reológica nesta fase para detectar desvios do planejado, e, possivelmente, até detecção da fonte de alteração, sendo possível a partir destas informações atuar de forma a corrigir a formulação. Encontra-se assim uma forma de incorporar um mecanismo de robustez ao processo de produção (mecanismo de controle do sistema, com *feed back*).

Quanto ao cenário de desvios de pesagem, observou-se que é possível considerar todos agregados em conjunto, reduzindo o estudo de variabilidade de pesagem a dois fatores apenas: desvio de pesagem total de agregados e desvio de pesagem de finos. No cenário de mudanças granulométricas, quem controla a reologia são as distâncias de separação das partículas. Pode-se assim, em vez de considerar as granulometrias dos diversos agregados como variáveis, considerar apenas o IPS e MPT da combinação como variáveis. No cenário de mudanças morfológicas, o fator preponderante foi a morfologia do material que define o empacotamento do esqueleto granular de agregados, isto é, a fração dominante do sistema. No concreto avaliado isto correspondeu à areia natural, que apesar de estar presente em menor volume, possui granulometria estreita, tornando-se por isso a fração dominante no empacotamento.

Para a maioria destes fatores preponderantes foi possível estabelecer correlações empíricas com altos coeficiente de determinação ($R^2 > 0,92$) com os principais parâmetros reológicos do concreto (viscosidade aparente, torque de mistura e energia de mistura). De forma mais geral, estas correlações puderam também ser expressas em termos de consumo de água. Assim, pôde-se calcular o teor de água necessário para que um dado parâmetro reológico alcance um valor desejado.

Na produção de concretos em campo é difícil mensurar o volume exato de água a ser adicionado, principalmente devido à falta de precisão no controle da umidade dos agregados. É prática costumeira lançar mão de um ensaio de trabalhabilidade para ajustar o consumo final de água. Porém, caso outras razões tenham levado à alteração reológica, este ajuste de água pode afetar outras propriedades. Avaliou-se o efeito deste ajuste, adotando o torque na rotação de mistura (126 rpm) como critério reológico para ajuste da reologia. Vários concretos dos planejamentos fatoriais iniciais apresentaram torques fora do limite admissível e necessitaram de ajuste de volume de água. A avaliação mecânica aos 28 dias destes concretos ajustados permitiu a construção de curvas de Abrams, a partir das quais se pôde prever a resistência a partir da relação água/cimento.

Para simular os efeitos dos desvios, nos diversos cenários avaliados, empregou-se os modelos empíricos obtidos e uma técnica de reamostragem (Bootstrap) aplicada sobre os dados de variabilidade coletados anteriormente. No cenário de desvios de pesagem, observou-se desvios de no máximo 10% dos valores previstos para os principais parâmetros reológicos avaliados e 0,8 MPa nas resistências. No cenário de mudança granulométrica, os desvios reológicos chegaram a 20% e os desvios de resistência a 2,4 MPa. No cenário de mudanças morfológicas, apenas a areia natural se mostrou influente. Atribuiu-se isto ao fato desta areia constituir a fração dominante no empacotamento granular. Empregar materiais que apresentam menor variabilidade morfológica como dominante no empacotamento é uma estratégia para reduzir os impactos da variabilidade morfológica de outros componentes do sistema. No concreto desta pesquisa, a areia natural é a mais estável, em termos de morfologia. Mesmo assim, estimou-se desvios na resistência de 2,0 MPa, o que mostra que a morfologia é uma propriedade importante a ser considerada no âmbito de avaliação de robustez.

A forma de análise realizada permite propor uma sequência para avaliação da robustez de uma dada formulação de concreto frente a um cenário de variabilidade (Figura 99). Dada uma formulação que se deseja avaliar, conhece-se suas características (composição, granulometria e morfologia dos grãos, ...) e pode-se determinar suas propriedades no estado fresco (parâmetros reológicos) e outras propriedades de interesse (compressão, durabilidade, ...). Em um cenário de variabilidade, as características sofrem variações, podendo resultar em alterações reológicas e nas propriedades de interesse. Caso a formulação afetada apresente condições reológicas inadequadas, se torna necessário realizar um ajuste reológico. Se este ajuste é realizado com água, pode afetar as propriedades de interesse. A composição final ajustada, mesmo apresentando condições reológicas semelhantes da composição projetada, poderá apresentar propriedades de interesse alterados. Assim, em um cenário variável, a distribuição de valores das propriedades de interesse pode ser considerada uma função da distribuição das características. Caso seja possível estabelecer esta função entre a variabilidade das características e a variabilidade das propriedades de interesse, pode-se calcular os intervalos em que

as propriedades variam (na Figura 99 o intervalo compreende 90% dos casos), e comparar este intervalo com intervalos de aceitação pré-estabelecidos. Pode-se propor um índice numérico de robustez, dado pela razão entre estes intervalos. Valores superiores a 1 indicam que a formulação não é robusta no cenário avaliado, e quanto menor o valor, mais robusta será a formulação considerada.

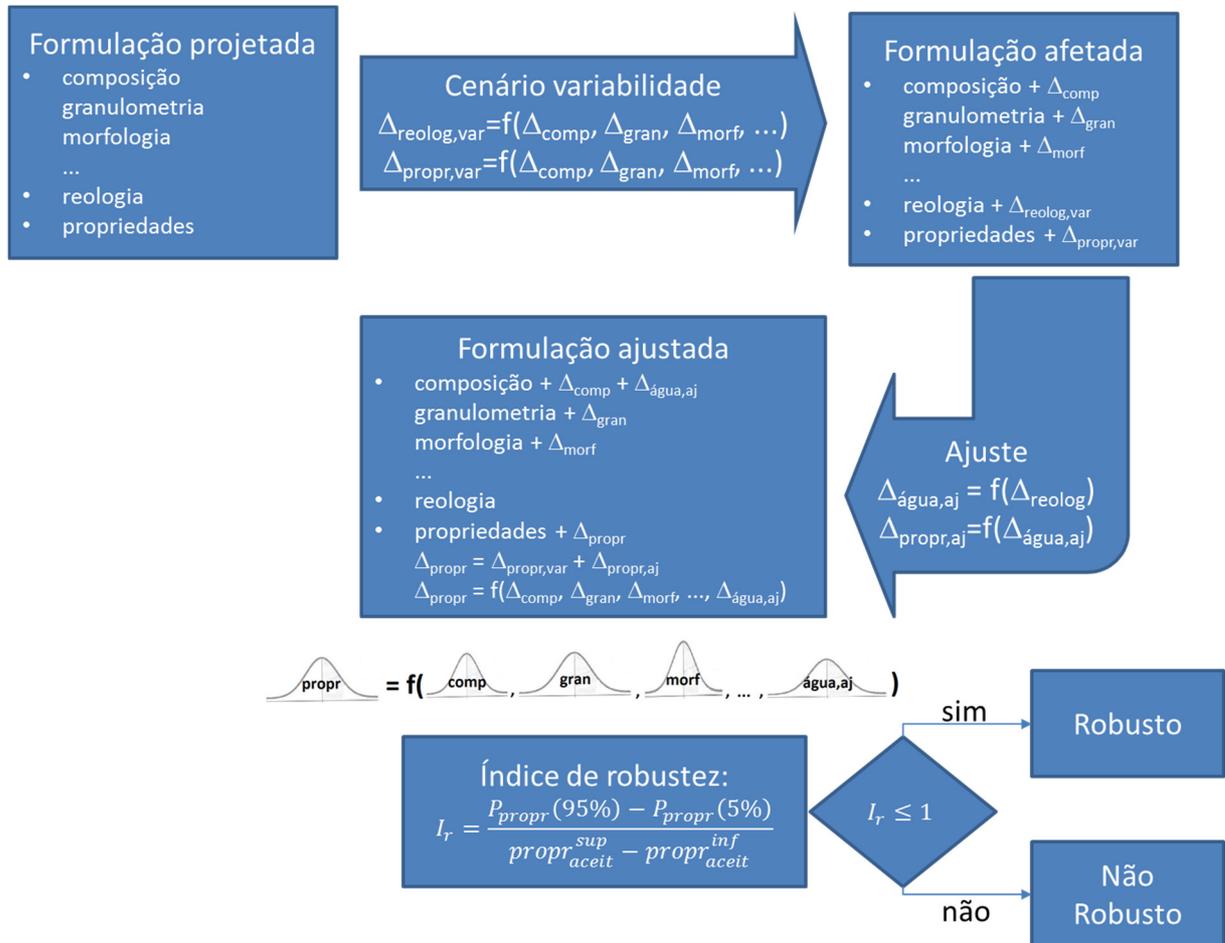


Figura 99 - Proposta de sequência de análise para avaliação numérica da robustez de uma formulação de concreto frente a um cenário de variabilidade

Considerando apenas o cenário de variabilidade decorrente do desvio de pesagem, tem-se os limites de variação da resistência entre 50,8 e 52,4 MPa, e a faixa de variação admissível de 5 MPa (Tabela 17, pg. 157), resultando em índice de robustez de 0,32. Frente a este cenário, o concreto pode ser considerado robusto. Para o cenário de mudanças granulométricas, a resistência varia de 50,0 e 54,6 MPa, resultando em índice de robustez de 0,92. Ainda pode-se considerar o concreto robusto, porém já próximo do limite. No cenário de mudanças morfológicas, a resistência varia de 48,5 a 52,4 MPa, resultando em índice de robustez de 0,77. Na prática os cenários não ocorrem isoladamente. Para uma compreensão completa, será necessário desenvolver modelos mais gerais, que considerem a participação das diversas variáveis.

7 PROPOSTA DE INSTRUMENTOS PARA CONTROLE DE CAMPO DA ROBUSTEZ

Na busca por consumos de cimento otimizados, formulações de concreto robustas são desejáveis. Exigir que a formulação em si seja capaz de fornecer toda a robustez necessária se torna cada vez mais desafiador à medida que os inúmeros parâmetros da formulação vão sendo otimizados. Para que se consiga soluções robustas mesmo neste cenário é preciso estender a análise da robustez para além da formulação apenas. Todo o processo de produção do concreto influencia a robustez e, portanto, pode e deve ser incluído. Enquanto a formulação em si não admite a introdução de vários dos mecanismos que conferem robustez (ver 2.1.6), se todo o sistema de produção for considerado, passa a ser possível, por exemplo, incluir mecanismos de controle que podem conduzir a rotas alternativas.

Para isto, ferramentas adicionais de controle são necessárias. Uma delas, já citada anteriormente, é o sistema computacional que implementa os modelos que descrevem a microestrutura do concreto. Junto com métodos de caracterização rápidos, e que possivelmente podem até ser inseridos na linha de produção, esta é uma ferramenta que pode ser empregada para controlar o sistema, permitindo detecção de desvios dos valores nominais, estimativa dos impactos, e sugestão de rotas alternativas para contornar o desvio. Por exemplo, detectando que a granulometria ou morfologia de um dos agregados mudou sensivelmente e que isto pode afetar o empacotamento das partículas, um ajuste de composição pode ser proposto de forma a contrapor esta mudança.

É de se esperar que maior controle no processo contribua para desempenhos mais controlados. No entanto estes controles podem não estar disponíveis, serem de implementação muito custosa ou impactar no ritmo de produção. No entanto algumas ferramentas podem ser consideradas.

A etapa da mistura do concreto é uma etapa crucial, onde muitas das variáveis que afetam a microestrutura do concreto já se manifestam. Monitorar esta etapa pode ser um instrumento valioso para identificação de desvios que poderão resultar em mudanças nas propriedades do concreto tanto no estado fresco como endurecido.

O controle de qualidade no estado fresco também deve ganhar em importância quando se considera concretos com menores consumos de cimento e necessariamente de água, resultando em formulações mais concentradas e com comportamento reológico mais crítico. Ensaio tradicionalmente aplicados e que avaliam aspectos restritos de trabalhabilidade (ensaio ditos monoponto, como abatimento, espalhamento e fluxo em caixas) podem não ser mais suficientes e precisam ser substituídos por métodos que permitam avaliar aspectos reológicos em taxas de cisalhamento variadas.

A instrumentação do misturador do concreto para monitorar o processo de mistura, uso de reômetros para controle de qualidade no estado fresco e sistemas que permitam ajustes na formulação em função dos parâmetros de entrada e/ou de medidas reológicas são instrumentos que contribuirão para a geração de uma produção robusta de concreto. Neste capítulo, a ênfase será dada à avaliação do uso de reômetros como instrumentos de qualidade e na instrumentação da mistura como modo de identificação de perturbações.

7.1 Uso de reômetro como instrumento de controle de qualidade e medida de robustez

7.1.1 Descrição do equipamento e ensaio

Na Figura 100 mostra-se o equipamento utilizado. Trata-se de um reômetro móvel, composto por uma unidade motriz à qual podem ser acopladas diferentes geometrias de ensaio. O material a ser ensaiado é acondicionado em um recipiente e a geometria de ensaio pode ser posicionada a qualquer distância em relação ao fundo do recipiente. Impõe-se uma rotação ao motor (variável de 0 a 3000 rpm) e aquisita-se a corrente elétrica necessária para manter esta rotação. Por meio de calibração prévia, correlaciona-se esta corrente com o torque aplicado. Todos os controles de posicionamento e rotação, bem como a aquisição, visualização e armazenamento dos resultados são controlados por um software especificamente desenvolvido para o equipamento. Permite-se programar passos de ensaio sequenciais, com rotações e posicionamentos distintos em cada um. Desta maneira têm-se uma diversidade de opções para desenvolver vários tipos de avaliações reológicas.

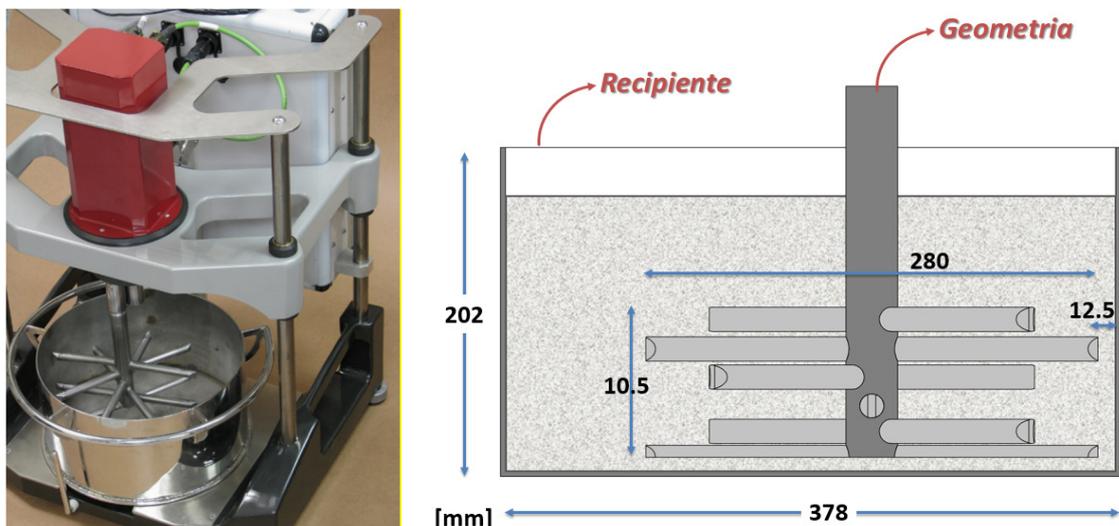


Figura 100 - Reômetro utilizado: visão geral (esquerda); detalhe da geometria de mistura (direita).

As geometrias de ensaio utilizadas possuem 6 aletas duplas dispostas helicoidalmente com passo de 30 mm / 45° e diâmetro das aletas de 16 mm. Estão disponíveis variações desta geometria com diferentes comprimentos de aletas. É possível acoplar a geometria ao equipamento em duas posições distintas: central ou planetária. Na posição central a geometria mantém-se sempre no mesmo eixo vertical, enquanto que na planetária além da rotação em torno do eixo ainda têm-se um movimento de translação ao redor do eixo central.

Várias opções de ensaio podem ser configuradas, destacando-se os ensaios de mistura e de ciclos de cisalhamento.

Nos ensaios de mistura, em geral, a rotação é mantida constante e observa-se a mudança de torques necessários para promover a mistura do material à medida que os diferentes materiais são adicionados e a mistura se processa. Curvas típicas de mistura são mostradas na Figura 101. Trata-se de dois concretos autoadensáveis onde a única alteração foi a morfologia dos agregados graúdos. As diversas etapas de adição são descritos na legenda da figura. Dados de interesse que podem ser obtidos em ensaios desta natureza são os torque em cada etapa, torques máximos em pontos específico, como, por exemplo, o ponto de virada durante a adição de água (pico próximo aos 250 segundos no exemplo), tempos para homogeneização e energia associada ao processo de mistura (correlacionada com a área abaixo da curva). O exemplo em questão mostra como a variação de um único parâmetro, no caso a morfologia do agregados graúdo, pode afetar a reologia. Maiores torques finais e maiores energias de mistura foram necessárias no caso do agregado mais lamelar.

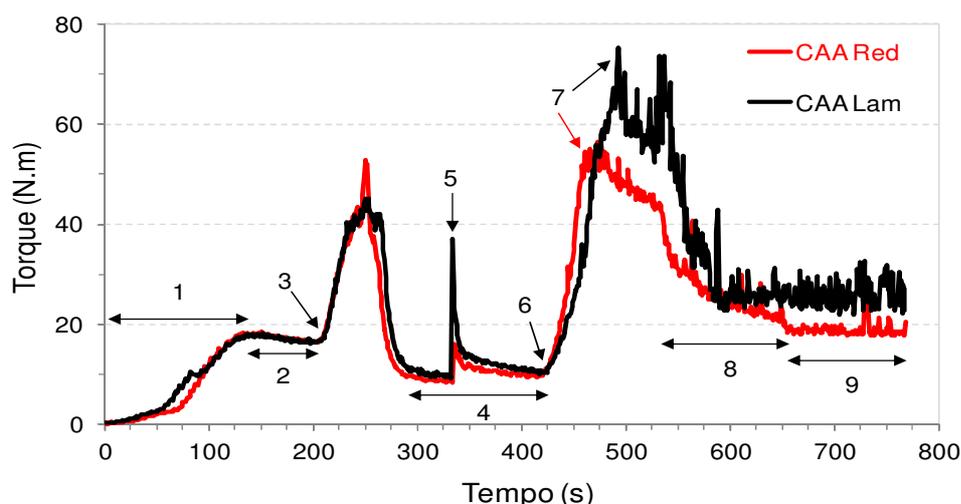


Figura 101 – Reometria de mistura de dois concretos com agregados graúdos de morfologias distintas: arredondados (CAA Red) e lamelares (CAA Lam).

Etapas: (1) adição de finos e areias; (2) homogeneização a seco; (3) adição de 90% da água; (4) homogeneização; (5) interrupção para raspagem de fundo e paredes da cuba; (6) adição dos agregados graúdos; (7) fim da adição dos agregados graúdos; (8) adição do restante da água; (9) homogeneização final.

O segundo tipo de ensaio, com o mesmo equipamento, aplicado ao concreto já misturado, permite descrever o seu perfil reológico. O ensaio consiste em realizar seguidas variações de rotação e determinação do torque necessário em cada nível. Procura-se sempre formar ciclos completos, por exemplo iniciando com uma rampa de aceleração, onde se parte de rotações bem baixas até atingir rotações altas, retornando em seguida à rotação baixa em uma rampa de desaceleração. Cada rampa é formada por diferentes estágios (patamares) de rotação de forma que se possa obter uma curva de aceleração e outra de desaceleração. As principais informações obtidas neste tipo de ensaio são:

- torques de escoamento: torques em rotações muito baixas, indicando o torque necessário para iniciar o movimento. É o equivalente à tensão de escoamento em ensaios reológicos que permitem descrever a reologia em unidades fundamentais.
- Relação torque/rotação em qualquer rotação: indicam os torques necessários para manter o movimento (cisalhamento). É o equivalente à viscosidade aparente.
- Perfil reológico: formato da curva. Comportamentos lineares se referem a comportamentos de fluidos de Bingham, curvas com derivadas crescentes indicam comportamento dilatante e curvas com derivadas decrescentes indicam comportamento pseudoplástico.
- Área de histerese: a área compreendida entre as rampas de aceleração e desaceleração. Relaciona-se à quebra ou formação de estruturas internas que levam a outro nível de torque depois de aplicado o cisalhamento.
- Modelamento: além das informações diretas citadas pode-se ajustar modelos reológicos aos dados. Os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley são os mais comuns. Neste caso os parâmetros do modelo dão informações a respeito de torques de escoamento, viscosidade e formato da curva.

Outros ensaios, como, por exemplo, avaliações do comportamento ao longo do tempo, e outras geometrias podem ser propostas.

7.1.2 Resultados de aplicação

Por permitir descrição mais completo da reologia, o uso de reômetros na produção de concretos deverá ter aplicação crescente no futuro. Equipamentos flexíveis como o apresentado, com o qual ensaios diferentes podem ser realizados, são ideais para a aplicação em campo no controle de qualidade, substituindo os atuais ensaios, que, embora simples, são limitados. Por este motivo considerou-se esta possibilidade, com objetivo de propor metodologias que permitam empregá-lo tanto para caracterizar concretos, bem como para avaliar a variabilidade que ocorre em situações práticas.

Neste sentido, uma primeira bateria de ensaios em campo foi realizada. Trata-se de uma grande obra de infraestrutura de barragem, na qual diferentes tipos de concreto foram empregados. Após a mistura dos concretos em misturadores tipo *twin shaft*, coletou-se uma amostra de cerca de 17 L, a qual foi avaliada no reômetro. Este ensaio foi conduzido em paralelo com o ensaio de abatimento tradicional, levando cerca de 5 minutos. Resultados de um dos concretos analisados estão mostrados na Figura 102. As curvas delimitam uma faixa de variabilidade, que pode ser estabelecida como região de aceitação.

Os resultados obtidos indicam a possibilidade de aplicar o reômetro como um instrumento de controle de qualidade. Uma vez estabelecidos limites máximos e mínimos de aceitação, um ensaio de ciclo de cisalhamento pode indicar desvios do aceitável, tanto em baixas como altas taxas de cisalhamento.

Também indicam que pode ser aplicado como um instrumento de medida de robustez em campo. Diversas composições de concreto podem ser monitoradas ao longo do tempo, sendo sujeitos às diversas fontes de variabilidade que naturalmente ocorrem no ambiente de produção, seja em termos de materiais, equipamentos e ambiente de produção. O grau de dispersão dos resultados reológicos ao longo do tempo pode ser considerado como um indicador quantitativo de robustez. Formulações mais dispersas podem ser consideradas menos robustas que outras menos dispersas.

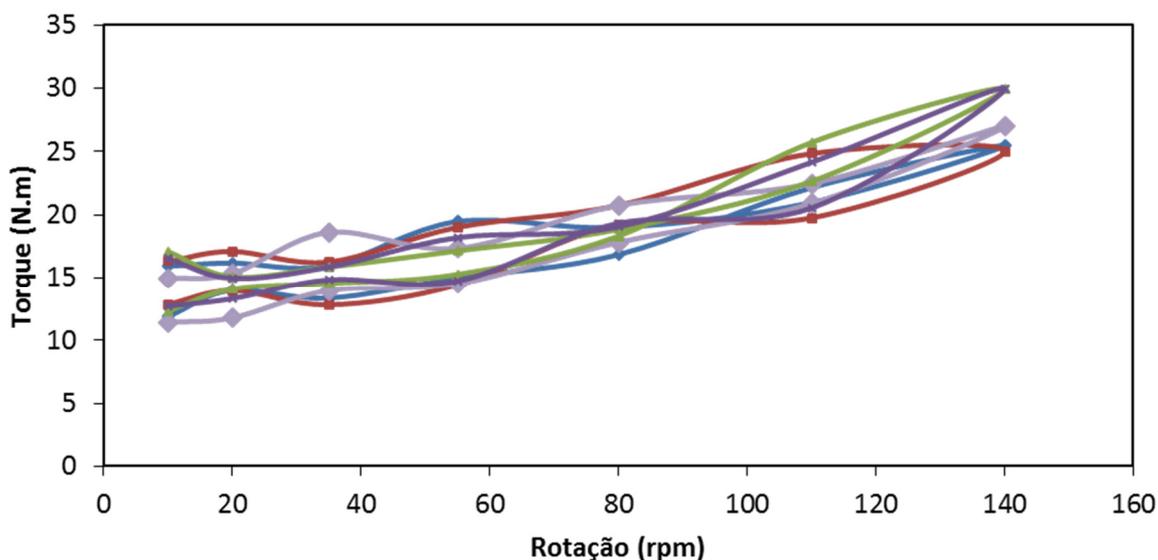


Figura 102 - Variabilidade detectada em campo, por meio de reometria de fluxo, em concretos de mesma composição teórica.

7.2 Instrumentação de um equipamento de mistura

A etapa de mistura é um momento crucial da produção do concreto, onde ocorrem uma diversidade de fenômenos os quais contribuem com as propriedades no estado fresco e, a depender das decisões tomadas, também no estado endurecido. A escolha da sequência de mistura, tempo de mistura e tipo de equipamento podem ser de importância fundamental. Por este motivo considerou-se que a aquisição de dados nesta etapa possa ser utilizada para interpretar e ajustar as formulações, bem como servir de medida de identificação de desvios da situação padrão.

A etapa de avaliação experimental da robustez, apresentado no capítulo 6, indicou que o reômetro de concreto possui sensibilidade para detectar diferenças na formulação ao longo de diversos momentos da mistura. Levantou-se então a hipótese de que um misturador de concreto de maior porte, instrumentado para aquisição dos torques necessários para realizar a mistura, pudesse também ser capaz de detectar estas alterações.

Descreve-se a seguir as adaptações realizadas em um misturador de concreto planetário para verificar esta hipótese.

7.2.1 Equipamento e sistema de aquisição

Foi realizada uma reforma completa de um misturador planetário, capaz de produzir até 200 L de concreto por batelada. Toda a parte mecânica foi revisada (acionamento principal e abertura de descarga), as pás misturadoras e raspadores internos tiveram seu posicionamento otimizado, foram adicionadas travas de segurança nas aberturas superiores e o conjunto recebeu uma pintura de proteção.

Para que o misturador pudesse atuar em rotações variáveis foi adicionado um inversor de frequência. Desta maneira têm-se possibilidades adicionais, como misturas em diferentes níveis de rotações ou até variáveis dentro de um mesmo processo de mistura. Além disto, o inversor de frequência escolhido permite a aquisição da corrente elétrica que alimenta o misturador. Mudanças de torques durante o processo de mistura afetam a corrente de alimentação, sendo, portanto, uma maneira indireta de avaliar o torque aplicado na mistura.

Por fim, foi inserida uma célula de torque, para que o esforço exercido pelo motor durante a mistura pudesse ser medido diretamente. Trata-se de um instrumento fornecida pela Torkflex Distribuidora de Acionamentos Mecânicos, que fornece este tipo de equipamento para monitoramento de clarificadores e decantadores de caldo de cana em usinas de açúcar e álcool (Figura 103).

analgógica de parâmetros de interesse, como a porcentagem de torque solicitado pelo motor. Portanto, a aquisição do torque do motor foi realizada pela saída analógica do inversor de frequência, através de uma placa de aquisição da *National Instruments*, modelo USB-6008 e a utilização do software *LabVIEW*. Este permite o controle da taxa de amostragem e também a filtragem dos dados. No caso, utilizou-se uma taxa amostral de 100 pontos por segundo e em seguida filtrados a partir de uma média móvel de um ponto por segundo.

7.2.2 Sistema de carregamento do misturador

Em função dos volumes de material necessário, e com o objetivo de possibilitar estudos de sequência de mistura dos materiais, surgiu a necessidade de um sistema auxiliar para alimentação do misturador. Este acessório tem por finalidade permitir a alimentação do misturador com até 10 materiais granulares distintos, os quais podem ser introduzidos separadamente, conforme a sequência de mistura desejada.

O sistema é composto por uma bateria de 10 mini silos, um elevador de carga para posicionamento vertical, trilhos para posicionamento horizontal e um funil de descarga. Na Figura 105 mostra-se uma visão geral do sistema e uma vista inferior da bateria de silos. Cada silo, capaz de armazenar até 50 L de material, é removível para que possa ser carregado e pesado individualmente (Figura 106).



Figura 105 - Sistema de alimentação do misturador instrumentado: vista geral (esquerda) e vista inferior da bateria de mini silos (direita)



Figura 106 - Sistema de alimentação do misturador instrumentado: vista superior parcial da bateria de mini silos (esquerda) e detalhe de um mini silo individual, o qual é removível para preenchimento e pesagem (direita).

Na Figura 107 mostra-se a sequência de operação. Após o preenchimento dos silos com o material a ser empregado na fabricação do concreto, estes são posicionados na bateria ainda ao nível do solo. Com ajuda do elevador de carga a bateria é suspensa até a altura final. Sensores de início e fim de curso garantem o posicionamento tanto no nível inferior como superior. A estrutura é então posicionada horizontalmente sobre o funil de descarga.



Figura 107 –Vista lateral da sequência de posicionamento para descarga: bateria de silos posicionados ao nível do solo (esquerda), bateria de silos na posição elevada (centro) e descolamento horizontal para posicionamento acima do funil de descarga (direita).

A abertura de cada silo se dá por meio de um gatilho, que abre a comporta inferior. Até a conclusão deste trabalho os gatilhos eram acionados manualmente. A automatização da abertura por meio de um sistema elétrico, que pode inclusive ser controlado por um sistema computacional, é uma das melhorias previstas.



Figura 108 - Vista inferior dos silos, com detalhes das portinholas e gatilhos de abertura.

A montagem e ajuste de diversos detalhes deste sistema de alimentação estendeu-se por vários meses. Apenas ao final do primeiro semestre de 2016 apresentava-se em condições mínimas de operação. Devido a este atraso, a exploração científica do sistema ficou limitada, porém não menos promissora, como será mostrado a seguir.

7.2.3 Proposta Experimental

No capítulo 6, diversos aspectos que afetam as características reológicas de concretos foram avaliadas, tendo um reômetro como equipamento de mistura. Na prática, as alterações reológicas, sejam por qual motivo forem, são geralmente interpretadas como inadequação no teor de água, seja na falta ou excesso. Tendo isto em vista, no capítulo supracitado todas as variáveis que afetaram as propriedades reológicas foram convertidas em volumes de água equivalentes. Assim sendo, qualquer equipamento que seja proposto como instrumento de controle, deve ser capaz de detectar primeiramente mudanças no teor de água de uma composição.

Os testes iniciais do misturador instrumentado analisaram os casos mais extremos do cenário de desvios de pesagem apresentados no capítulo 6. Como descrito, os desvios de pesagem de sólidos podem ser interpretados também como desvios de pesagem de água. Conforme a Tabela 23, os consumos de água variaram em $145 \pm 5 \text{ L/m}^3$. Esta faixa de variação corresponde também à recomendação mais restritiva da EFNARQ (2005) para considerar concretos auto adensáveis como robustos.

Propôs-se então avaliar a sensibilidade do misturador instrumentado nesta faixa de variação de consumos de água. Para que fosse possível uma comparação com os resultados já obtidos com o reômetro, uma sequência de mistura semelhante foi adotada (ver Figura 54, pg. 128), com a mesma duração de etapas, apenas eliminando a etapa de raspagem e os ciclos de cisalhamento.

7.2.4 Resultados e discussão

Misturou-se um volume de 100 L de concreto, o que corresponde durante a etapa de mistura inicial a apenas 60 L de argamassa. Mesmo sendo apenas 30% da capacidade total do equipamento, foi possível obter sinais com bastante nitidez durante toda a sequência de mistura.

Foram coletados dados tanto da célula de torque, quanto do inversor de frequência que controla o misturador. Antes do início da adição dos materiais no misturador, o equipamento permaneceu funcionando na rotação de mistura por 60 segundos. A média dos sinais deste período foram considerados como “Linha Base”, isto é, os sinais em vazio do equipamento. Este valor de “Linha Base” foi subtraídos dos sinais obtidos ao longo da mistura, de modo a desconsiderar os atritos e efeitos de inércia do próprio equipamento.

Na Figura 109 mostram-se os dados tratados. Observa-se uma ótima concordância entre os dois sinais, além de precisão nos eventos de adição de água (450 a 500 s) e agregados graúdos (1050 s). A possibilidade de obter informações de torque pelo inversor de frequência é de grande interesse. Além de ser mais barato que uma célula de torque, exige menor intervenção no equipamento. Testes adicionais ainda são necessários para conclusões mais gerais, principalmente em ambientes com alimentação elétrica com ruídos, típicos de ambientes industriais.

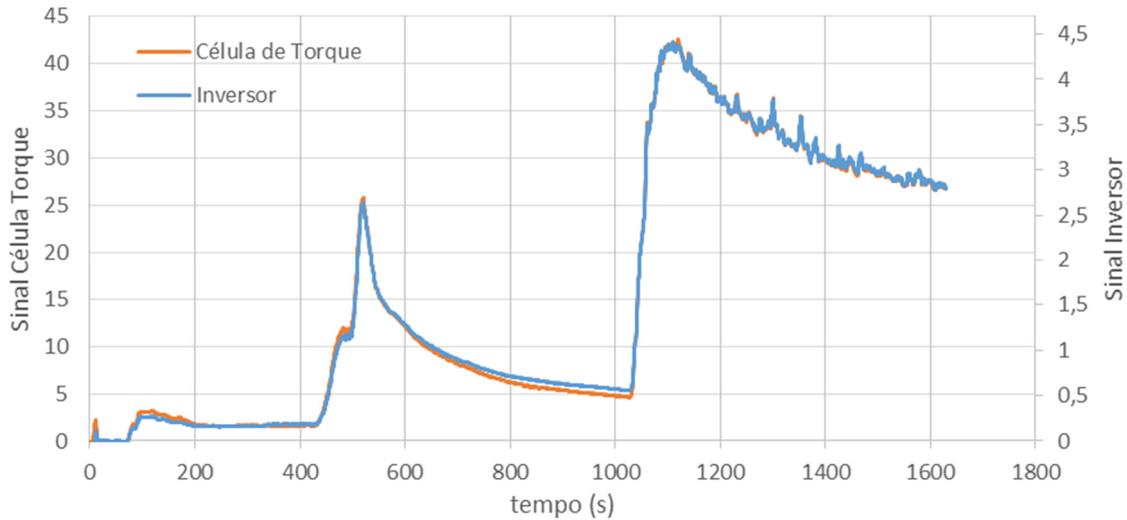


Figura 109 - Sinais obtidos pela célula de torque e inversor de frequência durante o processo de mistura

Na Figura 110 compara-se a curva de mistura do mesmo concreto produzido no reômetro e no misturador. Nota-se que ambos têm grande precisão na detecção dos eventos. Também o perfil e a ordem de grandeza relativa entre os eventos são muito semelhantes. Aparentemente apenas a cinética de mistura difere um pouco, o que pode ser notado, por exemplo, na mais rápida redução do nível de torque no reômetro, após a adição de agregados graúdos (1100 a 1300 s).

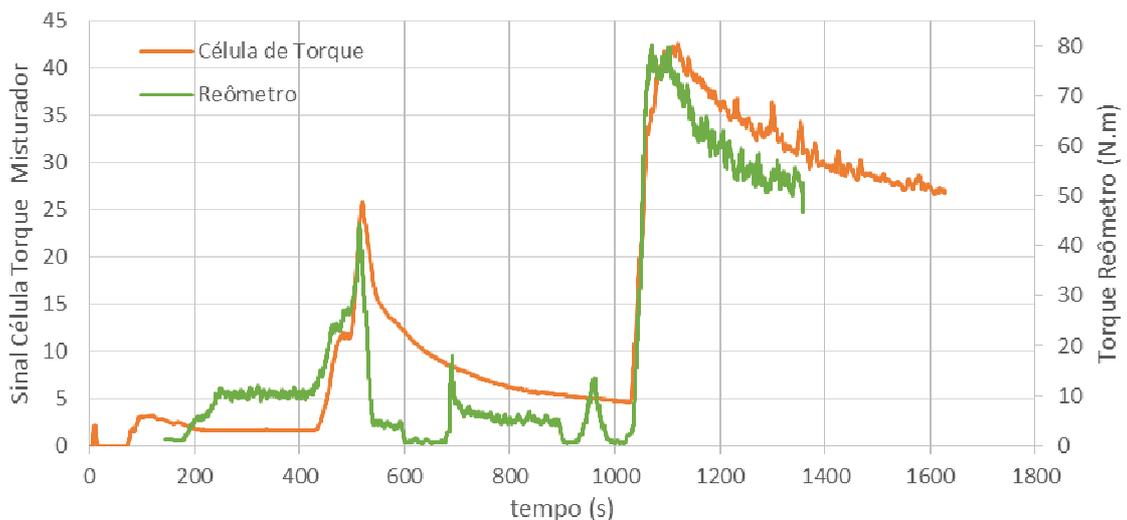


Figura 110 - Comparação de resultados obtidos no reômetro e no misturador

Por fim, mostra-se nas Figuras 111 e 112 as curvas de mistura de três concretos, simulando desvios de $\pm 5 \text{ L/m}^3$ de água.

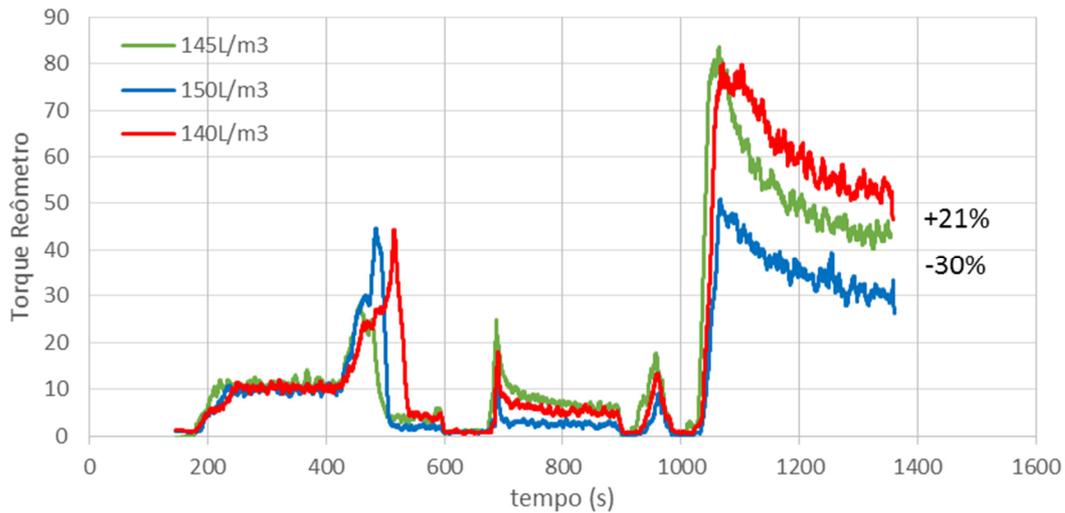


Figura 111 – Curvas de mistura de três concretos no reômetro. A diferença entre eles é o consumo de água, em intervalos de 5 L/m^3 .

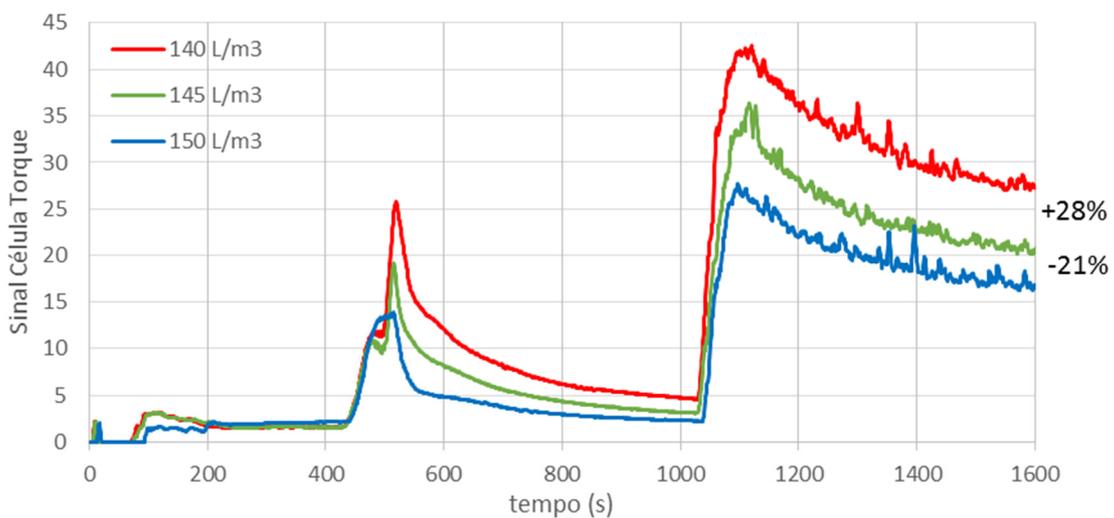


Figura 112 - Curvas de mistura de três concretos no misturador instrumentado. A diferença entre eles é o consumo de água, em intervalos de 5 L/m^3 .

Os resultados demonstram uma sensibilidade excepcional, semelhante à do reômetro. Variação de 5 L/m^3 de água alteraram substancialmente o torque final, na ordem de 20 a 30 %. Não apenas na

condição final, mas ao longo de todo processo de mistura foi possível notar diferenças, o que possibilita ações corretivas mesmo antes de concluir a mistura.

7.2.5 Considerações finais

Os resultados obtidos permitem uma validação de mão dupla. Inicialmente validam todo o trabalho experimental realizado com o reômetro, pois os resultados obtidos por meio dele são representativos do que ocorre em um misturador em escala e tipologia comercial. Os diversos aspectos de robustez avaliados, e que puderam ser detectados na mistura no reômetro, com boa possibilidade se manifestam em grau semelhante na produção em escala comercial.

Por outro lado, estes resultados validam também o uso de um equipamento de mistura em escala comercial como ferramenta de controle de robustez. Concretos que tiveram sua robustez natural reduzida devido à otimização de sua composição e redução do consumo de cimento, podem vir a necessitar da adição de mecanismos suplementares de robustez. O misturador pode ser um destes mecanismos de controle. Acoplado a um sistema de monitoramento e análise in-line, passa a ser possível estabelecer curvas de mistura nominais com uma faixa de tolerância de aceitação. Caso durante a mistura de um concreto qualquer os limites admissíveis sejam ultrapassados, o equipamento pode emitir um alerta ou até mesmo disparar ajustes.

8 CONCLUSÃO

Por meio da pesquisa desenvolvida demonstrou-se que diversas propriedades no estado fresco e endurecido dependem dos cenários de variabilidade impostos aos materiais e processo de produção. Desvios de proporcionamento e mudanças granulométricas e morfológicas afetam inicialmente as propriedades reológicas e, a depender das ações tomadas no processo de produção, podem comprometer até certo ponto as propriedades de desempenho do concreto no estado endurecido. No entanto, nem todas os fatores são relevantes. O grau com que cada cenário impacta depende de diversos fatores, como por exemplo a própria formulação do concreto e a amplitude em que os desvios se apresentam no dia-a-dia da produção do concreto. O trabalho desenvolvido permitiu avaliar a relação entre os fatores e algumas características mais fundamentais, de modo a permitir estender algumas das conclusões a sistemas mais gerais.

Devido à pressão ambiental, espera-se por mudanças na forma como se produz concreto. Novos ligantes, uso intensivo de materiais cimentícios suplementares e fílers, aditivos para múltiplas funções, aumento de durabilidade, uso de materiais reciclados e redução dos consumos de cimento deverão ser a tônica do concreto do futuro. Neste cenário encontrar soluções robustas será fundamental para garantir a aplicação segura e em larga escala. Entende-se que soluções robustas não se referem apenas a produção de formulações de concreto robustas por si só, mas podem também incluir ações incorporadas ao processo de produção, como, por exemplo, detecção de desvios e correções rápidas durante a produção.

Visando contribuir neste sentido este trabalho apresenta algumas conclusões, sintetizadas a seguir.

Quanto a modelos de empacotamento:

- Configurações otimizadas dos agregados são cada vez mais necessárias à medida que se reduz o consumo de cimento e água. Prever e controlar o empacotamento é, portanto, uma questão fundamental para que se possa obter concretos com menores consumos de cimento. Ter à disposição modelos práticos que permitam previsões realistas é fundamental para se avaliar o impacto que mudanças granulométricas ou morfológicas tem sobre a microestrutura física do concreto;
- O ensaio de empacotamento experimental empregado, com o equipamento Geopyc, evidenciou os principais parâmetros que afetam o empacotamento: tamanho das partículas, distribuição granulométrica, morfologia e efeito parede do recipiente;

- Avaliou-se nesta pesquisa alguns modelos de empacotamento. Nem todos se mostraram adequados para descrever a porosidade de misturas de grãos na faixa de tamanho dos agregados do concreto. O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) se mostrou mais adequado, desde que os seus parâmetros de entrada sejam adequadamente estabelecidos;
- A porosidade das frações discretas é um dos parâmetros de entrada que necessitam ser estabelecidos, o que pode ser feito pelo método experimental empregado neste trabalho;
- Para evitar o uso do processo experimental para medida direta do empacotamento, propôs-se um modelo matemático empírico que utiliza informações de tamanho e morfologia para estimar com boa precisão o valor da porosidade de frações discretas;
- Todas as informações de granulometria e morfologia, necessárias para estimar o empacotamento por meio do modelo calibrado, podem ser obtidos por meio da técnica de Análise de Imagens Dinâmicas;

Quanto à análise teórica da robustez:

- Com auxílio do modelo de empacotamento ajustado pôde-se desenvolver um sistema computacional para auxiliar na formulação de concretos. Este sistema permite prever alguns parâmetros microestruturais do concreto, tais como porosidade de empacotamento e distâncias de separação de partículas.
- Tanto para dar subsídio à análise teórica, como para fixar os níveis de variação a serem utilizados na etapa experimental, foi necessário coletar dados de variabilidade. Obteve-se dados a respeito de variação de granulometria, morfologia e umidade de agregados e de desvios de pesagem de todos materiais.
- Com base nestes dados, e empregando o sistema computacional, propôs-se um método para avaliar a influência de desvios de formulação e de granulometria e morfologia dos agregados sobre alguns parâmetros do concreto, podendo-se inclusive propor medidas de robustez;
- Aplicou-se o método a uma família de concretos convencionais e a um concreto de baixo consumo de cimento. O concreto de baixo consumo de cimento avaliado mostrou sensibilidade similar à dos concretos convencionais, o que pode ser consequência do conjunto de técnicas empregados para sua formulação. Considerou-se que isto é um indício de que é possível desenvolver concretos com baixo consumo de cimento com robustez adequada;
- As conclusões a respeito da importância de cada fator sobre as diversas respostas são específicas das formulações de concreto avaliadas e das situações de variabilidade consideradas. As conclusões, portanto, não devem ser generalizadas, o que evidencia o valor

do sistema computacional desenvolvido, pois pode-se avaliar outros cenários de variabilidade e outras formulações sem a necessidade de ensaios experimentais.

Quanto ao desenvolvimento de concretos de baixo consumo de cimento:

- O uso de aditivos superplastificante de alto desempenho e em teores adequados são fundamentais para a produção de concretos com baixo consumo de cimento. Mostrou-se que ensaios reológicos com pastas de cimento podem ser empregados para a escolha de aditivos e para a fixação do consumo;
- O teor de aditivo deve ser no teor de saturação, ou até um pouco acima deste valor. Deste modo, a solução se torna mais robusta quanto a pequenas variações na composição, pois não conduz a situações onde a dispersão não é completa, o que impactaria nas propriedades reológicas. Mostrou-se que, para definir o teor de saturação, a avaliação de parâmetros reológicos únicos, como é feito em ensaios do tipo monoponto (por exemplo, cone de Marsh ou espalhamento), podem não ser suficiente. Ensaios reológicos de fluxo com placas paralelas em pastas podem ser utilizados para descrever de maneira muito mais ampla o comportamento reológico da pasta, permitindo uma identificação mais correta do teor de saturação de aditivo;
- Mostrou-se que a manutenção das propriedades reológicas no tempo depende do teor de aditivo e que teores mais altos podem ser necessários para estabilizar as propriedades reológicas por um prazo adequado;
- Aplicou-se métodos reológicos para avaliar o empacotamento da pasta, observando-se fílers que podem atuar meramente como substituintes do cimento (fílers de substituição), sem impactar significativamente nas propriedades reológicas, e fílers que permitem redução de viscosidade e dilatância, além de conferir maior estabilidade de dispersão à pasta (fílers de desempenho). Teores crescentes deste último fíler, até um determinado teor acima do qual passa-se a uma faixa de consumo onde os parâmetros reológicos se mantem pouco variáveis, permitem redução no consumo de água em relação a pastas sem fíler de desempenho. A opção por empregar teores do fíler de desempenho nesta faixa contribui com o desenvolvimento de formulações mais robustas quanto a pequenos desvios na proporção entre os materiais sólidos da pasta.
- Aplicando os conceitos de empacotamento e dispersão de partículas, e empregando métodos reológicos para o desenvolvimento da pasta e do concreto, foi possível desenvolver um concreto com 51 MPa de resistência à compressão média aos 28 dias, com consumo de apenas 200 kg de cimento por m³ de concreto (188 kg/m³ de ligantes). Isto equivale a uma intensidade

de ligantes de apenas 3,66 kg/m³/MPa, o que comprovadamente pode ser considerado de baixo consumo de cimento. Nesta faixa de resistência, são raras as citações de literatura de concretos com intensidade de ligantes abaixo de 5 kg/m³/MPa.

- A separação de fases é um aspecto importante a ser considerado nos concretos de baixo consumo de cimento. O uso intensivo de aditivos superplastificante reduz a tensão de escoamento das pastas, o que pode conduzir a situações indesejadas de separação de fase (segregação). Ajustes no teor de fílers podem contribuir na modificação das propriedades da pasta, reduzindo o risco de segregação.

Quanto à avaliação experimental da robustez:

- Avaliou-se experimentalmente a influência que desvios de pesagem e alterações granulométricas e morfológicas dos agregados tem sobre as propriedades reológicas e mecânicas do concreto de baixo consumo de cimento desenvolvido. Pôde-se detectar em diversos momentos ao longo do processo de mistura o efeito destes desvios. Isto sugere a possibilidade de se empregar instrumentação reológica nesta fase para detectar desvios do planejado, e, possivelmente, até detecção da fonte de alteração, sendo possível a partir destas informações atuar de forma a corrigir a formulação. Isto é uma forma de incorporar um mecanismo de robustez ao processo de produção (mecanismo de controle do sistema, com *feed back*).
- Os desvios de pesagem dos agregados podem ser avaliados em conjunto, reduzindo o estudo de variabilidade de pesagem a dois fatores apenas: desvio de pesagem total de agregados e desvio de pesagem de finos.
- No cenário de variação granulométrica, as distâncias de separação de partículas (IPS na pasta, e MPT nos agregados) determinam o comportamento reológico.
- No cenário de variação morfológica, a morfologia das partículas da fração dominante (aquela que define a densidade de empacotamento) é o fator que mais afeta as propriedades reológicas. Caso seja empregado um material com boa uniformidade morfológica como material dominante, ganha-se em robustez e pode-se empregar materiais mais variáveis em outras frações granulométricas, sem afetar tanto as propriedades reológicas do concreto.
- Foi possível obter modelos empíricos com altos coeficiente de determinação ($R^2 > 0,92$) para estimar diversos parâmetros reológicos, tais como viscosidade aparente, torque de mistura e energia de mistura, a partir dos fatores preponderantes detectados. A partir destes modelos empíricos pôde-se calcular o teor de água necessário para que um dado parâmetro reológico alcançasse um valor desejado.

- Avaliou-se as consequências da prática de ajustar o volume final de água com base em um critério reológico. Adotou-se o torque na rotação padrão de mistura (126 rpm) como critério reológico para ajuste da reologia. Os concretos considerados adequados com base na reologia foram avaliados em termos mecânicos, podendo-se correlacionar a resistência com a relação água/cimento.
- Para simular os efeitos dos desvios de pesagem empregou-se os modelos empíricos obtidos e uma técnica de reamostragem (Bootstrap) sobre os dados de desvios absolutos de pesagem coletados em uma central comercial de concreto. Observou-se desvios de no máximo 10% dos valores previstos para os principais parâmetros reológicos avaliados. Para a resistência à compressão em 90% dos casos os desvios são de no máximo $\pm 0,8$ MPa ($\pm 2\%$) e a intensidade de ligantes variou pouco (3,63 e 3,71 kg/m³/MPa).
- De modo semelhante, no cenário de variação granulométrica observou-se desvios reológicos de até $\pm 20\%$ e $\pm 2,4$ MPa na resistência à compressão e no cenário de variação morfológica a resistência variou em $\pm 2,0$ MPa.
- A forma de análise realizada permitiu propor um método para avaliação da robustez de uma dada formulação de concreto frente a um cenário de variabilidade. Propôs-se também um índice numérico para quantificar a robustez, correspondente à relação entre os limites de variação detectados e a faixa considerada como admissível. Valores superiores a 1 indicam que a formulação não é robusta no cenário avaliado, e quanto menor o valor, mais robusta será a formulação considerada.
- Para a resistência à compressão obteve-se índice de robustez de 0,32 para o cenário de desvios de pesagem, 0,92 para o cenário de variabilidade granulométrica e 0,77 para o cenário de variabilidade morfológica. Com base nestes valores, o concreto pode ser considerado robusto caso se considere os cenários isoladamente. As preocupações com a granulometria e morfologia devem ser maiores que com os desvios de pesagem. O fator mais importante no caso da granulometria é o teor de finos (fração abaixo de 150 μm) dos materiais britados e no caso da morfologia é a forma das partículas da fração dominante que precisa ser mais controlada.

Quanto à aplicação de ferramentas de campo para aumentar a robustez:

- O método de mistura empregado na avaliação experimental da robustez permitiu identificar em diferentes momentos da mistura a influência das variáveis estudadas. Também a avaliação do comportamento reológico por meio de ciclos de cisalhamento identificou estas alterações. Ambos os ensaios foram conduzidos pelo mesmo equipamento, um reômetro de concreto.

Mostrou-se que equipamentos como este podem também ser empregados para controle da qualidade do concreto em campo. Uma vez estabelecidos limites de aceitação pode-se avaliar sequências de concretos produzidos a partir da mesma formulação e avaliar a frequência com a qual estão dentro dos limites admitidos. Quanto maior esta frequência, mais robusto pode ser considerada a formulação.

- Controlar a reologia ao longo do processo de mistura é uma forma de aumentar a robustez. Caso os desvios do projeto de formulação original do concreto apresentem reflexos nesta fase de produção, pode-se detectá-los e até mesmo propor correções ainda na fase de mistura. Para verificar esta possibilidade instrumentou-se um misturador planetário de concreto com uma célula de torque capaz de informar o esforço aplicado ao longo da mistura. Avaliações iniciais neste sistema instrumentado permitiram validar os resultados obtidos pelo reômetro em uma escala maior e de configuração próxima da empregada comercialmente. O misturador assim instrumentado foi capaz de detectar mudanças significativas nos torques de mistura ao se modificar em $\pm 5 \text{ L/m}^3$ o consumo de água no concreto estudado. Possui, portanto, sensibilidade suficiente para atuar na detecção de alterações de composição.

8.1 Sugestões para futuras pesquisas

Este trabalho representa apenas o início da avaliação da robustez de concretos com baixo consumo de cimento. Ao mesmo tempo que soluções robustas são essenciais para possibilitar a transição do ambiente laboratorial para as primeiras aplicações em escala, este é um campo vasto ainda a ser explorado. Algumas sugestões para nortear as futuras pesquisas nesta área são citadas a seguir:

- Avaliar outras composições de concreto: neste quesito pode-se avançar em direção a consumos de cimento ainda menores, empregar agregados com outras morfologias e/ou granulometrias ainda mais bem empacotadas;
- Avaliar a robustez frente a alterações na pasta: nesta pesquisa apenas poucas questões referentes à pasta foram abordadas. Diversos aspectos adicionais precisam ser considerados, tais como granulometria do cimento e fillers, presença de materiais cimentícios suplementares, contaminantes, alteração na composição química do cimento, interação do sistema cimento-aditivo, entre outros.
- Mesmo estudando aspectos isolados para gradativamente avaliar os diversos parâmetros mais importantes, em algum momento será necessário integrar os modelos, ou estudar de maneira experimental, os que mostraram ser mais impactantes.

- A separação de fases é uma questão importante nos concretos com baixo consumo de cimento. Para obter as altas reduções de água necessárias emprega-se aditivos dispersantes de alto desempenho, o que conduz a pastas com tensão de escoamento próximas de zero, o que agrava problemas de separação de fases. O uso de aditivos modificadores de viscosidade, influência dos fíler e relação com a distribuição granulométrica dos agregados são alguns dos tópicos que podem ser abordados neste sentido.
- A influência dos cenários de variabilidade sobre a durabilidade foi apenas superficialmente abordada nesta pesquisa (ver Apêndice 10.3, pg. 240). Observou-se que a variabilidade dos ensaios para avaliar a durabilidade é superior às variações decorrentes dos cenários avaliados. Com base nestas breves avaliações, não se observou influência significativa sobre a durabilidade, porém, o assunto deve ser aprofundado, em especial quanto a aspectos de permeabilidade e carbonatação.
- A exploração científica do misturador instrumentado promete adicionar mecanismos de robustez à produção de concreto. Integração do monitoramento durante a mistura com sistemas de previsão de propriedades permitirá criar sistemas que se autocontrolam e se auto ajustam, amplificando a robustez não do material produzido, mas do processo de produção.
- Como continuidade da pesquisa sugere-se também avaliar as consequências devido às variações na execução sobre um concreto que foi produzido de modo adequado, porém aplicado com falhas (por exemplo, falhas no adensamento ou cura). Este tipo de análise também é importante para a aceitação mais fácil do produto.

9 REFERÊNCIAS⁶

- ACI COMMITTEE 237. **ACI 237R-07: Self-consolidating concrete**. American Concrete Institute, 2007.
- AÏTCIN, P.-C. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1349–1359, Setembro 2000.
- ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABÁSI, A.-L. Error and attack tolerance of complex networks. **Nature**, v. 406, n. 6794, p. 378–382, 27 jul. 2000.
- ALLEN, T. **Particle Size Measurement - Volume 1: Powder sampling and particle size measurement**. Netherlands: Springer, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. West Conshohocken/Pennsylvania/USA: ASTM, 2012.
- ANDRADE, W. P. DE. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.
- ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Koernern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Z**, v. 50, p. 217–228, 1930.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: agregados para concreto: especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- _____. **NBR NM 248: agregados - determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- _____. **NBR 12655: Concreto de Cimento Portland: preparo, controle e recebimento: procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- _____. **NBR 5739: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 8522: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- _____. **NBR 7809: agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- _____. **NBR 15823-2: concreto auto-adensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- _____. **NBR 15823-1: concreto auto-adensável Parte 1: classificação, controle e aceitação no estado fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- _____. **NBR 7212: execução de concreto dosado em central: procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

⁶ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BAKER, J. W.; SCHUBERT, M.; FABER, M. H. On the assessment of robustness. **Structural Safety**, v. 30, n. 3, p. 253–267, Maio 2008.

BARROS NETO, B. DE; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 4. ed. Bookman, 2010.

BAYRAMOV, F.; TAŞDEMİR, C.; TAŞDEMİR, M. A. Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 665–675, Agosto 2004.

BEN-AÏM, R. **Etude de la Texture des Empilements de Grains, Application à la Détermination de la Perméabilité des Mélanges Binaires en Régime Moléculaire, Intermédiaire, Laminaire**. Thesis (doctoral)—Nancy/France: Université de Nancy, 1970.

BERNSTEIN, L. et al. 2007: Industry. In: METZ, B. et al. (Eds.). . **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. p. 447–496.

BINGHAM, E. C. **An investigation of the laws of plastic flow**. National Bureau of Standards, 1916.

BODE, H. W. **Network Analysis and Feedback Amplifier Design**. New York: D. Van Nostrand Company, 1945.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. 2. ed. Wiley, 2005.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8500: concrete - complementary British standard to BS EN 206**.(in two parts). London, 2006.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades (Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos/ Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CATOIA, T.; CATOIA, B.; PEREIRA, T. A. C.; CATAI, E.; LIBORIO, J. B. L. **Concreto de alta resistência com baixo consumo de cimento**. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...**Salvador: IBRACON, 2008a

CATOIA, T.; PEREIRA, T. A. C.; CATOIA, B.; SANCHES JR., J. E. R.; CATAI, E.; LIBORIO, J. B. L. **Concreto auto-adensável com baixo consumo de cimento**. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...**Salvador: IBRACON, 2008b

CEMBUREAU. **Activity Report 2015**. Brussels, Belgium: CEMBUREAU, 2015.

CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **Eurocode 1 – actions on structures part 1 – basis of design**. Bruxelas/Bélgica, 1994.

CEPURITIS, R.; JACOBSEN, S.; PEDERSEN, B.; MØRTSELL, E. Crushed sand in concrete – Effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 26–41, ago. 2016.

CHAUVENET, W. **A Manual of Spherical and Practical Astronomy: Spherical astronomy**. J.B. Lippincott Company, 1874.

CORTES, D. D.; KIM, H.-K.; PALOMINO, A. M.; SANTAMARINA, J. C. Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1142–1147, Outubro 2008.

CSI - THE CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050**. Suíça: World Business Council for Sustainable Development, 2009. 33 p.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, Setembro 2010.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (Doutorado em Ciências) São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. London: E&FN Spon, 1999.

DERRIBLE, S.; KENNEDY, C. The complexity and robustness of metro networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 389, n. 17, p. 3678–3691, Setembro 2010.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1045-2: concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 2: concrete: specification, properties, production and conformity: application rules for DIN EN 206-1**. Berlin/Alemanha, 2008.

EFNARC. **European SCC Guidelines**, 2005. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>>

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. **An Introduction to the Bootstrap**. New York: CRC Press, 1994.

EPE & IDDRI - Enterprises pour l'Environnement & International Institute for Sustainable Development and International Relations. (2008). **Scenarios for transition towards a low carbon world in 2050: What's at stake for heavy industries?** EPE & IDDRI: Paris, 2008. 6 p.

ERDOĞAN, S. T.; MARTYS, N. S.; FERRARIS, C. F.; FOWLER, D. W. Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 5, p. 393–402, 2008.

FLATT, R. J.; ROUSSEL, N.; CHEESEMAN, C. R. Concrete: An eco material that needs to be improved. **Journal of the European Ceramic Society**, Special Issue: ECerS XII, 12th Conference of the European Ceramic Society. v. 32, n. 11, p. 2787–2798, Agosto 2012.

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The laws of proportioning concrete. **Proc. Am. Soc. Civil Engr.**, v. 33, n. 261, 1907.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing**. New York: Springer, 1994.

FURNAS, C. C. Relations between specific volume, voids and size compositions in systems of broken solids of mixed sizes. **U.S. Bureau of Mines Reports of Investigation**, v. 2894, 1928.

GÁLVEZ-MORENO, D.; DURÁN-HERRERA, A.; GONZÁLEZ-LÓPEZ, J. R.; KHAYAT, K. H. **Robustness of Powder-Type SCC with Fly Ash and Limestone Crushed Aggregates**. SCC 2016 Conference Proceedings. **Anais...** In: SCC 2016. Washington D.C.: 2016

GRANDES, F. A.; REBMANN, M. S.; PILEGGI, R. P. Estudo de um método para medida do empacotamento de sistemas particulados compactados. In: **Iniciação Científica e Tecnológica: o jovem pesquisador em ação IV**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2013.

GRAY, W. A. **The packing of solid particles**. Chapman & Hall, 1968.

HALES, T. A proof of the Kepler conjecture. **Annals of Mathematics**, v. 162, n. 3, p. 1065–1185, 1 nov. 2005.

HARTWELL, L. H.; HOPFIELD, J. J.; LEIBLER, S.; MURRAY, A. W. From molecular to modular cell biology. **Nature**, v. 402, p. C47–C52, 2 dez. 1999.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. **Kolloid-Zeitschrift**, v. 39, n. 4, p. 291–300, ago. 1926.

HSU, K.-C.; CHIU, J.-J.; CHEN, S.-D.; TSENG, Y.-C. Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 5–6, p. 425–430, Dezembro 1999.

HU, J.; WANG, K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1196–1204, mar. 2011.

HUBER, P. J. **Robust statistical procedures**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1977.

HUHNS, M. N.; HOLDERFIELD, V. T. **Robust Software**. University of South Carolina, 2002.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2007). **Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ emissions**. Paris/France: International Energy Agency, 2007. 321 p.

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. Issues concerning the evaluation of permeability in refractory concretes with Darcy and Forchheimer equations. **Cerâmica**, v. 45, n. 292–293, p. 61–67, jun. 1999.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Concrete sustainability with very high amount of fly ash and slag. **Structures and Materials Journal**, v. 2, n. 3, p. 244–253, set 2009.

JOHN, V. M. **Sustentabilidade e a industrialização da construção**. . In: CONCRETESHOW. São Paulo: 2009

KHAYAT, K. H. Optimization and performance of air-entrained, self-consolidating concrete. **ACI Structural Journal**, v. 97, n. 5, p. 526–535, 2000.

KHAYAT, K. H.; GHEZAL, A.; HADRICHE, M. S. Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete. **Materials and Structures**, v. 33, n. 5, p. 338–344, jun. 2000.

KITANO, H. Biological robustness. **Nature Reviews Genetics**, v. 5, n. 11, p. 826–837, nov. 2004.

- KNOLL, F.; VOGEL, T. **Design for Robustness**. Suíça: IABSE, 2009.
- KWAN, A. K. H.; CHAN, K. W.; WONG, V. A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect. **Powder Technology**, v. 237, p. 172–179, mar. 2013.
- KWAN, A. K. H.; LI, L. G. Combined effects of water film, paste film and mortar film thicknesses on fresh properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 598–608, 15 jan. 2014.
- KWAN, A. K. H.; NG, I. Y. T. Improving performance and robustness of SCC by adding supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2260–2266, nov. 2010.
- KWAN, A. K. H.; WONG, V.; FUNG, W. W. S. A 3-parameter packing density model for angular rock aggregate particles. **Powder Technology**, v. 274, p. 154–162, abr. 2015.
- LARANJEIRAS, A. C. R. Colapso Progressivo: breve introdução. **TQS News**, n. 33, p. 38, ago. 2011.
- LECOMTE, A. The Measurement of Real and Virtual Packing Density of Soft Grains. **Materials and Structures**, v. 39, n. 1, p. 63–80, 1 jan. 2006.
- LIBORIO, J. B. L. **Concreto de alto desempenho: uma tecnologia simples para produção de estruturas duráveis**: Notas de aula, disciplina de pós-graduação SET 5891 - Tecnologia dos concretos estruturais. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 2007.
- MCGEARY, R. K. Mechanical Packing of Spherical Particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, n. 10, p. 513–522, 1 out. 1961.
- MEHTA, P. K. **A glimpse into sustainable ternary-blended cements of the future**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50. Salvador: IBRACON, 2008
- MERCER, L. B. **Ready mixed concrete: quality control refinements**. Proceedings of a symposium. **Anais...** In: SYMPOSIUM ON MIX DESIGN AND QUALITY CONTROL OF CONCRETE. London: Andrew, R. P., 1954
- MEYER, B. **Object-oriented software construction**. 2. ed. Prentice Hall, 1997.
- MICROTRAC. **3D Particle size and shape analyzer**. Disponível em: <<http://www.microtrac.com/partan-3-d-particle-size-and-shape-analyzer/#.WEAPN7IrKpo>>. Acesso em: 1 dez. 2016.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 3rd. ed. New York: Wiley, 1997.
- _____. **Design and Analysis of Experiments**. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- MUELLER, F. V.; WALLEVIK, O. H. Robustness of very low binder, self compacting concrete: ECO-SCC. **ANais do 3rd International RILEM Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete**, Agosto 2009.
- MÜLLER, N.; HARNISCH, J. (2008). **A blueprint for a climate friendly cement industry**. Gland/Switzerland: WWF International, 2008. 16 p.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology : process and product optimization using designed experiments**. 3. ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2009.

NUNES, S.; FIGUEIRAS, H.; MILHEIRO OLIVEIRA, P.; COUTINHO, J. S.; FIGUEIRAS, J. A. A methodology to assess robustness of SCC mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 12, p. 2115–2122, Dezembro 2006.

OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, v. 1, n. 1, p. 3–17, 2000.

OLIVEIRA, I. R. D.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. P.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A. Biotech cementitious materials: Some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability. **Construction and Building Materials**, Special Section on Recycling Wastes for Use as Construction Materials. v. 40, p. 1136–1141, mar. 2013.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 722–729, mar. 2012.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PETERSEN, L.; MINKKINEN, P.; ESBENSEN, K. H. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, FESTSCHRIFT HONOURING PROFESSOR D.L. MASSART. v. 77, n. 1–2, p. 261–277, 28 maio 2005.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia de materiais) São Carlos: UFSCAR, 2001.

PLACKETT, R. L.; BURMAN, J. P. The Design of Optimum Multifactorial Experiments. **Biometrika**, v. 33, n. 4, p. 305–325, 1 jun. 1946.

RASHEEDUZZAFAR; AL-SAADOUN, S. S.; AL-GAHTANI, A. S.; DAKHIL, F. H. (1990). Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 20, n. 5, set. 1990, p. 723-738.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 211 p. Dissertação (Mestrado) –Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2011.

REBMANN, M. S.; CARDOSO, F. A.; HAWLITSCHKEK, G.; CARMO, R. S. DO; PILEGGI, R. G. **Efeito da forma dos agregados graúdos sobre o comportamento no estado fresco de concreto autoadensável com baixo consumo de cimento**. Anais do I Simpósio Latino Americano sobre concreto autoadensável. **Anais...** In: I SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE CONCRETO AUTOADENSÁVEL. Maceió: Ibracon, Outubro 2012

REBMANN, M. S.; CARDOSO, F. A.; HAWLITSCHKEK, G.; PILEGGI, R. G. Influence of aggregate shape on mixing and rheological behaviour of low-cement self-compacting concrete. **Proceedings 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete**, p. 10, Maio 2016.

REINHARDT, H. W.; WÜSTHOLZ, T. About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self-compacting concrete. **Materials and Structures**, v. 39, n. 7, p. 683–693, 1 ago. 2006.

RETSCH. **Operating Manual Particle Size Analysis System Camsizer®**. Haan/Germany: Retsch Technology GmbH, 2010.

RIGUEIRA, J. W. **Estudio de la sensibilidad e influencia de la composición en las propiedades reológicas y mecánicas de los hormigones autocompactantes**. Tese—Valencia, Spain: Universidad Politécnica de Valencia, 2008.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. **Mechanical properties of self-compacting concrete**. 2008.

RUSS, J. C.; DEHOFF, R. T. **Practical Stereology**. 2. ed. New York: Springer, 2000.

SHARP, J. H.; GARTNER, E. M.; MACPHEE, D. E. Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the fred glasser cement science symposium. **Advances in Cement Research**, v. 22, n. 4, p. 195–202, 2010.

SLOTINE, J.-J.; LI, W. **Applied Nonlinear Control**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1991.

SOLÉ, R. V.; ROSAS-CASALS, M.; COROMINAS-MURTRA, B.; VALVERDE, S. **Robustness of the European Power Grids under Intentional Attack**. 2007.

SONEBI, M. Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 11, p. 1553–1560, nov. 2001.

STELLING, J.; SAUER, U.; SZALLASI, Z.; DOYLE III, F. J.; DOYLE, J. Robustness of Cellular Functions. **Cell**, v. 118, n. 6, p. 675–685, Setembro 2004.

STERN, R. M. Robust Speech Recognition. In: **Survey of the state of the art in human language technology**. Cole, R. A., 1996.

SUSSMAN, G. J. **Building Robust Systems: an essay**. Massachusetts Institute of Technology, 2007.

TAGUCHI, G. **Introduction to quality engineering : designing quality into products and processes**. Asian Productivity Organization, 1986.

TAGUCHI, G.; KONISHI, S. **Taguchi Methods Orthogonal Arrays and Linear Graphs: Tools for Quality Engineering**. Dearborn, Michigan: Amer Supplier Inst, 1987.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F. G. **Rheology of Fresh Concrete**. Pitman Advanced Publishing Program, 1983.

TIBONI, R. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TORKFLEX. **Torkflex**. Disponível em: <<http://www.torkflex.com.br/>>. Acesso em: 3 dez. 2016.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. 2005. 286 f. Tese (Doutorado) —Florianópolis Brazil: UFSC, 2005.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Cement Statistics**: Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140/>>. Acesso em: 5 ago. 2011.

VASCONCELOS, A. C. DE. Robustez. **TQS News**, p. 30–32, fevereiro 2010.

WADDINGTON, C. H. Canalization of development and the inheritance of acquired characters. **Nature** 150, 563-565, novembro 1942.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, Conferences Special: Cement Hydration Kinetics and Modeling, Quebec City, 2009 & CONMOD10, Lausanne, 2010. v. 41, n. 12, p. 1279–1288, Dezembro 2011.

WASSERMAN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. Minimum cement content requirements: a must or a myth? **Materials and Structures**, v. 42, n. 7, p. 973–982, ago 2009.

WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B.; SILFWERBRAND, J.; FORSSBERG, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 274–282, abr. 2008.

WESTMAN, A. E. R.; HUGILL, H. R. The Packing of Particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 13, n. 10, p. 767–779, 1 out. 1930.

WONG, V.; KWAN, A. K. H. A 3-parameter model for packing density prediction of ternary mixes of spherical particles. **Powder Technology**, v. 268, p. 357–367, dez. 2014.

YAHIA, A.; KHAYAT, K. H. Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 749–757, Maio 2001.

YANG, Y.; LEPECH, M. D.; YANG, E.-H.; LI, V. C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 382–390, Maio 2009.

YI, T.-M.; HUANG, Y.; SIMON, M. I.; DOYLE, J. Robust perfect adaptation in bacterial chemotaxis through integral feedback control. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 9, p. 4649–4653, 25 abr. 2000.

YU, A. B.; STANDISH, N. Estimation of the porosity of particle mixtures by a linear-mixture packing model. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 30, n. 6, p. 1372–1385, 1 jun. 1991.

YU, A. B.; ZOU, R. P.; STANDISH, N. Modifying the Linear Packing Model for Predicting the Porosity of Nonspherical Particle Mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 35, n. 10, p. 3730–3741, 1 jan. 1996.

ZOU, R. P.; YU, A. B. Evaluation of the packing characteristics of mono-sized non-spherical particles. **Powder Technology**, v. 88, n. 1, p. 71–79, 1 jul. 1996.

10 Apêndices

10.1 Parâmetros de dimensão e forma na Análise de Imagens Dinâmicas

10.1.1 Dimensão

Na Figura 113 consta um exemplo de análise de uma partícula de pedrisco de granito, coletado em uma pedreira na cidade de São Paulo e analisado com o equipamento Camsizer®. Na Tabela 37 estão resumidos os principais critérios de dimensões conforme RETSCH (2010), ilustrados com a partícula da Figura 113.

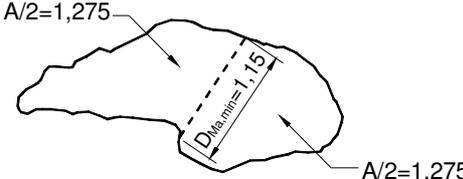
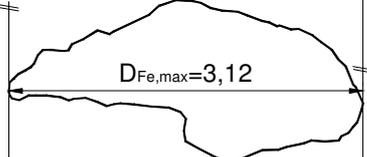
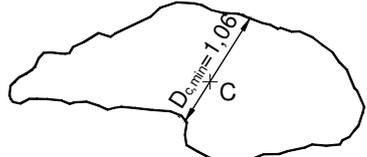


Figura 113 - Partícula de um grão de agregado de granito analisado com Camsizer® (unidade de dimensão: mm)

Observa-se que várias dos critérios dependem da direção escolhida para a determinação. Por exemplo, o comprimento de Martin pode dividir a projeção em duas partes iguais segundo as infinitas possíveis direções. De interesse especial, nestes casos, são os valores mínimos, máximos ou médios.

No exemplo dado, nota-se que a mesma partícula pode ser descrita por dimensões que variam desde 1,06mm a 3,12mm.

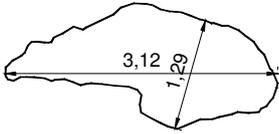
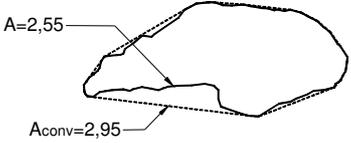
Tabela 37 – Principais critérios de dimensão de partículas na análise de imagens dinâmicas

Critério	Descrição	Exemplo/Equação (unidade de dimensão: mm)
Área	Diâmetro de um círculo com a mesma área (A) da projeção da partícula.	$D_A = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,55}{\pi}} = 1,80$
Perímetro	Diâmetro de uma circunferência com o mesmo perímetro (U) da projeção da partícula.	$D_U = \frac{U}{\pi} = \frac{7,58}{\pi} = 2,41$
Martin	Comprimento do segmento que divide a partícula em duas áreas iguais. No exemplo ao lado ilustra-se o menor dos comprimentos de Martin.	
Feret	Distância entre duas retas paralelas que tangenciam a projeção da partícula em lados opostos. No exemplo ao lado ilustra-se o maior dos comprimentos de Feret.	
Corda Centróide	Distância entre dois pontos do contorno, medida através do centróide da seção projetada. No exemplo ao lado ilustra-se a menor das cordas.	
Corda	Para uma dada direção, obtém-se a maior corda (distância entre dois pontos do contorno). No exemplo ao lado ilustra-se a menor das cordas assim obtidas dentre todas as direções.	
Length	Calculado a partir dos diâmetros de Feret máximo e Martin mínimo (ou corda mínima).	$D_{length} = \sqrt{(D_{Fe,max})^2 - (D_{Ma,min})^2}$ $D_{length} = \sqrt{(3,12)^2 - (1,15)^2} = 2,90$

10.1.2 Morfologia

Na Tabela 38 estão resumidos alguns índices de forma, conforme RETSCH (2010), ilustrados com a partícula da Figura 113. Ressalta-se que as definições apresentadas não são universais. Diversos parâmetros numéricos para descrever a morfologia de grãos têm sido propostos na literatura. Esta diversidade tem inclusive levado a dificuldades referente à nomenclatura empregada, sendo que por vezes o mesmo termo é empregado para diferentes parâmetros e em outras o mesmo parâmetro possui diferentes termos.

Tabela 38 – Principais parâmetros de forma de partículas na análise de imagens dinâmicas

Critério	Descrição	Exemplo/Equação (dimensões em mm)
Esfericidade	<p>Descreve o quão próximo a projeção da partícula está de um círculo.</p> <p>Relaciona a área da projeção (A) com a área de um círculo com perímetro igual ao perímetro da projeção da partícula (U).</p> <p>Valor unitário (1) representa um círculo. Quanto mais próximo de zero, mais irregular é a partícula.</p>	$Esf = \frac{4 \times \pi \times A}{U^2}$ $Esf = \frac{4 \times \pi \times 2,55}{7,58^2} = 0,56$
Relação b/l	<p>Razão de aspecto entre a largura e o comprimento.</p> <p>Valor unitário (1) representa um círculo. Quanto mais próximo de zero, mais achatada (lamelar) é a partícula.</p>	$b/l = \frac{D_{c,min}}{D_{Fe,max}}$  $b/l = \frac{1,29}{3,12} = 0,41$
Convexidade	<p>Descreve a conformação superficial da partícula, relacionando a área da projeção (A) com a área de um contorno convexo, sem concavidades (A_{conv}). O contorno convexo pode ser imaginado como o contorno obtido ao se esticar uma fita elástica ao redor da partícula.</p> <p>Valor unitário (1) representa uma partícula sem concavidades. Quanto mais próximo de zero, mais irregular é o contorno da partícula.</p>	$Convex = \sqrt{\frac{A}{A_{conv}}}$  $Convex = \sqrt{\frac{2,55}{2,95}} = 0,93$

10.2 Detalhes da aplicação da técnica de Análise de Imagens Dinâmicas

A seguir citam-se alguns usos da técnica de determinação de tamanho e forma de grãos por Análise de Imagens Dinâmicas. Os resultados citados foram obtidos com Camsizer® e Camsizer® XT, respectivamente para materiais mais grossos e mais finos.

Na análise de diâmetros e formas optou-se essencialmente pelos diâmetros de corda mínima (c_{min}) e área, por se aproximarem de resultados de análise granulométrica por peneiramento e difração laser, respectivamente. Para avaliação da forma optou-se pela esfericidade e relação b/l . Estes apresentam valores que variam de forma mais significativa. Outros parâmetros, como simetria e convexidade resultam em valores muito próximos a um (1), não permitindo diferenciação entre partículas que normalmente são tidas como vantajosas (equiaxiais e arredondadas) e desvantajosas (alongadas/lamelares e angulosas).

10.2.1 Cuidados no ensaio e interpretação

O principal cuidado a ser tomado para obtenção de resultados coerentes está relacionado com a constituição do material. Material oriundo de britagem em geral vem acompanhado de considerável quantidade de pó fino. Notou-se que esta parcela de material pode distorcer a distribuição granulométrica por cair diante da câmara na forma de um conjunto de partículas aglomeradas que são interpretadas como uma única. Na Figura 114 mostram-se duas curvas granulométricas de uma areia artificial com 16 % de material passante na peneira #150 μm . Nota-se um pico entre 0,2 e 1,0 mm na curva Original. A segunda curva foi obtida separando o material com uma peneira #150 μm . O material retido foi analisado no Camsizer® e o material passante em dispersão aquosa no Camsizer® XT. Os dois resultados somados resultam na segunda curva apresentada (Fracionado).

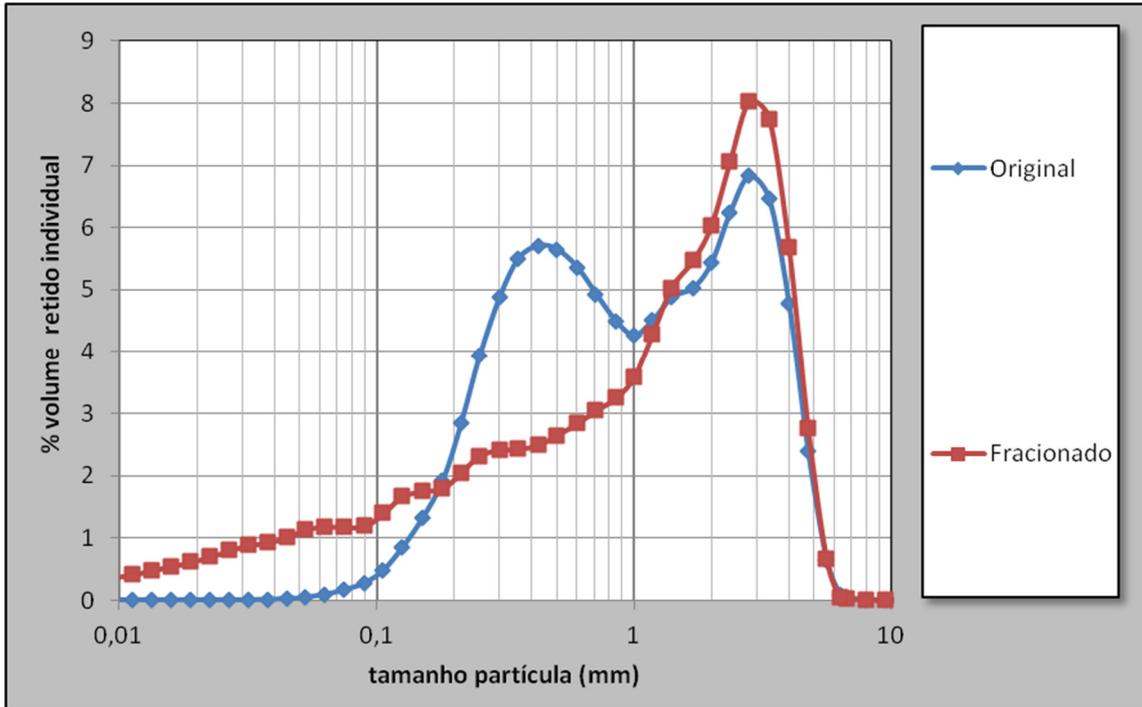


Figura 114 - Curvas granulométricas de um mesmo material, ensaiado em fração única e fracionado em duas parcelas.

Além de evitar o problema citado, obtém-se ainda um aumento de precisão na detecção de pequenas partículas, já que a resolução do Camsizer® XT é superior ao Camsizer®. Este detalhe passa a ser importante quando há uma quantidade apreciável de material próximo ao limite inferior de detecção. Por esta mesma razão, resultados de granulometria e forma em partículas abaixo de 10 μm , mesmo sendo analisados com a máxima resolução do Camsizer® XT, devem ser utilizados com cautela. Neste tamanho a imagem da projeção das partículas é composta por poucos pixels, não representando a real projeção da partícula. Como consequência têm-se, por exemplo, um falso aumento de esfericidade, pois com poucos pixels e baixa resolução não é possível representar a angulosidade superficial.

Não custa lembrar a importância de uma boa técnica de amostragem. Como não é necessária uma grande amostra para obter um número de partículas na ordem de 10^5 a 10^8 , se não for tomado cuidado na amostragem, facilmente se obtém resultados que não descrevem com fidelidade o material em estudo.

10.2.2 Comparação com outras técnicas

Sempre que um novo método é adotado é comum realizar-se comparações com métodos já consagrados. No caso da granulometria, o peneiramento é o ensaio mais empregado atualmente, principalmente para material mais grosso. Para material fino a granulometria determinada por difração de laser é bastante utilizada.

Na Figura 115 têm-se uma comparação entre ensaio de granulometria por peneiramento e por AID (Camsizer®), adotando como tamanho da partícula a corda mínima (c_{min}), que, segundo o fabricante do equipamento, é o parâmetro mais próximo ao peneiramento (RETSCH, 2010).

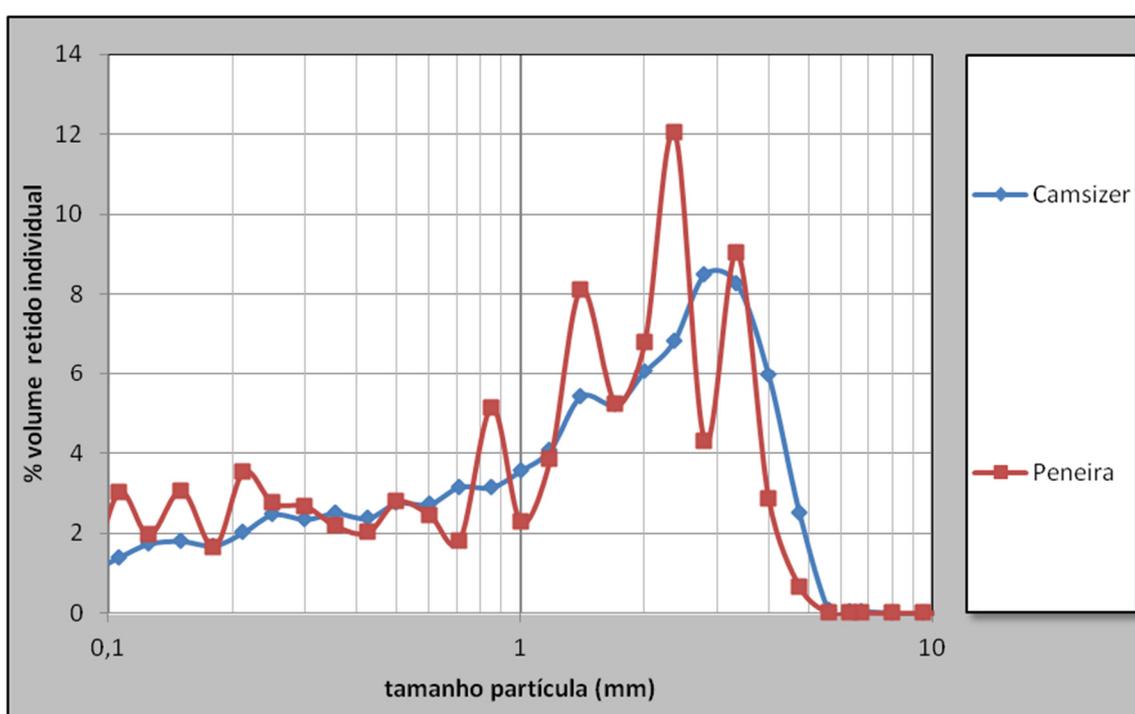


Figura 115 - Comparação de granulometrias obtidas pelo Camsizer® e por peneiramento.

A princípio nota-se uma boa concordância geral entre as curvas. A curva de peneiramento, no entanto, apresenta variações localizadas acentuadas (sinuosidade, ruído), o que não é esperado para materiais oriundos de processo de cominuição (areia artificial). Sabe-se que a quantidade de material retido em uma peneira depende não apenas do tempo de peneiramento, mas também da uniformidade de abertura da malha da peneira. Allen (1997) cita casos de peneiras com coeficientes de variação de até 17 %. O resultado é que uma quantidade maior ou menor fica retida na peneira do que seria esperado se todas as aberturas fossem de tamanho constante e igual ao nominal. Quanto maior a resolução (quantidade de peneiras), mais acentuados ficam estes desvios, principalmente quando peneiras

vizinhas possuem desvios em sentidos opostos. Na curva apresentada foi utilizada uma razão geométrica de $\sqrt[4]{2}$, o que significa que entre duas peneiras da série normal (ABNT 7211:2009) são acrescentadas mais três peneiras. Por exemplo, entre as peneiras 300 μm e 600 μm acrescentam-se ainda as peneiras 355, 425 e 500 μm . O objetivo deste aumento é melhorar a resolução dos resultados, permitindo a detecção de picos localizados, oriundos, por exemplo, de mistura de materiais (compostos, materiais bimodais ou multimodais). Isto, porém, somente passa a ser possível se as peneiras forem bem calibradas, com pouco desvio do valor nominal. Não é o que parece ter ocorrido no caso analisado. É pouco provável que os inúmeros picos e vales sejam oriundos de uma natureza altamente polimodal do material, mas sim de falhas das peneiras. Comparando com curvas granulométricas de outros materiais peneirados com o mesmo conjunto de peneiras notou-se uma tendência comum, de picos e vales localizados nas mesmas posições.

Verificou-se então se é possível empregar o Camsizer® como método de avaliação da qualidade de peneiras. O mesmo material da Figura 115 foi separado por peneiramento e cada fração retida foi analisada separadamente pelo Camsizer®. Na Figura 116 apresenta-se o resultado. Cada curva representa uma peneira, desde a abertura de 106 μm (última à esquerda) até 4,00 mm (última à direita). Quanto mais uniformes as aberturas de uma peneira, mais estreita será a curva. Quanto mais larga e baixa uma curva, maior a heterogeneidade de aberturas. Aparentemente quanto menor a malha, maior a dispersão. A malha #106 μm , por exemplo, se estende de valores abaixo de 100 μm até acima de 200 μm , estando praticamente inclusa sob a peneira seguinte (125 μm).

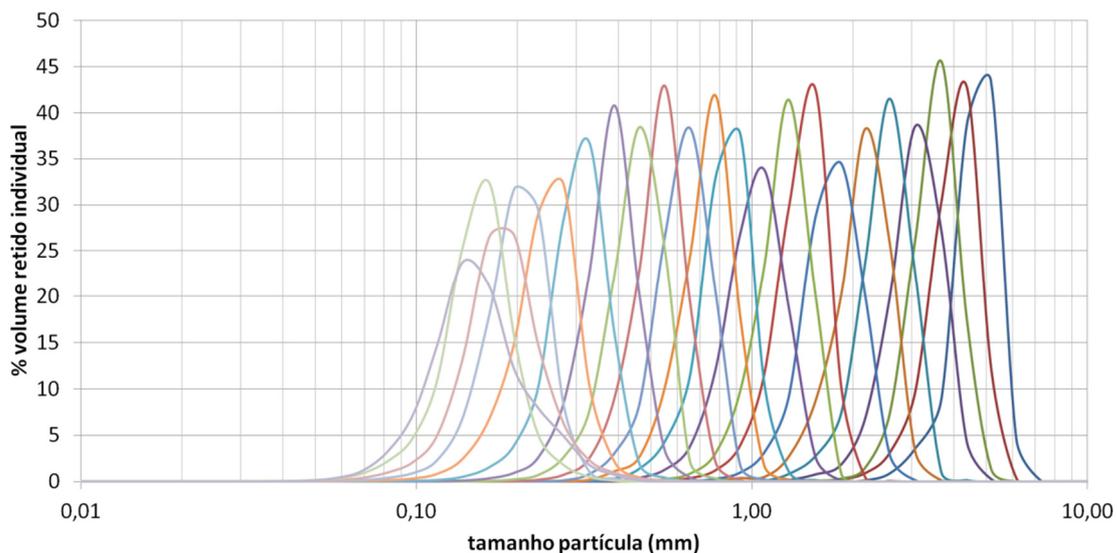


Figura 116 - Granulometria via Camsizer® para frações retidas em peneiras.

Para comprovar a hipótese levantada, algumas peneiras com maiores dispersões foram submetidas a uma análise microscópica. Na Figura 117 mostra-se uma das imagens obtidas da peneira com abertura nominal de 106 μm . Observam-se aberturas de 99 μm a 150 μm . Vale observar que se trata de peneira com pouco uso e de marca reconhecida no mercado nacional. Mesmo assim a variação das aberturas é considerável.

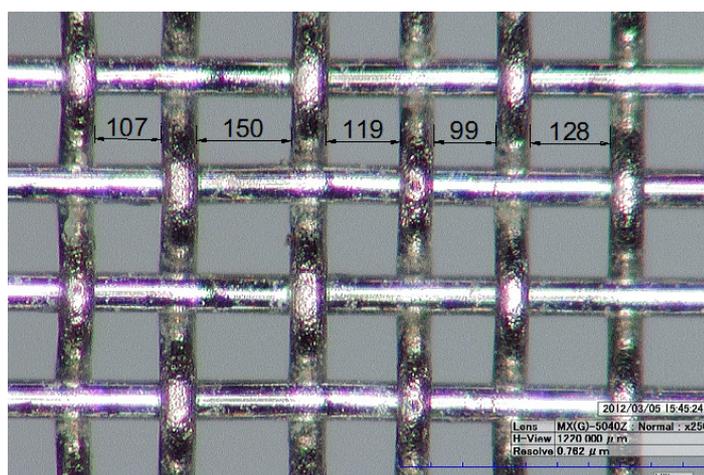


Figura 117 - Variabilidade de aberturas em uma peneira com abertura nominal de 106 μm

Não é de se esperar, no entanto, que ocorram aberturas tão extremas quanto as detectadas pelo Camsizer[®]. Isto decorre do fato de que partículas irregulares apenas passam pela abertura da peneira em uma posição preferencial, quando as menores dimensões encaixarem na abertura, ou seja, a peneira seleciona por posição preferencial. Já no Camsizer[®] a mesma partícula pode ser analisada por ângulos aleatórios. Mesmo adotando a corda mínima como parâmetro, é possível que haja menores dimensões na direção não avaliada pela câmara. Desta maneira, por descrever o tamanho das partículas com base em um conceito distinto, aparecem valores maiores que o observado no peneiramento.

Utilizando as curvas obtidas (Figura 116) como um parâmetro de correção das peneiras, é possível obter uma curva granulométrica completa, a partir dos resultados do peneiramento. Para isto deve-se multiplicar a porcentagem de material retido em cada peneira pela curva correspondente e somar todos os resultados. Na Figura 118 têm-se as três curvas: análise direta pelo Camsizer[®] (1), peneiramento original (2) e o resultante da aplicação da correção sobre o peneiramento (3). Nota-se que a curva 3 eliminou o efeito sinuoso da curva 2, reproduzindo-se praticamente a curva obtida diretamente com o Camsizer[®]. Supõe-se que este tipo de “calibração” possua dependência do formato das partículas, portanto seria válido apenas para um material similar ao utilizado na geração das curvas

de calibração. Ainda assim, realizando testes com outros materiais, de formato mais arredondado que a areia artificial utilizada, observou-se uma aproximação muito boa também. Considera-se que este tipo de correção é mais acurado que outras costumeiramente aplicadas sobre ensaios de peneiramento, como, por exemplo, a redistribuição de parte do valor retido em uma peneira nas peneiras adjacentes.

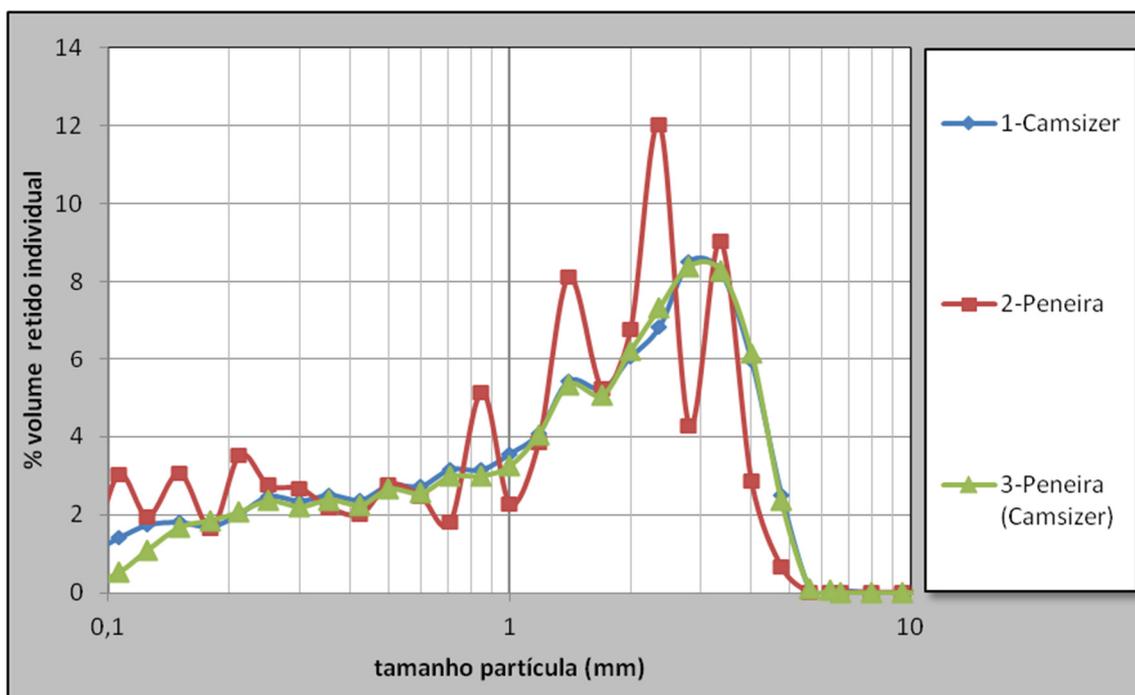


Figura 118 - Ajuste de resultados de peneiramento utilizando os resultados de Camsizer® como fator de correção.

10.2.3 Análise de forma de alguns materiais

O investimento em equipamentos que permitem a caracterização mais detalhada dos materiais visa aumentar o grau de conhecimento acerca destes, permitindo uma melhor previsão das propriedades dos materiais formados a partir destes. Embora seja conhecido que a forma dos agregados pode alterar o empacotamento de um dado conjunto de materiais (OLIVEIRA et al., 2000), a maioria dos modelos matemáticos que tratam do assunto supõe que as partículas são esféricas. Isto pode, em alguns casos, estar bem longe da realidade. Somando-se a isto as discrepâncias entre o tamanho real e o detectado em um ensaio de peneiramento, que detecta basicamente as menores dimensões das partículas, pode-se perceber que facilmente ocorrerão desvios imprevistos.

O uso da técnica de AID possibilita a avaliação da forma de partículas, de maneira produtiva e estatisticamente significativa. Como se trata de um campo novo, inicialmente é necessário investigar

quais os principais parâmetros de forma e como estes se apresentam nos materiais comumente empregados em concretos e argamassas. Para isto foram avaliadas algumas dezenas de materiais, entre agregados miúdos e graúdos, de diferentes fornecedores, mineralogias e processos de produção.

Na Figura 119 apresentam-se as curvas de forma para os materiais avaliados. Os valores do eixo das ordenadas representa a porcentagem em volume do material que possui índice de forma inferior ao indicado no eixo das abscissas. Por exemplo, a curva mais à esquerda possui cerca de 70 % de material com esfericidade abaixo de 0,60. Quanto mais à esquerda a curva, mais longe as partículas estão da forma esférica. O material citado como exemplo se refere a uma borracha britada, bastante irregular.

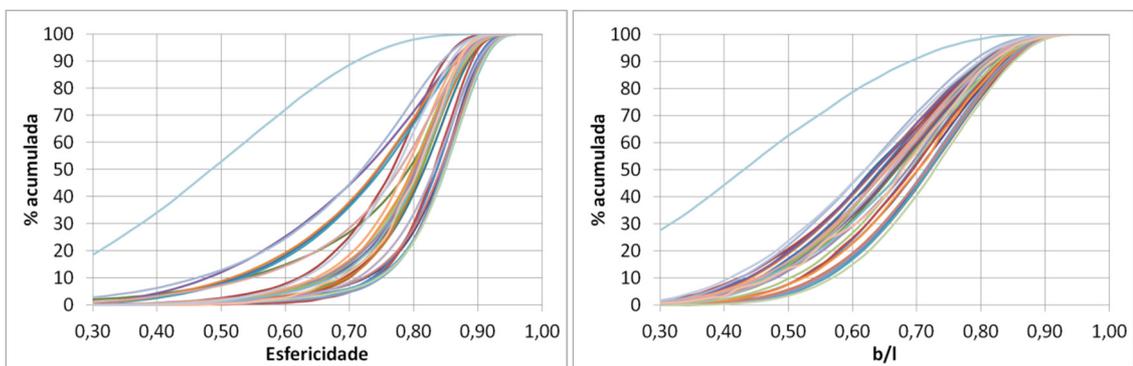


Figura 119 - Parâmetros de forma: esfericidade e relação b/l

Com base nos demais resultados, que se referem a materiais minerais, pode-se observar que a esfericidade mediana encontra-se entre 0,72 e 0,85, que representam, respectivamente, uma areia artificial proveniente da britagem de diabásio e uma areia natural de quartzo. Para o parâmetro b/l a mediana está entre 0,62 e 0,73.

Realizando uma análise agrupada de materiais semelhantes, obtêm-se os gráficos da Figura 120. Mesmo nas areias naturais de quartzo, tidas em geral como mais esféricas, pode haver variações de angulosidade. A mediana nas amostras avaliadas varia de 0,80 a 0,85. Já as areias artificiais variam bem mais, refletindo diferenças de mineralogia e processo de britagem. Têm-se assim valores de 0,72 a 0,85. Estes resultados demonstram que é possível produzir areias artificiais com formatos equivalentes às areias naturais, desde que equipamentos adequados sejam empregados, como, por exemplo, os britadores VSI que permitem a produção de grãos menos angulosos.

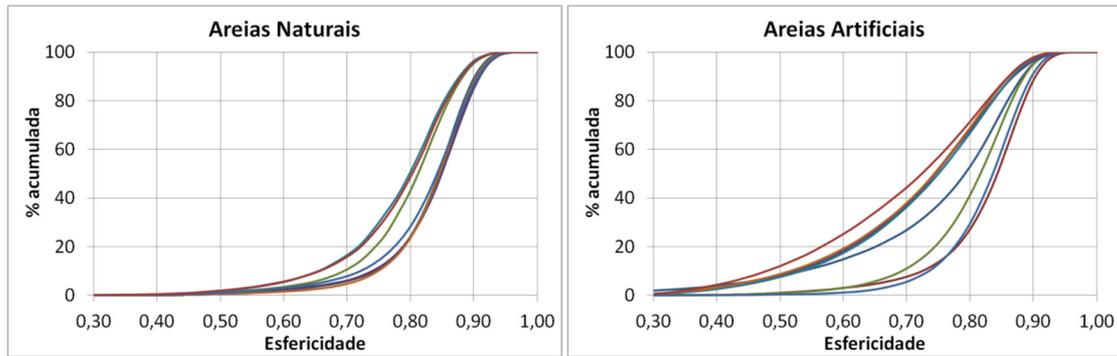


Figura 120 - Esfericidade de areias naturais e artificiais.

A Figura 121 ajuda a formar uma melhor ideia do que representam os valores de esfericidade e b/l . Em preto estão imagens de projeção de agregados obtidos pelo Camsizer®. Em marrom foram acrescentados ainda alguns outros materiais (esferas de vidro, sementes) para complementar o gráfico. Em azul algumas formas geométricas regulares ilustram algumas regiões onde para os agregados naturais não se encontra projeções. A curva verde contínua ilustra a posições de elipses, limite abaixo do qual não se encontram figuras geométricas. Embora se note uma correlação grosseira entre os dois parâmetros de forma, pode-se observar que um mesmo valor de um parâmetro pode corresponder a uma ampla faixa do outro. Por exemplo, para esfericidade de 0,80 encontra-se b/l entre 0,50 e 0,85. E para b/l de 0,60 encontra-se esfericidades entre 0,70 e 0,90.

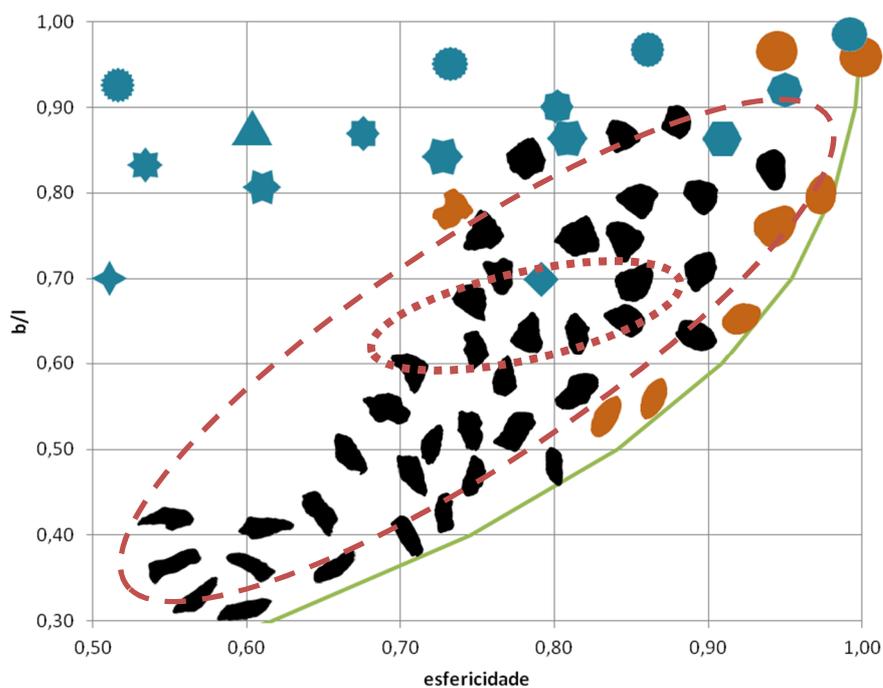


Figura 121 - Esfericidade e relação b/l para diferentes formatos.

A região delimitada pela linha pontilhada vermelha representa a região das médias para os materiais analisados anteriormente. Nota-se mais uma vez que a esfericidade é o parâmetro mais sensível, isto é, apresenta numericamente uma maior variação para os materiais analisados. Já a região delimitada pela linha tracejada vermelha representa aproximadamente a região na qual se encontram 90% das partículas analisadas.

Buscando interpretar visualmente os formatos apresentados, pode-se dizer que a relação b/l descreve o achatamento do formato. Quanto menor, mais achatado. Quanto maior, mais equiaxial é a partícula. A esfericidade tem relação com a angulosidade, ou macrorrugosidade da partícula. Quanto menor, mais angulosa é a partícula. Quanto mais perto de um, mais lisa é a superfície.

Deve-se salientar que a resolução da técnica permite apenas a avaliação da macrorrugosidade. Para avaliação da microrrugosidade, e eventuais porosidades, fissuras, e escamações, é mais adequada a avaliação da área específica superficial, através de BET por exemplo. Descreve-se então a macromorfologia através da AID e a micromorfologia por meio de correlação com a área superficial específica.

10.2.4 Considerações finais a respeito de análise dinâmica de imagens

A determinação de distribuição de tamanhos e de forma de agregados utilizando Análise de Imagens Dinâmicas mostrou-se um ensaio de fácil realização, eliminando a interferência de operador e permitindo a obtenção de resultados com alta representatividade estatística ao mesmo tempo em que consome pouco tempo. Ensaio de poucos minutos podem avaliar da ordem de 10^6 a 10^8 partículas. Permite avaliar desde agregados graúdos até materiais finos, como o cimento. Assim pode-se obter uma curva granulométrica extensa com base em um mesmo critério de dimensão. Isto representa uma vantagem em relação ao que por vezes é realizado ao se acoplar uma análise granulométrica por peneiramento dos agregados com uma análise granulométrica por laser dos materiais finos. Como estes dois métodos se baseiam em critérios diferentes a transição entre as duas nem sempre é adequada, principalmente no caso de grãos com forma distante da esférica.

A técnica pode ser empregada para controle da qualidade do processo de produção ou de aceitação, informando em tempo real a distribuição de tamanhos e de formas. Na pesquisa acadêmica, análises neste sentido oferecem informações preciosas a respeito da variabilidade dos agregados. Este é ponto de partida para pesquisas de robustez de concretos, onde se verifica qual a sensibilidade de concretos frente às diversas fontes de variação que podem alterar suas características.

Nesta pesquisa empregou-se a técnica de AID para estabelecer correlações entre a forma dos agregados e as propriedades de misturas granulares, permitindo avaliar o impacto que agregados com formas diferentes tem sobre o comportamento reológico de argamassas e concretos com baixo consumo de cimento. Uma vez entendida qual a relação entre a forma e as implicações nos materiais à base de cimento, a técnica passa a ser um instrumento para escolha de materiais e avaliação de processos de produção. Permite, por exemplo, avaliar o desempenho de diferentes equipamentos em produzir agregados com características melhoradas.

10.3 Breves considerações a respeito de durabilidade

Atualmente é desejável que bons concretos atendam a pelo menos quatro aspectos: estado fresco, propriedades mecânicas, sustentabilidade e durabilidade. Os três aspectos iniciais já foram abordados. Quanto à durabilidade, apenas uma breve abordagem foi realizada nesta pesquisa, considerando dois aspectos de durabilidade: permeabilidade ao ar e penetração de cloretos. Esta avaliação constitui apenas um indicativo preliminar sobre se as variabilidades abordadas neste trabalho deveriam ou não gerar preocupações quanto à durabilidade.

Aïtcin (2000) chama a atenção para o fato de que a natureza, a intensidade e os mecanismos implicados em cada um dos diversos ataques ao concreto podem variar consideravelmente. Além disso, não existe método padronizado único ou unidade única capaz de descrever de modo completo a durabilidade, ficando, portanto, um pouco vaga a expressão “durabilidade do concreto”. Mais adequado seria falar em “durabilidades do concreto” (no plural), especificando sempre o tipo de ataque que está sendo considerado.

Muitas vezes um aspecto considerado favorável sob um ponto de vista pode ser negativo sob outro. Por exemplo, cimentos com alto teor de C_3A são favoráveis do ponto de vista de ataque de cloretos, porém não o são perante o ataque de sulfatos. A carbonatação pode ser extremamente prejudicial se ocorrer em concretos armados, porém para outras aplicações pode até mesmo ser desejado, pois conduz a um concreto menos permeável.

Em função da natureza dos ensaios de robustez previstos, que demandam a avaliação de uma grande quantidade de concretos, restringiu-se os ensaios de durabilidade a dois ensaios: penetração de cloretos e permeabilidade ao ar. Busca-se assim avaliar os casos de ambiente litorâneo (presença de cloretos) e os mecanismos de ingresso de agentes agressivos. A avaliação de carbonatação, inicialmente prevista e de importância para concretos com baixo teor de reserva alcalina, não foi possível incluir, devido ao volume de concreto necessário e a falta de estrutura (equipamentos, câmaras de carbonatação disponíveis). Reconhece-se a importância do assunto e sugere-se que seja desenvolvido um estudo específico da carbonatação a partir das conclusões iniciais geradas por esta pesquisa.

10.3.1 Resistência à penetração de íons cloreto

Os ensaios foram conduzidos conforme a ASTM C1202/12. Após cura inicial de pelo menos 28 dias, fatias de 5 cm de espessura foram cortadas com serra diamantada a partir de corpos de prova

cilíndricos 10 cm x 20 cm. As laterais da fatia foram impermeabilizadas com selante de silicone e após a cura deste a fatia foi saturada sob vácuo em um dessecador, inicialmente por 3 horas apenas no vácuo e em seguida mais 1 hora submerso, com admissão de água no dessecador sem a entrada de ar. Concluídas estas etapas sob vácuo, o corpo de prova permaneceu por mais 18 horas submerso. Após a saturação a fatia foi inserida em uma célula eletroquímica, composta por uma solução 3% de NaCl (polo negativo) e a outra solução 0,3N de NaOH (polo positivo). Aplicou-se então uma diferença de potencial de 60 V durante 6 horas, registrando a cada 30 minutos a corrente que percorre o corpo de prova. A temperatura foi monitorada e limitada a no máximo 90°C, o que ocorre caso a migração de cloretos seja muito intensa. A partir da corrente determinou-se a carga passante, conforme a Equação 61

$$Q = \int_0^T I. dt \quad \text{Equação 61}$$

onde T é o tempo total do ensaio em segundos e I é a corrente em amperes em cada instante. A carga é dada em coulombs. Admite-se medidas em intervalos a cada 30 minutos. Neste caso a carga total foi obtida calculando a área abaixo da curva corrente *versus* tempo.

A ASTM C1202/12 ainda classifica o risco de penetração de cloretos com base nos resultados obtidos (Tabela 39).

Tabela 39 - Relação ente carga passante e penetrabilidade de íons cloreto (ASTM C1202/2012)

Carga passante (coulombs)	Penetrabilidade de íons cloreto
> 4.000	Alto
2.000 a 4.000	Moderado
1.000 a 2.000	Baixo
10 a 1.000	Muito baixo
<100	Desprezível

Pela Figura 122 nota-se que há certa variabilidade nos resultados de carga passante. Estes resultados devem ser considerados principalmente em termos qualitativos. Para a etapa de desvios de pesagem, todos resultados ficaram próximos a 2.000 C de carga passante, o que equivale à transição entre classificação de baixa a moderada penetrabilidade de íons cloreto, segundo a ASTM C1202. Já na etapa de variação granulométrica, todos concretos apresentaram moderada penetrabilidade de íons cloreto (entre 200 e 4000 C). Observa-se que a etapa de desvio de pesagem foi ensaiada após cura úmida por 90 dias, enquanto que a etapa de variação granulométrica foi ensaiada após 28 dias de cura. A cura, portanto, tem maior efeito que os desvios de variabilidade impostos aos concretos.

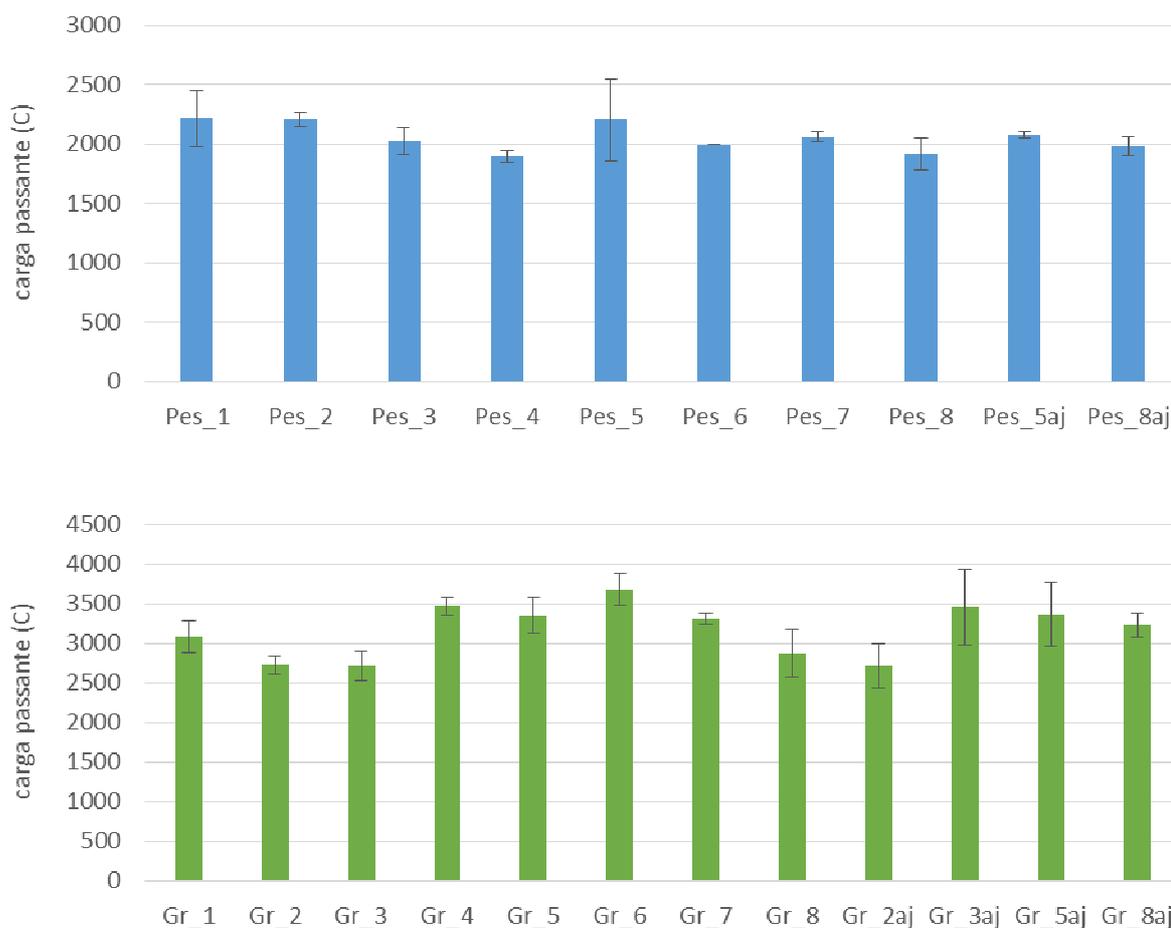


Figura 122 - Carga passante em ensaio de penetração de cloretos, segundo a ASTM C1202. Gráfico superior se refere à etapa de avaliação de desvios de pesagem e foi ensaiada aos 90 dias de idade. O gráfico inferior se refere à etapa de variação granulométrica e foi ensaiada aos 35 dias de idade. Os concretos com o sufixo “aj” se referem às formulações que sofreram ajuste reológico por meio de alteração do teor de água.

10.3.2 Permeabilidade ao ar

Para avaliar a porosidade acessível pelos agentes agressivos gasosos, foi empregado um sistema de medida de permeabilidade ao ar. Após cura de 28 dias, fatias de 7 cm de espessura foram cortadas com serra diamantada a partir de corpos de prova cilíndricos 10cm x 20cm. Estas fatias foram secas em estufa a 70°C até constância de massa e então submetidas a uma diferença de pressão, no equipamento ilustrado na Figura 123. As fatias de concreto foram inseridas em uma câmara de pressão, sendo uma das faces submetida à pressão de ensaio e a face oposta em contato com a pressão atmosférica.



Figura 123 – Equipamento de medida de permeabilidade ao ar. Visão geral (esquerda), detalhe da câmara de pressão onde se insere a fatia de concreto (centro) e bolômetros de diversos calibres para medidas de permeabilidade em diferentes ordens de grandeza (direita)

Após o estabelecimento de um fluxo constante de vazão de ar através do concreto, determinou-se a vazão Q de saída de ar com base no deslocamento de uma bolha de sabão na proveta graduada do equipamento (bolômetro). A partir desta vazão e da área A da seção transversal de fluxo do ar através do concreto determinou-se a velocidade v_s superficial de saída do ar (Equação 62).

$$v_s = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 62}$$

A partir das velocidades v_s , obtidas em diferentes níveis de pressão aplicadas, pode-se determinar as constantes de permeabilidade com base na equação de Forchheimer (Equação 63), que se tem mostrado adequada para descrever a percolação de um fluido compressível através de um meio poroso (INNOCENTINI; PANDOLFELLI, 1999).

$$\frac{P_i^2 - P_0^2}{2P_0L} = \left(\frac{\mu}{k_1}\right)v_s + \left(\frac{\rho}{k_2}\right)v_s^2 \quad \text{Equação 63}$$

Sendo:

P_i : pressão absoluta do ar na entrada

P_0 : pressão absoluta do ar na saída (atmosférica)

v_s : velocidade do ar superficial

L : espessura do disco de concreto

μ : viscosidade do ar, calculada para a pressão P_0 ;

ρ : densidade do ar, calculada para a pressão P_0 ;

As constantes k_1 e k_2 são conhecidas como constantes de permeabilidade Darciana (associada à perda de energia viscosa durante o escoamento em baixas velocidades) e não-Darciana (associada à perda de energia em altas velocidades, que é intensificada por fatores como a turbulência do escoamento e a tortuosidade do meio poroso), respectivamente.

Pela Figura 122 nota-se os coeficientes de permeabilidade K_1 encontrados estão todos na mesma ordem de grandeza, em torno de 10^{-16} m.

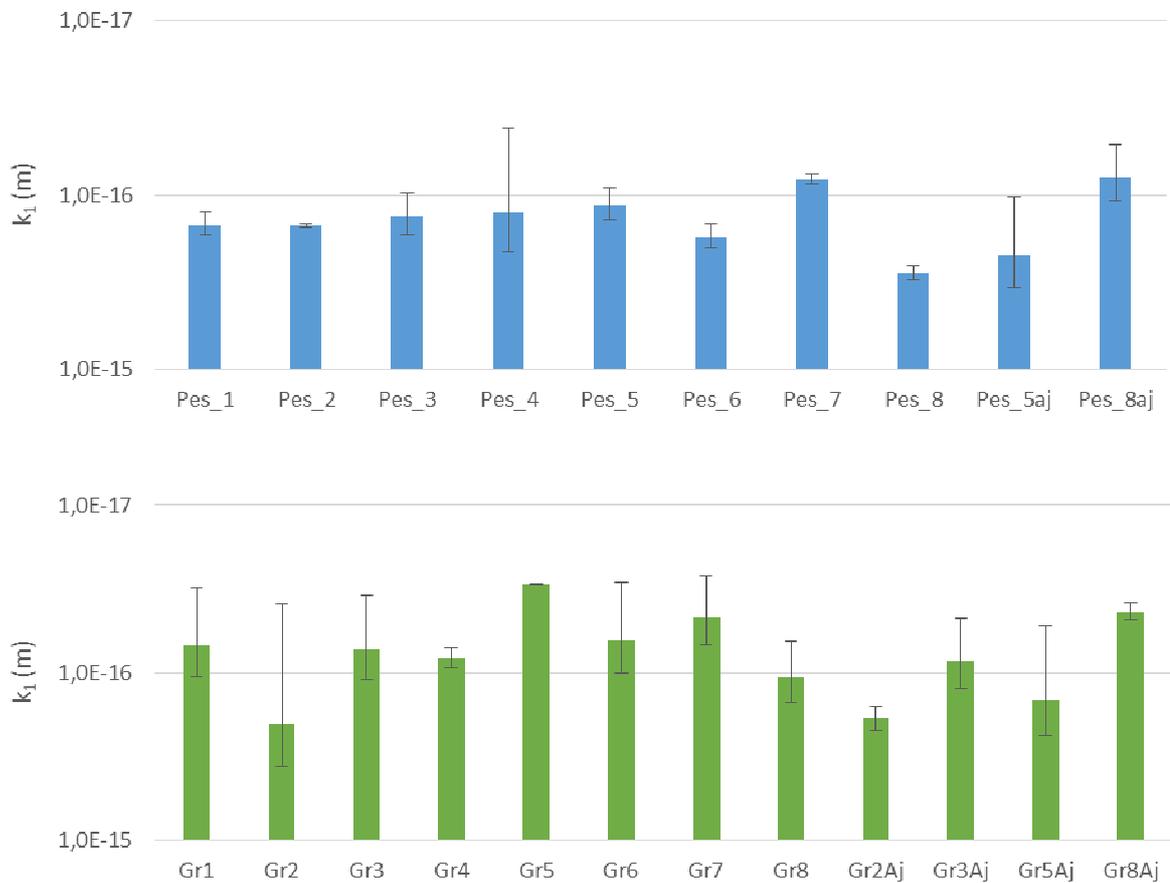


Figura 124 – Coeficiente de permeabilidade K_1 . O gráfico superior se refere à etapa de avaliação de desvios de pesagem e o inferior se refere à etapa de variação granulométrica.

Os valores de k_2 obtidos foram pequenos, e por vezes até ligeiramente negativos, indicando que nestes concretos, e nas pressões avaliadas, predomina a dissipação de energia viscosa durante o escoamento em baixas velocidades (permeabilidade Darciana).

Baseados nesta breve avaliação deve-se considerar que a variabilidade de ensaios para avaliar a durabilidade é bastante superior às variações decorrentes da variabilidade imposta por desvios de pesagem ou mudanças granulométricas.

10.4 Caracterização dos materiais

10.4.1 Granulometrias

As granulometrias apresentadas de forma gráfica ao longo do texto são apresentadas em forma numérica nas tabelas seguintes.

Tabela 40 – Granulometria dos finos (% volume retido)

tamanho partícula (mm)	Cimento	Filer P5	Filer P1	Pó brita
0,355				0,00
0,300				0,00
0,250				0,24
0,212				1,10
0,180				2,40
0,150	0,00			4,76
0,125	0,11			6,47
0,106	0,15			6,43
0,0900	0,21			6,25
0,0750	0,34	0,02	0,00	6,52
0,0630	0,54	0,15	0,00	5,73
0,0530	1,05	0,37	0,00	5,22
0,0450	1,88	0,81	0,00	4,59
0,0378	3,38	1,73	0,00	4,53
0,0318	5,35	3,28	0,00	4,27
0,0268	7,03	4,88	0,02	3,99
0,0225	8,15	6,30	0,07	3,73
0,0189	8,52	7,24	0,18	3,47
0,0159	8,21	7,80	0,50	3,25
0,0134	7,48	7,78	1,10	3,01
0,0113	6,82	7,22	2,01	2,73
0,00946	5,97	6,72	3,13	2,49

tamanho partícula (mm)	Cimento	Filer P5	Filer P1	Pó brita
0,00795	5,20	6,02	4,39	2,24
0,00669	4,54	5,26	5,43	2,00
0,00563	3,97	4,55	6,13	1,79
0,00473	3,45	3,94	6,51	1,61
0,00398	2,93	3,45	6,66	1,47
0,00334	2,46	3,03	6,74	1,34
0,00281	2,08	2,69	6,63	1,23
0,00237	1,74	2,43	6,56	1,13
0,00199	1,46	2,22	6,49	1,04
0,00167	1,24	2,08	6,42	0,99
0,00141	1,08	1,94	6,12	0,92
0,00118	0,96	1,73	5,60	0,79
0,000994	0,83	1,56	4,98	0,66
0,000836	0,71	1,33	4,18	0,53
0,000703	0,59	1,08	3,31	0,40
0,000591	0,49	0,85	2,48	0,28
0,000497	0,39	0,62	1,75	0,18
0,000418	0,29	0,43	1,15	0,11
0,000352	0,22	0,28	0,74	0,06
0,000296	0,14	0,16	0,42	0,03
0,000249	0,06	0,06	0,20	0,00
0,000209	0,00	0,00	0,08	

Tabela 41 – Granulometria dos agregados empregados na produção do concreto base e na etapa de desvios de pesagem (% volume retido)

tamanho partícula (mm)	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural	tamanho partícula (mm)	Brita 1	Brita 0	Areia Britada	Areia Natural
31,8	0,00				0,0750	0,00	0,12	1,08	0,91
26,6	4,60				0,0630	0,01	0,10	0,91	0,42
22,2	17,68				0,0530	0,00	0,09	0,77	0,20
19,1	29,87				0,0450		0,07	0,62	0,08
15,9	28,33	0,00			0,0378		0,06	0,54	0,03
13,3	11,59	5,59			0,0318		0,05	0,45	0,01
11,11	4,66	10,99			0,0268		0,04	0,36	0,02
9,50	1,33	18,01			0,0225		0,03	0,31	0,02
8,00	0,46	19,80	0,00		0,0189		0,03	0,29	0,03
6,70	0,21	17,35	0,29		0,0159		0,03	0,27	0,04
5,60	0,13	11,47	2,66		0,0134		0,03	0,25	0,04
4,75	0,09	5,90	5,68		0,0113		0,03	0,25	0,03
4,00	0,06	3,29	6,99		0,00946		0,03	0,24	0,02
3,35	0,05	1,48	6,75		0,00795		0,02	0,23	0,02
2,80	0,04	0,86	6,59		0,00669		0,02	0,21	0,02
2,36	0,04	0,51	5,82		0,00563		0,02	0,19	0,02
2,00	0,03	0,38	4,87		0,00473		0,02	0,17	0,02
1,70	0,03	0,30	4,66	0,00	0,00398		0,02	0,15	0,02
1,40	0,03	0,26	5,32	0,02	0,00334		0,01	0,13	0,02
1,18	0,03	0,22	4,21	0,07	0,00281		0,01	0,11	0,02
1,00	0,03	0,16	3,52	0,17	0,00237		0,01	0,10	0,02
0,850	0,03	0,14	3,16	0,22	0,00199		0,01	0,09	0,02
0,710	0,04	0,15	3,40	0,34	0,00167		0,01	0,08	0,02
0,600	0,04	0,12	3,06	0,43	0,00141		0,01	0,07	0,02
0,500	0,05	0,15	3,13	2,41	0,00118		0,01	0,07	0,02
0,425	0,06	0,14	2,68	5,92	0,000994		0,01	0,06	0,02
0,355	0,07	0,19	2,98	12,02	0,000836		0,01	0,05	0,02
0,300	0,07	0,24	2,90	14,08	0,000703		0,00	0,04	0,02
0,250	0,09	0,32	3,21	17,26	0,000591			0,03	0,01
0,212	0,07	0,30	2,70	16,36	0,000497			0,02	0,01
0,180	0,07	0,22	2,02	13,85	0,000418			0,01	0,01
0,150	0,05	0,16	1,60	7,40	0,000352			0,01	0,00
0,125	0,03	0,15	1,39	3,51	0,000296			0,00	
0,106	0,02	0,13	1,17	2,25					
0,0900	0,02	0,12	1,08	1,48					

Tabela 42 – Granulometria dos agregados empregados na etapa de desvios de granulometria (% volume retido)

tamanho partícula (mm)	Versão mais fina				Versão mais grossa			
	Brita 1 Br1F	Brita 0 Br0F	Areia Britada ArBF	Areia Natural ArNf	Brita 1 Br1G	Brita 0 Br0G	Areia Britada ArBG	Areia Natural ArNG
31,8	0,00				0,00			
26,6	1,15				2,85			
22,2	5,12				14,88			
19,1	23,34				39,19			
15,9	28,48	0,00			25,18	0,00		
13,3	21,98	4,10			12,26	7,23		
11,11	12,56	8,77			3,77	17,50		
9,50	4,01	12,23	0,00		0,71	18,90	0,00	
8,00	1,62	14,62	0,14		0,14	19,04	0,26	
6,70	0,63	17,23	0,30	0,00	0,11	16,39	0,56	0,00
5,60	0,28	16,77	2,24	0,01	0,12	10,77	4,16	0,01
4,75	0,11	9,77	3,58	0,01	0,08	3,87	6,65	0,02
4,00	0,06	5,64	4,99	0,01	0,05	1,72	9,28	0,01
3,35	0,03	2,61	6,03	0,01	0,03	0,76	10,12	0,03
2,80	0,03	1,32	6,11	0,02	0,03	0,46	8,43	0,03
2,36	0,03	0,92	6,03	0,02	0,03	0,41	6,72	0,04
2,00	0,03	0,66	5,14	0,02	0,03	0,33	5,33	0,04
1,70	0,03	0,65	5,47	0,02	0,03	0,33	5,41	0,04
1,40	0,03	0,62	6,27	0,02	0,03	0,31	5,58	0,06
1,18	0,03	0,41	5,43	0,01	0,03	0,19	4,18	0,10
1,00	0,03	0,35	5,22	0,00	0,03	0,16	3,78	0,19
0,850	0,03	0,36	5,52	0,02	0,03	0,16	3,97	0,30
0,710	0,04	0,36	5,97	0,09	0,04	0,15	4,30	0,44
0,600	0,03	0,29	4,91	0,30	0,03	0,11	3,55	1,02
0,500	0,03	0,28	4,83	1,25	0,03	0,11	3,48	4,19
0,425	0,03	0,27	4,13	3,09	0,03	0,12	2,92	9,34
0,355	0,05	0,37	4,49	8,62	0,05	0,19	3,01	17,03
0,300	0,05	0,39	3,92	15,33	0,06	0,22	2,49	16,24
0,250	0,05	0,40	3,72	18,47	0,05	0,22	2,32	16,09
0,212	0,04	0,29	2,68	15,39	0,04	0,16	1,67	13,09
0,180	0,02	0,17	1,62	13,01	0,02	0,10	1,01	10,08
0,150	0,01	0,07	0,67	11,03	0,01	0,04	0,42	6,33
0,125	0,00	0,02	0,17	6,61	0,00	0,01	0,11	2,87
0,106		0,00	0,00	3,14	0,01	0,00	0,04	1,21
0,0900		0,00	0,00	1,77	0,00		0,04	0,63
0,0750		0,01	0,07	1,03			0,04	0,34
0,0630		0,01	0,07	0,43			0,04	0,13
0,0530		0,01	0,06	0,18			0,04	0,05
0,0450		0,00	0,05	0,06			0,04	0,02
0,0378			0,05	0,03			0,03	0,01
0,0318			0,00	0,00			0,00	0,00

Tabela 43 – Granulometria dos agregados empregados na etapa de desvios de morfologia (% volume retido)

tamanho partícula (mm)	Versão mais arredondada			Versão mais alongada		
	Brita Gr+	Areia Britada ArB+	Areia Natural ArN+	Brita Gr-	Areia Britada ArB-	Areia Natural ArN-
31,8	0,00			0,00		
26,6	1,45			1,87		
22,2	8,10			8,52		
19,1	26,76			25,21		
15,9	23,11			22,16		
13,3	15,51			15,45		
11,11	7,36			9,08		
9,50	4,92	0,00		4,71	0,00	
8,00	3,58	0,09		3,60	0,20	
6,70	3,28	1,07	0,00	3,15	0,44	0,00
5,60	2,44	3,45	0,01	2,49	3,23	0,00
4,75	1,37	5,16	0,01	1,23	5,16	0,00
4,00	0,69	6,09	0,01	0,67	7,20	0,00
3,35	0,23	6,45	0,02	0,31	8,14	0,00
2,80	0,09	8,87	0,02	0,17	7,31	0,00
2,36	0,07	7,78	0,02	0,14	6,39	0,00
2,00	0,05	5,32	0,02	0,11	5,24	0,00
1,70	0,05	2,68	0,02	0,11	5,44	0,00
1,40	0,06	3,71	0,03	0,11	5,92	0,00
1,18	0,06	6,81	0,05	0,08	4,79	0,02
1,00	0,07	7,03	0,09	0,07	4,48	0,03
0,850	0,07	5,06	0,16	0,07	4,72	0,25
0,710	0,07	4,16	0,27	0,07	5,11	1,08
0,600	0,06	3,92	0,66	0,06	4,21	1,96
0,500	0,06	4,12	2,72	0,06	4,14	2,99
0,425	0,06	3,70	6,21	0,06	3,51	4,30
0,355	0,09	4,00	12,83	0,09	3,73	10,42
0,300	0,10	3,28	15,80	0,10	3,19	16,87
0,250	0,10	2,96	17,29	0,10	3,00	19,09
0,212	0,07	2,08	14,25	0,07	2,16	14,44
0,180	0,04	1,29	11,55	0,04	1,31	10,57
0,150	0,02	0,46	8,69	0,02	0,54	8,02
0,125	0,01	0,11	4,75	0,00	0,14	4,96
0,106	0,01	0,06	2,18	0,00	0,05	2,49
0,0900	0,00	0,06	1,20	0,00	0,05	1,33
0,0750		0,06	0,69		0,06	0,70
0,0630		0,06	0,28		0,06	0,28
0,0530		0,05	0,12		0,05	0,12
0,0450		0,04	0,04		0,04	0,05
0,0378		0,03	0,02		0,04	0,02
0,0318		0,00	0,00		0,00	0,00

10.4.2 Caracterização física, química e mecânica do cimento

Tabela 44 – Resultados de análise química do cimento

Determinação	Resultados, em %
Perda ao fogo (PF) (NBR NM 18/12)	3,93
Anidrido silícico (SiO ₂) (NBR NM 11-2/12)	19,5
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) (NBR NM 11-2/12)	4,92
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃) (NBR NM 11-2/12)	2,98
Óxido de cálcio (CaO) (NBR NM 11-2/12)	63,2
Óxido de magnésio (MgO) (NBR NM 11-2/12)	0,53
Anidrido sulfúrico (SO ₃) (NBR NM 16/12)	2,76
Óxido de sódio (Na ₂ O) (ASTM C 114-15)	0,12
Óxido de potássio (K ₂ O) (ASTM C 114-15)	0,74
Equivalente alcalino (em Na ₂ O) ⁽¹⁾	0,61
Óxido de cálcio livre (CaO) (NBR NM 13/12)	1,59
Resíduo insolúvel (RI) (NBR NM 22/12)	0,98
Anidrido carbônico (CO ₂) (NBR NM 20/12)	2,42

(1) Equivalente alcalino (em Na₂O) = % Na₂O + 0,658 x % K₂O

Tabela 45 – Resultados da resistência à compressão (MPa) do cimento

idade	1	2	3	4	média	DRM (%)
3	40,8	41,8	40,1	40,7	40,9	2,2
7	46,3	48,8	47,6	47,5	47,6	2,7
28	49,9	51,1	54,0	49,5	51,1	5,7

Tabela 46 – Resultados das características físicas do cimento

Ensaio	Resultados
Finura por meio de peneira 75 µm (N° 200) (%) (NBR 11579/13)	0,1
Água para pasta normal (% massa do cimento) (NBR NM 43/03)	29,8
Início de pega (NBR NM 65/03)	02h 50min
Início de pega (NBR NM 65/03)	04h 45min
Expansibilidade a frio (mm) (NBR 11582/16)	0,5
Expansibilidade a quente (mm) (NBR 11582/16)	0,0
Massa específica (g/cm ³) (NBR NM 23/01)	3,09
Finura pelo método de Blaine (cm ² /g) (NBR 16372/15)	4530

Nota: Análise química, mecânica e física do cimento conforme relatório de ensaio IPT 1083626-203.

10.4.3 Termogravimetria do cimento

Os ensaios foram realizados em um equipamento Netzsch, modelo TASC 414/4 acoplado a uma termobalança - STA409EP. Foi utilizado cadinho de alumina com volume de 3,4 mL, sem tampa. A temperatura foi aumentada até 1000 °C mantendo-se a taxa de aquecimento de 10°C por minuto.

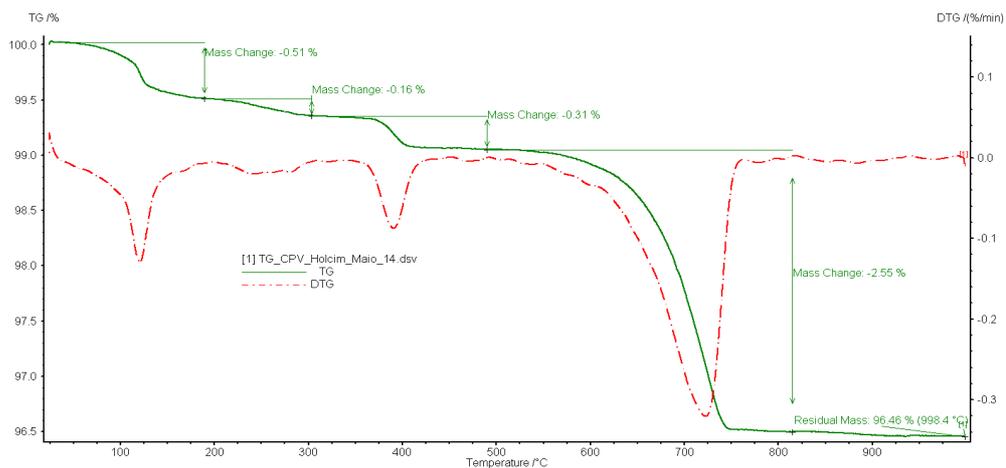


Figura 125 - Análise termogravimétrica do cimento CPV-ARI

10.4.4 Fluorescência de raios-X do cimento

Os teores apresentados na Tabela 47 foram determinados por análise quantitativa em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, por comparação com materiais certificados de referência na calibração Cimentos TBL, em espectrômetro por fluorescência de raios X Axios Advanced, marca PANalytical. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.050 °C por 1h.

Tabela 47- Composição química do cimento por fluorescência de raio-X (%)

Determinação	Resultados, em %
Perda ao fogo (PF)	3,63
Anidrido silícico (SiO ₂)	19,0
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,75
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	2,90
Óxido de cálcio (CaO)	64,0
Óxido de magnésio (MgO)	0,63
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	2,78
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,15
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,78
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,25
Pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,29
Óxido de manganês (MnO)	<0,10
Óxido de estrôncio (SrO)	0,35