MARIANA FIGUEIRA LACERDA DE MENEZES

Modelo de fluidez do concreto baseado em distância entre partículas para centrais dosadoras

São Paulo

2020

MARIANA FIGUEIRA LACERDA DE MENEZES

Modelo de fluidez do concreto baseado em distância entre partículas para centrais dosadoras

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Ciências.

São Paulo

2020

MARIANA FIGUEIRA LACERDA DE MENEZES

Modelo de fluidez do concreto baseado em distância entre partículas para centrais dosadoras

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:

Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:

Prof. Dr. Rafael G. Pileggi

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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: _____

Catalogação-na-publicação

Menezes, Mariana
Modelo de fluidez do concreto baseado em distância entre partículas para centrais dosadoras / M. Menezes -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
196 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

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

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à colaboração genuína e desproporcional dos envolvidos neste trabalho:

À Universidade de São Paulo e ao Centro de Inovação em Construções Sustentáveis. Em especial, ao Professor Rafael G. Pileggi, pelo direcionamento e pelas posições geniais durante o processo e ao Markus Rebmann, pelo rigor incansável nas discussões e revisões. A toda equipe do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência pela cooperação nos ensaios. A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, os quais formaram a sólida base para este estudo, sobretudo, ao Vanderley John e ao Sergio Ângulo, pela incrível disciplina de Sustentabilidade e pelas contribuições na Qualificação e ao Antonio Figueiredo, pelas inovadoras videoaulas.

À InterCement, por todo o suporte nesta pesquisa. Aos meus líderes Carlos Massucato e Seiiti Suzuki, pela ajuda na seleção do tema, pela disponibilização de informações, infra-estrutura e tempo para realização deste trabalho. À equipe da central de concreto da Freguesia, em especial, ao Felipe, ao Guilherme e à Vanessa pela execução dos ensaios em campo e, também, ao Rogério, à Janaina e ao Sandro por todo o apoio técnico.

À minha namorada Rita, pela compreensão, pela parceria e pelas divertidas revisões do texto. Aos meus pais, pelo exemplo e pela dedicação de uma vida e, ao meu irmão, pelo incentivo e pela empatia. Aos meus amigos de São Paulo, do Rio e de Friburgo, pelo entendimento das minhas ausências.

Por último, à New Steel, em especial, o Pedro e o Mauro, por acreditar neste projeto e me apoiar na finalização desta jornada.

If the doors of perception were cleansed
everything would appear to man as it is,
infinite.

(Willian Blake)

RESUMO

Atualmente, a indústria do concreto não opera com alta eficiência no uso de ligantes, ocasionando um impacto ambiental relevante. As centrais dosadoras convivem com altos desvios de matérias-primas e de proporcionamento, comprometendo a eficiência. Ademais, o método de dosagem de concreto adotado atualmente, por otimização experimental, apesar de funcional, incorre em ensaios excessivos e conclusões restritas. Assim, destaca-se a otimização computacional, reduzindo os recursos despendidos. A fim de contribuir para este método, visa-se criar um modelo físico para previsão da fluidez do concreto avaliada pelo abatimento do tronco de cone baseado em distância entre partículas. Para tal, elegeu-se especificamente uma central dosadora de concreto em São Paulo para cumprir a metodologia, a qual pode ser sintetizada em duas etapas prevalecentes: (1) a construção do modelo físico baseado em empacotamento e distância de partículas para a previsão do abatimento do tronco de cone, a partir das formulações base desta central, e (2) a validação experimental deste modelo, fundamentada no processo de dosagem na operação da central. Ao avaliar a eficiência desta central, encontram-se intensidades de ligante entre 7,5 e 10 kg/m^3/MPa, embora este valor seja próximo do valor médio encontrado na literatura, se encontra acima das melhores intensidades. O modelo físico de previsão da fluidez estabelecido a partir das 120 formulações base contemplando dois conjuntos de materiais obteve R^2 0,84. Para validar o modelo estabelecido, foram utilizados 224 dados de concretos dosados na central que consistiam em 22 formulações em uma região experimental para além da qual o modelo foi criado. Entre os abatimentos estimados, usando os dados de apenas um conjunto de materiais, e os abatimentos medidos, o R^2 atingiu 0,75, já para os materiais do dia mais próximo, atingiu-se o R^2 0,62, o que representa correlações medianas. Notou-se que o modelo é capaz de estimar razoavelmente o impacto das mudanças de proporcionamento dos materiais na fluidez do concreto – e, desta forma, pode ser empregado na otimização computacional –, porém necessita ser validado e aprimorado no que diz respeito à previsão do impacto das mudanças dos materiais no abatimento de tronco de cone durante a operação.

Palavras chave: Fluidez do concreto. Dosagem de concreto. Empacotamento. Mobilidade de partículas. Distância entre partículas. Abatimento de tronco de cone. Intensidade de ligante. Baixo volume de pasta. Modelo físico.

ABSTRACT

Currently, the concrete industry does not operate with high efficiency in binder use, generating a relevant environmental impact. The ready-mix concrete plants handle high deviations of raw materials and proportion, compromising efficiency. Furthermore, the mix design method currently adopted, by experimental optimization, although functional, incurs excessive tests and restricted conclusions. Thus, computational optimization stands out, reducing the resources spent. In order to contributing to this method, the aim is to create a physical model to predict the concrete fluidity evaluated by the slump test based on distance between particles. Thereunto, a ready-mix concrete plant in São Paulo was specifically chosen to comply with the methodology, which can be synthesized in two main stages: (1) the construction of a physical model based on packing and distance among particles for predicting the concrete slump, using data from the base formulations of this plant, and (2) the experimental validation of this model, based on data extracted from the plant operation. When assessing the efficiency of this plant, binder intensities are between 7.5 and 9 kg/m^3/ MPa, although this value is close to the average found in the literature, it is above the best ones. The physical fluidity prediction model adjusted from the 120 base formulations comprising two sets of materials achieved R^2 0.84. To validate the model, 224 concrete batches of the plant were used, which comprises 22 formulations in an experimental region wider than the one the model was created with. Between the estimated slump, using only one set of materials, and the measured slump, R^2 reached 0.75, while using the materials of the closest day, R^2 0.62 was reached, which represents median correlations. It was noted that the model is capable of reasonably estimating the impact of proportioning changes in the fluidity of concrete – and, in this way, it can be used in computational optimization –, however it needs to be validated and improved with respect to the forecast of the impact of material changes in the concrete slump during the operation.

Keywords: Concrete fluidity. Mix design. Packing. Particle mobility. Distance between particles. Slump test. Binder intensity. Low paste volume. Physical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura organizacional de uma central de concreto 20
Figura 2 – Vista superior da central de concreto, identificando os principais elementos da operação de dosagem de concreto, desde a baia de agregados até a plataforma com caminhões betoneira..... 21
Figura 3 – Vista frontal da central, identificando os elementos da operação de dosagem de concreto 22
Figura 4 – Fluxograma do processo de compra, execução da dosagem e entrega do concreto 23
Figura 5 – Vista superior de uma série de baias de agregados 24
Figura 6 – Alimentação dos agregados em uma tremonha por um pá carregadeira 24
Figura 7 – Correia transportadora dos agregados contendo mistura de areia e brita..... 24
Figura 8 – Vista frontal de uma central misturadora de concreto, mostrando o misturador conectado aos silos..... 26
Figura 9 – Ponto de dosagem da central dosadora com um caminhão betoneira e silos ao fundo..... 26
Figura 10 – Plataforma para ajuste da quantidade de água do concreto com caminhão betoneira estacionado e operador subindo a escada..... 26
Figura 11 – Medição do abatimento do tronco de cone durante a execução do ensaio para um concreto plástico 27
Figura 12 – Caminhão auto bomba parado..... 28
Figura 13 – Lançamento do concreto por bombeamento em uma laje na obra..... 29
Figura 14 – (a) Intensidade de ligante de concretos brasileiros e internacionais de literatura e mercado versus resistência à compressão aos 28 dias (b) Intensidade de carbono de concretos brasileiros e internacionais de literatura e mercado versus resistência à compressão aos 28 dias 33
Figura 15 – Fluxogramas dos três métodos de dosagem distintos: dosagem prescritiva; otimização experimental; e otimização computacional 35
Figura 16 – Diagrama de dosagem experimental: 1° quadrante – Equação de Abrams; 2° quadrante – Equação de Lyse; 3° quadrante – Equação de Priszkulnik & Kirilos; 4° quadrante – Intensidade de ligantes 37
Figura 17 – Representação esquemática das fases do concreto segundo o modelo bifásico: o agregado (compreende as partículas maiores que 100µm) e a matriz (consiste nas partículas menores que 100µm e a água)..... 39
Figura 18 – Representação esquemática do conceito de distância média de separação entre partículas: (a) partículas em contato sem nenhum fluido, à esquerda (b) partículas separadas pelo fluido, à direita 41
Figura 19 – Empacotamento: (a) distribuição bimodal, com mais e maiores vazios, à esquerda (b) distribuição polimodal, com menos e menores vazios, à direita. 44
Figura 20 – Modelos de relação entre abatimento do tronco de cone e tensão de escoamento. 53
Figura 21 – Reograma ilustrando a influência do aumento nas quantidades de ar, água, superplastificante e microssílica. 54
Figura 22 – Fluxograma que descreve as etapas principais da metodologia adotada neste trabalho 58

Figura 23 – Fluxograma da obtenção e análise dos dados de processo da central de concreto durante o período de 2 meses a fim de validar o modelo de abatimento construído 71
Figura 24 – Granulometria discreta do Conjunto de Materiais 1 (agregados graníticos) 77
Figura 25 – Granulometria discreta do Conjunto de Materiais 2 (agregados calcíticos) 77
Figura 26 – Resistência à compressão especificada em função da relação água/cimento para todos os concretos das Formulações Base 79
Figura 27 – Intensidade de ligantes por f_{ck} de todas as Formulações Base segregadas em séries de dados que compreendem os mesmos Conjunto de Formulação, dimensão máxima e abatimento especificado 81
Figura 28 – Intensidade de ligantes por f_{ck} do Conjunto de Formulações 1 com dimensão máxima 19mm segregadas em série de dados com o mesmo abatimento do tronco de cone 82
Figura 29 – Intensidade de ligantes (a) por f_{ck} para diferentes dimensões máximas, à esquerda (b) para os Conjuntos de Formulações 1 e 2 (agregados graníticos e calcíticos), à direita 82
Figura 30 – Verificação da relação entre o abatimento do tronco de cone e da porosidade do empacotamento dos grossos por f_{ck} 83
Figura 31 – Abatimento do tronco de cone em função do MPT por f_{ck} (a) Conjunto de Formulações 1, à esquerda (b) Conjunto de Formulações 2, à direita 85
Figura 32 – Relação entre IPS e f_{ck} para o Conjunto de Formulações 1 e o 2 86
Figura 33 – Relação entre o abatimento esperado e o abatimento estimado pelo modelo para os Conjuntos de Formulações individuais 88
Figura 34 – Relação entre o abatimento esperado e o abatimento estimado pelo modelo para os Conjuntos de Formulações juntos (Formulações Base) 89
Figura 35 – Abatimento do tronco de cone estimado pela eq.(29) em função do MPT e IPS no intervalo que o modelo se aplica 91
Figura 36 – Média e intervalo de confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta dos materiais 93
Figura 37 – Correlação do abatimento medido na obra com o abatimento especificado para cada concreto analisado 98
Figura 38 – Correlação entre o abatimento medido e o abatimento estimado dos 336 concretos analisados 99
Figura 39 – Correlação entre a quantidade de água adicionada e a quantidade de água teórica em cada um dos 336 concretos analisados 100
Figura 40 – Correlação entre a quantidade de água adicionada e a quantidade de água teórica por formulação 101
Figura 41 – Correlação entre a quantidade de água adicionada e a quantidade de água teórica das 25 formulações, após exclusão de dados 104
Figura 42 – Faixa das formulações base e das formulações da central 105
Figura 43 – Correlação entre o abatimento medido e o abatimento estimado por formulação para Conjunto de Materiais M1D0 105
Figura 44 – Correlação entre o abatimento medido e o abatimento estimado por formulação para Conjunto de Materiais DiaMaisProx 106
Figura 45 – Média do abatimento estimado por média do abatimento medido nos cinco dias em que os materiais foram caracterizados 109
Figura 46 – (a) Distribuição granulométrica discreta da Brita 19mm (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Brita 19mm 143

Figura 47 – (a) Distribuição granulométrica discreta da Brita 9,5mm (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Brita 9,5mm 143
Figura 48 –(a) Distribuição granulométrica discreta da Areia Britada (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Areia Britada 143
Figura 49 – (a) Distribuição granulométrica discreta da Areia Natural (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Areia Natural 144
Figura 50 – (a) Distribuição granulométrica discreta do CP V ARI RS (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta do CP V ARI RS 144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação de um concreto dentre as 120 Formulações Base 59
Tabela 2 – Formulação do concreto pertencente as Formulações Base especificado na Tabela 1 59
Tabela 3 – Conjunto de Materiais empregados na central durante o período de estudo das Formulações Base: agregados britados graníticos e calcíticos 60
Tabela 4 – Características do Conjunto de Materiais 1 (agregados graníticos) 76
Tabela 5 – Características do Conjunto de Materiais 2 (agregados calcíticos) 77
Tabela 6 – Comparação de intensidade de ligantes, MPT e suas variáveis de entrada de formulações com dimensão máxima diferentes 86
Tabela 7 – Parâmetros estimados para a equação do abatimento do tronco de cone em função do MPT e do IPS 88
Tabela 8 – Densidade dos materiais 92
Tabela 9 – Área específica BET dos materiais 94
Tabela 10 – Fator de forma dos materiais 94
Tabela 11 – Área volumétrica granulométrica dos materiais 95
Tabela 12 – Especificação dos concretos dosados na central 96
Tabela 13 – Formulação especificada dos concretos dosados na central 97
Tabela 14 – Desvios associados às etapas de adição de água 102
Tabela 15 – Média do abatimento estimado e abatimento medido para as formulações dos concretos dosados na central 107
Tabela 16 – Média do abatimento do tronco de cone medido e estimado para as formulações selecionadas 111
Tabela 17 – Variáveis da distância de partículas dos concretos dosados na central as quais levam ao limite superior e inferior do abatimento do tronco de cone estimado 112
Tabela 18 – Análise de sensibilidade dos concretos das formulações escolhidas frente às variações de proporcionamento 114
Tabela 19 – Materiais utilizados nos concretos dosados na central os quais levam ao limite superior e inferior do abatimento do tronco de cone estimado 118
Tabela 20 – Análise de sensibilidade dos concretos das formulações escolhidas frente às variações de materiais 119
Tabela 21 – Formulações Base 131
Tabela 22 – Intensidade de ligantes por concreto 133
Tabela 23 – Distância entre partículas finas das Formulações Base 134
Tabela 24 – Distância entre partículas grossas das Formulações Base 137
Tabela 25 – Abatimento do tronco de cone estimado e abatimento especificado das Formulações Base 140
Tabela 26 – Área específica BET das areias 145
Tabela 27- Dados de processo 145
Tabela 28 – Distância entre partículas finas considerando os conjuntos de materiais do dia mais próximo 154
Tabela 29 – Distância entre partículas grossas considerando o conjunto de materiais do dia mais próximo 162
Tabela 30 – Distância entre partículas finas considerando o conjunto de materiais do dia M1D0 171
Tabela 31 – Distância entre partículas grossas considerando o conjunto de materiais do dia M1D0 180

Tabela 32 – Abatimento estimado e abatimento medido para os concretos dosados na central..... 188

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO ... 14
1.1 Justificativa e importância da pesquisa ... 14
1.2 Objetivo ... 16
1.3 Método ... 16
1.4 Estrutura do texto ... 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ... 18
2.1 A produção de concreto atual ... 18
2.2 O concreto e seu impacto ambiental ... 30
2.3 Métodos de dosagem ... 34
2.4 Modelos físicos do concreto ... 39
2.4.1 *Distância de separação entre duas partículas* ... 41
2.4.2 Empacotamento das partículas ... 44
2.5 Comportamento reológico do concreto ... 47
2.5.1 Reologia aplicada a concreto ... 47
2.5.2 Modelos de comportamento reológico ... 48
2.5.3 Viscosidade ... 49
2.5.4 Tensão de escoamento ... 50
2.5.5 O comportamento reológico medido pelo ensaio de abatimento do tronco de cone 51
2.5.6 Influência dos constituintes no comportamento reológico ... 53
2.6 Efeito do volume de pasta na resistência à compressão ... 56
3 MATERIAIS E MÉTODOS ... 57
3.1 Análise das Formulações Base ... 58
3.2 Caracterização das matérias-primas ... 60
3.2.1 Densidade – Picnometria ... 62
3.2.2 Distribuição granulométrica ... 63
3.2.3 Área específica – BET ... 65
3.3 Construção de um modelo para previsão da fluidez baseado em distância entre partículas ... 66
3.4 Validação do modelo para previsão da fluidez a partir dos concretos dosados na central de concreto ... 69
3.4.1 Amostragem e caracterização das matérias-primas ... 69
3.4.2 Obtenção e análise de dados de processo ... 71
3.4.3 Análise de sensibilidade do modelo ... 74

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 76
4.1 Análise das Formulações Base 76
4.1.1 Caracterização dos Materiais 76
4.1.2 *Intensidade de ligantes* 79
4.1.3 Empacotamento e distância entre partículas 83
4.2 Construção de um modelo semi-empírico baseado em distância entre partículas 87
4.3 Validação do modelo para previsão da fluidez dos concretos dosados na central de concreto 92
4.3.1 Caracterização das matérias-primas 92
4.3.2 Análise dos dados de processo 95
4.3.3 Análise de sensibilidade do modelo 111
5 CONCLUSÕES 121
5.1 Sugestões para pesquisas futuras 123
REFERÊNCIAS 125
APÊNDICES 131
Formulações Base 131
Caracterização das amostras coletadas na central 143
Concretos dosados na central 145

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e importância da pesquisa

A operação na central de concreto tem como objetivo entregar o concreto em conformidade com sua especificação, que pode ser feita pela resistência à compressão característica, pelo consumo de cimento ou pela formulação do concreto, e deve caracterizar ainda a classe de consistência. Até mesmo em comparação com outras indústrias, as centrais de concreto convivem com altos volumes, altos desvios das matérias-primas e, principalmente, desvios da água adicionada ao concreto. Assim sendo, a modelagem numérica da dosagem no dia-a-dia revela-se inviável, devido à complexidade e demanda de tempo desta abordagem. Desse modo, as decisões são tomadas baseadas em análises simplificadas, optando-se pela segurança, na falta de informações mais detalhadas. Este *modus operandi*, no qual a entrega em conformidade compromete a eficiência no uso de ligantes, no caso, o próprio cimento, aumentando ligeiramente o custo, foi aceito até hoje. Entretanto, este custo se torna muito maior se considerada a externalidade do impacto ambiental.

As emissões de gases de efeito estufa do concreto são majoritariamente provenientes do cimento, sendo a indústria do cimento responsável por aproximadamente 7% das emissões de CO_2 mundiais. Para mitigar as emissões de carbono na fabricação do cimento, existem quatro principais estratégias, são elas: o aumento da eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos, o aumento da substituição de clínquer e o uso de tecnologias inovadoras, como a captura e estocagem de carbono (IEA; WBCSD, 2018). Entretanto, o cimento raramente é aplicado isoladamente, em pasta, sendo usado predominantemente em concreto ou argamassa. No campo do concreto, uma estratégia relevante é o aumento da eficiência no uso de ligante, como o cimento e a escória, atingindo propriedades melhores com menores consumos de ligante (FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012).

Como apontado por Damineli (2013), a grande maioria das centrais de concreto não estão operando com alta eficiência no uso de ligantes, ocasionando um alto impacto ambiental, devido às emissões provenientes do cimento. Globalmente, uma redução média na intensidade de ligante dos concretos – e, consequentemente, na intensidade de carbono – da ordem de 10% já se equivaleria à todas as emissões de CO_2 da indústria de eletrônicos (IEA; WBCSD, 2018). Para aumentar esta eficiência, é necessário aprimorar os métodos e controles empregados na operação de dosagem

de concreto. Uma alternativa é aplicar métodos já explorados pela academia, que, contudo, ainda não são adotados pela indústria.

A compreensão dos métodos de dosagem empregados atualmente e o mapeamento de oportunidades de melhoria neste âmbito podem contribuir para tal. O método de dosagem do concreto consiste na criação da formulação do concreto, ou seja, a seleção do tipo e da quantidade de cada material que constitui o concreto cujas propriedades atendam a determinada especificação. Estes métodos podem ser divididos em três grupos: a dosagem prescritiva, a otimização experimental e a otimização computacional (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A dosagem prescritiva são métodos passo-a-passo como a tradicional razão volumétrica “1: 2: 3” (cimento: areia: pedra), enquanto o método de dosagem por otimização experimental permite ao técnico buscar as especificações do concreto sem regras estritas, através de experimentos em laboratório pautados por tentativa-e-erro, sendo este o método adotado nas centrais atualmente. Apesar de funcional, a abordagem experimental incorre em um crescimento exponencial de experimentos e suas conclusões são difíceis de serem generalizadas (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018).

Dentre os métodos de dosagem, destaca-se o método de otimização computacional, pois são empregados métodos numéricos que são capazes de testar inúmeras possibilidades em poucos instantes, possibilitando a obtenção de soluções próximas do ótimo global, reduzindo os recursos despendidos ao empregar os demais métodos. A otimização computacional está fundamentada em modelos que relacionem as propriedades do concreto, como a resistência à compressão e a fluidez e as variáveis de dosagem e que reflitam o observado experimentalmente. Na operação, a fluidez é avaliada pelo abatimento do tronco de cone: um ensaio simples e imprescindível para a quantificação, ainda que parcial, do comportamento reológico do concreto, sendo que o seu resultado indica como será o lançamento e a moldagem do material.

A modelagem das relações entre as variáveis tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, que empregam abordagem diferentes: combinações lineares, análises de ciclo de vida, modelos estatísticos, inteligência artificial e modelos físicos (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018). Dentre os modelos físicos, destaca-

se o modelo bifásico do concreto suportado pelos conceitos de distância de partículas e empacotamento das partículas para compreensão da fluidez (FLATT, 2004; PILEGGI, 2001; POWERS, 1968).

Dessa maneira, um modelo bem definido, validado experimentalmente, que correlacione as variáveis de dosagem com o abatimento do tronco de cone do concreto é fundamental para a aplicação da otimização computacional nas centrais de concreto. Levando em conta as altas variações encontradas nestas operações, se faz necessário um modelo robusto, que apresente uma resposta satisfatória às oscilações usuais das variáveis de entrada.

1.2 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é desenvolver e validar um modelo de fluidez do concreto avaliada pelo abatimento do tronco de cone baseado em distância entre partículas para aplicação nas centrais de concreto.

1.3 Método

O método consiste em construir um modelo físico baseado em distância entre partículas para previsão do abatimento do trone de cone a partir de formulações de uma central de concreto em São Paulo e comparar os abatimentos previstos pelo modelo com os dados de concretos executados em sua operação. O método foi desenvolvido em uma central a fim de ser replicado em qualquer outra central que necessite do modelo. Esta central conta com formulações raiz elaboradas pelo laboratório da central por otimização experimental, que fundamentam todas as demais formulações criadas pelo laboratório, as quais foram chamadas de Formulações Base.

Na primeira etapa, foi realizada uma análise das Formulações Base desta central utilizando os modelos físicos de distância entre partículas, com o intuito de entender a relação entre as variáveis, bem como estimar parâmetros para um modelo de previsão da fluidez.

Em seguida, com a finalidade de compreender se o modelo físico era capaz de prever o comportamento reológico dos concretos dosados na central, foram realizados experimentos nesta central de concreto por dois meses, período no qual as matérias-primas foram caracterizadas e os dados do processo foram coletados. Com estes

dados, o uso do modelo para previsão da fluidez foi validado. Por fim, avaliou-se a sensibilidade do modelo quanto às variações de dosagem e das matérias-primas.

1.4 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado em sete capítulos.

O Capítulo Um realiza uma introdução ao tema, justificando a importância do trabalho e mostrando seu objetivo. Apresenta um resumo do método, bem como uma descrição da estrutura do texto.

O segundo capítulo compreende a revisão bibliográfica, abordando os temas da produção do concreto, seu impacto ambiental, metodologias de dosagem, modelos físicos do concreto, o comportamento reológico do material e as variáveis que o influenciam.

O Capítulo Três apresenta os materiais e métodos utilizados na pesquisa, descrevendo os ensaios de caracterização das matérias-primas, a análise das Formulações Base, as premissas para construção do modelo, o método para validação do modelo a partir dos concretos dosados na central e, por fim, a metodologia para realização da análise de sensibilidade do modelo.

O quarto capítulo mostra os resultados obtidos, com a análise crítica das Formulações Base, apresentação do modelo físico ajustado, a validação deste a partir dos concretos dosados na central, assim como a análise de sensibilidade deste modelo.

Já o Capítulo Cinco sintetiza as principais conclusões atingidas.

Em seguida, listam-se todas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho. E encerra-se apresentando os apêndices, com a base de dados utilizada no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A produção de concreto atual

O concreto é constituído por, pelo menos, agregados graúdos e miúdos, cimento e água, podendo conter também aditivos orgânicos, materiais suplementares cimentícios, pigmentos e fibras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os agregados compreendem usualmente mais de 80% da massa do concreto e são considerados materiais inertes, pois não apresentam reações químicas relevantes com a água. São as características físicas e propriedades mecânicas dos agregados que se destacam ao se dosar o concreto. Exemplos destas características incluem a distribuição granulométrica e a área superficial dos agregados, as quais serão discutidas e analisadas profundamente neste trabalho. Na qualidade de propriedades mecânicas do concreto, merecem menção a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os atributos dos agregados são derivados de dois fatores majoritários: sua composição mineralógica e seu processo produtivo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A compreensão da composição mineralógica passa necessariamente pelo estudo da geologia das rochas que formam os agregados minerais. As rochas são agrupadas em três famílias: ígneas, sedimentares e metamórficas. As rochas ígneas são originárias do resfriamento do magma e neste grupo está contido o granito e o basalto, rochas silicosas utilizadas em abundância no Brasil como agregado. Dentre as rochas sedimentares, encontram-se o gnaisse, a areia quartsoza – rica em sílica, a qual consiste em um sedimento não consolidado – e o calcário calcítico – o qual consiste em um sedimento consolidado por via química, majoritariamente constituído por carbonato de cálcio. Pelo fato de demonstrarem diferentes características como resistência, porosidade e forma – dependendo da pressão sob a qual foram formadas – as rochas sedimentares consolidadas eventualmente podem apresentar baixas resistências ou impurezas, e, nesses casos, serem inadequadas para o uso em determinados concretos, como os concretos de alta resistência à compressão, por exemplo. Observa-se que, no Brasil, o perfil das rochas utilizadas para agregados graúdos é 85% do tipo granito e gnaisse, 10% calcário e dolomito e 5% basalto e diabásio (FERREIRA; JUNIOR, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O processo produtivo dos agregados depende da ocorrência mineral na jazida. No caso de rochas maciças, o beneficiamento passa por operações unitárias de decapeamento de estéril, extração da rocha, cominuição e classificação granulométrica. A etapa de cominuição é determinante para as características físicas dos agregados produzidos, porquanto os equipamentos utilizados, assim como os parâmetros de processo, influenciam a morfologia, a porosidade e a distribuição granulométrica dos produtos. No caso de areias encontradas em rios e planícies de inundações, a explotação é feita por dragagem, escavação ou desmonte, e o processo pode incluir lavagem, classificação por tamanho de partículas e secagem (FERREIRA; JUNIOR, 2012).

A classificação dos agregados entre miúdos e graúdos pela NBR 7211 considera o tamanho das partículas através do critério limítrofe de 4,8mm. Ou seja, todo agregado que não apresenta massa retida na peneira de abertura 4,8mm é categorizado como agregado miúdo, enquanto se contém este retido é rotulado como agregado graúdo (ABNT, 2009a).

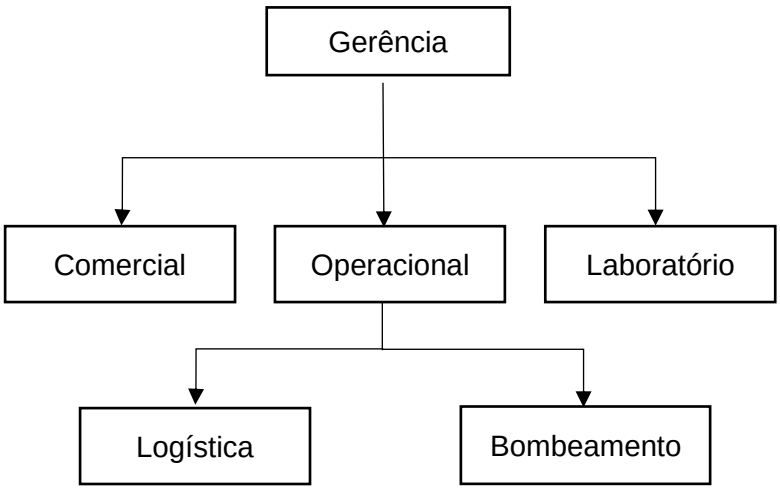
O cimento Portland é um ligante hidráulico que une os agregados no concreto, composto por clínquer e sulfato de cálcio, podendo conter também fíleres inertes – como o calcário moído finamente – e materiais suplementares cimentícios – como a escória de alto forno e a cinza volante. Componente essencial do cimento Portland, o clínquer constitui-se basicamente de silicatos, aluminatos e ferroaluminatos de cálcio e é produzido através de moagem das matérias-primas e de calcinação e sinterização no forno de clínquer em temperatura de 1350°C (HEWLETT, 2003).

O conceito de ligante neste trabalho está associado a materiais que apresentam atividade hidráulica ou pozolânica e formam produtos de hidratação que contribuem para as propriedades mecânicas do concreto endurecido como, por exemplo, o cimento, o sulfato de cálcio e os materiais suplementares cimentícios (DAMINELI, 2013).

Finalmente, os aditivos são compostos orgânicos utilizados para maximizar o desempenho dos concretos em diferentes aspectos, tais como a redução da demanda de água e o controle da velocidade de reação de hidratação (ABNT, 2019; LIU *et al.*, 2019).

A dosagem do concreto pode ser feita diretamente na obra, contudo a execução da dosagem em central de concreto representa maior controle de qualidade e eficiência na execução. Para realização deste processo, a central conta com uma estrutura organizacional que possui, no mínimo, o comercial, o operacional e o laboratório, conforme apresentado na Figura 1. A equipe comercial é responsável pela venda da prestação de serviço de concretagem e pela assistência pós-venda. O operador da central, conhecido como balanceiro, é responsável por executar a dosagem do concreto na planta e o laboratório por controlar a qualidade das matérias-primas e dos concretos. A logística deve transportar o concreto e descarregá-lo na obra e o operador da bomba é responsável por operar o caminhão bomba e lançar o concreto por bombeamento. Existem ainda outras funções de apoio para garantir o bom funcionamento de uma central como a gestão de ativos, manutenção e saúde e segurança.

Figura 1 – Estrutura organizacional de uma central de concreto



Fonte: própria autora

Para se ter um panorama da central de concreto, a Figura 2 e a Figura 3 dão uma visão geral de uma planta.

Figura 2 – Vista superior da central de concreto, identificando os principais elementos da operação de dosagem de concreto, desde a baia de agregados até a plataforma com caminhões betoneira

Fonte: Adaptado de InterCement, 2019

A: Baias de armazenamento de agregados

B: Tremonha de alimentação de agregados

C: Correia transportadora

D: Tanques de aditivos

E: Silos de materiais cimentícios

F: Ponto de dosagem

G: Plataforma

H: Caminhão betoneira

I: Balança plataforma

J: Tanques de armazenamento de água

L: Laboratório

M: Prédio Administrativo e oficina mecânica

Figura 3 – Vista frontal da central, identificando os elementos da operação de dosagem de concreto

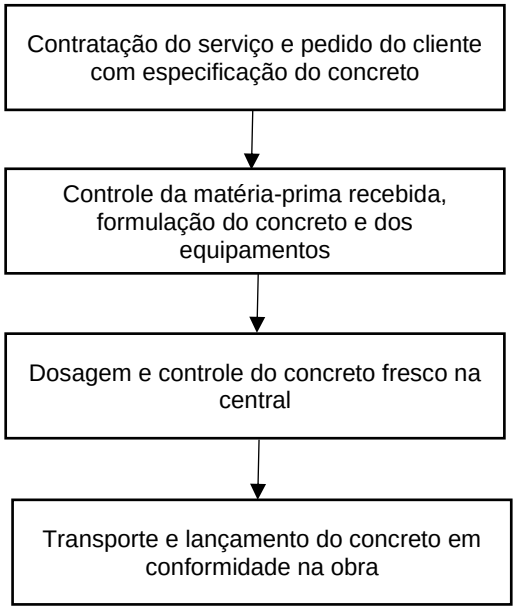
Fonte: Adaptado de InterCement, 2016

B: Tremonha de alimentação de agregados
C: Correia transportadora
E: Silos de materiais cimentícios
F: Ponto de dosagem
G: Plataforma
H: Caminhão betoneira
N: Pá carregadeira

O fluxo operacional do serviço de concretagem ocorre conforme explicitado esquematicamente na Figura 4. A operação na central de concreto se inicia a partir do recebimento do pedido feito por um cliente, contendo a especificação do concreto, que pode ser feita pela resistência característica, pelo consumo de cimento ou pela formulação do concreto, e deve caracterizar ainda a classe de consistência. Além destes requisitos básicos, a especificação pode abranger outras questões como a relação água/cimento máxima e o módulo de elasticidade, segundo a NBR 7212 (ABNT, 2012).

Se já houver uma formulação de concreto elaborada pelo laboratório, utilizando as matérias-primas disponíveis, que atenda às especificações do cliente e que seja eficiente para esta aplicação, esta formulação é selecionada. Se não, o laboratório desenvolve uma formulação para esta necessidade, através de métodos de dosagem, que são abordados em detalhe no item 2.3.

Figura 4 – Fluxograma do processo de compra, execução da dosagem e entrega do concreto



Fonte: própria autora

A operação, em conjunto com o laboratório, controla a qualidade da matéria-prima recebida, através da pesagem na balança plataforma, inspeção visual, amostragem e ensaio dos agregados segundo a norma NBR 7211. Estes ensaios englobam a granulometria por peneiramento, avaliações de substâncias nocivas, como torrões de argila, materiais carbonosos, impurezas orgânicas e teor de cloretos e sulfatos solúveis, além das propriedades físicas, como massa específica, massa unitária e absorção de água (ABNT, 2009a).

Em seguida, o armazenamento dos materiais é feito de forma a evitar contaminação. Os agregados são separados em baias, os materiais cimentícios em silos e os aditivos em tanques (Figura 3 e Figura 5). Os silos de cimento e os tanques de aditivo são conectados na linha de carregamento, já os agregados são alimentados nas tremonhas por uma pá carregadeira e transportados até o ponto de dosagem por correia transportadora, operações estas ilustradas pelas Figura 6 e Figura 7 (PCA, 2011).

Figura 5 – Vista superior de uma série de baias de agregados

Fonte: InterCement, 2019

Figura 6 – Alimentação dos agregados em uma tremonha por um pá carregadeira

Fonte: InterCement, 2016

Figura 7 – Correia transportadora dos agregados contendo mistura de areia e brita

Fonte: InterCement, 2016

De posse das matérias-primas em conformidade e a formulação do concreto especificado, o operador da central seleciona a formulação e o sistema automatizado pesa os componentes, processo conhecido como dosagem. A dosagem na central de

concreto é a medição em massa das quantidades de matérias-primas e posterior introdução na misturadora ou betoneira. Vale destacar que, ao longo deste trabalho, o termo dosagem é utilizado com outro sentido, a saber: o processo de seleção e determinação das proporções de materiais. Antes de iniciar o carregamento, os teores de umidade dos agregados miúdos são inseridos no sistema para ajustes dos pesos a serem adicionados, favorecendo a dosagem correta. Essa análise é realizada no laboratório da central diariamente por diferença gravimétrica e secagem do material em frigideira (DEWAR; ANDERSON, 1992; PCA, 2011).

Para a mistura das matérias-primas existem dois tipos de centrais: as dosadoras e as misturadoras. As últimas contam com um misturador que homogeneíza o concreto, o qual, em seguida, é despejado, já com a fluidez almejada, no caminhão betoneira (Figura 8). Já nas centrais dosadoras, espécie utilizada no Brasil, os componentes são descarregados diretamente no caminhão betoneira totalizando até $8m^3$ de concreto (Figura 9). Para a mistura, o balão do caminhão gira em alta rotação, de 12 a 16 rpm por cinco minutos e, em seguida, a fluidez precisa ser avaliada por inspeção visual pelo motorista do caminhão betoneira, na plataforma (Figura 10). Se a fluidez não tiver cumprido a especificação, insere-se um volume adicional de água mensurado por um hidrômetro até o objetivo desejado. No que tange aos benefícios das centrais misturadoras em relação às dosadoras, apesar da mistura mais intensa nas centrais misturadoras ser positiva para o concreto, a grande vantagem dessas centrais é o controle da composição – principalmente da quantidade de água – e do comportamento reológico do concreto (CAZACLIU; LÊ; DE LARRARD, 2008; PCA, 2011).

Na plataforma, o caminhão betoneira também é lavado para retirada do excesso de sujeira e pó no balão. A partir daí, o transporte para a obra é realizado, com uma rotação do balão de 2 a 3 rpm para evitar segregação e aglomeração do material, além de reduzir desgastes mecânicos. Segundo a norma brasileira, o caminhão betoneira deve chegar à obra em, no máximo, 90 minutos a partir do contato do cimento com a água, e o concreto deve ser lançado em até 150 minutos, pois, após este tempo, o período de indução da reação do cimento pode chegar ao fim e se iniciar a fase de aceleração da reação, na qual os produtos de hidratação são formados e o concreto já deve estar moldado (ABNT, 2012; NRMCA, 2015; PCA, 2011).

Figura 8 – Vista frontal de uma central misturadora de concreto, mostrando o misturador conectado aos silos

Fonte: CIPI, 2019

Figura 9 – Ponto de dosagem da central dosadora com um caminhão betoneira e silos ao fundo

Fonte: InterCement, 2016

Figura 10 – Plataforma para ajuste da quantidade de água do concreto com caminhão betoneira estacionado e operador subindo a escada

Fonte: InterCement, 2016

Ao chegar na obra, é verificado se o abatimento do tronco de cone do concreto está conforme a classe de consistência especificada e, consequentemente, se o concreto se encontra apto a ser lançado. O abatimento do tronco de cone é um ensaio simples, no qual se verifica a dimensão da queda do concreto ao se levantar o tronco de cone com concreto, conforme dispõe a NBR NM 67 (Figura 11). Este ensaio é a única avaliação do concreto no estado fresco e é imprescindível para a quantificação, ainda que parcial, do comportamento reológico do concreto, sendo que o seu resultado indica como será o lançamento e a moldagem do material. Ademais, esta etapa é a única em que é realizada uma verificação da qualidade do concreto em tempo real na obra, ao fim da qual o concreto pode ser rechaçado se não atender à especificação. Se o concreto está em conformidade com a classe de consistência (Quadro 1), este pode ser lançado, do contrário, se o abatimento do tronco de cone for inferior ao especificado, o concreto deve ser ajustado com adição de água até o limite previsto na formulação, ou com aditivo. Importante frisar que esta correção é realizada na obra, pois, durante o período do transporte, há uma perda da fluidez do material, devido à aglomeração das partículas e à reação do cimento (ABNT, 1998, 2012).

Figura 11 – Medição do abatimento do tronco de cone durante a execução do ensaio para um concreto plástico

Fonte: própria autora

Quadro 1 – Classes de consistência do concreto e suas aplicações típicas, segundo NBR 8953 (ABNT, 2015a).

Classe	Abatimento (s) (mm)	Aplicações típicas
S10	10 ≤ s < 50	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	50 ≤ s < 100	Alguns tipos de pavimentos e elementos de fundações
S100	100 ≤ s < 160	Elementos estruturais com lançamento convencional
S160	160 ≤ s < 220	Elementos estruturais com lançamento bombeável
S220	220 ≤ s	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Para atingir locais de difícil acesso ou com alturas elevadas, é feito o bombeamento do concreto com o caminhão auto bomba (Figura 12 e Figura 13). Durante o lançamento, é retirada uma amostra a cada 50m^3 de concreto, em operação contínua da central, e corpos de prova são moldados para verificação da resistência à compressão, segundo as normas técnicas. Com este programa de controle, é possível calcular o desvio padrão da central de concreto (ABNT, 2012, 2018; NRMCA, 2015; PCA, 2011).

Figura 12 – Caminhão auto bomba parado

Fonte: InterCement, 2016

Figura 13 – Lançamento do concreto por bombeamento em uma laje na obra

Fonte: InterCement, 2019

Nas centrais de concreto, como em qualquer indústria, é necessário gerir diferentes fornecedores, diferentes tipos de concretos requeridos, desvios de processo e pessoas com processos decisórios individuais e, particularmente, o concreto lida ainda com um alto volume de matérias-primas com suas variações inerentes de materiais provenientes de jazidas e pouco manufaturados. Com diversas fontes de variabilidade, é importante instalar um processo robusto para garantir concretos que atendam às especificações solicitadas.

Robustez na tecnologia do concreto pode ser definida como “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” (REBMANN, 2017).

Em um estudo de caso de robustez em uma central dosadora com o processo e as matérias-primas similares ao estudado neste trabalho, ao investigar os fatores mais relevantes na variação das propriedades do concreto obtido, foram avaliados desvios de operação e seu efeito nas propriedades do concreto. Concluiu-se que a características dos agregados – a granulometria e morfologia das partículas – são mais impactantes nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto que os próprios desvios de pesagem das matérias-primas. No que tange especificamente à granulometria dos agregados, o fator mais influente nas propriedades do concreto foi o teor de partículas menores que 150µm, enquanto no tocante à morfologia o mais significativo se mostrou a forma da fração dominante (REBMANN, 2017). O resultado

do estudo mencionado mostra a necessidade de se avaliar com mais atenção as variações das matérias-primas na operação de concreto, bem como lança luz a esses fatores mais preponderantes na etapa de dosagem do concreto.

Como as centrais de concreto convivem com altos volumes e altos desvios das matérias-primas e principalmente da água adicionada ao concreto, a modelagem da dosagem no dia-a-dia revela-se inviável, devido à complexidade e demanda de tempo desta abordagem. Desse modo, as decisões são tomadas empiricamente, baseadas em experiência do corpo funcional e análises simplificadas, optando-se pela segurança, na falta de informações mais detalhadas. Este *modus operandi*, no qual a entrega em conformidade compromete a eficiência no uso de ligantes, aumentando ligeiramente o custo, foi aceito até hoje. Entretanto, este custo se torna muito maior se considerada a externalidade do impacto ambiental, conforme explicado no item seguinte do presente trabalho.

2.2 O concreto e seu impacto ambiental

O concreto é o material estrutural mais consumido no mundo, devido a suas propriedades de resistência à água, facilidade de execução, flexibilidade de formas, alta disponibilidade e baixo custo. O volume de consumo de concreto mundial é da ordem de 10km^3 por ano. Como comparativo, o volume de consumo da madeira é de 4km^3 e do aço 0,1km^3, sendo que aproximadamente metade deste aço é destinado ao concreto armado. O consumo de cimento no mundo é maior que 4.500Mt/ano e, particularmente, no Brasil em 2018, foram consumidas 52,9Mt de cimento (GARTNER, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SNIC, 2019; UNEP, 2016).

O concreto é um material com baixa energia e carbono incorporados comparando-se com os outros materiais da construção civil, mostrando que seu alto impacto ambiental é devido aos grandes volumes utilizados. Assim, a solução deste problema não parece ser a substituição do concreto por outro material e sim a evolução do próprio concreto (BARCELO *et al.*, 2014; GARTNER, 2011; HAMMOND; JONES, 2011; SCRIVENER, 2014).

Sabe-se que o maior contribuinte para as emissões de carbono do concreto é o cimento. Por exemplo, em um caso na cidade de São Paulo, 78% da pegada de carbono de um concreto entregue em obra foi proveniente da produção do cimento. Ainda, a indústria do cimento, sozinha, é responsável por 5% a 8% das emissões

antropogênicas mundiais de CO_2, dependendo da fronteira estabelecida na quantificação (BARCELO *et al.*, 2014; IEA; WBCSD, 2018; MENEZES *et al.*, 2016; SCRIVENER, 2014; WRI, 2005).

Examinando a produção de cimento, aproximadamente 40% das emissões estão associadas à energia, tanto térmica (pois a clinquerização se dá a 1350°C) quanto elétrica (majoritariamente nos moinhos de farinha e cimento). Os demais 60% são emissões derivadas da descarbonatação do carbonato de cálcio da matéria-prima para formação dos silicatos de cálcio do clínquer (SCRIVENER, 2014).

Isto posto, as emissões provenientes da energia podem ser mitigadas com a melhoria da eficiência térmica dos equipamentos – porém, seus ganhos são limitados – ou através do uso de combustíveis alternativos ao coque de petróleo nos fornos de clínquer. Adicionalmente, tanto as emissões geradas pela descarbonatação quanto pela energia podem ser mitigadas se o clínquer deixar de ser produzido, ou, pelos menos, se sua produção for reduzida. Com este fim, materiais suplementares cimentícios e fíleres inertes podem ser usados para substituição de clínquer na composição do cimento. Tal substituição pode ser alcançada até 2050, data estabelecida como meta pelo setor, com a adição de fíleres de calcário e argilas calcinadas, uma vez que a disponibilidade de seus constituintes é da ordem de 6.000 Mt/ano, enquanto todos os demais materiais suplementares cimentícios não atingem 1.000 Mt/ano (GARTNER, 2004; IEA; WBCSD, 2018; UNEP, 2016).

Em síntese, existem quatro principais estratégias para a redução de emissões no CO_2 na indústria do cimento, apresentadas aqui com seu potencial de mitigação até 2050 (IEA; WBCSD, 2018):

- Eficiência térmica e elétrica: uso de tecnologias no estado da arte para novas plantas e renovações para equipamentos mais eficientes em plantas já instaladas, quando economicamente viável
    - Redução de 3,5GJ/t de clínquer em 2014 para 3,1-3,2GJ/t de clínquer em 2050
- Combustíveis alternativos: incremento do uso de combustíveis fósseis com menores emissões, biomassa e resíduos
    - Aumento de 5,6% de substituição na matriz energética em 2014 para 17,5-30,0% em 2050

- Substituição de clínquer: substituir o clínquer por materiais cimentícios suplementares
    - Evolução na razão clínquer/cimento de 0,65 em 2014 para 0,66-0,60 em 2050
- Tecnologias inovadores incluindo Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)

Com essas projeções, uma redução das emissões de CO_2 até 2050 coerente com o objetivo global de manter o aumento máximo da temperatura do planeta pré-era industrial em 2°C seria atingida, sendo 3% da redução através da eficiência energética e térmica, 12% por meio de combustíveis alternativos, 37% através da substituição de clínquer e 48% por meio de tecnologias inovadoras, como a CCS (IEA; WBCSD, 2018).

Muito embora os resultados com o uso de tecnologias para captura e armazenamento de carbono se mostrem promissores, a aplicação destas tecnologias custa entre 30 e 100 euros por tonelada de CO_2 e possivelmente dobraria o preço do cimento (ECRA, 2012; UNEP, 2016). Destarte, como essa opção tem um custo muito elevado, ela deve ser a última a ser escolhida.

Até este ponto, foram apresentadas estratégias de redução do impacto ambiental na fabricação do cimento. De fato, por diversos fatores – como o maior porte e organização das empresas fabricantes de cimento –, a discussão das emissões de gases de efeito estufa da cadeia é muito centralizada na etapa da fabricação do cimento. Entretanto, o cimento raramente é aplicado isoladamente, em pasta, sendo usado predominantemente em concreto ou argamassa. Cumpre ressaltar que, além das estratégias apresentadas para mitigação do CO_2 na fabricação do cimento, na aplicação em concretos, existe a alternativa de aumento da eficiência de ligantes, ou seja, atingir a redução do consumo de ligantes, porém mantendo as propriedades desejadas do material. Essa rota inclui o uso de dispersantes ou superplastificantes e empacotamento de partículas do concreto (DAMINELI et al., 2010; FLATT, 2004; FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012, UNEP, 2016).

Neste contexto, uma avaliação quantitativa da eficiência de ligantes é essencial para implementação desta estratégia e pode ser realizada pelos indicadores propostos por Damineli (2013): intensidade de ligante (IL) e intensidade de carbono (IC) de cada

concreto (eq.(1) e (2)). Através destes indicadores simples, é possível normalizar o consumo de ligantes, assim como as emissões de CO_2, de acordo com desempenho de cada concreto.

$$IL = {}^{l}/_{rc} \quad (1)$$

$IL = intensidade\ de\ ligante, em\ kg/m^3/MPa$

$l = quantidade\ total\ de\ ligante, em\ kg/m^3$

$rc = requisito\ de\ desempenho, resistência\ à\ compressão\ aos\ 28\ dias\ (MPa)$

$$IC = {}^{c}/_{rc} \quad (2)$$

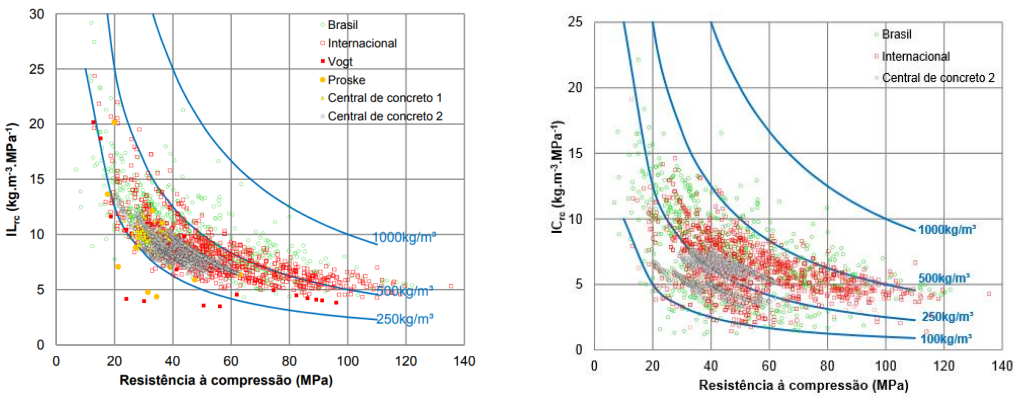
$IC = intensidade\ de\ carbono, em\ kg/m^3/MPa$

$c = total\ de\ emissões\ de\ CO_2, em\ kg/m^3$

$rc = requisito\ de\ desempenho, resistência\ à\ compressão\ aos\ 28\ dias\ (MPa)$

Desta maneira, o autor pôde comparar 1.584 dados de literatura e de mercado sobre concretos de 29 países, apresentado na Figura 14, deflagrando a oportunidade de aumento da eficiência no uso de ligantes dos concretos dosados em central. Isso porque, observou-se que, por exemplo, para concretos com 30MPa, a IL mínima é 8kg/m^3/MPa, porém, a média é 12kg/m^3/Mpa, revelando uma defasagem de 4kg/m^3/MPa, que poderiam ser poupadas em uma operação eficiente (DAMINELI, 2013; UNEP, 2016).

Figura 14 – (a) Intensidade de ligante de concretos brasileiros e internacionais de literatura e mercado versus resistência à compressão aos 28 dias (b) Intensidade de carbono de concretos brasileiros e internacionais de literatura e mercado versus resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Damineli, 2013

Como apontado por Damineli (2013), a grande maioria das operações de concreto não estão operando com alta eficiência no uso de ligantes, ocasionando um alto impacto ambiental, devido às emissões provenientes do cimento.

Como a mitigação das mudanças climáticas na cadeia do concreto passa necessariamente pelo aumento na eficiência do uso dos ligantes, é necessário aprimorar os métodos e controles empregados na operação de dosagem de concreto. Uma alternativa é aplicar métodos já explorados pela academia, que, contudo, ainda não são adotados pela indústria.

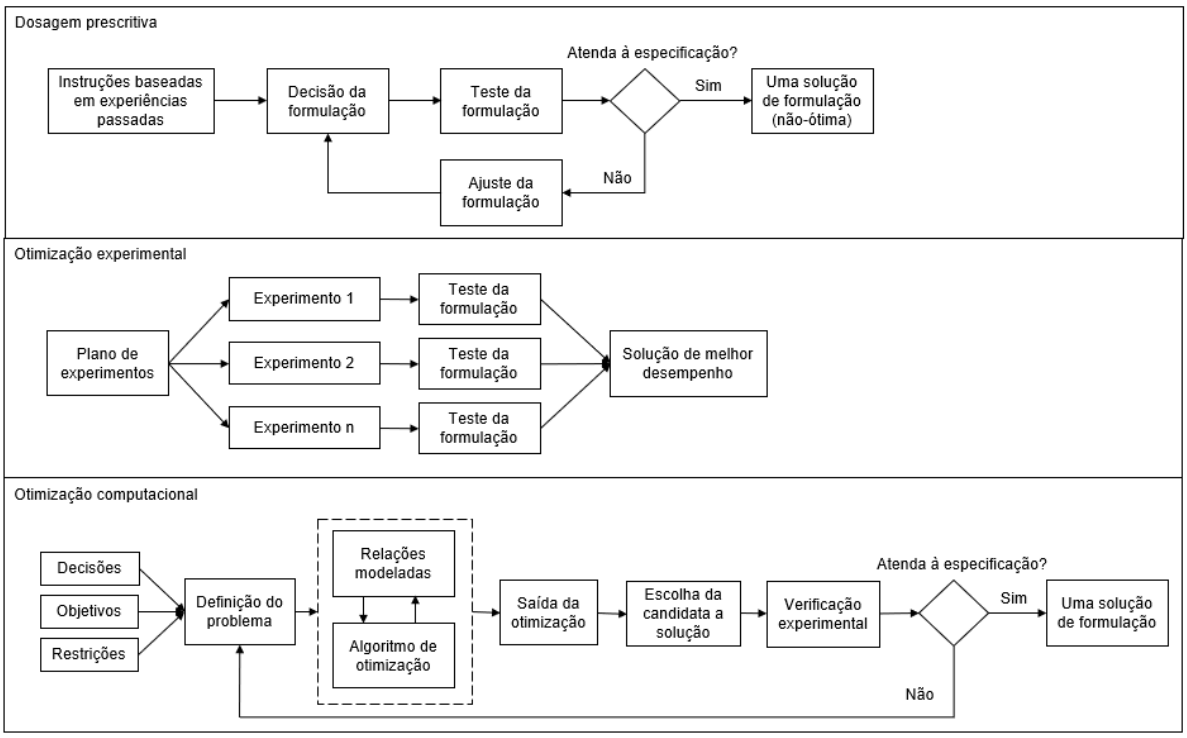
2.3 Métodos de dosagem

A compreensão dos métodos de dosagens empregados atualmente e o mapeamento de oportunidades de melhoria neste âmbito podem contribuir para o aumento da eficiência no uso de ligantes nos concretos dosados em central.

A dosagem do concreto consiste na criação da formulação do concreto, ou seja, a seleção do tipo e da quantidade de cada material que constitui o concreto cujas propriedades atendam a determinada especificação para uma aplicação particular. Os objetivos mais comuns são a resistência à compressão do concreto endurecido e a fluidez do concreto fresco. Ainda, essa dosagem deve garantir os requisitos com o menor custo possível (MEHTA; MONTEIRO, 2014; DEROUSSEAU, KASPRZYK; SRUBAR, 2018).

Os métodos de dosagem de concreto podem ser divididos em três grupos: a dosagem prescritiva, a otimização experimental e a otimização computacional, conforme apresentado esquematicamente na Figura 15 (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018).

Figura 15 – Fluxogramas dos três métodos de dosagem distintos: dosagem prescritiva; otimização experimental; e otimização computacional



Fonte: Adaptado de Derousseau, Kasprzyk e Srubar, 2018

A dosagem prescritiva são métodos passo-a-passo que, quando seguidos rigorosamente, atingem um concreto que atende aos requisitos, porém, dificilmente será a solução ótima. Exemplos deste método passam pela tradicional razão volumétrica “1: 2: 3” (cimento: areia: pedra) e o método do volume absoluto prescrito pelo ACI (American Concrete Institute) – no Brasil, foi adaptado e ficou conhecido como método ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) – e pela PCA (Portland Cement Association) (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018).

O método do volume absoluto requer que sejam escolhidos o abatimento do tronco de cone e a dimensão máxima dos agregados – em função dos espaços entre as armaduras e entre as faces das formas –, e que sejam estimados pelo técnico a razão água/cimento – em função da resistência desejada –, a quantidade de água, o teor de ar incorporado, a dosagem de aditivos e a quantidade de agregados graúdos – visando maximizá-la. Por fim, os agregados miúdos são calculados por diferença para atingir o metro cúbico do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ao contrário da dosagem prescritiva, o método de dosagem por otimização experimental permite ao técnico buscar as especificações do concreto sem regras

estritas, através de experimentos em laboratório pautados por tentativa-e-erro. Este método fundamentado em desempenho se mostra uma abordagem iterativa em contraponto à abordagem linear dos métodos prescritivos como o volume absoluto do ACI (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018). Os métodos brasileiros do IBRACON (Instituto Brasileiro de Concreto) e do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) se enquadram no grupo dos métodos por otimização experimental.

O método do IBRACON preconiza que, após serem escolhidos o abatimento do tronco de cone, a resistência à compressão e a dimensão máxima dos agregados, deve-se realizar três experimentos com distintas razões agregados/cimento em massa. Após ajustada experimentalmente a razão agregados miúdos/cimento, os três ensaios são executados regulando a quantidade de água para atingir o abatimento do tronco de cone desejado. Destes experimentos, pode-se tomar o melhor resultado, ou, opcionalmente, montar o diagrama de dosagem (Figura 16), fundamentado nas equações de comportamento empíricas abaixo, para ajustar a formulação em função do requisito desejado (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Equação de Abrams (1918): a resistência de um concreto, numa determinada idade (f_{cj}), tem uma relação inversa e exponencial à relação água/cimento (a/c) (eq.(3)).

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (3)$$

Equação de Lyse (1932): “fixados o cimento e agregados, a consistência do concreto fresco depende preponderantemente da quantidade de água por metro cúbico de concreto” (eq.(4)).

$$m = k_3 + k_4 \, {}^{a}/_{c} \quad (4)$$

Equação de Priszkulnik & Kirilos (1974): “o consumo de cimento por metro cúbico de concreto varia na proporção inversa da relação em massa seca de agregados/cimento (m).” (eq.(5)).

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \, m} \quad (5)$$

$f_{cj} = resistência \text{ à } compressão\ do\ concreto\ para\ a\ idade\ de\ j\ dias, em\ MPa$

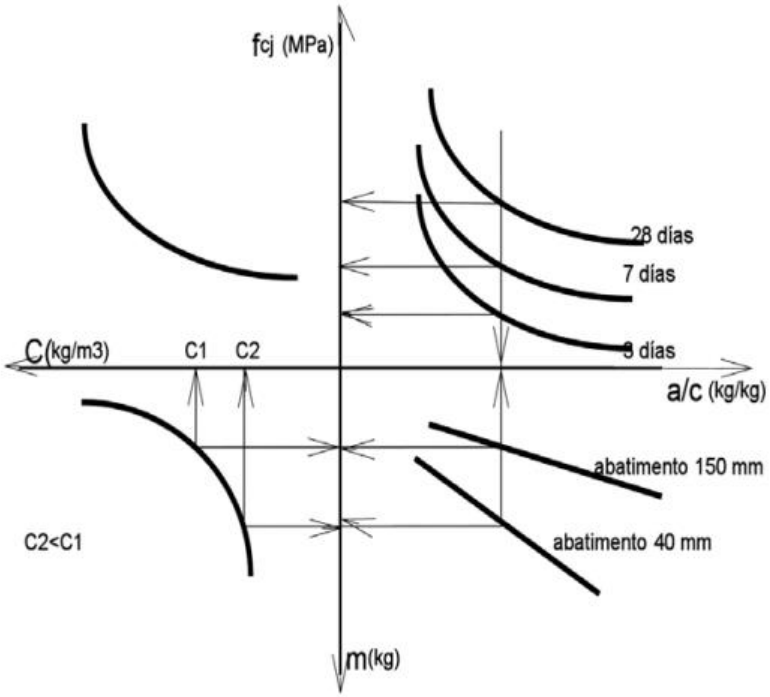
$m = relação\ em\ massa\ seca\ de\ agregados/cimento$

${}^{a}/_{c} = relação\ em\ massa\ de\ água/cimento$

$C = consumo\ de\ cimento\ por\ volume\ de\ concreto\ adensado, em\ kg/m^3$

$k_1,\ k_2, k_3, k_4, k_5\ e\ k_6\ são\ constantes\ particulares\ de\ cada\ conjunto\ de\ mesmos\ materiais$

Figura 16 – Diagrama de dosagem experimental: 1° quadrante – Equação de Abrams; 2° quadrante – Equação de Lyse; 3° quadrante – Equação de Priszkulnik & Kirilos; 4° quadrante – Intensidade de ligantes



Fonte: Tutukian, Helene, 2011

O diagrama de dosagem (Figura 16) deve ser criado para a família de concretos obtidas pelos experimentos. O primeiro quadrante corresponde à equação de Abrams e deve ser preenchido a partir do ajuste dos resultados experimentais à esta lei. O segundo quadrante corresponde à Lei de Lyse e o terceiro, à Lei de Priszkulnik & Kirilos. No quarto quadrante, deve ser plotada a intensidade de ligantes (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Apesar de funcional, a abordagem experimental incorre em um crescimento exponencial de experimentos necessários a cada variável adicional que se almeja otimizar. Além disso, é difícil generalizar as conclusões obtidas, as quais são limitadas para o caso de variações no tipo ou na composição química dos materiais cimentícios, assim como no tamanho e na morfologia dos grãos dos agregados (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018).

A última abordagem dos métodos de dosagem abarca a otimização computacional, que visa alcançar a formulação ótima para atender cada especificação, além de

reduzir o tempo e os recursos despendidos ao empregar os demais métodos. O método se fundamenta em uma otimização matemática, e não experimental, o qual consiste em definir um problema, modelar as relações entre as variáveis e escolher um algoritmo de otimização da função objetivo. A definição do problema passa por estabelecer as variáveis envolvidas, a função objetivo e as restrições. Apenas após se obter matematicamente uma solução ótima, esta formulação deve ser validada por um experimento em laboratório (DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018).

A função objetivo quantifica o que se pretende maximizar ou minimizar, por exemplo, o custo total da formulação por metro cúbico do concreto. As restrições impõem limites provenientes das especificações do concreto e do conhecimento empírico, podendo ser, por exemplo, a resistência à compressão e o abatimento do tronco de cone especificados, bem como a quantidade máxima de agregados (SECCHI, 2015).

O algoritmo de otimização é uma questão matemática, o qual é escolhido para atingir o máximo e o mínimo global, ao invés de locais, bem como para reduzir o tempo de processamento até atingir a solução. Os algoritmos são divididos em dois grandes grupos de métodos numéricos, os determinísticos – fundamentados em aproximação – e estocásticos – fundamentados em probabilidades –, que são selecionados a partir de sua adequação para cada problema (SECCHI, 2015).

A modelagem das relações entre as variáveis tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, que empregam abordagem diferentes: combinações lineares, análises de ciclo de vida, modelos estatísticos, inteligência artificial e modelos físicos. Estes últimos são os tratados neste trabalho. Os modelos físicos buscam descrever os fenômenos que ocorrem no sistema por uma ótica mecanicista. Não há um modelo holístico que compreende todas as variáveis envolvidas e propriedades resultantes para o concreto. Desta forma, os modelos descrevem alguma propriedade em particular, por exemplo, os modelos que preveem a resistência à compressão em função das proporções e tipos dos materiais, e os modelos para o comportamento reológico, que serão detalhados nesta revisão (CHANDWANI; AGRAWAL; NAGAR, 2015; DEROUSSEAU; KASPRZYK; SRUBAR, 2018).

Dentre os métodos de dosagem, destaca-se o método de otimização computacional, pois são empregados métodos numéricos que são capazes de testar inúmeras possibilidades em poucos instantes, possibilitando a obtenção de soluções próximas

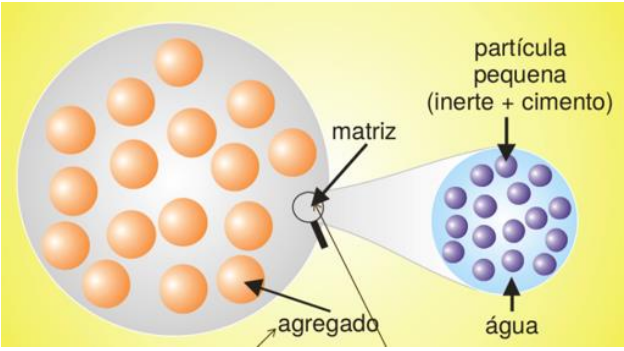
do ótimo global. Contudo, a otimização computacional está fundamentada em modelos que relacionem as propriedades do concreto e as variáveis de dosagem e que reflitam o observado experimentalmente.

Dessa maneira, um modelo bem definido, validado experimentalmente, que relacione as variáveis de dosagem com o abatimento do tronco de cone do concreto é fundamental para a aplicação da otimização computacional.

2.4 Modelos físicos do concreto

Para entender diferente fluidez apresentada por concretos distintos, pesquisadores desenvolveram teorias relacionando os fenômenos físicos que ocorrem no sistema particulado com o resultado macroscópico do movimento desse fluido (FLATT, 2004; PILEGGI, 2001; POWERS, 1968). O concreto é um fluido multifásico, constituído pela água e por partículas sólidas com uma ampla distribuição de tamanhos. Um modelo físico simples da microestrutura do concreto o divide em duas fases: a matriz e os agregados, conforme mostrado esquematicamente na Figura 17. A matriz, ou pasta, contempla a água e as partículas pequenas – menores que 100µm – incluindo o cimento, materiais suplementares cimentícios, fíleres inertes e a fração fina da areia. Já os agregados constituem-se das partículas maiores que 100µm, como as britas e as areias (POWERS, 1968).

Figura 17 – Representação esquemática das fases do concreto segundo o modelo bifásico: o agregado (compreende as partículas maiores que 100µm) e a matriz (consiste nas partículas menores que 100µm e a água)



Fonte: Pileggi, 2015

As forças que afetam o comportamento de todas as partículas no concreto são a gravidade, a inércia, o arrasto viscoso, a dispersão (Van der Walls), a eletrostática e a browniana. Ao calcular estas forças para as diferentes partículas – agregado graúdo, areia, cimento e microssílica – percebe-se que, sobre as partículas finas, as forças

predominantes são a dispersão, a eletrostática e a browniana. Já nas partículas grossas são o arraste viscoso, a inércia e a gravidade. Nas dimensões intermediárias, a gravidade e a dispersão têm um efeito relevante, porém nenhuma força é desprezível, gerando assim fenômenos complexos, sem uma única força preponderante (FLATT, 2004; PILEGGI, 2001).

Em síntese, as forças predominantes na matriz, nas partículas finas, são as forças superficiais, enquanto nos agregados, nas partículas grossas, as forças mais relevantes são as mássicas. Assim, define-se o diâmetro de 100μm como a fronteira entre partícula fina e grossa, pois esse diâmetro está na região da transição entre o predomínio de cada tipo de força (FLATT, 2004; PILEGGI, 2001; POWERS, 1968).

Isto posto, a fluidez do concreto está relacionada a dois fatores: o volume da pasta cimentícia em excesso – além da quantidade necessária para preencher os vazios dos agregados – e a consistência da própria pasta (POWERS, 1968).

Antes de serem molhados, os grãos dos agregados secos estão em contato entre si, com a porosidade determinada pelo seu empacotamento de partículas. Conforme se adiciona a pasta a este sistema, a área superficial dos grãos é recoberta e os vazios são completados. Durante este processo, a distância entre as partículas se mantém zero, pois elas ainda estão se tocando. Com todos os vazios preenchidos, o fluido adicional inicia o afastamento das partículas e o sistema começa a apresentar mobilidade. Tal fenômeno ocorre da mesma maneira na pasta, no qual o fluido é a água e as partículas finas são os grãos separados pela água (DAMINELI, 2013; POWERS, 1968; VOGT, 2010).

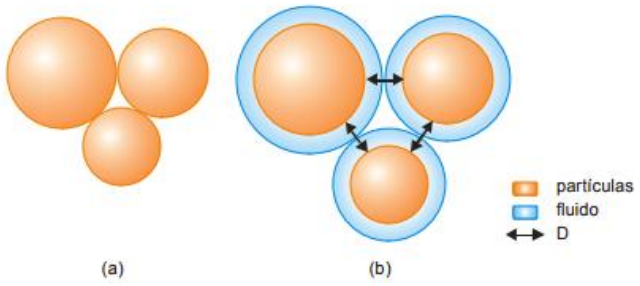
Neste trabalho, é utilizado o conceito de distância de separação entre duas partículas, para descrever parte do fenômeno da mobilidade. Esta distância é avaliada separadamente para cada fase: a matriz, que contém as partículas finas, e os agregados, que consiste nas partículas grossas.

Nos tópicos seguintes, apresentar-se-ão conceitos chaves para a compreensão dos modelos físicos utilizados para descrever o comportamento reológico e, mais especificamente, o abatimento do tronco de cone do concreto.

2.4.1 *Distância de separação entre duas partículas*

Define-se a distância de separação entre partículas como distância média entre as superfícies externas de duas partículas adjacentes quaisquer na mistura, admitindo que todas as partículas são esféricas e entidades separadas, ou seja, que não existem aglomerados, representada na Figura 18 por D (FUNK; DINGER, 1994).

Figura 18 – Representação esquemática do conceito de distância média de separação entre partículas: (a) partículas em contato sem nenhum fluido, à esquerda (b) partículas separadas pelo fluido, à direita



Fonte: Pileggi, 2001

Ao aplicar este conceito de distância entre partículas no concreto, a premissa que não há aglomerados é discutida, devido às forças de atração entre as partículas. Flatt (2004) argumenta que há um problema de aglomeração nos modelos que separam partículas e matriz, chamado “abordagem da homogeneização”. Isto porque, como as partículas podem se aglomerar, elas não estariam mais na fração granulométrica esperada e acarretaria uma imprecisão no cálculo das distâncias entre partículas, que consequentemente comprometeriam as conclusões alcançadas. Porém, esses aglomerados se desfazem com o uso de aditivos e ao serem cisalhados com uma determinada energia. Isto posto, deve-se validar esta premissa ao utilizá-la.

Funk e Dinger (1994) apresentaram um modelo para cálculo da distância média entre partículas (variável D na Figura 18) em suspensões, chamado IPS (Interparticle Separation Distance), descrito pela eq.(6). O modelo do IPS divide o fluido em duas categorias: a parte que preenche os vazios entre partículas e a parte que separa as partículas. De posse da porosidade do empacotamento das partículas, é possível conhecer o volume de fluido necessário para encher estes poros. A parte do fluido que separa as partículas é calculada distribuindo o fluido restante igualmente entre a

superfície de todas as partículas. Feito isso, a distância média entre as partículas é duas vezes a espessura do fluido que as recobre, pois há uma camada de fluido para cada partícula adjacente (Figura 18).

$$IPS = \frac{2}{VSA}\left[\frac{1}{Vsol} - \left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right)\right] \quad (6)$$

$IPS = distância\ de\ separação\ entre\ partículas\ (\mu m)$

$VSA = área\ superficial\ volumétrica\ (m^2/cm^3)$

$V_{sol} = fração\ volumétrica\ de\ sólidos\ finos$

$\varepsilon = porosidade\ do\ empacotamento\ dos\ finos$

$$VSA = SSA\ \rho_{sol} \quad (7)$$

$SSA = área\ superficial\ específica\ (m^2/g)$

$\rho_{sol} = densidade\ do\ sólido\ (g/m^3)$

Em um concreto, o IPS se aplica à pasta, na qual as partículas são as partículas finas e o fluido que as afasta é a água. O IPS afeta o comportamento reológico da suspensão, pois a água precisa recobrir a superfície das partículas, preencher os vazios e espaçar as partículas. O espaço entre as partículas é o que vai permitir que a suspensão concentrada flua. Verifica-se, assim, que quanto maior o IPS, menor é a viscosidade da suspensão (FLATT, 2004; PILEGGI, 2001).

O IPS mostra que os fatores que afetam o comportamento reológico englobam a distribuição granulométrica, ou seja, a fração volumétrica de sólidos e a fração de poros no sistema, bem como a morfologia das partículas, refletida na área superficial volumétrica, e o volume de água. Quanto menor a porosidade do empacotamento, maior é o IPS e, dessa forma, menor é a sua resistência ao movimento. E ainda, quanto mais porosas e mais finas forem as partículas, representando maior área superficial volumétrica, menor será o IPS e maior sua viscosidade.

Um ponto interessante é que o IPS é avaliado em volume, apesar dos materiais serem quantificados em massa. Isso se dá porque o estudo de empacotamento é um problema espacial e as massas por si só não são relevantes, pois o que impacta as propriedades de porosidade do empacotamento são os volumes.

Já para calcular a distância média entre as partículas (variável D na Figura 18) grossas, ou seja, o agregado, no qual o fluido que o separa é a pasta, utiliza-se o MPT (Maximum Paste Thickness), que é uma adaptação da equação do IPS, descrito pela eq.(8) (PILEGGI, 2001).

$$MPT = \frac{2}{VSA_g}\left[\frac{1}{Vsolg} - \left(\frac{1}{1-\varepsilon_g}\right)\right] \quad (8)$$

$MPT = espessura\ máxima\ da\ pasta\ (\mu m)$

$VSA = área\ superficial\ volumétrica\ dos\ grossos\ (m^2/cm^3)$

$V_{solg} = fração\ volumétrica\ de\ sólidos\ dos\ grossos$

$\varepsilon_g = porosidade\ dos\ grossos$

A influência do MPT na viscosidade do concreto é análoga a do IPS na viscosidade da suspensão. Como a mobilidade está correlacionada com a distância entre partículas gerada pelo fluido, um projeto de concreto de alta eficiência de ligantes deve reduzir a porosidade, de forma a necessitar de menos fluido para atingir a mobilidade necessária (DAMINELI, 2013; PILEGGI, 2001; VOGT, 2010).

Existem outros métodos para calcular a distância entre partículas, por exemplo, Arora e colaboradores (2018) o fazem através de seu modelo de empacotamento estocástico. Nesse caso, a alocação das partículas no volume de controle é realizada até a fração de sólidos da pasta. Ou seja, toma-se a fração volumétrica de sólidos de um concreto, e esta fração é preenchida aleatoriamente com grãos provenientes da distribuição granulométrica dos sólidos deste concreto no volume de controle. Por fim, a distância média de todas as partículas é calculada. Apesar deste modelo não ter sido testado neste estudo, é interessante conhecer outras abordagens adotadas por pesquisadores.

Neste trabalho, são utilizados o MPT e o IPS e busca-se entender como estes parâmetros podem descrever o comportamento reológico dos concretos. Um importante parâmetro utilizado na avaliação do MPT e do IPS é a porosidade do empacotamento das partículas, cujo cálculo pode ser feito por uma gama de modelos detalhados a seguir.

2.4.2 Empacotamento das partículas

Para compreensão do empacotamento das partículas, é necessário definir o conceito de porosidade do empacotamento. Vale mencionar que o estudo de empacotamento de partículas discorre acerca de materiais secos. A compacidade ou densidade de empacotamento é a proporção de sólidos contidos em certo volume de material granuloso. Por sua vez, a porosidade do empacotamento é o seu complemento, ou seja, a quantidade de vazios em um certo volume de material granuloso (eq.(11) e Figura 19) (DE LARRARD, 1999; POWERS, 1968).

$$\rho_{emp} = \frac{V_{sol}}{V_{tot}} \quad (9)$$

$\rho_{emp} = densidade\ de\ empacotamento$

$V_{sol} = volume\ de\ sólidos$

$V_{tot} = volume\ total$

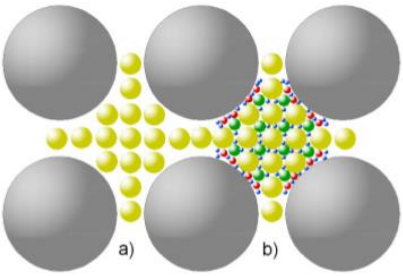
$$V_{ap} = \frac{1}{\rho_{emp}} \quad (10)$$

$V_{ap} = volume\ aparente$

$$\varepsilon = 1 - \rho_{emp} \quad (11)$$

$\varepsilon = porosidade$

Figura 19 – Empacotamento: (a) distribuição bimodal, com mais e maiores vazios, à esquerda (b) distribuição polimodal, com menos e menores vazios, à direita.



Fonte: Damineli, 2013

Uma forma de se avaliar a porosidade do empacotamento das partículas é experimentalmente. Analisam-se diversas misturas de diferentes agregados e cimento com diferentes teores. O ensaio é realizado para as misturas de materiais secos em um volume controlado e afere-se sua massa, obtendo-se assim sua quantidade de vazios baseado na densidade destes materiais. Vale pontuar que as proporções são volumétricas, uma vez que o empacotamento é um problema espacial, no qual os volumes de cada material são somados para atingir o volume definido. Com este

procedimento, encontra-se em qual composição aquele sistema atinge a menor porosidade do empacotamento, característica esta desejável para o distanciamento das partículas (POWERS, 1968). Entretanto, para o uso do método de dosagem por otimização computacional, é essencial ter um modelo descritivo desta propriedade baseado nas características e na proporção de cada material.

A porosidade do empacotamento do sistema depende basicamente de três fatores: a distribuição granulométrica, a morfologia dos grãos e o método de compactação (DE LARRARD, 1999).

Considerando partículas esféricas, todas do mesmo tamanho e com empacotamento ordenado, a porosidade pode atingir 26% (HALES, 2005). Já com um arranjo aleatório, a porosidade sobe para a faixa de 36 a 40% (FUNK; DINGER, 1994).

Alguns autores propuseram modelos para previsão da densidade de empacotamento de uma mistura. O modelo de Westman e Hugill utiliza o conceito de fração crítica, ou seja, a dominante. As partículas mais finas que a fração crítica se acomodam em seus vazios e não aumentam o volume ocupado pela mistura. As mais grossas, por seu turno, adicionam apenas seu volume de sólidos ao volume aparente. O modelo é apresentado na eq.(6) (WESTMAN; HUGILL, 1930).

$$V_{ai} = a_i\, x_i + \sum_{j=1}^{i-1} x_j \quad (12)$$

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

$x_i = fração\ volumétrica\ da\ classe\ de\ tamanho\ i$

$V_{ai} = volume\ aparente\ com\ referência\ a\ classe\ i$

A priori, não se sabe qual é a fração crítica, assim, se calcula o volume aparente para todos os casos e, pela restrição de impenetrabilidade (o volume aparente da mistura é sempre maior ou igual o da fração dominante pura), o volume aparente real é o maior valor obtido.

Para o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), De Larrard (1999) define o conceito de densidade de empacotamento virtual, sendo esta a maior densidade possível de ser atingida pelo conjunto granular (eq.(13)). Para calcular essa densidade, ele também utiliza o conceito de fração dominante, adicionando, a esse modelo, efeitos de interação entre as partículas. Partículas menores não

necessariamente ocupam exatamente o vazio da fração crítica, podendo causar uma redução da porosidade do empacotamento dessa fração. Já partículas maiores geram um efeito de parede no empacotamento de partículas muito menores. Estas interferências são descritas através de modelos empíricos do coeficiente de efeito de afastamento (a_{ij}: eq.(14)) e coeficiente de efeito de parede (bij: eq.(15)).

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1-\sum_{j=1}^{i-1}[1-\beta_i-b_{ij}\beta_i(1-1/\beta_j)]\,x_j-\sum_{j=i+1}^{n}[1-a_{ij}\beta_i/\beta_j]x_j} \quad (13)$$

$\beta_i = densidade\ máxima\ de\ empacotamento\ virtual\ da\ classe\ i\ discreta$

$x_i = proporção\ volumétrica\ da\ classe\ i$

$\gamma_i = densidade\ em\ empacotamento\ da\ mistura\ para\ classe\ i$

$$a_{ij} = \sqrt{1-\left(1-\frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (14)$$

$$b_{ij} = 1-\left(1-\frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50} \quad (15)$$

$a_{ij} = coeficiente\ efeito\ de\ afastamento$

$b_{ij} = coeficiente\ efeito\ de\ de\ parede$

$d_i = diâmetro\ da\ partícula\ considerada$

$d_j = diâmetro\ da\ partícula\ que\ está\ causando\ a\ interferência$

Para considerar o processo de empacotamento, o autor introduz o índice escalar K (eq.(16)), que representa a eficiência do método para atingir a densidade de empacotamento virtual. Quanto maior a energia de compactação, maior é o valor de K.

$$K = \sum_{i=1}^{n}\frac{x_i/\beta_i}{1/\emptyset-1/\gamma_i} \quad (16)$$

$K = índice\ de\ compactação$

$\emptyset = densidade\ de\ empacotamento$

Apesar do modelo MEC considerar fenômenos físicos e ser mais complexo, ainda está baseado no empacotamento de monodispersões para prever o empacotamento de uma dispersão contínua, e dessa forma não apresenta grande evolução do modelo Westmann e Hugill (VOGT, 2010).

Arora e colaboradores (2018) e Sobolev e Amirjanov (2010) utilizam modelos de empacotamento estocásticos, em detrimento dos modelos determinísticos apresentado anteriormente. Estes modelos definem um volume tridimensional,

preenchendo-o com esferas de tamanhos aleatórios baseados nas probabilidades provenientes da distribuição granulométrica dos materiais constituintes.

O modelo utilizado neste trabalho foi o De Larrard (1999). Cumpre mencionar que o modelo de Westman e Hugill (1930) foi testado, porém, não apresentou bom ajuste ao conjunto de dados e os demais, embora não tenham sido testados nesta dissertação, merecem menção pois é interessante saber que existem essas outras abordagens.

O entendimento do modelo bifásico do concreto, em conjunto com a teoria do excesso de pasta, fundamenta os modelos fenomenológicos apresentados. A distância média entre partículas, associada à porosidade do empacotamento, é parte da questão de mobilidade, porém estes modelos ainda não foram correlacionados diretamente com o comportamento reológico do concreto. Dessa forma, se faz necessário vincular estes modelos ao comportamento reológico dos concretos, e, subsequentemente, ao abatimento do tronco de cone. Ademais, é prudente ter a ciência da natureza do concreto enquanto fluido e suas características típicas ao escoar, para se apreciar o resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone, tendo em vista suas restrições.

2.5 Comportamento reológico do concreto

2.5.1 Reologia aplicada a concreto

Do ponto de vista de aplicação, o concreto deve se manter fluido em seu estado fresco de maneira que o transporte, lançamento e moldagem sejam viáveis. A fluidez consiste rigorosamente no comportamento reológico do concreto, o qual pode ser avaliado pelo estudo da reologia. Esta ciência analisa a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento no escoamento dos materiais. Como os experimentos são realizado em reômetros, em diversas tensões de escoamento, alcança-se um entendimento mais completo do comportamento do concreto do que a simples análise do abatimento do tronco de cone, como é a prática na tecnologia do concreto (DE LARRARD, 1999).

Ainda que o ensaio utilizado para avaliação do comportamento reológico seja o abatimento do tronco de cone, como dito anteriormente, é importante conhecer os conceitos envolvidos no comportamento reológico do concreto para saber interpretar os resultados do abatimento do tronco de cone e ter ciência de suas limitações.

2.5.2 Modelos de comportamento reológico

Tadros (2010) e diversos outros autores definem conceitos e princípios básicos de reologia de suspensões necessários para o entendimento desse item, como tensão e taxa de cisalhamento, viscosidade plástica e aparente, lei de Newton da viscosidade, fluidos não newtonianos, comportamento dilatante e pseudoplástico, tixotropia, reopexia e interação entre partículas.

As pastas cimentícias podem apresentar tanto comportamento pseudoplástico quanto dilatante. A transição entre esses perfis depende do tamanho das partículas, viscosidade do fluido, densidade do cimento e magnitude das forças de Van der Walls. Desta maneira, o concreto fresco geralmente apresenta um comportamento não newtoniano, sendo os dois modelos mais utilizados para descrição do concreto o de Bingham e o de Herschel-Bulkley (NEHDI; RAHMAN, 2004; ROUSSEL et al, 2010).

2.5.2.1 Bingham

Para o fluido de Bingham, é necessário aplicar uma tensão de cisalhamento mínima para que ele comece a escoar, chamada de tensão de escoamento. Depois que o fluido inicia o escoamento, a relação entre a variação da taxa de deformação e a variação da tensão de cisalhamento é linear e pode ser descrita pela eq.(17) (TADROS, 2010).

$$\sigma = \sigma_\beta + \eta_{pl}\gamma' \quad (17)$$

$\sigma = tensão$

$\sigma_\beta = tensão\ de\ escoamento$

$\eta_{pl} = viscosidade\ plástica$

$\gamma' = taxa\ de\ deformação$

2.5.2.2 Herschel-Bulkley

O fluido de Herschel-Bulkley também apresenta a tensão de escoamento, porém, diferentemente do fluido de Bingham, após o início do escoamento, a relação entre a variação da taxa de deformação e a variação da tensão de cisalhamento é descrita por uma lei da potência, conforme eq.(18) (TADROS, 2010).

$$\sigma = \sigma_\beta + k\gamma'^{\eta} \quad (18)$$

$k = constante$

$\eta = constante$

No tocante ao tema da previsão da viscosidade e da tensão de escoamento de suspensões concentradas, em especial, de pastas cimentícias e concretos – descritos nos itens 2.5.3 e 2.5.4 –, diversos autores desenvolveram modelos que pautam a temática da construção de um modelo físico para previsão do comportamento reológico. Ressalte-se que as variáveis de entrada selecionadas, bem como as premissas assumidas por estes autores, enriquecem a perspectiva ao se elaborar um novo modelo físico para uso na operação de dosagem de concreto.

2.5.3 Viscosidade

A viscosidade dos concretos é regulada pela concentração da mistura, definida como a razão entre a proporção de materiais sólidos e a densidade de empacotamento (DE LARRARD; SEDRAN, 2002).

Para a previsão da viscosidade, há modelos tradicionais que relacionam a fração volumétrica de sólidos, a fração volumétrica de sólidos crítica suportada pela suspensão e a viscosidade intrínseca. Alguns destes modelos são apresentados no Quadro 2, reproduzido de Dörr, Sadiki e Mehdizadeh (2013). É interessante destacar que o primeiro modelo de viscosidade de suspensões diluídas em função da fração volumétrica de sólidos foi proposto por Einstein em 1906 e 1911, deduzindo uma solução analítica para a hidrodinâmica ao redor de uma esfera (MUELLER; LLEWELLIN; MADER, 2010). Porém, como esses modelos não levam em consideração propriedades dos materiais constituintes, eles necessitam de parâmetros ajustados experimentalmente para cada grupo de materiais.

Considerando essas limitações, Damineli e colaboradores (2016) propõem a modelagem da viscosidade baseada no Modelo de Interferência de Partículas. Este modelo é baseado em sub-suspensões, assumindo que uma partícula só interage com outras 10 vezes maiores e 10 vezes menores, e, além disso, utiliza um número adimensional que representa o tempo necessário para uma partícula percorrer uma distância considerando o escoamento de Stokes (DAMINELI et al, 2016; FARRIS, 1968).

Quadro 2- Equações de modelos preditivos de viscosidade.

Referência	Modelo
Krieger e Dougherty (1959)	$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{\varphi_T}\right)^{-[\eta]_1 \varphi_T}$
Mooney (1951)	$\eta_r = exp\left(\frac{[\eta]_1 \phi}{1 - \phi/\varphi_T}\right)$
Eilers (1941)	$\eta_r = \left[1 + \frac{1}{2}[\eta]_1 \left(\frac{\phi}{1 - \phi/\varphi_T}\right)\right]^2$
Quemada (1977)	$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{\varphi_T}\right)^{-2}$
Robinson (1949)	$\eta_r = 1 + [\eta]_1 \left(\frac{\phi}{1 - \phi/\varphi_T}\right)$
η_r = viscosidade relativa; $[\eta]$ = viscosidade intrínseca; ϕ = fração de sólidos ; φ_T = fração crítica de sólidos.	

Fonte: Dorr, Sadiki, Mehdizadeh, 2013

A viscosidade está relacionada a escoamentos em altas taxas de cisalhamento, desta maneira, é primordial para o lançamento por bombeamento do concreto. Por esta razão, é importante ter-se um modelo que descreva esta propriedade. Ademais, uma discriminação completa do comportamento reológico do material está intimamente ligada à definição precisa da viscosidade.

2.5.4 Tensão de escoamento

No tocante à tensão de escoamento, seu fenômeno gerador pode ser dividido em faixas de fração volumétrica de sólidos. Há uma fração volumétrica crítica abaixo da qual não há interação entre as partículas e, por isso, não há tensão de escoamento. A partir desse ponto e abaixo de uma fração volumétrica que provoque contatos diretos, a tensão de escoamento deve-se a forças de Van der Walls. Conforme a fração volumétrica aumenta, a tensão de escoamento passa a ser justificada pela rede de interações diretas e a fricção entre as partículas, fenômeno este que é influenciado pela distribuição granulométrica e pela porosidade do empacotamento (DE LARRARD; SEDRAN, 2002; ROUSSEL *et al.*, 2010).

Para a tensão de escoamento, Flatt e Bowen (2006) desenvolveram um modelo para suspensões concentradas que formam uma rede de partículas com ligações atrativas e testaram em dados de suspensão de alumina (eq.(19)).

$$\tau = m_1 \frac{\phi(\phi-\phi_0)^2}{\phi_{max}(\phi_{max-\phi})} \quad (19)$$

Onde

$\tau = tensão\ de\ escoamento$

$\phi = fração\ volumétrica\ de\ sólidos$

$\phi_{max} = fração\ de\ empacotamento\ máximo$

$\phi_0 = limite\ de\ percolação.$

A tensão de escoamento, ao contrário da viscosidade, está relacionada a baixas taxas de cisalhamento, e, dessa maneira, esta propriedade influi em operações com escoamentos mais brandos, como o lançamento e a moldagem manual. A definição deste parâmetro também é fundamental para a completa descrição do comportamento reológico do concreto.

Estes modelos apresentados são importantes, não só pelas suas descrições determinísticas, mas também para o profundo entendimento dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento do concreto e pelas variáveis relevantes para a descrição do comportamento reológico do material.

Entendida a natureza complexa do escoamento do concreto, classificado usualmente como um fluido não-newtoniano, passar-se-á para a análise da relação de parâmetros do ensaio do abatimento do tronco de cone com os parâmetros reológicos.

2.5.5 O comportamento reológico medido pelo ensaio de abatimento do tronco de cone

Analisando o panorama histórico, a medição do comportamento reológico do concreto evoluiu da seguinte maneira: inicialmente, a propriedade era descrita qualitativamente, de forma comparativa, utilizando termos como “rígido”; com o invento do abatimento do tronco de cone, passou a ser medida por este ensaio monoponto e, posteriormente, pode ser definida rigorosamente com ensaios multipontos, com os reômetros (BANFILL, 2006).

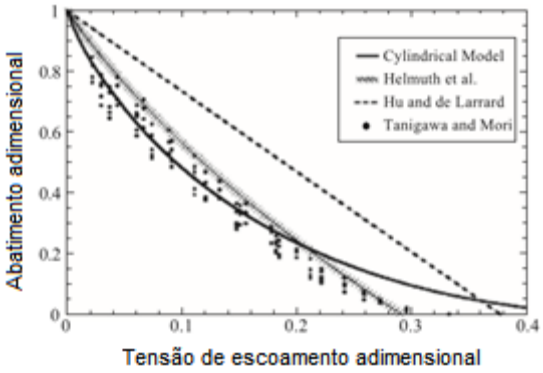
O ensaio monoponto apresenta um resultado parcial para fluidos complexos, pois suas respostas a taxas de cisalhamentos diferentes são distintas. Um ensaio monoponto só seria satisfatório para um fluido newtoniano sem tensão de

escoamento. Como normalmente este não é o caso do concreto, é impossível descrevê-lo por completo com um ensaio monoponto como o abatimento do tronco de cone (BANFILL, 2006). Na operação, opta-se por conviver com essa limitação do ensaio de abatimento do tronco de cone devido à grande diferença de custos ao compará-lo com equipamentos mais sofisticados como reômetros de concreto.

Isto posto, o abatimento do tronco de cone se correlaciona de maneira mais forte com a tensão de escoamento do que com a viscosidade. Tal correspondência é esperada, devido à baixa taxa de cisalhamento imposta pelo ensaio de abatimento do tronco de cone. Entretanto, a viscosidade é negligenciada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone e, por isso, usualmente é esta propriedade descrita qualitativamente, como concreto “pesado”, “coeso” e “chiclete”. Esta omissão afeta diretamente a operação de lançamento e moldagem do concreto, uma vez que a dificuldade de bombeamento e a formação de bolhas grosseiras na retirada da forma estão correlacionadas com a viscosidade (BANFILL, 2006; DE LARRARD; SEDRAN, 2002).

Diversos autores validaram esta relação entre o abatimento do tronco de cone e a tensão de cisalhamento e alguns criaram modelos para definir essa relação. Saak, Jennings e Shah (2004) usam um modelo baseado na geometria do cilindro, Helmuth e colaboradores (1995) e Murata (1984) utilizam um balanço de forças envolvidas no fenômeno de escoamento durante o ensaio de abatimento do tronco de cone, Tanigawa e Mori (1989) e Larrard e colaboradores (1994) usaram o método dos elementos finitos para simular o escoamento no ensaio de abatimento do tronco de cone. A Figura 20 mostra a relação entre o abatimento do tronco de cone e a tensão de escoamento e sintetiza os modelos ajustados para esta relação. Os resultados obtidos pelos autores corroboram a teoria do escoamento no ensaio do tronco de cone, ambos indicando que o abatimento do tronco de cone está fortemente correlacionado com a tensão de escoamento.

Figura 20 – Modelos de relação entre abatimento do tronco de cone e tensão de escoamento.



Fonte: adaptado de Saak, Jennings, Shah (2004)

A análise do ensaio do abatimento do tronco de cone como ferramenta para avaliação do comportamento reológico explicita que há uma forte relação do seu resultado com a tensão de escoamento do concreto, contudo o ensaio não é capaz de mensurar a viscosidade do material. Assim sendo, atualmente na operação da central de concreto, se possui domínio sobre o desempenho do concreto no estado fresco para aplicações em baixas taxas de cisalhamento, porém, em altas taxas, não há um controle quantitativo.

Ao utilizar qualquer método de dosagem, sobretudo métodos iterativos, que buscam uma solução ótima, é importante ter conhecimento das variáveis que podem ser manipuladas para ajustar o concreto. Assim, deve-se observar a influência de cada constituinte na mobilidade do material, possibilitando modificações na dosagem do concreto que incorra em otimização das formulações.

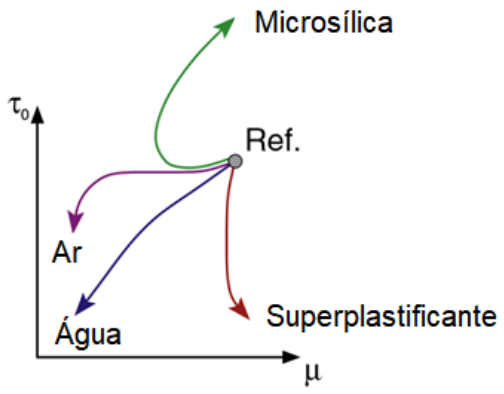
2.5.6 Influência dos constituintes no comportamento reológico

Para realizar melhorias incrementais ao ajustar a dosagem do concreto, é necessário entender o impacto de cada variável nas características do concreto. Ao discutir este assunto, deve-se ter em mente que concretos são sistemas complexos e normalmente a mudança de uma variável afeta outra(s) diretamente, portanto, a influência de uma variável apenas nas características do concreto é simplesmente um indicativo prático, sendo recomendada uma análise holística de cada sistema (TATTERSALL, 1991; WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

2.5.6.1 Teor de ar, água e aditivo superplastificante

Para avaliar o impacto do teor de ar incorporado, da quantidade de água e do uso de superplastificantes no concreto, faz-se uso do reograma, este gráfico apresenta justamente a influência na tensão de escoamento e na viscosidade do concreto (ou da argamassa) das mudanças em sua dosagem (Figura 21). A consequência do aumento do teor de ar incorporado é a redução da viscosidade, não apresentando um impacto relevante na tensão de escoamento. Já o aumento de água reduz ambas as propriedades reológicas (DE LARRARD; SEDRAN, 1994; JIAO *et al.*, 2017; TATTERSALL, 1991; WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

Figura 21 – Reograma ilustrando a influência do aumento nas quantidades de ar, água, superplastificante e microssílica.



Fonte: adaptado de Wallevik, Wallevik (2011)

O uso de aditivo superplastificante reduz a tensão de escoamento, porém, com pouco impacto na viscosidade do concreto. Isto ocorre, pois este aditivo tem um efeito de lubrificação – reduzindo a fricção entre as partículas – e de destruição de aglomerados de partículas (DE LARRARD; SEDRAN, 2002; WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

É interessante notar que, ao adicionar superplastificante na pasta, ocorre uma queda tanto da tensão de escoamento quanto da viscosidade, ao contrário do efeito apenas sobre a tensão de escoamento observado no concreto. Na pasta de cimento, a tixotropia, bem como a quebra da estrutura pelo aditivo, são mais pronunciadas que em concreto e argamassa, uma vez que as partículas maiores agem como dispersantes e rompedoras de aglomerados (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

2.5.6.2 Areia

Genericamente, a forma, a granulometria, a área específica e as contaminações da areia influenciam o comportamento reológico do concreto. No tocante à forma, os fatores mais significativos são o arredondamento e a esfericidade: quanto mais arredondadas e esféricas as partículas, menores a tensão de escoamento e a viscosidade. (HU; WANG, 2011; JIAO *et al.*, 2017; WALLEVIK; WALLEVIK, 2011; WESTERHOLM *et al.*, 2008).

A fração granulométrica menor que 125µm da areia impacta sobremodo o comportamento reológico do concreto. Quanto maior a fração mássica nesta faixa granulométrica e maior a área específica das partículas, maiores a tensão de escoamento e a viscosidade. Além disso, a adsorção dos aditivos superplastificantes nos contaminantes, como as argilominerais, afeta negativamente o comportamento reológico do concreto (CEPURITIS *et al.*, 2016, 2017).

Isto posto, é essencial considerar as características físicas da areia ao selecioná-la para a formulação, assim como sua potencial interação com os demais constituintes do concreto.

2.5.6.3 Agregados graúdos

As características dos agregados que mais impactam no comportamento reológico são a forma, a textura e a distribuição granulométrica. A forma arredondada e esférica reduz tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade. A textura rugosa, por sua vez, aumenta as duas referidas propriedades. A distribuição granulométrica ampla, em contraposição a agregados com um único tamanho, reduz a porosidade do empacotamento das partículas e, consequentemente, reduz a tensão de escoamento e a viscosidade. Esta é a razão para que uma dimensão máxima dos agregados mais alta seja favorável ao comportamento reológico, pois, ao inserir mais uma fração na distribuição granulométrica total do agregados, esta distribuição se torna mais ampla, o que tende a reduzir a porosidade do empacotamento (BOUQUETY *et al.*, 2007; ERDOĞAN *et al.*, 2008; HU; WANG, 2011; JIAO *et al.*, 2017). Logo, assim como para as areias, as características físicas dos agregados graúdos, somadas à dimensão máxima especificada, influem vigorosamente no comportamento reológico do concreto.

A discussão sobre o comportamento reológico e os modelos físicos para previsão destas propriedades tem como finalidade subsidiar o emprego da otimização computacional como método de dosagem nas centrais de concreto e, dessa maneira, aprimorar a eficiência do uso dos ligantes nas formulações de concreto utilizadas nestas operações. Naturalmente, esta estratégia implicará em uma redução do volume de pasta, pois a diminuição do teor de ligantes em um concreto que visa atender as mesmas especificações, passa pela concomitante redução da quantidade de água.

A avaliação dos impactos da redução da pasta no estado fresco já foi debatida exaustivamente neste trabalho, porém ainda não foram considerados os impactos no estado endurecido, análise esta de extrema importância, visto que, um dos possíveis impactos seria na evolução da resistência à compressão, propriedade primordial para o alcance da conformidade do concreto.

2.6 Efeito do volume de pasta na resistência à compressão

Para entender o efeito do volume de pasta na resistência à compressão, é mister o trabalho clássico de Abrams (1918), o qual testou diferentes agregados, consistências e proporcionamentos e todos apresentaram relação entre a razão água/cimento e a resistência. Foram avaliados concretos com relação a/c entre 0,4 e 3,7, e o volume de pasta não influenciava a resistência do concreto.

Contudo, para relações a/c abaixo de 0,4, o volume de pasta passa a ser impactante na resistência à compressão. Nota-se que dada uma razão água/cimento, o menor volume de pasta incorre em uma maior resistência. Este fenômeno pode ser atribuído à absorção de água na superfície do agregado, o que reduz a verdadeira relação a/c e o tamanho da zona de transição. Além da influência na resistência à compressão, a diminuição do volume de pasta reduz ainda a absorção de água e a retração do concreto (KOLIAS; GEORGIOU, 2005; KWAN; LING, 2015; PIASTA; ZARZYCKI, 2017).

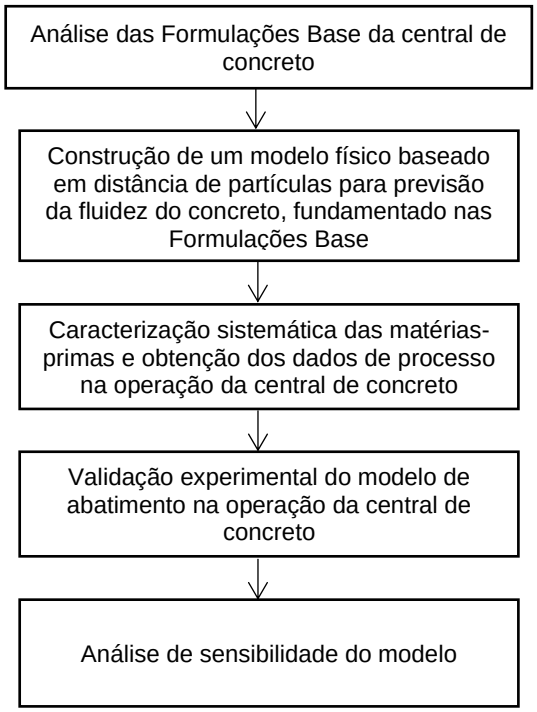
Concluída a revisão do estado da arte no que diz respeito à produção do concreto, ao impacto ambiental deste material, dos modelos físicos para previsão do comportamento reológico e às propriedades mecânicas, olha-se para materiais e métodos, seção que descreve a metodologia adotada em busca de oportunidades de melhorias, tirando proveito destes conceitos estudados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho procura atingir o objetivo proposto de desenvolver um modelo para previsão da fluidez do concreto medida pelo abatimento do tronco de cone, no contexto de uma central de concreto. Com este fim, elegeu-se especificamente uma central dosadora de concreto em São Paulo, cuja operação sucede conforme descrito no item 2.1 da Revisão Bibliográfica, sobre a qual cumpre-se o estudo. Esta central, que se encontra em operação, conta com uma série raiz de formulações – desenvolvidas através do método de dosagem da otimização experimental – que consiste na essência de qualquer outra formulação que seja criada pelo laboratório da central e, por isso, são chamadas de Formulações Base.

Isto posto, a metodologia pode ser sintetizada em duas etapas prevalecentes: (1) a construção do modelo físico de previsão da fluidez, a partir das Formulações Base desta central, e (2) a validação experimental deste modelo, fundamentada no processo de dosagem na operação da central. Ainda, por fim, é feita uma análise de sensibilidade do modelo validado, frente a variações de dosagem e de matérias-primas. Esta metodologia é apresentada esquematicamente na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma que descreve as etapas principais da metodologia adotada neste trabalho



Fonte: própria autora

3.1 Análise das Formulações Base

Para iniciar a compreensão sobre os concretos da central estudada, foram obtidas suas Formulações Base, as quais foram desenvolvidas previamente no laboratório pela equipe da central em 2016 e 2017, através do método de dosagem de otimização experimental. Estas são ajustadas por meio de experimentos ao longo do tempo, quando se percebe variações relevantes nas matérias-primas ou nos concretos dosados na central.

Para uma formulação de concreto, são definidas pelo menos os seguintes parâmetros, que compõem a especificação do concreto:

- Dimensão máxima do agregado;
- Abatimento do tronco de cone;
- Resistência à compressão em 28 dias.

A central dosadora de concreto avaliada dispõe de 60 Formulações Base para cada conjunto de matérias-primas constituinte, cujos concretos possuem resistência característica à compressão variando de 20 a 40MPa, abatimento do tronco de cone de 90 a 200mm e dimensão máxima 19mm (Brita 19mm) ou 9,5mm (Brita 9,5mm). Durante o período de aquisição de dados desta pesquisa foram empregados dois

conjuntos de materiais nesta central, portanto, a central conta com 120 formulações base.

Para clarificar a percepção das Formulações Base, a Tabela 1 exemplifica a especificação de um concreto, e ainda a Tabela 2 mostra a formulação em si. Este concreto é apresentado individualmente nesta seção, porém, as 120 formulações são representadas em detalhe no Apêndice, na Tabela 21.

Tabela 1 – Especificação de um concreto dentre as 120 Formulações Base

Especificação do concreto	
Resistência característica à Compressão (MPa)	30
Abatimento (mm)	100
Dimensão máxima do agregado	19mm

Tabela 2 – Formulação do concreto pertencente as Formulações Base especificado na Tabela 1

Formulação do Concreto	
Consumo de água (l/m^3)	178
Consumo de cimento (kg/m^3)	272
Brita 19mm (kg/m^3)	917
Brita 9,5mm (kg/m^3)	188
Areia Natural (kg/m^3)	439
Areia Britada (kg/m^3)	362
Teor de aditivo[1]	0,75%
Teor volumétrico de ar incorporado	2,0%

[1]Teor de aditivo em massa sobre a massa do cimento

Como mencionado previamente, a referida central utilizou dois conjuntos de matérias-primas em 2016 e 2017, cuja natureza dos agregados britados (miúdos e graúdos) é distinta. A Tabela 3 descreve cada um dos conjuntos, que foram nomeados Conjunto de Materiais 1 e Conjunto de Materiais 2, coletados e caracterizados em 2017. As 60 formulações projetadas para o Conjunto de Materiais 1 chamou-se de Conjunto de Formulações 1, e de Conjunto de Formulações 2 as demais 60 formulações feitas para o Conjunto de Materiais 2.

Tabela 3 – Conjunto de Materiais empregados na central durante o período de estudo das Formulações Base: agregados britados graníticos e calcíticos

Conjunto de Materiais 1	Conjunto de Materiais 2
Brita 19mm granítica	Brita 19mm calcítica
Brita 9,5mm granítica	Brita 9,5mm calcítica
Areia britada granítica	Areia britada calcítica
Areia natural quartzosa	Areia natural quartzosa
Cimento CP-V-ARI-RS	Cimento CP-V-ARI-RS
Aditivo polifuncional	Aditivo polifuncional

De posse das 120 Formulações Base, calculou-se a intensidade de ligante de cada concreto, através da eq.(1), mostrada na Revisão Bibliográfica. Analisaram-se assim os resultados para entender e avaliar as estratégias adotadas pela dosagem atual, assim como apreciar a ecoeficiência das formulações.

A fim de elucidar as tendências observadas e desenvolver o modelo de previsão da fluidez dos concretos desta central, tomaram-se os modelos físicos de distância entre partículas e de empacotamento. O primeiro passo para a construção do modelo passou por uma investigação da relação do abatimento do tronco de cone especificado com os parâmetros de porosidade do empacotamento e distância entre partículas dos concretos para entender a influência de cada um destes parâmetros no abatimento do tronco de cone especificado e como eles deveriam ser utilizados como variáveis de entrada no modelo.

Neste estudo, a porosidade foi calculada pelo Modelo de Empacotamento Compressível, eq. (13), e as distâncias entre partículas (IPS e MPT) pelas eq. (6) e (8), apresentados na Revisão Bibliográfica. Para avaliação do IPS e do MPT, as partículas são divididas em partículas finas e grossas pelo limite de 100µm, ou seja, as partículas finas são menores que 100µm e as grossas maiores que este valor. É importante destacar que para o emprego destes modelos físicos, fazem-se necessárias as caracterizações das matérias-primas apresentadas na seção 3.2.

3.2 Caracterização das matérias-primas

A central de concreto estudada realiza a caracterização dos agregados através dos ensaios preconizados pela ABNT NBR 7211, com frequência definida internamente como mensal ou caso haja alguma mudança ou anomalia na matéria-prima neste

intervalo. Ademais, se solicitada, a caracterização do cimento é informada pelo fabricante a cada lote recebido (ABNT, 2009a).

A fim de se avaliarem os parâmetros da porosidade do empacotamento e da distância média entre partículas, são necessárias três propriedades de cada material: a distribuição granulométrica, a densidade e a área superficial específica. Estas propriedades são combinadas para cada fase do concreto – a pasta contemplando as partículas menores que 100µm e os agregados, com as partículas maiores – a partir da sua formulação.

Para avaliação da granulometria dos agregados na central, é empregado o peneiramento. Apesar de esta técnica permitir o controle de variações acentuadas das matérias-primas, para o estudo do empacotamento das partículas, é necessária uma técnica mais precisa, como a análise de imagem dinâmica – que avalia diversos tamanhos de partículas dentro de cada intervalo entre peneiras, além de analisar a forma de cada partícula, permitindo diferentes métodos de cálculo do tamanho de partículas irregulares. No que tange à granulometria dos finos, o cenário é ainda mais crítico, pois a caracterização do cimento limita-se a determinar um limite superior de granulometria, especificando que apenas um percentual pode ficar retido na peneira com abertura de 45µm e, da mesma forma, os finos dos agregados são baseados somente na peneira com abertura de 75µm. Logo, não se conhece a distribuição granulométrica dos finos e, para este fim, neste estudo, aplicou-se a técnica de granulometria a laser.

Com intuito de mensurar a densidade, usualmente na central é empregada a picnometria por água. Embora seja vantajoso considerar apenas os poros acessíveis à própria água na superfície das partículas – uma vez que este é o fluido utilizado no concreto –, especialmente os materiais finos tendem a formar aglomerados que impedem a água de molhar todos os grãos, incorrendo em erros nesta técnica. Já a picnometria por gás Hélio é mais precisa, na medida em que esta aglomeração não compromete o fluxo do gás, portanto esta foi a técnica escolhida para este trabalho.

Por fim, para a área superficial específica, não há nenhum ensaio executado na central e tampouco na área de concretos comparável ao BET, dessarte esta foi a técnica selecionada para tal. Cumpre ressaltar que o ensaio de área superficial específica BET é executado apenas para as partículas finas, menores que 106µm, pois este

ensaio não é adequado para as partículas grossas nas condições disponíveis, tanto com relação ao pequeno tamanho da amostra quanto do adsorbato incompatível com a baixa área que se deseja medir. À vista disso, para as últimas, a área superficial específica foi calculada a partir da distribuição de tamanho de partículas obtida pela análise de imagem dinâmica, considerando as partículas como esferas.

Em síntese, foram realizadas as seguintes caracterizações no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência – USP e no Laboratório de Caracterização Tecnológica – USP:

- Agregados
    - Granulometria por Análise de Imagem Dinâmica: Equipamento Camsizer (Retsch) para Brita 19mm e Qicpic (Sympatec) para demais agregados;
    - Densidade por Picnometria a gás Hélio: Equipamento Multipycnometer (Quantachrome);
    - Área superficial por adsorção de gás nitrogênio pela teoria BET: Equipamento Belsorp (Bel Japan) para finos dos agregados.
- Finos
    - Granulometria a laser: Equipamento Helos (Sympatec);
    - Densidade por Picnometria: Equipamento Multipycnometer (Quantachrome);
    - Área superficial por adsorção de gás nitrogênio pela teoria BET: Equipamento Belsorp (Bel Japan).

Nos itens seguintes, são apresentadas as técnicas de caracterização selecionadas e seus princípios de funcionamento, assim como as premissas e os procedimentos adotados.

3.2.1 Densidade – Picnometria

A picnometria de gás Hélio determina a densidade de uma amostra através da comparação da pressão exercida pelo gás Hélio em um recipiente fechado com a amostra e outro de referência. Assim, determina-se o volume real da amostra, considerando os poros acessíveis ao gás nas partículas. Pesando-se a amostra, calcula-se a densidade (NUNES, 2017).

A densidade foi obtida através do picnômetro de gás hélio, modelo Multipicnometer Quantachrome MVP 5DC. Para a realização do ensaio, foram utilizadas as amostras secas entre 5 g e 120 g, dependendo do material. O ensaio foi realizado com cinco repetições e foi calculado o valor médio da densidade do material fundamentado na lei de Boyle.

3.2.2 Distribuição granulométrica

3.2.2.1 Granulometria a laser

A granulometria a laser determina a distribuição granulométrica de materiais finos. O princípio da técnica é lançar um feixe de laser na amostra e medir a variação angular da luz que difrata nas partículas. Com base na teoria da difusão, é possível correlacionar o padrão de dispersão da amostra com o diâmetro de suas partículas (MALVERN, 2017).

As distribuições granulométricas dos finos foram determinadas com uso do granulômetro a laser, marca Helos, da marca Sympatec, com dispersão à água, que detecta grãos abaixo da ordem de 355µm. Entre 20 mg e 40 mg de amostra de cada fino foi adicionada a 50 ml de água e a mistura foi mantida em agitação mecânica por meio de um misturador a 1000 rpm durante 1 minuto. A suspensão foi alimentada no equipamento e mantida por 2 minutos em agitação com ultrassom (para buscar a desaglomeração dos finos).

Desta maneira, é possível obter a distribuição granulométrica das partículas finas. É importante frisar que todas as amostras foram analisadas em duplicata e o resultado consistiu em sua média.

3.2.2.2 Análise de Imagem Dinâmica (AID)

A análise de imagem dinâmica é feita através do movimento da amostra em frente de lentes de câmeras digitais que captam suas imagens projetadas por uma fonte de luz. O movimento pode ser gerado por gravidade ou fluxo de um fluido carreador.

A análise permite o cálculo de parâmetros geométricos e da distribuição granulométrica da amostra. A distribuição granulométrica por partículas é feita por contagem, já por volume, o volume de cada partícula é estimado baseado nas dimensões capturadas para cada partícula. Para a distribuição granulométrica, pode-se escolher diversos diâmetros característicos como Martin mínimo, corda mínima e

Feret máximo, EQPC (*Circle of equal projection area*) e BRmin. Neste estudo, foi utilizado o diâmetro EQPC, que consiste no diâmetro de um círculo que tenha a mesma área que a área projetada da partícula, e é muito utilizado para partículas que não são esféricas (eq.(20)).

$$x_{EQPC} = 2\sqrt{A/_{\pi}} \quad (20)$$

$A = área\ projetada\ da\ partícula$

$x_{EQPC} = diâmetro\ EQPC$

Além da distribuição granulométrica, é possível calcular a área volumétrica granulométrica, baseada nesse diâmetro (eq.(21)). Com esse resultado, é possível calcular a área superficial volumétrica utilizada no cálculo do MPT, bem como o Fator de Forma (eq.(22)), uma relação entre a área volumétrica BET e a área volumétrica granulométrica. Esse fator indica quão distante a área superficial real das partículas está da área teórica de esferas.

$$VSA_{gran} = \sum_{i=0}^{n} A_i/V_i \ \ x_i \quad (21)$$

$VSA_{gran} = área\ volumétrica\ granulométrica$

$A_i = área\ de\ esfera\ da\ fração\ de\ diâmetro\ i$

$V_i = volume\ da\ esfera\ da\ fração\ de\ diâmetro\ i$

$x_i = fração\ volumétrica\ das\ partículas\ de\ diâmetro\ i$

$$FF = VSA_{BET}/VSA_{gran} \quad (22)$$

$FF = fator\ de\ forma$

$VSA_{BET} = área\ volumétrica\ BET$

$VSA_{gran} = área\ volumétrica\ granulométrica$

A análise de imagem dinâmica foi utilizada para agregados com dispersão a seco. É tomada uma amostra que contenha o número suficiente de partículas para o cálculo da granulometria, deste modo, esta quantidade varia entre aproximadamente 100g para a areia natural e 1.000 g para as britas. Para saber o número suficiente de partículas, foram feitos testes preliminares com diferentes tamanhos de amostra de

cada material até atingir a quantidade mínima de amostra que não apresentava desvios relevantes das amostras maiores.

É importante ressaltar que os equipamentos disponíveis não contam com uma detecção precisa na faixa dos finos (embora a resolução da lente seja 1 pixel=10 micra, partículas com poucos pixels perdem precisão), dessa maneira, optou-se por peneirar as areias na malha 106µm e analisar os finos por granulometria a laser. A composição da granulometria do material é gerada através de uma média das distribuições dos tamanhos de partícula ponderada pela massa de cada fração, considerando que as densidades de ambas as frações possuem o mesmo valor.

3.2.3 Área específica – BET

A superfície de uma partícula real não é lisa, ela contém poros, que influenciam em sua interação com o meio, por exemplo, com a água em uma suspensão concentrada. O estudo da superfície de uma partícula pode ser feito através da análise do processo isotérmico de adsorção de gás na superfície, analisando-se a variação do volume em função da pressão parcial do gás. A teoria de Langmuir considera que o gás forma apenas uma camada de moléculas sobre o sólido, descrevendo bem a absorção química, mas não tão bem em relação à física. Assim, a teoria BET propôs um conceito de multicamadas e uma função que descreve o fenômeno para o volume em função da pressão parcial. Baseado nesta teoria, e na área ocupada pela molécula do absorbato, a área superficial das partículas de um material pode ser calculada. O absorbato utilizado, e o mais comum nos experimentos de área superficial, foi o N_2, sua área projetada é 16,2 $Å^2$ e o experimento é realizado à temperatura de 77K (WEBB; ORR; MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION, 1997).

Para realização do ensaio, as amostras de areia foram classificadas em peneira com abertura de 106µm, e foram tomados aproximadamente 2g dos finos, enquanto o cimento foi utilizado diretamente. Empregou-se um equipamento Belsorp Max, com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60°C e pressão de 10^{-2} KPa por 24 horas no equipamento Belprep vac-II para retirada da umidade e de outros gases adsorvidos. Na sequência, as amostras foram expostas a diferentes pressões de Nitrogênio gasoso (pureza 99,999%, Air Liquide) a 77K gerando isotermas de adsorção. Todas as amostras foram analisadas em duplicata e sua média calculada.

Neste ponto, é importante expor a metodologia utilizada para a análise da área específica BET das areias. Adotou-se a metodologia de peneiramento na malha 106µm e a análise BET apenas dos finos da areia, uma vez que a técnica de adsorção por nitrogênio é mais adequada para partículas finas.

Para apresentar a área superficial da areia por inteiro, tomou-se a hipótese de que o fator de forma de todas as frações da amostra é semelhante à dos finos. Assim, calculou-se o fator de forma dos finos, conforme eq. (22) e, considerando este fator para todas as frações, estimou-se a área superficial específica da areia.

Destaca-se, no entanto, que a área específica BET só foi utilizada ao calcular o IPS, ou seja, apenas para as partículas menores que 106 µm. Já para o cálculo do MPT, foi usada a área superficial granulométrica. Inicialmente, foi avaliada a possibilidade de utilizar a área específica BET para os grossos, entretanto as distâncias médias calculadas entre agregados (MPT) se mostraram da ordem de 2 a 5µm, valores muito baixos para separar grãos de até 19mm. Além da inconsistência física, os modelos atingiram correlações mais baixas empregando a área superficial BET dos agregados. Desta maneira, supôs-se que o uso da área superficial BET superestimou a área superficial dos grossos a ser molhada pela pasta, possivelmente devido a extrapolação a partir do fator de forma.

3.3 Construção de um modelo para previsão da fluidez baseado em distância entre partículas

À luz das análises das Formulações Base descritas no item 3.1, o objetivo desta etapa foi construir um modelo capaz de descrever o abatimento do tronco de cone através dos parâmetros de distância entre partículas e porosidade do empacotamento. Este desenvolvimento foi fundamentado especificamente nas Formulações Bases e nos modelos apresentados na seção 3.1, bem como nas técnicas de caracterização discutidas na seção 3.2.

A construção do modelo passa necessariamente pela identificação de quais variáveis são dependentes e quais são independentes no problema. As últimas consistem nas variáveis de entrada do modelo. No caso analisado, compõem-se, basicamente, da formulação do concreto e da caracterização da matéria-prima. São elas:

- Consumo de água (a);

- Consumo de cimento (c);
- Teor volumétrico de argamassa (arg);
- Proporção volumétrica entre agregados graúdos (b0);
- Proporção volumétrica entre agregados miúdos (af);
- Teor de aditivo (ad);
- Tipo das matérias-primas, descrito pela caracterização de cada material (t).

Já as variáveis dependentes, resumem-se àquelas que podem ser calculadas a partir das variáveis independentes, como os parâmetros intermediários e as variáveis de saída de fato. São elas:

- Abatimento do tronco de cone (s);
- MPT;
- IPS;
- Porosidade do empacotamento dos finos (ρ);
- Volume de sólidos dos finos (V_{sol});
- Área superficial específica dos finos (ASE);
- Porosidade do empacotamento dos grossos (ρ_g);
- Volume de sólidos dos grossos (V_{solg});
- Área superficial específica dos grossos (ASE_g).

Conforme os modelos apresentados na Revisão Bibliográfica:

$$MPT = f(\rho_g, V_{solg}, ASE_g) \quad (23)$$

$$IPS = f(\rho, V_{sol}, ASE) \quad (24)$$

$$\rho = f(c, arg, b0, af, t) \quad (25)$$

$$ASE = f(c, arg, b0, af, t) \quad (26)$$

$$V_s = f(a, c, arg, b0, af, t) \quad (27)$$

Ao avaliar as equações apresentadas, nota-se que a única variável dependente que não dispõe de um modelo para previsão é o abatimento do tronco de cone. Por isso, visa-se construir este modelo baseado em distância entre partículas na região experimental, ou seja, na equação que define o abatimento do tronco de cone (eq.

(28)) determinar a forma de f (por exemplo, linear ou exponencial) e estimar seus parâmetros (α).

$$s = f(MPT, IPS, \alpha) \quad (28)$$

Para construção do modelo e estimação dos parâmetros, foi utilizado o método dos mínimos quadrados, assumindo-se as seguintes hipóteses:

- Os erros das variáveis independentes são desprezíveis;
- A distribuição dos erros da variável dependente (abatimento) é conhecida e é fixa dentro da região experimental. Essa premissa é uma simplificação, pois o erro do abatimento do tronco de cone varia na região experimental, segundo a norma NBR 7212 (ABNT, 2012).

A fim de escolher o melhor modelo, foram testadas diversas formas de funções, dentre elas, linear, logarítmica e exponencial com distintos termos. Para avaliar a aderência do modelo aos dados, foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) entre o abatimento do tronco de cone especificado e o abatimento do tronco de cone estimado para o conjunto das formulações.

Ao ajustar o modelo, levou-se em conta que as Formulações Base estão divididas em dois grupos, cada um com 60 formulações: o Conjunto de Formulações 1 e o Conjunto de Formulações 2, dependendo dos agregados empregados. Cumpre-se ressaltar que, conforme amplamente discutido na Revisão Bibliográfica, as características das matérias-primas influem substancialmente no comportamento reológico. Assim sendo, infere-se que alcançar um modelo único que reflita o comportamento de ambos os conjuntos de formulações consiste em um desafio adicional.

Isto posto, optou-se por inicialmente buscar modelos que se ajustassem a cada Conjunto de Formulações individualmente. Esta estratégia consistiu em dividir o problema em dois: primeiro, foi resolvido apenas o tema das variações de proporcionamento entre os materiais na formulação; em seguida, inseriu-se as mudanças referente às características das matérias-primas. Assim, obteve-se um modelo único capaz de prever o abatimento do tronco de cone das Formulações Base em sua totalidade.

3.4 Validação do modelo para previsão da fluidez a partir dos concretos dosados na central de concreto

Após a construção do modelo a partir das Formulações Base, foram analisados os concretos dosados na operação da central de concreto durante dois meses (de 03/01/2018 a 28/02/2018) com intuito de validar o modelo criado.

Até esta etapa, o desenvolvimento foi fundamentado nas Formulações Base, obtidas através de experimentos realizados previamente (2016 a 2017) a este estudo, no laboratório da central. Em contrapartida, neste momento, a validação é feita na operação em si– conforme descrita no item 2.1 da Revisão Bibliográfica–, coletando os agregados das baias de matéria-prima, obtendo os dados de processo do sistema da central e o abatimento do tronco de cone anotado pelo motorista na nota fiscal na obra.

Ao investigar a operação da central, é possível obter uma quantidade significativa de dados referente aos concretos produzidos, englobando variações de dosagem e de características das matérias-primas e seus resultados nas propriedades reológicas dos concretos entregues na obra. Durante os dois meses estudados, foram dosados diversos concretos com formulações distintas das Formulações Base, assim como diferentes lotes de matérias-primas, uma vez que a central recebe diariamente ou, no máximo, a cada dois dias, novas remessas de agregados e cimento. Dessa maneira, a região experimental de validação do modelo é ampliada se comparada ao conjunto de dados a partir do qual este modelo foi concebido.

3.4.1 Amostragem e caracterização das matérias-primas

As características das matérias-primas, a saber, a área superficial específica, a densidade e a distribuição granulométrica, são o alicerce do modelo de abatimento do tronco de cone desenvolvido. Desta maneira, visou-se avaliar o impacto de seus desvios ao longo do tempo, neste caso em dois meses, no abatimento do tronco de cone modelado.

Com este fim, realizou-se a amostragem das matérias-primas na central em duas semanas específicas, uma em cada mês. Nestas semanas, as amostras de materiais foram coletadas em um intervalo de dois dias em suas pilhas, segundo a norma NBR NM 26 (ABNT, 2009b). O conjunto de materiais coletados consistiu em:

- Brita 19mm granítica;
- Brita 9,5mm granítica;
- Areia Britada granítica;
- Areia natural;
- Cimento.

Foram caracterizados cinco Conjuntos de Materiais pelos ensaios mencionados na seção 3.2: os M1D0 (17/01), M1D2 (22/01), M1D4 (24/01), M2D1 (19/02) e M2D3 (21/02). A nomenclatura utilizada para cada Conjunto de Materiais se refere ao mês de análise, após o M, e o dia da semana de coleta, após o D. Por exemplo, o Conjunto de Materiais M1D2 se refere ao conjunto coletado no segundo dia da semana de coleta do primeiro mês.

Com intuito de avaliar a variabilidade destes materiais, foram calculadas as médias amostrais das características de cada material ao longo do tempo, por exemplo, tomaram-se as cinco medidas de densidade do cimento referente às amostras dos dias distintos e calculou-se a média. Ademais, calculou-se também o intervalo de confiança com grau de confiança de 0,90.

Detalhando os conceitos, o intervalo de confiança comtempla os resultados que são considerados normais, enquanto o grau de confiança define a probabilidade de o intervalo definido conter a média populacional, no caso, 90%. O intervalo de confiança para um grau de confiança de 0,90, assumindo uma distribuição normal, para pequenas amostras é calculado pela eq.(29).

$$IC = \bar{X} \pm t_{(n-1,0,10)} \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (29)$$

Sendo:

$IC = intervalo\ de\ confiança$

$\bar{X} = média\ amostral$

$t = t\ da\ distribuição\ T\ de\ Student$

$s_x = desvio\ padrão\ amostral$

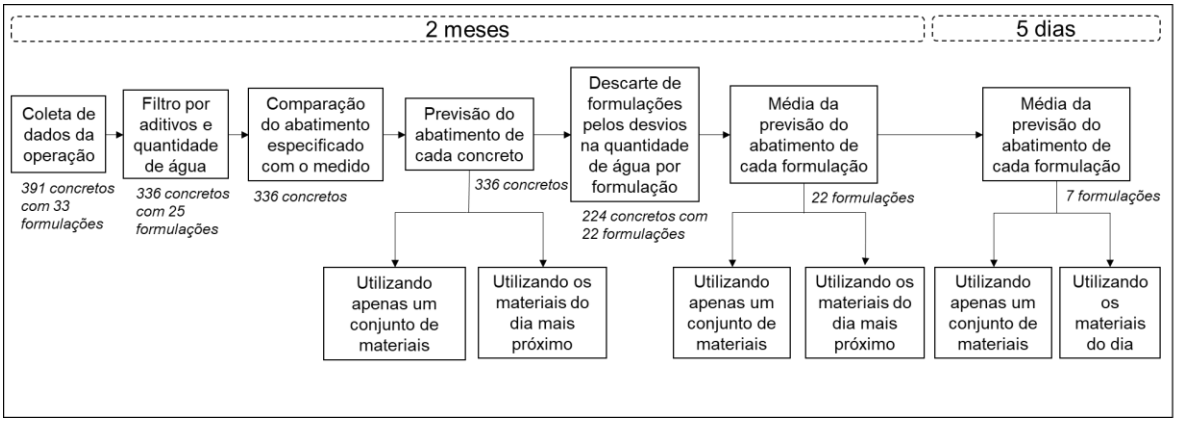
$n = número\ de\ amostras$

Esta análise estatística permitiu uma avaliação da variabilidade de cada matéria-prima, em seus distintos aspectos relevantes ao comportamento reológico do concreto. Ainda, com estes dados, pode-se avaliar o impacto de suas mudanças nos resultados do abatimento do tronco de cone modelado em comparação com o abatimento do tronco de cone medido na obra.

3.4.2 Obtenção e análise de dados de processo

Para a validação do modelo criado, foram obtidos os dados de processo da operação durante os dois meses de estudo desta central, a fim de entender se os resultados da operação poderiam ser descritos pelo modelo. Sabe-se que uma central de concreto entrega um volume muito grande de material, por isso, esta operação gera uma massa de dados relevante, neste trabalho, são utilizados 391 concretos. Muito embora a operação gere muitos dados, existe uma imprecisão nestas medidas, decorrente das variações do processo e dos próprios erros de medida. Dessa maneira, faz-se necessária a adoção de uma estratégia na qual a grande quantidade de dados seja capaz de compensar a imprecisão destes. A Figura 23 sintetiza a metodologia empregada nesta etapa.

Figura 23 – Fluxograma da obtenção e análise dos dados de processo da central de concreto durante o período de 2 meses a fim de validar o modelo de abatimento construído



Fonte: própria autora

Inicialmente, foram obtidos os dados de concretos dosados na central, que somaram 33 formulações especificadas e 391 concretos entregues. As propriedades levantadas foram:

- Especificação do concreto, em especial, o abatimento do tronco de cone especificado;
- Formulação especificada do concreto;

- Quantidade de água: a quantidade de água total é um somatório de todos os momentos que a água é adicionada ao concreto até sua aplicação:
    - Umidade dos agregados miúdos: o teor de umidade dos agregados miúdo é quantificado. É feito um cálculo de água adicionada ao concreto proporcionalmente à quantidade de agregado miúdo da formulação. Os agregados graúdos também apresentam umidade, porém, na operação, esta alíquota é considerada como de volume desprezível;
    - Balança no ponto de carga: extraído do sistema da central;
    - Hidrômetro na plataforma: Após a pesagem e a mistura inicial do concreto pelo caminhão betoneira em alta rotação, o motorista ajusta a consistência visualmente através da adição de água. O total adicionado é medido pelo hidrômetro e registrado pelo motorista na nota fiscal.
    - Hidrômetro da betoneira: Na obra, a consistência é ajustada através da adição de água da caixa do caminhão betoneira. O total adicionado é medido pelo hidrômetro e registrado pelo motorista na nota fiscal.
- Quantidade de cimento proveniente da balança do ponto de carga;
- Abatimento do tronco de cone medido na obra;
- Resistência à compressão a 7 e 28 dias de amostras coletadas e moldadas na obra segundo as normas NBR 5739 e NBR 5738 (ABNT, 2007, 2015b).

Os dados de formulação dos concretos foram filtrados no que diz respeito a tipos de aditivos e quantidade de água para que os concretos avaliados estivessem em coerência com as premissas do modelo. O modelo não considera o impacto do tipo de aditivo no comportamento reológico do concreto, por isso foram utilizados apenas os concretos dosados com o aditivo polifuncional, à base de lignosulfonato, o mesmo tipo de aditivo usado para a construção do modelo. Com este filtro, restaram 346 concretos. Além disso, foi definido o limite mínimo de 145l/m^3 para a quantidade de água abaixo da qual não é factível considerar um concreto plástico utilizando este aditivo, o que indica alguma falha na coleta de dados. Com isso, seguiu-se com 336 concretos de 25 diferentes formulações.

O primeiro passo para avaliar os dados coletados foi comparar o abatimento do tronco de cone especificado e o abatimento do tronco de cone medido na obra para a verificação da conformidade dos concretos, sem comparar ainda com os resultados

do modelo. Com os dados filtrados e as caracterizações dos materiais amostrados, explicitado no item 3.4.1, foi possível calcular o MPT e IPS dos concretos e estimar o abatimento do tronco de cone utilizando o modelo construído pelo método descrito no item 3.3.

No que tange aos resultados da caracterização das matérias-primas empregados no cálculo do abatimento do tronco de cone, foram utilizados dois métodos a fim de se investigar a sensibilidade do modelo à variação das características dos materiais:

1) Independentemente do dia que o concreto foi executado ao longo dos dois meses, empregaram-se os resultados de caracterização apenas do Conjunto de Materiais M1D0, nomeado “M1D0”, para o cálculo do seu abatimento do tronco de cone pelo modelo. Assim, todos os abatimentos previstos foram calculados utilizando os dados do mesmo conjunto de matérias-primas.
2) Observou-se o dia que o concreto foi executado e selecionou-se o resultado da caracterização do Conjunto de Materiais do dia mais próximo ao concreto avaliado, que foi chamado “DiaMaisProx”. Assim, foram usados os resultados das caracterizações dos cinco conjuntos de materiais para previsão do abatimento do tronco de cone dos concretos no período.

Ao usar apenas um conjunto de materiais, no cenário “M1D0”, avaliam-se as mudanças de proporcionamento isoladamente, enquanto ao utilizar o conjunto do dia mais próximo, se adiciona à análise as variações das características dos materiais. Cumpre ressaltar que, ao empregar o método “DiaMaisProx”, assume-se a hipótese de transição suave entre os lotes de matéria prima, pois os dados de processo foram levantados durante os dois meses de estudo ininterruptamente, enquanto as cinco caracterizações foram feitas em apenas duas semanas neste período. Desta maneira, o uso da caracterização do dia mais próximo, ainda que tenda a uma melhor representatividade das características dos materiais constituintes dos concretos em si, segue sendo uma aproximação. Isto posto, foi comparado o abatimento do tronco de cone estimado por ambos os métodos com o abatimento do tronco de cone medido em obra.

Na etapa seguinte, realizou-se uma avaliação por Formulações, em contraste à análise por concretos que havia sido feita até este momento. A estratégia adotada para compensar a imprecisão das medidas, através do uso da grande quantidade de

dados, foi agrupar todos os concretos com a mesma especificação e avaliar a média dos seus resultados de abatimento do tronco de cone. Assim, examinou-se a aderência da média dos resultados do modelo aos dados médios da operação, atenuando os efeitos das variações do processo e dos erros de medida. A análise, que inicialmente foi empreendida para os 336 concretos, foi sintetizada para 22 formulações especificadas.

Para aprofundar o estudo no que diz respeito aos conjuntos de materiais, tomaram-se apenas os dias nos quais os materiais foram caracterizados, ou seja, avaliou-se o conjunto de dados de processo somente dos cinco dias específicos, cuja caracterização dos materiais havia sido realizada, a fim de aumentar a representatividade da amostragem. Desse modo, comparou-se a média dos abatimentos estimados por formulação utilizando o Conjunto de Materiais M1D0 e usando o Conjunto de Materiais caracterizado exatamente no dia com a média dos abatimentos medidos por formulação referente a estes cinco dias.

3.4.3 Análise de sensibilidade do modelo

A fim de se avaliar o impacto de cada variável de entrada do modelo no abatimento do tronco de cone estimado, foi realizada uma análise de sensibilidade dos concretos cujos abatimentos estimados apresentaram maior erro. Esta análise foi executada em duas etapas: inicialmente, apreciou-se o efeito das variações de proporcionamento, estabelecendo o mesmo Conjunto de Materiais; em seguida, mantiveram-se as formulações fixas e investigou-se a influência da mudança dos Conjuntos de Materiais.

Para esta investigação, foram selecionadas quatro formulações de concreto, as quais apresentaram maior erro do abatimento do tronco de cone estimado. Escolheu-se o concreto mais próximo da média de cada formulação para este estudo. A análise de sensibilidade consistiu em substituir cada variável do modelo – volume de sólidos, área superficial e porosidade – pelo limite superior e inferior dos concretos da central e avaliar o impacto em percentual no abatimento do tronco de cone estimado para aquele concreto de referência.

No primeiro estágio, foi fixado o Conjunto de Materiais M1D0 e cada variável do modelo foi variada dentro do intervalo dos concretos dosados na central. Isto é, tomaram-se as maiores e as menores porosidades do empacotamento, áreas

superficiais específicas e volumes de sólidos tanto para as partículas grossas quanto para as finas dos concretos da central avaliados no período. Estas são as variáveis de dosagem que levam aos limites máximo e mínimo do abatimento do tronco de cone estimado, sendo nomeado o “limite superior” as mudanças nas variáveis que aumentam o abatimento do tronco de cone e “limite inferior” as que o reduzem ao máximo. Partiu-se da premissa de que se esta faixa foi atingida em concretos executados, ela é factível, e, assim, avaliou-se o impacto destas variáveis no abatimento do tronco de cone estimado.

Na fase seguinte, realizou-se a avaliação das variações dos materiais. Dos cinco Conjuntos de Materiais caracterizados, tomaram-se os materiais que levavam a maior e a menor distância de partículas e, desta forma, atingiram os limites superior e inferior de abatimento do tronco de cone. Calculou-se o abatimento do tronco de cone dos quatro concreto selecionados considerando estes materiais e, assim sendo, avaliou-se o efeito das variações dos materiais no abatimento do tronco de cone estimado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das Formulações Base

Para entender a lógica de dosagem atual praticada na central, foram analisadas as Formulações Base em vigor, que consistem em dois Conjuntos de Formulações, cada qual com seu Conjunto de Materiais, os quais foram caracterizados. Com os resultados da caracterização, foram calculadas a porosidade do empacotamento e a distância de partícula para finos e grossos. Esses parâmetros foram correlacionados com o abatimento do tronco de cone do concreto.

4.1.1 Caracterização dos Materiais

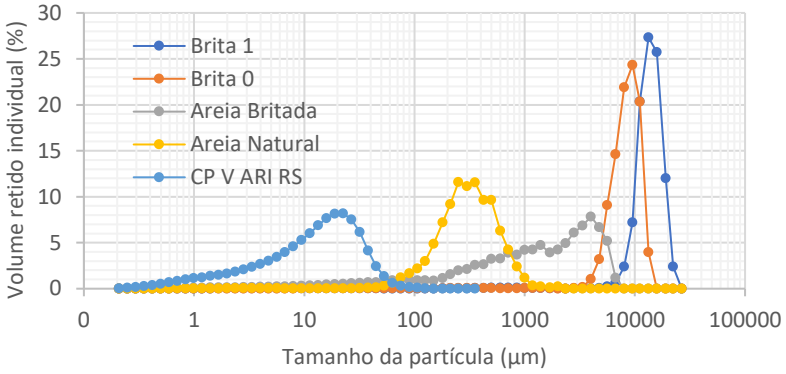
Nesta seção, são apresentados os resultados da caracterização física das matérias-primas, incluindo os ensaios de densidade, granulometria e área específica para dois conjuntos de amostras – o primeiro contendo agregados de origem granítica e o segundo de origem calcítica –, mostrados nas Tabela 4, Tabela 5, Figura 24 e Figura 25.

Tabela 4 – Características do Conjunto de Materiais 1 (agregados graníticos)

	Conjunto de Materiais 1				
Características	**Brita 19mm**	**Brita 9,5mm**	**Areia Britada**	**Areia Natural**	**CP V ARI RS**
Densidade (kg/dm^3)	2,71	2,70	2,70	2,65	3,06
Área específica BET (m^2/g)	0,01	0,01	0,26	0,30	1,48
Área volumétrica granulométrica (m^2/cm^3)	7,8 x 10^{-3}	4,0 x 10^{-3}	8,2 x 10^{-2}	4,2 x 10^{-2}	1,17
Fator de forma	3,45	7,20	8,56	18,80	3,88

(1) Área volumétrica granulométrica foi calculada a partir da distribuição granulométrica (item 3.2.2.2)
(2) Fator de forma consiste na relação entre a área volumétrica BET e a área volumétrica granulométrica (item 3.2.2.2)

Figura 24 – Granulometria discreta do Conjunto de Materiais 1 (agregados graníticos)



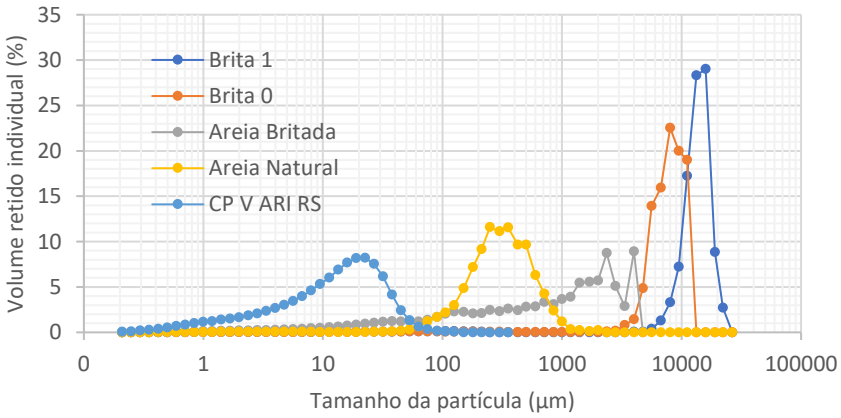
Fonte: própria autora

Tabela 5 – Características do Conjunto de Materiais 2 (agregados calcíticos)

	Conjunto de Materiais 2				
Características	**Brita 19mm**	**Brita 9,5mm**	**Areia Britada**	**Areia Natural**	**CP V ARI RS**
Densidade (kg/dm³)	2,66	2,65	2,86	2,65	3,06
Área específica BET (m²/g)	0,02	0,02	0,23	0,30	1,48
Área volumétrica granulométrica (m²/cm³)	$6{,}9 \times 10^{-3}$	$4{,}6 \times 10^{-3}$	0,12	$4{,}2 \times 10^{-2}$	1,17
Fator de forma	5,75	8,47	12,68	18,80	3,88

(1) Área volumétrica granulométrica foi calculada a partir da distribuição granulométrica (item 3.2.2.2)
(2) Fator de forma consiste na relação entre a área volumétrica BET e a área volumétrica granulométrica (item 3.2.2.2)

Figura 25 – Granulometria discreta do Conjunto de Materiais 2 (agregados calcíticos)



Fonte: própria autora

No que tange à densidade dos materiais, o valor de 2,70 e 2,71 kg/dm^3 para os agregados graníticos pertencentes ao Conjunto de Materiais 1 está coerente com a massa específica da rocha mãe. Enquanto os agregados do Conjunto de Materiais 2, identificados como calcíticos, apresentam uma diferença significativa entre os agregados graúdos (entre 2,66 e 2,67kg/dm^3) e a areia britada (2,86kg/dm^3). Esta diferença pode ser atribuída à um maior teor de dolomita na fração mais fina do material, uma vez que a dolomita possui uma maior densidade que a calcita, devido à presença do magnésio em substituição ao calcário em sua composição. Além disso, a dolomita se mostra mais friável que a calcita, desta maneira a dolomita se concentraria na fração fina no processo de cominuição. É importante ressaltar que seria necessária uma análise da composição química dos agregados para verificação desta hipótese. A areia natural quartsoza e o cimento apresentam densidades coerentes com sua composição mineralógica (MEHTA; MONTEIRO, 2014; WEBMINERAL, 2020; WILLS, 1992).

Uma questão intrigante na análise do fator de forma encontra-se na diferença desta característica entre a Areia Natural e as Areias Britadas de ambos os Conjuntos de Materiais, a primeira alcançando um fator de forma muito superior às últimas. Conceitualmente, as areias naturais tendem a possuir um formato mais arredondado devido à ação do tempo na formação de sua partícula, já as areias britadas tendem a ter um grão mais lamelar devido à sua produção por britagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Corroborando essa ideia, Rebmann (2017) mostra em seu trabalho imagens ampliadas dos grãos de areia natural e britada (outras amostras, porém da mesma origem) e, de fato, a areia natural é mais arredondada. Naturalmente, quanto menor o fator de forma, mais próximo as partículas estão da esfera – porém, é importante ressaltar que a área específica BET considera além da forma em si, os poros do material que são penetráveis pelo Nitrogênio. Assim, é surpreendente o fator de forma da Areia Natural ser mais alto que a Areia Britada. Suspeita-se que a Areia Natural tenha contaminações de argila, a qual tem alta área específica devido a sua conformação em placóides, e aumentaria a área superficial BET da Areia Natural (ALUJAS *et al.*, 2015). Para investigar com mais detalhes este tópico, deve ser realizada uma caracterização química da areia natural.

As distribuições granulométricas dos dois conjuntos são similares, sendo que os agregados britados do Conjunto de Materiais 2 apresentam uma distribuição

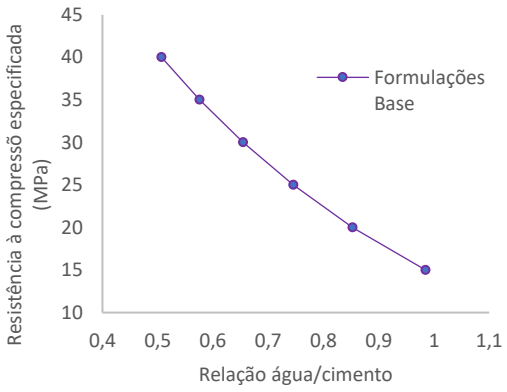
granulométrica mais ampla que o Conjunto de Materiais 1. A análise comparativa das propriedades de dois conjuntos de materiais de origens distintas revela suas particularidades, as quais ajudam a explicar seus efeitos nos concretos e, sobretudo, enriquecem a construção do modelo.

4.1.2 *Intensidade de ligantes*

Os concretos possuem resistência à compressão variando entre 20 e 40MPa, abatimento do tronco de cone entre 90 e 200mm e dimensão máxima 19mm ou 9,5mm. A Tabela 1 mostra um exemplo de especificação e seus parâmetros e a Tabela 2 mostra a formulação deste concreto, além disso, todas as formulações são apresentadas na Tabela 21 no Apêndice.

Para aumentar a resistência à compressão, o modelo de dosagem reduz a relação água/cimento, por meio do aumento da quantidade de cimento e, em alguns casos, um ligeiro incremento de água para manter o abatimento do tronco de cone, como mostrado pela Figura 26. Destaca-se que a relação apresentada pela figura se refere a todos os concretos das Formulações Base, independentemente do abatimento do tronco de cone, da dimensão máxima ou das matérias primas.

Figura 26 – Resistência à compressão especificada em função da relação água/cimento para todos os concretos das Formulações Base



Fonte: própria autora

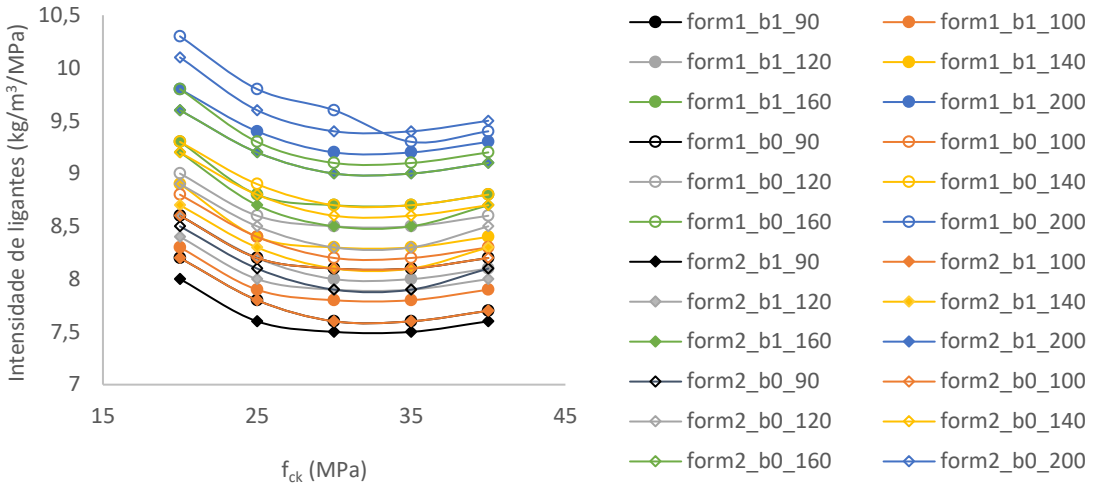
Uma outra estratégia adotada conforme aumenta-se o f_{ck} é reduzir o teor de argamassa. Para aumentar o abatimento do tronco de cone, é aumentada a quantidade de pasta, mantendo a relação água/cimento fixa. Conforme aumenta-se o abatimento do tronco de cone, o teor de argamassa também é aumentado, para evitar segregação.

Nos gráficos, as formulações estão identificadas pelas suas especificações da seguinte forma: o primeiro texto corresponde ao Conjunto de Formulações (Conjunto de Formulações 1=Form1 ou Conjunto de Formulações 2=Form2), o segundo à dimensão máxima (9,5mm = b0 ou 19mm = b1) e o terceiro o abatimento do tronco de cone especificado (em mm) e, optativamente, o quarto a resistência à compressão (em MPa). Por exemplo, “Form2_b0_160_30”, se refere ao Conjunto de Formulações 2, dimensão máxima 9,5mm, abatimento do tronco de cone 160 mm e f_{ck} 30MPa.

Neste conjunto de dados, a intensidade de ligantes é um bom indicador para avaliar a ecoeficiência dos concretos. Quanto menor a intensidade de ligantes maior é a eficiência da formulação, conforme discutido na Revisão Bibliográfica. No Apêndice, na Tabela 22, são apresentadas as intensidades de ligantes para cada concreto.

Analisando as intensidades de ligantes pelo $f_{ck,}$ conforme apresentado na Figura 27, é possível notar que, para um dado abatimento do tronco de cone, há uma queda da intensidade de ligantes entre 20 e 30MPa, porém, de 30 a 35MPa a intensidade se estagna e cresce ligeiramente ao passar de 35 para 40MPa. Este comportamento até 30MPa é coerente com o caráter exponencial e negativo da relação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento de um concreto, apresentado por Abrams (1918). Isto é, um incremento da quantidade de cimento – reduzindo a relação água/cimento – traz um aumento exponencial da resistência à compressão, reduzindo a intensidade de ligante. A partir de 30MPa, o acréscimo de pasta – e, por essa razão, de cimento – para manter o comportamento reológico supera o efeito supracitado, invertendo a tendência na relação entre intensidade de ligante e a resistência à compressão especificada.

Figura 27 – Intensidade de ligantes por f_{ck} de todas as Formulações Base segregadas em séries de dados que compreendem os mesmos Conjunto de Formulação, dimensão máxima e abatimento especificado



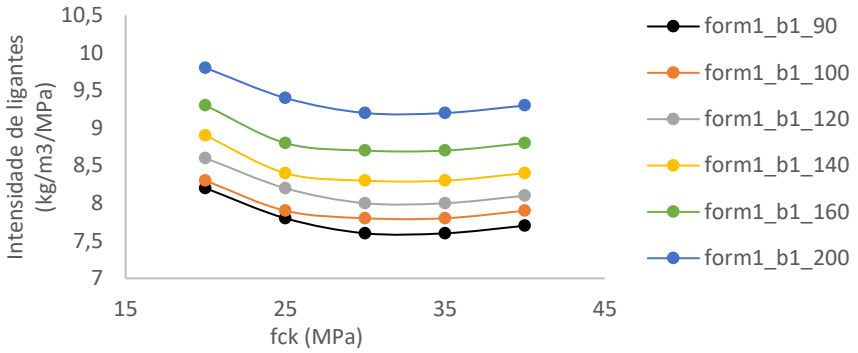
Fonte: própria autora

Comparando os resultados com a Figura 14, nota-se que as intensidades dos concretos avaliados estão na mesma faixa dos concretos mapeados por Daminelli (2013), entretanto com intensidades de ligantes muito acima das melhores intensidades encontradas, que estão abaixo de 5kg/m^3/MPa.

Para uma dada resistência à compressão, as formulações com menor intensidade de ligantes são as formulações com dimensão máxima 19mm e baixo abatimento do tronco de cone: em torno de 7,5 a 8 kg/m^3/MPa. Enquanto as formulações com menor ecoeficiência são as com dimensão máxima 9,5mm e maiores abatimentos do tronco de cone, atingindo valores entre 9 e 10 kg/m^3/MPa.

Para explicitar essa avaliação, é apresentada a Figura 28, na qual o Conjunto de Formulações e a dimensão máxima são fixas, com cada série representando um diferente abatimento do tronco de cone. Por esse gráfico, percebe-se que o aumento do abatimento do tronco de cone resulta em uma maior intensidade de ligante nestes concretos. Isto ocorre pois o aumento do abatimento do tronco de cone neste modelo de dosagem é obtido por meio da adição de volume de pasta, mantendo a relação água/cimento fixa a fim de obter a resistência à compressão especificada.

Figura 28 – Intensidade de ligantes por f_{ck} do Conjunto de Formulações 1 com dimensão máxima 19mm segregadas em série de dados com o mesmo abatimento do tronco de cone

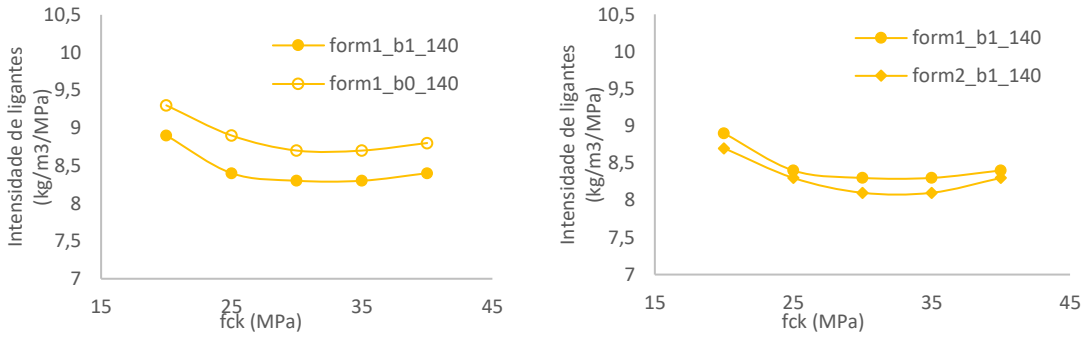


Fonte: própria autora

Na Figura 29 (a), é mantido fixo o abatimento do tronco de cone e o Conjunto de Formulações, variando assim a dimensão máxima. Essa análise mostra o efeito negativo da dimensão máxima 9,5mm quanto à ecoeficiência, o qual decorre do aumento do teor de argamassa, assim como de pasta para manutenção do comportamento reológico ao dispor de um material a menos (a Brita 19mm) para o proporcionamento, incorrendo em uma distribuição granulométrica menos contínua que prejudica o fluxo.

A Figura 29 (b) mostra a mesma especificação no Conjunto de Formulações 1 e no Conjunto de Formulações 2, que permite concluir que o Conjunto de Formulações 2 é ligeiramente mais ecoeficiente. O Conjunto de Formulações 2 foi desenvolvido a partir de um Conjunto de Materiais diferente dos do Conjunto de Formulações 1, sendo essa ecoeficiência proveniente da troca de agregados e do ajuste das formulações para tal por meio de uma redução de pasta.

Figura 29 – Intensidade de ligantes (a) por f_{ck} para diferentes dimensões máximas, à esquerda (b) para os Conjuntos de Formulações 1 e 2 (agregados graníticos e calcíticos), à direita



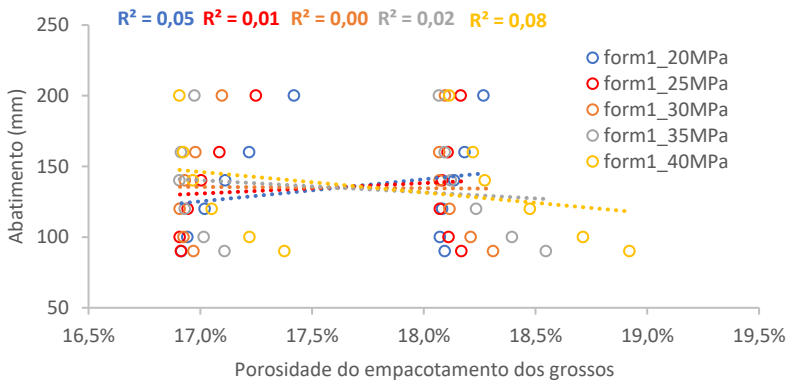
Fonte: própria autora

Destaca-se que o comportamento observado é consequência das decisões e pressupostos do modelo de dosagem atual, o qual foi alcançado por meio de experimentos, e não necessariamente reflete o ótimo global destas formulações. Não obstante, a análise da intensidade de ligantes dos concretos contribui para o entendimento dos efeitos das mudanças nas formulações na ecoeficiência dos concretos. A fim de aprimorar a compreensão dos fenômenos físicos e suas resultantes nas propriedades dos concretos, os parâmetros físicos destas formulações foram avaliados.

4.1.3 Empacotamento e distância entre partículas

Para entender a fluidez do concreto, calcularam-se as porosidades do empacotamento dos grossos e dos finos, o MPT e o IPS, conforme definido pelas eq.(11) e (13), resultados estes apresentados no Apêndice na Tabela 23 e na Tabela 24. Primeiro, os concretos para diferentes f_{ck} – consequentemente diferentes relações água/cimento e concentrações de sólidos na pasta – foram analisados plotando o abatimento do tronco de cone como uma função da porosidade do empacotamento dos grossos (Figura 30).

Figura 30 – Verificação da relação entre o abatimento do tronco de cone e da porosidade do empacotamento dos grossos por f_{ck}



Fonte: própria autora

Observando-se estes resultados, não é possível encontrar uma relação entre a porosidade do empacotamento dos grossos e o abatimento do tronco de cone, porquanto concretos diferentes que possuem o mesmo abatimento do tronco de cone apresentam porosidades distintas. Pode-se notar que para cada resistência à compressão especificada são encontrados dois grupos de dados: um com a

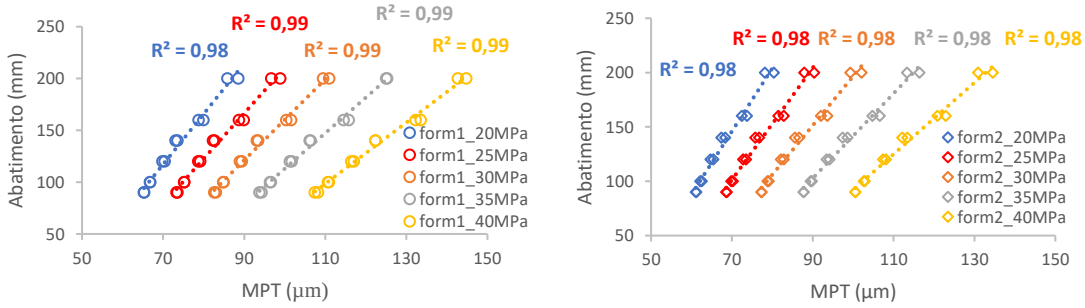
porosidade do empacotamento dos grossos entre 16,8% e 17,5% e outro a partir de 18,0%. Cada um destes grupos é para um tamanho de agregado máximo distinto: 19mm e 9,5mm. O grupo com tamanho máximo 19mm atinge uma porosidade de empacotamento dos grossos mais baixa porque possui uma distribuição de tamanho de partícula mais ampla que a do grupo de 9,5mm.

A porosidade é uma propriedade da distribuição granulométrica e não compreende o a área superficial das partículas, que determina a quantidade de pasta necessária para recobrir os grãos, nem tampouco considera o próprio volume de pasta do concreto. Assim, em diferentes concretos com o mesmo abatimento do tronco de cone, diferentes proporções de material são utilizadas, o que implica não só diferentes porosidades, mas também em diferentes áreas superficiais. Além destas propriedades das partículas, ainda se soma ao fato de os volumes de pasta serem diferentes.

Desta forma, avaliar apenas a porosidade do empacotamento das partículas se mostra insuficiente para a entender o comportamento reológico do material. É necessário abarcar as demais variáveis que influem no fenômeno.

Isto posto, o MPT considera o volume da pasta e a área superficial das partículas grossas também. Assim, o abatimento do tronco de cone foi plotado como uma função do MPT (Figura 31) para ambos os Conjuntos de Formulação. Observou-se uma alta relação entre MPT e o abatimento do tronco de cone, com o coeficiente de determinação da regressão linear ajustada (R^2) entre 0,97 e 0,98, dado um f_{ck}. Ou seja, formulações com diferentes resistências especificadas não apresentam o mesmo MPT para um abatimento do tronco de cone, devido ao comportamento reológico diferente dessas pastas. Mas se a variável f_{ck} é fixa, o abatimento do tronco de cone varia linearmente com o MPT.

Figura 31 – Abatimento do tronco de cone em função do MPT por f_{ck} (a) Conjunto de Formulações 1, à esquerda (b) Conjunto de Formulações 2, à direita

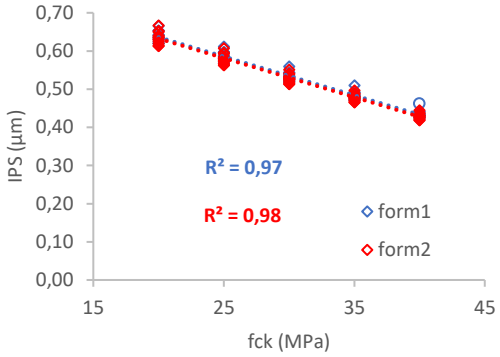


Fonte: própria autora

A resistência à compressão em si não tem um impacto direto no abatimento do tronco de cone, entretanto isto foi observado ao avaliar os dados da Figura 31. Desta maneira, investigam-se parâmetros que influenciam o comportamento reológico da pasta que podem estar atrelados a esta relação obtida, como a concentração de sólidos e a própria distância entre partículas finas.

Ao avaliar a distância entre partículas finas (IPS), nota-se uma alta relação (R^2 0,97 e 0,98) entre o IPS e o f_{ck}, para ambos os Conjuntos de Formulação (Figura 32). Assim, percebe-se que o IPS tem uma forte relação causal com o abatimento do tronco de cone, pois, ao diminuir a distância entre as partículas finas, o movimento dessas partículas é dificultado, aumentando a viscosidade da pasta e reduzindo o abatimento do tronco de cone. A causa de correlação negativa entre o f_{ck} e o IPS se encontra na estratégia para aumentar o f_{ck} por meio da redução da relação água/cimento (apresentada na Figura 26), o que implica no aumento da concentração de sólidos na pasta e na diminuição do volume de fluido para separar as partículas, ou seja, na redução do IPS. Para concretos sem outras partículas finas além de finos de cimento e agregados, essa relação alta entre IPS e f_{ck} provavelmente será repetida. Porém, conforme discutido no item 2.6, esta tendência tem um limite: abaixo da relação água/cimento da ordem de 0,4, o volume de pasta têm um impacto relevante na resistência à compressão, ampliando a complexidade do fenômeno e alterando a relação entre IPS e f_{ck}.

Figura 32 – Relação entre IPS e f_{ck} para o Conjunto de Formulações 1 e 2



Fonte: própria autora

Para um mesmo f_{ck}, é necessário um maior MPT para atingir um maior abatimento do tronco de cone, e esse aumento de MPT, neste modelo de dosagem, é conseguido majoritariamente aumentando o volume de pasta e, consequentemente, o consumo de ligantes. Portanto, a intensidade de ligantes aumenta conforme o aumento do abatimento do tronco de cone, indicando uma ecoeficiência mais baixa para estas formulações.

É importante ressaltar que para cada abatimento do tronco de cone e pasta tem-se duas formulações, a com dimensão máxima 9,5mm e a com 19mm, e essas formulações tem diferentes porosidades do empacotamento e diferentes volumes de sólidos, porém os seus MPT são iguais (Tabela 6).

Tabela 6 – Comparação de intensidade de ligantes, MPT e suas variáveis de entrada de formulações com dimensão máxima diferentes

f_{ck}: 30 MPa Abatimento: 100 mm	**Dimensão máxima**	**MPT (micra)**	**Porosidade do empacotamento (%)**	**Volume de sólidos (%)**	**Intensidade de Ligante (kg/m³/MPa)**
	Brita 19mm	84,9	16,9	68,4	8,9
	Brita 9,5mm	84,8	18,2	66,9	9,4

Essa constatação permite criar uma estratégia de dosagem baseada em distância entre partículas. A relação água/cimento governa o IPS e, consequentemente, a viscosidade das pastas nessa região experimental. Como a relação água/cimento é determinada pela resistência à compressão especificada, o ganho de eficiência no uso de ligante deve ser obtido com a redução de consumo de pasta, ou seja, aumento

do volume de sólidos dos grossos na formulação. Assim, para um concreto especificado (f_{ck}, abatimento do tronco de cone e dimensão máxima), deve-se almejar aumentar o volume de sólidos dos grossos mantendo o MPT fixo por meio da redução da porosidade do empacotamento, bem como da redução da área superficial dos grossos. Essa estratégia permite diminuir o volume de pasta da formulação e, logo, reduzir a intensidade de ligante do concreto.

A análise das Formulações Base sob a ótica do empacotamento e da distância entre partículas expõe uma perspectiva distinta à usualmente empregada, a qual apresenta correlações altas, gerando uma estratégia de dosagem centrada na eficiência e motivando a proposição de um modelo baseado nestes parâmetros.

4.2 Construção de um modelo semi-empírico baseado em distância entre partículas

A seção anterior mostrou o impacto das duas variáveis de distância (IPS e MPT) na fluidez do concreto. Com base na hipótese de que essas duas variáveis poderiam descrever o abatimento do tronco de cone, um modelo linear foi ajustado (eq.(29)).

Para indicar uma boa correlação das duas variáveis, que representam a mesma propriedade – o abatimento do tronco de cone –, o coeficiente de determinação deve ser próximo de um. Foram testadas diversas funções a fim de representar o conjunto de dados, como exponencial, assintótica e polinomial, porém a função que apresentou o coeficiente de determinação mais alto foi a função linear.

Os parâmetros mostrados na Tabela 7 foram estimados utilizando três conjuntos de dados distintos: o Conjunto de Formulações 1, o Conjunto de Formulações 2 e as Formulações Base (ambos os conjuntos). A Figura 33 e a Figura 34 mostram uma comparação entre o abatimento do tronco de cone especificado e o abatimento do tronco de cone estimado, mostrados em detalhe na Tabela 25 no Apêndice. Neste gráfico, as linhas laterais cinzas tracejadas indicam a faixa de erro do ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a norma NBR 7212 (ABNT, 2012).

Para o Conjunto de Formulações individuais, o R^2 está entre 0,97 e 0,96 (Figura 33). Quando ambos os Conjuntos de Formulações são considerados juntos, ou seja, as Formulações Base, um valor menor – mas ainda assim bom – de correlação (R^2 0,84) foi alcançado (Figura 34). Parte desta diminuição no coeficiente de determinação, ao

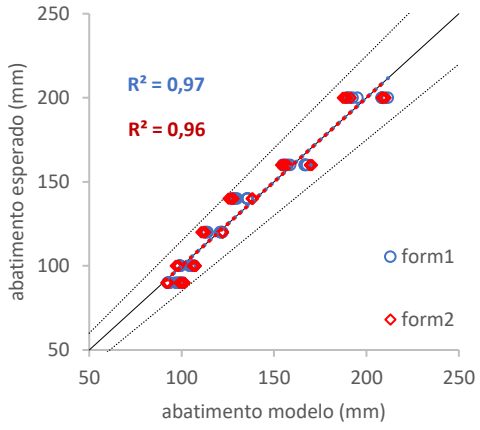
considerar as Formulações Base como um todo, pode ser atribuída a mudanças na morfologia dos agregados, como a relação de aspecto e a esfericidade das partículas, as quais não são contempladas pelo modelo. É possível incluir mais estas duas variáveis no cômputo do MPT e do IPS, entretanto optou-se por manter o modelo mais simples em detrimento deste ganho incremental de precisão.

$$s = a + b \times IPS + c \times MPT + d \times IPS * MPT \quad (30)$$

Tabela 7 – Parâmetros estimados para a equação do abatimento do tronco de cone em função do MPT e do IPS

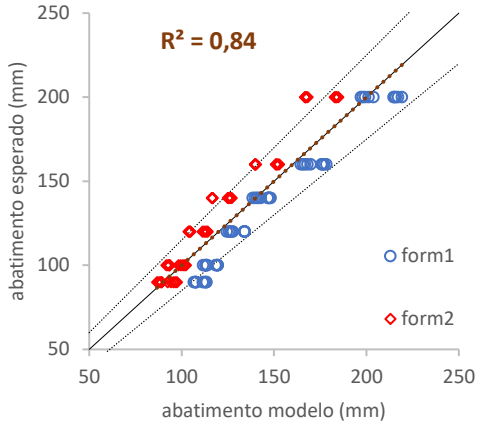
Parâmetro	Conjunto de Formulações 1	Conjunto de Formulações 2	Formulações Base
a	-201,9	-206,1	-164,42
b	95,4	73,5	79,41
c	-0,408	-0,546	-0,402
d	6,49	7,65	6,13

Figura 33 – Relação entre o abatimento esperado e o abatimento estimado pelo modelo para os Conjuntos de Formulações individuais



Fonte: própria autora

Figura 34 – Relação entre o abatimento esperado e o abatimento estimado pelo modelo para os Conjuntos de Formulações juntos (Formulações Base)



Fonte: própria autora

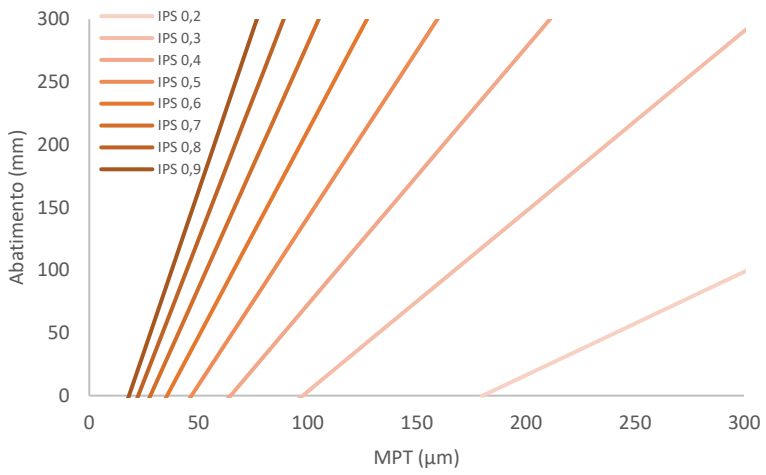
Ao analisar o modelo para as Formulações Base (Figura 34), nota-se que os abatimentos estimados para os dois Conjuntos de Formulação se mostram deslocados, pois o Conjunto de Formulações 2 apresenta concretos com menor quantidade de pasta que o Conjunto de Formulações 1. Apesar deste deslocamento ser um erro do modelo, é um comportamento aceitável, pois, na maioria dos concretos, o erro do modelo se mostra inferior ao erro do próprio ensaio de abatimento do tronco de cone. Nas Formulações Base, apenas alguns concretos do Conjunto de Formulação 2 (dimensão máxima 19mm e abatimentos altos) e do Conjunto de Formulações 1 (dimensão máxima 9,5mm e abatimentos baixos) apresentam o erro do modelo ligeiramente superior ao do ensaio (Figura 34), possivelmente devido a efeitos não contemplados pelo modelo, como a relação de aspecto e a esfericidade das partículas grossas.

Nota-se também, que há uma maior dispersão do abatimento do tronco de cone estimado para valores mais altos de abatimentos, o que ocorre também com o próprio ensaio. A diferença no abatimento do tronco de cone está presente especialmente entre as duas dimensões máxima e os dois conjuntos de formulações, enquanto os concretos com diferentes f_{ck} atingem abatimentos muito próximos. Como o f_{ck} tem forte relação com o IPS (Figura 32), e para diferentes f_{ck}, o abatimento do tronco de cone é atingido por aumento de volume de pasta, pode-se inferir desta avaliação que o IPS e

o volume de sólidos dos grossos estão apresentando alta precisão no abatimento estimado. Já os diferentes conjuntos de materiais e dimensões máximas influem na porosidade do empacotamento e na área superficial dos grossos, indicando uma imprecisão no modelo no que se refere a estas variáveis, que pode ser atribuída a uma pequena deficiência dos modelos de empacotamento e MPT e aos efeitos supracitados não contemplados pelo modelo, correlacionados à forma das partículas grossas.

No tocante ao fenômeno físico, sabe-se que a distância de partículas influi positivamente no abatimento do tronco de cone, pois partículas mais afastadas se movem com mais facilidade e aumentam a fluidez, conforme amplamente discutido no item 2.4. Contudo, ao avaliar o modelo criado para as Formulações Base, detalhado na eq.(29), percebe-se que o termo do MPT apresenta seu parâmetro negativo (parâmetro *c* da Tabela 7), o que poderia se levar à conclusão de que um aumento no MPT resultaria em uma redução do abatimento do tronco de cone. Assim, avalia-se o efeito do MPT no abatimento do tronco de cone estimado para diferentes IPS, no intervalo no qual a equação do modelo se aplica, com o abatimento do tronco de cone entre 0 e 300mm. Nesta análise, percebe-se que o abatimento do tronco de cone aumenta com o incremento do MPT (Figura 35) em todo o intervalo do modelo. Isso ocorre pois parâmetro *d* do termo IPS e MPT em conjunto (eq.(29) e Tabela 7), se mostra da ordem de grandeza de 6 e o IPS varia de 0,2 a 0,9 dependendo da pasta. Ao isolar o MPT na eq.(29) e, assim, somar o parâmetro *c* (da ordem de -0,4), com o *d* x IPS (entre 1,2 e 5,5), o resultado se revela positivo em toda a região experimental. Este comportamento do modelo é coerente com o fenômeno físico, no qual o acréscimo da distância entre as partículas favorece a fluidez.

Figura 35 – Abatimento do tronco de cone estimado pela eq.(29) em função do MPT e IPS no intervalo que o modelo se aplica



Fonte: própria autora

Outro ponto interessante que se constata pela Figura 35 é o efeito conjugado do MPT e IPS no abatimento do tronco de cone. Para um IPS alto, um pequeno incremento no MPT já implica em um crescimento abrupto de abatimento do tronco de cone, o que pode ser notado no gráfico (Figura 35) pelo aumento na inclinação das curvas de IPS conforme este cresce. Esse comportamento é compatível com o observado nas Formulações Base na Figura 31, no qual a curva MPT *versus* abatimento do tronco de cone se torna menos inclinada, conforme aumenta-se o f_{ck}. Devido à forte relação negativa entre o IPS e o f_{ck} (Figura 32), a Figura 31 mostra que, quanto menor o IPS, maior deve ser o acréscimo no MPT para um mesmo ganho de abatimento do tronco de cone, corroborando o exposto na Figura 35.

Assim, como o modelo para as Formulações Base se mostrou coerente com o comportamento observado experimentalmente e atingiu um erro considerado aceitável, este foi o modelo empregado para validação a partir dos concretos dosados na central. Cumpre destacar que as Formulações Base compreendem formulações específicas segundo a estratégia de dosagem da central de concreto, como, por exemplo, a mesma relação entre areia natural e areia britada e entre Brita 19mm e brita 9,5 mm para todas as formulações. É importante, ainda, validar este modelo em uma região experimental mais ampla.

4.3 Validação do modelo para previsão da fluidez dos concretos dosados na central de concreto

4.3.1 Caracterização das matérias-primas

Nesta seção, é apresentada a caracterização física das matérias-primas, incluindo os ensaios de densidade, granulometria e área específica para cinco conjuntos de amostras de materiais coletadas em um período de dois meses.

4.3.1.1 Densidade

Na Tabela 8, são apresentados os resultados de densidade por picnometria de hélio das amostras coletadas. Destaca-se que os ensaios de densidade por picnomeria a gas Helio foram repetidos cinco vezes para cada amostra e o desvio padrão para cada amostra dos agregados foi inferior a 0,01kg/dm^3 e para o cimento foi inferior a 0,04kg/dm^3. É possível notar a regularidade do material para esta propriedade ao observar o pequeno intervalo de confiança.

Tabela 8 – Densidade dos materiais

Densidade (kg/dm^3)	**M1D0**	**M1D2**	**M1D4**	**M2D1**	**M2D3**	**Intervalo de confiança(1)**
Brita 19mm	2,72	2,71	2,71	2,71	2,70	2,71 ± 0,01
Brita 9,5mm	2,71	2,74	2,71	2,71	2,71	2,71 ± 0,01
Areia Britada	2,74	2,72	2,73	2,77	2,72	2,74 ± 0,01
Areia Natural	2,63	2,63	2,63	2,63	2,64	2,63 ± 0,00
CP V ARI RS	2,93	2,93	2,93	2,95	2,93	2,93 ± 0,01

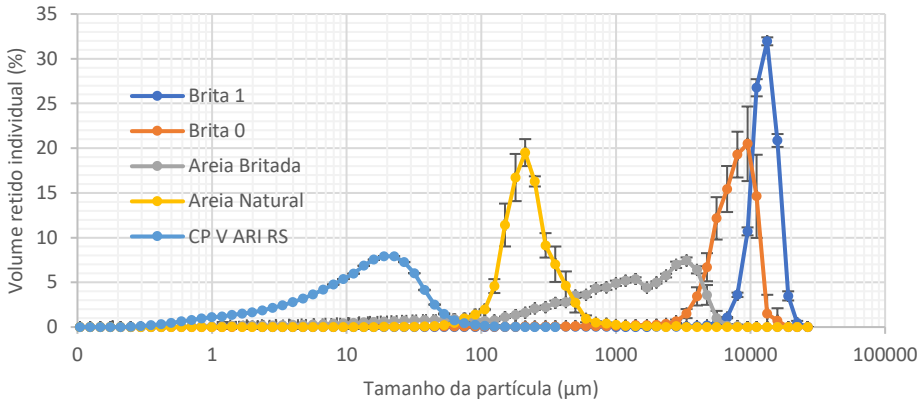
(1) Grau de confiança 0,90

4.3.1.2 Granulometria

Na Figura 36, são apresentadas as médias da distribuição granulométrica dos materiais com o diâmetro EQPC (como discutido no item 4.3.1.2). O resultado detalhado de cada uma das cinco amostras de cada material é apresentado no Apêndice (entre a Figura 46 e a Figura 50). É possível notar que o material que apresenta maior oscilação é a Brita 9,5mm. Foram feitos ensaios em mais duas amostras, assim como todos os ensaios foram refeitos garantindo amostras grandes o suficiente. Esse resultado é surpreendente, uma vez que a Brita 9,5mm é produzida no mesmo processo que a Brita 19mm e a Areia Britada, as quais apresentam baixa flutuação. É necessária uma investigação mais profunda para entender esta variação

da Brita 9,5mm. A Areia Natural apresentou uma ligeira alteração entre os dois meses, porém durante a semana no mesmo mês a mudança dos resultados foi baixa.

Figura 36 – Média e intervalo de confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta dos materiais



Fonte: própria autora

É primordial ressaltar que os finos dos agregados não são caracterizados pela análise convencional realizada na central e isso tem importantes consequências, especialmente para as areias. Comparando o resultado do passante na última peneira (150µm) da Areia Natural com a Areia Britada, obtém-se respectivamente 20% e 16%. Com base apenas nessa informação, poder-se-ia concluir que a Areia Natural possui mais partículas em uma região que causaria interferência com o cimento, ou seja, o IPS da pasta poderia ser reduzido devido ao aumento do volume de sólidos finos. Porém, quando analisado com o corte de 100µm na granulometria a laser, obtém-se a Areia Natural com 3,63% e Areia Britada com 11,85%, ou seja, a última se revela a principal responsável pelo aumento no volume de sólidos nos finos.

4.3.1.3 Área superficial específica

Na Tabela 9, são mostrados os resultados de área específica BET do cimento e dos finos das areias, uma vez que todas as análises da área superficial específica BET foram feitas apenas para a fração menor que 106µm e foram utilizadas apenas no cálculo do IPS. Os valores de área superficial específica para os finos da Brita 19mm e da Brita 9,5mm foram estimados com base no fator de forma histórico destes materiais, pois a área específica total no concreto destes materiais são uma ou duas ordens de grandeza abaixo das areias e do cimento, mesmo com quantidades maiores na formulação. Este fator de forma foi obtido de um estudo anterior, pela média de 14

amostras de cada agregado coletadas na mesma central e proveniente da mesma fonte dos materiais deste estudo no ano de 2016 (Tabela 10).

Tabela 9 – Área específica BET dos materiais

Área Específica BET (m^2/g)	**M1D0**	**M1D2**	**M1D4**	**M2D1**	**M2D3**	**Intervalo de confiança(1)**
Finos da Areia Britada	2,06	1,84	1,60	1,88	2,03	1,88 ± 0,39
Finos da Areia Natural	0,78	0,56	0,62	0,71	0,7	0,64 ± 0,18
CP V ARI RS	1,11	1,08	1,04	1,34	1,05	1,12 ± 0,11

(1) Grau de confiança 0,90

Nota-se que o cimento apresentou um desvio na amostra M2D1 e os finos das areias também oscilaram. É interessante notar que os resultados da área superficial BET apenas dos finos das areias apresentam uma variabilidade maior que a areia por inteiro (estão apresentados no Apêndice), pois a mudança na quantidade de finos atenua estas oscilações, ou seja, o fator de forma varia menos que a área superficial BET dos finos.

Na Tabela 10 é apresentado o fator de forma. Este consiste na relação entre a área específica BET e a área volumétrica granulométrica (calculada a partir da distribuição granulométrica). O material que apresentou maior oscilação do fator de forma foi a Areia Natural, comportamento explicado pela variação da distribuição granulométrica nos dois meses subsequentes, conforme discutido na seção 4.3.1.2, o que impacta na área volumétrica granulométrica (apresentada na Tabela 11), bem como o desvio da área específica BET na amostra M1D0.

Tabela 10 – Fator de forma dos materiais

Fator de forma(1)	**M1D0**	**M1D2**	**M1D4**	**M2D1**	**M2D3**	**Intervalo de confiança(2)**
Brita 19mm(3)	4,53	4,53	4,53	4,53	4,53	-
Brita 9,5mm(3)	8,12	8,12	8,12	8,12	8,12	-
Areia Britada	8,01	7,59	7,45	8,66	8,14	7,97 ± 0,45
Areia Natural	14,32	12,09	12,00	14,24	15,93	13,72 ± 1,59
CP V ARI RS	2,83	3,03	2,73	3,51	2,92	3,00 ± 0,28

(1) Fator de forma consiste na relação entre a área específica BET e a área volumétrica granulométrica (item 3.2.2.2)
(2) Grau de confiança 0,90
(3) Brita 19mm e Brita 9,5mm foram estimados com base no histórico

Tabela 11 – Área volumétrica granulométrica dos materiais

Área volumétrica granulométrica (m^2/cm^3)(1)	**M1D0**	**M1D2**	**M1D4**	**M2D1**	**M2D3**	**Intervalo de confiança(2)**
Brita 19mm	$5{,}80 \times 10^{-4}$	$4{,}75 \times 10^{-4}$	$4{,}80 \times 10^{-4}$	$4{,}92 \times 10^{-4}$	$4{,}79 \times 10^{-4}$	$(5{,}01 \pm 0{,}43) \times 10^{-4}$
Brita 9,5mm	$4{,}29 \times 10^{-3}$	$4{,}29 \times 10^{-3}$	$4{,}40 \times 10^{-3}$	$1{,}12 \times 10^{-3}$	$8{,}88 \times 10^{-3}$	$(6{,}62 \pm 3{,}08) \times 10^{-3}$
Areia Britada	$9{,}07 \times 10^{-2}$	$9{,}65 \times 10^{-2}$	$8{,}73 \times 10^{-2}$	$8{,}63 \times 10^{-2}$	$1{,}04 \times 10^{-1}$	$(9{,}29 \pm 0{,}70) \times 10^{-2}$
Areia Natural	$3{,}63 \times 10^{-2}$	$3{,}48 \times 10^{-2}$	$3{,}60 \times 10^{-2}$	$3{,}23 \times 10^{-2}$	$3{,}04 \times 10^{-2}$	$(3{,}40 \pm 0{,}25) \times 10^{-2}$
CP V ARI RS	1,15	1,04	1,12	1,13	1,05	1,10 ± 0,05

(1) Área volumétrica granulométrica foi calculada a partir da distribuição granulométrica (item 3.2.2.2)
(2) Grau de confiança 0,90

Mais uma vez, nota-se a diferença do fator de forma entre a Areia Natural e a Areia Britada, a primeira alcançando um patamar 72% superior à segunda. Como já discutido no item 4.1.1, as areias naturais tendem a possuir um formato mais arredondado enquanto as areias britadas tendem a ter um grão mais lamelar, assim estes resultados devem ser investigados em detalhes.

4.3.2 Análise dos dados de processo

Para a investigação da operação da central sob a ótica do modelo físico de distância de partículas, foram obtidos dados da operação a fim de entender se os resultados da operação conseguem ser descritos pelo modelo. Nesta análise, foi avaliada também a influência das variações das características dos materiais no abatimento estimado.

Foram levantados os dados de concretos dosados e moldados em dois meses na central, que somaram 391 concretos de 33 formulações distintas. As especificações dos concretos dosados na central neste período são apresentadas na Tabela 12, assim como as formulações especificadas para cada uma destas especificações são mostradas na Tabela 13. Vale destacar que o estudo partiu dos resultados dos 391 concretos em si, sendo que as quantidades de agregados e aditivos utilizadas para o estudo foram as teóricas, ou seja, as quantidades descritas na formulação especificada do concreto, já as quantidades de água e cimento foram as medidas na operação de dosagem da central, as quais estavam disponíveis para a exportação a partir do sistema supervisório da central, apresentadas no Apêndice, na Tabela 27.

Tabela 12 – Especificação dos concretos dosados na central

Formulação	Resistência à compressão característica (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Relação água/cimento	Consumo de cimento mínimo (kg/m^3)	Dimensão máxima	Abatimento do tronco de cone (mm)
1	25	x	x	x	9,5mm	100
2	25	x	x	x	19mm	120
3	30	x	x	x	9,5mm	140
4	30	x	x	x	9,5mm	100
5	30	x	x	x	19mm	100
6	35	x	x	x	9,5mm	200
7	35	x	x	x	19mm	100
8	35	x	x	x	19mm	100
9	40	x	x	x	9,5mm	140
10	40	x	x	x	19mm	100
11	40	x	x	x	9,5mm	120
12	40	x	x	x	19mm	120
13	40	x	x	x	19mm	120
14	25	x	x	400	9,5mm	220
15	30	x	x	400	9,5mm	220
16	30	x	x	400	9,5mm	220
17	35	30	0,50	x	19mm	160
18	30	x	0,55	x	9,5mm	160
19	30	27	0,55	x	19mm	160
20	30	27	0,55	x	19mm	200
21	30	x	0,55	x	19mm	100
22	30	x	0,55	x	19mm	120
23	25	x	0,60	x	19mm	160
24	45	32	x	x	19mm	120
25	35	28	x	x	19mm	100
26	40	30	x	x	19mm	100
27	40	32	0,45	x	19mm	40
28	45	32	x	x	19mm	120
29	30	x	x	x	9,5mm	200
30	30	x	x	x	9,5mm	90
31	35	x	x	x	19mm	160
32	35	x	x	x	19mm	200
33	20	x	x	x	19mm	100

Tabela 13 – Formulação especificada dos concretos dosados na central

	Quantidade de material (kg/m^3)									
Formulação	**Cimento**	**Brita 19mm**	**Brita 9,5mm**	**Areia Natural**	**Areia Britada**	**Água**	**Teor de aditivo polifuncional(1)**	**Teor de aditivo super plastificante(1)**	**Teor de aditivo estabilizador(1)**	**Adição**
1	272	x	1047	454	374	189	0,8%	x	x	x
2	265	874	179	461	380	184	0,8%	x	x	x
3	308	x	981	453	374	202	0,8%	x	x	x
4	309	x	1056	430	354	190	0,8%	x	x	x
5	256	916	188	429	353	179	0,9%	x	x	x
6	417	x	806	418	421	227	0,8%	x	0,3%	x
7	330	923	189	404	333	180	0,8%	x	x	x
8	300	923	189	404	333	173	0,8%	x	x	x
9	391	x	1007	406	335	198	0,7%	x	x	x
10	343	939	192	396	327	174	0,8%	x	x	x
11	409	x	1035	382	315	198	0,8%	x	x	x
12	397	827	276	459	198	192	0,7%	x	x	x
13	359	903	185	400	330	182	0,8%	x	x	x
14	400	x	831	242	568	228	0,5%	x	x	x
15	400	x	879	319	482	220	0,7%	x	x	x
16	400	x	879	319	482	220	0,6%	x	x	x
17	327	692	297	480	396	172	0,7%	0,7%	0,8%	pigmento
18	370	x	934	440	363	217	0,9%	x	x	x
19	349	872	154	431	356	192	0,8%	x	x	x
20	387	820	145	427	352	205	0,8%	x	x	x
21	311	934	191	419	346	171	0,8%	x	x	x
22	315	901	185	436	360	173	0,8%	x	x	x
23	327	831	170	442	364	196	0,7%	x	x	x
24	396	908	186	386	318	178	0,8%	0,5%	x	x
25	300	954	168	423	349	173	0,8%	x	x	x
26	347	960	169	393	324	176	0,8%	x	x	x
27	384	919	188	398	328	173	0,8%	0,4%	x	x
28	378	939	166	400	330	170	0,8%	0,4%	x	x
29	320	x	795	399	192	192	x	1,0%	0,2%	fibra
30	320	x	764	514	518	192	x	1,4%	0,2%	fibra
31	330	847	173	439	362	190	0,8%	x	x	x
32	351	796	163	445	367	202	0,8%	x	x	x
33	226	899	184	473	390	178	0,7%	X	x	x

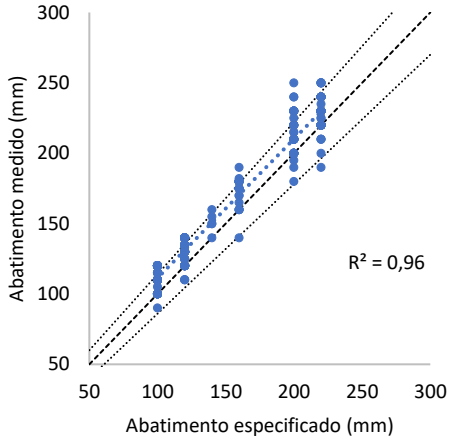
(1) Teor de aditivo em massa sobre a massa do cimento

No conjunto de 391 dados levantados, foram excluídos da análise concretos com fibra, com aditivos além do polifuncional, assim como concretos com quantidade de água abaixo de 145l/m^3, conforme apresentado no item 3.4.2, restando 336 concretos de 25 formulações diferentes. As formulações excluídas da análise foram marcadas em

cinza na Tabela 12 e na Tabela 13. Cada concreto de uma mesma formulação foi executado e possui quantidades particulares de água e cimento medidas adicionadas à betoneira, assim como, o seu próprio abatimento medido na obra.

A primeira análise consiste na comparação do abatimento do tronco de cone medido na obra com o especificado, como é mostrado na Figura 37, sendo as linhas claras os limites da especificação e a escura a bissetriz. Observa-se pelo gráfico uma boa correlação entre os dados, apresentando o R^2 de 0,96.

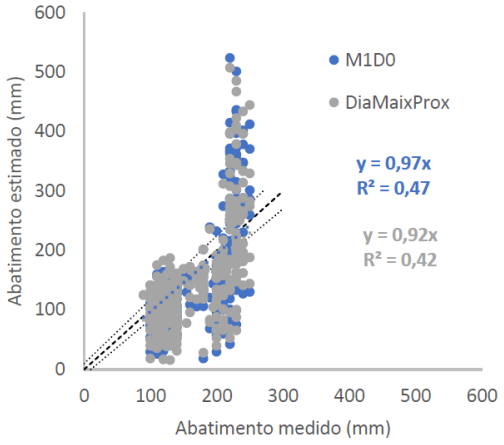
Figura 37 – Correlação do abatimento medido na obra com o abatimento especificado para cada concreto analisado



Fonte: própria autora

Para validar o modelo de comportamento reológico, apreciou-se o abatimento do tronco de cone de descarga em obra em comparação ao abatimento estimado pelo modelo construído na seção 4.2. O abatimento estimado *versus* o abatimento medido é apresentado na Figura 38, a série de dados “M1D0” corresponde a este valor calculado utilizando apenas a caracterização dos materiais coletados no dia M1D0 e a série “DiaMaisProx” foi calculada utilizando as cinco análises apresentadas na seção 4.2, considerando invariavelmente o resultado de caracterização do dia mais próximo ao dia que o concreto foi dosado. Estes resultados detalhados são mostrados no Apêndice entre a Tabela 28 e a Tabela 32.

Figura 38 – Correlação entre o abatimento medido e o abatimento estimado dos 336 concretos analisados

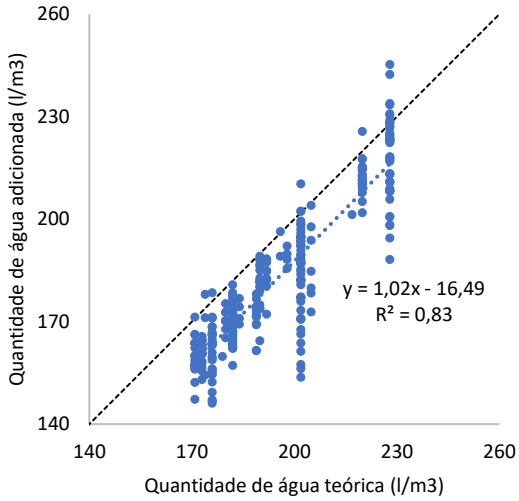


Fonte: própria autora

Nota-se que há uma dispersão muito grande dos abatimentos estimados. Levanta-se a hipótese que essas variações são devido ao alto desvio de medida da quantidade de água no concreto.

Para iniciar esta investigação, comparou-se a quantidade de água adicionada com a quantidade de água teórica da formulação em cada concreto, conforme retratado pela Figura 39, atingindo um desvio médio de 12,5l/m^3. Em 95% dos concretos, a água adicionada é inferior à água teórica da formulação, como é o necessário a fim de garantir a resistência à compressão dos concretos.

Figura 39 – Correlação entre a quantidade de água adicionada e a quantidade de água teórica em cada um dos 336 concretos analisados



Fonte: própria autora

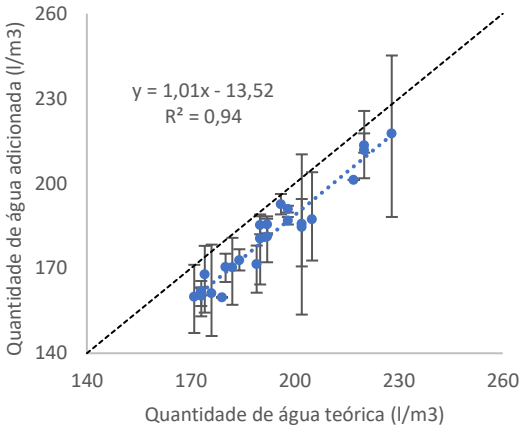
Apesar das formulações teóricas não serem as mesmas que as Formulações Base, elas são concebidas a partir das Formulações Base. Desta forma, é interessante observar que parte da redução da quantidade de água nos concretos pode ser explicada pela mudança nas características dos materiais de 2017 – quando as Formulações Base foram ajustadas – para 2018, quando a validação foi realizada.

Comparando a área superficial específica do cimento e da areia natural utilizados para ajustar o modelo apresentados na Tabela 4 (respectivamente, 1,48m^2/g e 0,30m^2/g) com a média dos materiais coletados na central mostrados na Tabela 9 (1,12 m^2/g para o cimento e 0,18 m^2/g para a areia natural), nota-se a redução da área específica dos materiais, condição que necessariamente reduz a demanda de água dos concretos. Houve também uma mudança importante na granulometria dos materiais, especialmente da areia natural, a qual também tem um impacto no abatimento do tronco de cone em função da porosidade do empacotamento dos grossos atingida considerando o proporcionamento dos materiais. Essas variações podem ser devidas a mudanças nas frentes de lavra dos agregados, assim como no próprio processo produtivo das matérias-primas.

Ademais, percebe-se que, de fato, há uma grande dispersão das quantidades de água adicionada para a mesma quantidade de água teórica. Por isso, optou-se por analisar os concretos com a mesma formulação em conjunto para atenuar os desvios do

abatimento estimado em decorrência da variação da quantidade de água registrada, conforme mostrado na Figura 40, na qual as barras de erro representam o maior e o menor valor da quantidade de água dentre os concretos de mesma Formulação. Espera-se que, ao se trabalhar com a média de cada formulação, a média dos valores tenda ao valor verdadeiro.

Figura 40 – Correlação entre a quantidade de água adicionada e a quantidade de água teórica por formulação



Fonte: própria autora

Nota-se que existem desvios relevantes da quantidade de água de cada concreto da mesma Formulação. A fim de averiguar se estes desvios são os desvios usuais da operação ou se houve alguma falha na coleta de dados, estimou-se os desvios de registro do processo através da propagação dos desvios de cada etapa em que é adicionada água ao concreto.

A primeira fonte de água no concreto dosado na central é a umidade dos agregados. A umidade dos agregados miúdos é registrada diariamente, porém, ao considerar apenas um valor de umidade por dia pode-se incorrer em erros significativos na quantidade de água proveniente desta fonte. Rebmann (2017) analisou a umidade dos agregados miúdos 30 vezes em um dia e obteve uma média de 2,18%, dentre uma faixa de 3,24% e 1,40% para 75% dos resultados, atingindo um desvio positivo de 1,1% e negativo de 0,8% da umidade. Foram medidas ainda variações maiores que esta, porém para o presente estudo considerou-se o valor encontrado para 75% dos casos, pois estes desvios são mais prováveis de ocorrer.

A umidade dos graúdos – que na operação não é medida rotineiramente – também é uma fonte de desvio, e é calculada também baseado na avaliação de Rebmann (2017), para as britas 19mm obteve uma média de 0,40%, dentre uma faixa de 1,05% e 0,12% para 75% dos resultados, atingindo um desvio positivo de 0,6% e negativo de 0,3% da umidade. Ainda, para as britas 9,5mm, obteve-se uma média de 0,63%, dentre uma faixa de 1,77% e 0,23% para 75% dos resultados, alcançando um desvio positivo de 1,1% e negativo de 0,4% da umidade.

Para calcular o desvio absoluto da quantidade de água, tomou-se a média da quantidade de cada agregado por metro cúbico dentre os 336 concretos avaliados na central e multiplicou-se pelos desvios de umidade positivo e negativo supracitados, atingindo os valores apresentados na Tabela 14.

Nesta central a calibração da balança da água no ponto de carga é realizada anualmente ou quando há alguma suspeita de falha, por meio de um material com massa conhecida, resultando em um erro de medição de ±5kg por betonada. Como as betonadas são de 3 a 8m^3, calcula-se uma média de desvio de quantidade de água no concreto no valor de ±1l/m^3.

Na plataforma e na obra a dosagem é feita manualmente e, apesar do erro de medição dos hidrômetros ser de 1l por betonada, o registro é feito de 10 em 10l, incorrendo em um desvio de ±5l por betonada, atingindo um desvio médio de quantidade de água no concreto de ±1l/m^3. Este desvio parte da premissa que o registro é bem feito, o que não foi validado e, portanto, pode ser uma fonte de desvio adicional. O desvio da quantidade de água proveniente da dosagem dos aditivos foi desprezado, pois, como mostrado por Rebmann (2017), se mostra irrelevante no desvio de água total. Estes desvios são apresentados e totalizados na Tabela 14.

Tabela 14 – Desvios associados às etapas de adição de água

Etapa	**Desvio positivo (l/m^3)**	**Desvio negativo (l/m^3)**
Umidade agregados miúdos	9	6
Umidade agregados graúdos	8	3
Dosagem no ponto de carga	1	1
Plataforma	1	1
Obra	1	1
Total	20	12

Essa depuração dos desvios mostra que analisar e registrar como variável de controle a umidade dos agregados graúdos é tão importante quanto a umidade dos agregados miúdos. Como há essa variação relevante da umidade dos agregados durante o dia e sua consequente influência no total de água do concreto, se faz necessário aumentar a frequência de análises da umidade dos agregados no controle do processo. Um terceiro ponto de atenção é confiabilidade dos dados dos registros realizados na plataforma e na obra, os mesmos devem ser validados por monitoramento contínuo da operação.

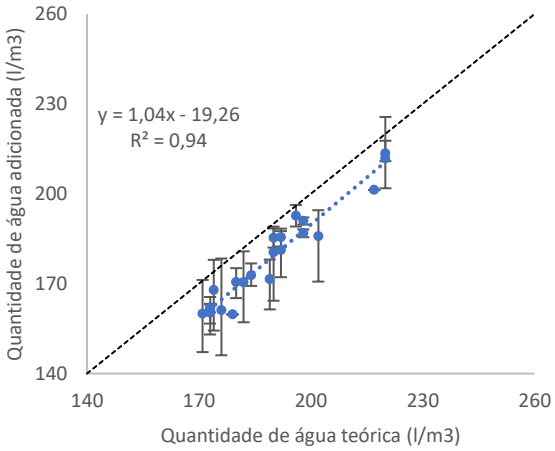
Neste processo, tomou-se como critério de aceitação dos dados para a análise, a faixa de variação da quantidade de água de 32l/m^3 apresentada na Tabela 14. Notou-se que duas formulações no grupo, descrito na Tabela 27 do Apêndice, apresentaram variações acima do critério e foram descartadas. Os concretos com a Formulação 14 apresentaram 57l/m^3 de variação de quantidade de água entre si, e os concretos com a Formulação 32 mostraram 56l/m^3. O maior intervalo após este foi 32l/m^3 e esta formulação foi mantida, pois estava aderente ao critério de aceitação.

A Formulação 20 configurou-se um caso específico, a qual, apesar de apresentar 31l/m^3 de diferença na quantidade de água entre seus concretos (aderente ao critério de aceitação), se mostrou inconsistente quando comparada com uma formulação com a mesma especificação – a Formulação 19 –, que teve uma variação de apenas 6l/m^3 na quantidade de água durante o período. Basicamente, a diferença entre as duas consistiu em um consumo de cimento 38kg/m^3 maior da Formulação 20 que a Formulação 19, enquanto as demais variáveis foram iguais, inclusive a quantidade de água. Não obstante, a Formulação 20 atingiu um abatimento do tronco de cone médio de 218mm, ao passo que a segunda atingiu apenas um abatimento do tronco de cone médio de 166mm. Como a Formulação 20 apresentou um abatimento 52mm maior que a Formulação 19, com uma diferença em sua formulação que tenderia a reduzir o abatimento, excluiu-se a Formulação 20 da análise devido a esta inconsistência, possivelmente gerada por um erro no registro dos dados.

Ao final, utilizaram-se 22 formulações das 25 iniciais (88%) e 224 concretos dos 346 iniciais (65%), resultando no gráfico apresentado na Figura 41 no que se refere à quantidade de água. Estas 22 Formulações se localizam em uma região experimental para além das Formulações Base (Conjuntos de Formulações 1 e 2), como os

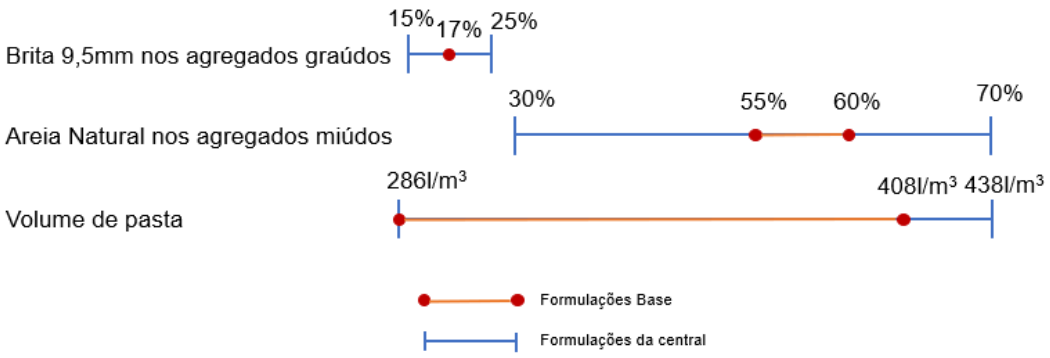
concretos para fundações (com consumo de 400kg/m^3 de cimento e abatimento do tronco de cone especificado de 220mm) – Formulações 15 e 16 –, os concretos com relação água/cimento fixa – Formulações de 18 a 23 – e módulos especificados – Formulações 19, 20, 25 e 26 –, com restrições maiores que os concretos das Formulações Base e formulações diferentes. Isso representa uma variação na fração de areia natural nos agregados miúdos entre 30 e 70% e a fração de Brita 9,5mm nos agregados graúdos entre 15% e 25%, além dos concretos com 100% Brita 9,5mm. No volume de pasta, esta faixa fica entre 286l/m^3 e 432l/m^3. Nas Formulações Base, a fração de Brita 9,5mm esteve fixa em 17% nos agregados graúdos e de areia natural entre 55% e 60% dos agregados miúdos, além disso, o volume de pasta variou entre 286l/m^3 e 408l/m^3, conforme esquema na Figura 42.

Figura 41 – Correlação entre a quantidade de água adicionada e a quantidade de água teórica das 25 formulações, após exclusão de dados



Fonte: própria autora

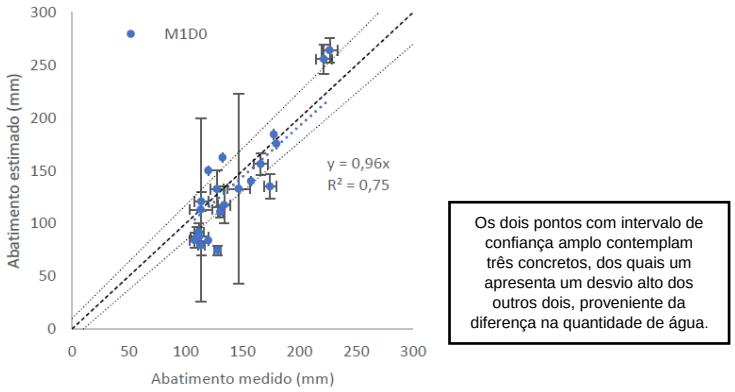
Figura 42 – Faixa das formulações base e das formulações da central



Fonte: própria autora

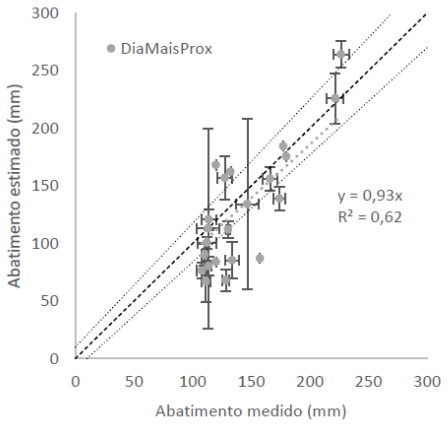
Destes concretos, comparou-se a média do abatimento estimado com a média do abatimento medido de cada formulação. A Figura 43 corresponde ao abatimento do tronco de cone estimado empregando apenas a caracterização dos materiais coletados no dia M1D0. Ao passo que, na Figura 44, o abatimento do tronco de cone foi estimado utilizando as cinco análises apresentadas na seção 4.2, considerando o resultado de caracterização do dia mais próximo ao dia que o concreto foi dosado. Estes resultados detalhados são mostrados na Tabela 15 e as barras de erro dos gráficos representam o intervalo de confiança, para um grau de confiança de 0,90, conforme a eq.(28). É necessário mencionar que não foi calculado o intervalo de confiança para as seis formulações que continham apenas um ou dois concretos (Tabela 15), por ser uma amostra muito pequena.

Figura 43 – Correlação entre o abatimento medido e o abatimento estimado por formulação para Conjunto de Materiais M1D0



Fonte: própria autora

Figura 44 – Correlação entre o abatimento medido e o abatimento estimado por formulação para Conjunto de Materiais DiaMaisProx



Os dois pontos com intervalo de confiança amplo contemplam três concretos, dos quais um apresenta um desvio alto dos outros dois, proveniente da diferença na quantidade de água.

Fonte: própria autora

Tabela 15 – Média do abatimento estimado e abatimento medido para as formulações dos concretos dosados na central

Formulação	Quantidade de concretos	Média do abatimento do tronco de cone estimado (mm)		Média do abatimento do tronco de cone medido (mm)	Diferença entre o abatimento medido e o estimado (mm)	
		DiaMaisProx	M1D0		DiaMaisProx	M1D0
1	11	67	92	111	-45	-20
2	4	85	117	134	-48	-16
3	3	134	133	147	-12	-14
4	2	168	150	120	48	30
5	1	84	84	120	-36	-36
7	8	121	121	114	7	7
8	7	76	84	108	-31	-24
9	2	87	140	158	-71	-18
10	3	113	113	113	0	0
11	2	162	162	133	30	30
12	6	157	133	128	29	5
13	51	112	111	130	-18	-20
15	15	226	256	222	4	34
16	6	264	264	227	37	37
18	1	175	175	180	-5	-5
19	5	156	156	166	-10	-10
21	18	80	79	114	-33	-35
22	22	68	74	128	-60	-54
23	2	184	184	178	7	7
25	5	100	87	112	-12	-25
26	31	90	87	110	-20	-24
31	16	139	135	174	-35	-39

Em ambos os gráficos da Figura 43 e Figura 44, os dois pontos que apresentam um intervalo de confiança amplo para o abatimento do tronco de cone estimado comparados aos demais são casos semelhantes, a Formulação 3 e a Formulação 10: uma formulação com apenas três concretos, dos quais um apresenta um desvio alto dos outros dois, proveniente da diferença na quantidade de água. No entanto, esta diferença ainda está contemplada nos possíveis erros de medição detalhados previamente e, dessa forma, o dado foi mantido na análise.

Ao examinar as outras 14 formulações as quais o intervalo de confiança foi calculado, nota-se que, com um grau de confiança de 0,90, estes intervalos se mantiveram estreitos, todos menores que o erro do ensaio de abatimento do tronco de cone. Esta

constatação revela que, de fato, o cálculo do abatimento do tronco de cone médio das formulações atenuou os desvios e permitiu a análise do conjunto de dados.

Observando o processo, o alto desvio de medida de água se sobrepõe a qualquer outra mudança na dosagem, como variações da quantidade de cimento ou da própria quantidade de água, considerando o valor verdadeiro, e não os valores medidos. Para reduzir a variabilidade, é essencial aperfeiçoar a medição da água adicionada ao concreto na central por meio de tecnologias disponíveis no mercado. É possível, por exemplo, dispor do sensoriamento da umidade dos agregados graúdos e miúdos em linha, conectado com o sistema supervisório, e o hidrômetro na plataforma interligado com o sistema supervisório da central.

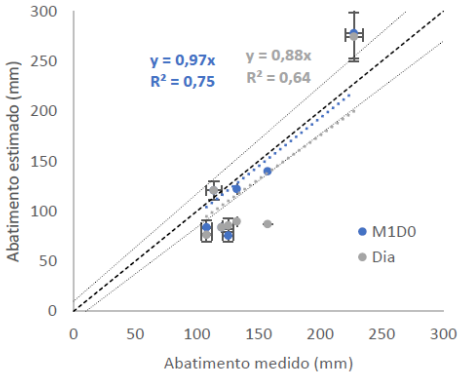
O coeficiente de determinação para os abatimentos estimados com os dados do Conjunto de Materiais M1D0 atingiu 0,75, o que representa uma correlação razoável, considerando que são dados de processo (com altas variações em condições de operação em escala real). Este resultado mostra que o modelo pode ser utilizado como uma ferramenta de dosagem para prever os impactos esperados no abatimento do tronco de cone. Já tomando o Conjunto de Materiais do dia mais próximo o coeficiente de determinação foi 0,62, o que representa uma correlação intermediária.

O exame das diferenças entre o abatimento estimado e o medido apresentadas na Tabela 15 corrobora o observado nos gráficos: o abatimento estimado utilizando apenas um conjunto de materiais apresenta uma diferença menor que usando os cinco conjuntos. Para o Conjunto de Materiais M1D0, sete formulações – 32% do total – se encontram com uma diferença maior que a aceitável pelo erro do ensaio de abatimento do tronco de cone, enquanto para o Conjunto de Materiais do dia mais próximo este valor alcança 11 formulações (50% das formulações analisadas).

Nota-se que a correlação é mais fraca quando se usa diferentes conjunto de materiais. Isso indica que os resultados estão mais dispersos em torno da média, possivelmente porque o modelo está superestimando as variações de abatimento do tronco de cone em decorrência das mudanças dos materiais. Porém, ao utilizar a caracterização dos materiais do dia mais próximo, não se usa exatamente o material do dia: são dois meses de dados de concretos e apenas cinco conjuntos de materiais caracterizados em duas semanas específicas.

Deste modo, tomaram-se apenas os dias em que os materiais foram coletados – 47 concretos e 7 formulações – e realizou-se a mesma análise (Figura 45). Nota-se que o coeficiente de determinação com apenas um Conjunto de Materiais se mantém mais alto que utilizando a caracterização do material do dia (0,75 contra 0,64). Apesar de serem poucos dados, esta observação pode estar atrelada ao fato de o modelo estar superestimando o impacto das variações dos materiais no abatimento do tronco de cone.

Figura 45 – Média do abatimento estimado por média do abatimento medido nos cinco dias em que os materiais foram caracterizados



Fonte: própria autora

Ao avaliar a capacidade preditiva do modelo, nota-se a característica de especificidade deste para um grau de dispersão, ou seja, o modelo não quantifica a influência do tipo, da dosagem e de oscilações do aditivo, tampouco considera mudanças na interação entre o aditivo e o cimento. Desta forma, é necessário assumir a premissa de igual dispersão entre os concretos avaliados. Para exemplificar esse tema, tomou-se a média de sete concretos da Formulação 28, que emprega dois aditivos em conjunto: um à base de lignosulfonato e outro à base de policarboxilato. Estimou-se o abatimento do tronco de cone pelo modelo utilizando o material M1D0 e obteve-se 43mm. Porém, a média do abatimento do tronco de cone de descarga atingiu 107mm, gerando um erro do modelo de 63mm, superior ao erro das 22 formulações avaliadas. Este caso mostra a necessidade de se ajustar o modelo para cada grau de dispersão das partículas no concreto em decorrência do tipo de aditivo aplicado. Para tal, deve-se utilizar o mesmo método empregado neste trabalho: tomar

um conjunto de dados validado em laboratório e ajustar um modelo a partir do MPT e do IPS.

Atualmente, os altos desvios de medida de água na central impedem o uso do modelo para avaliar o impacto das variações no proporcionamento durante a operação. Ao conseguir atenuar este problema de medição da água, trabalhando com as médias das formulações, é possível notar que, entre formulações, o modelo pôde perceber bem o efeito das mudanças de proporcionamento no abatimento do tronco de cone.

É preciso destacar que os coeficientes de determinação encontrados entre o abatimento medido e estimado apresentam valores medianos, indicando uma relação relevante, contudo revelam que o modelo ainda necessita ser avaliado, sobretudo para as variações dos materiais. Para tanto, devem ser realizados experimentos em laboratório, controlando as variáveis de interesse, de forma a validar os resultados obtidos neste estudo e, caso pertinente, efetuar adequações no modelo.

Em resumo, nesta pesquisa, o modelo se mostrou capaz de estimar razoavelmente a influência das mudanças de proporcionamento no abatimento em diversos concretos, porém necessita ser aprimorado no que diz respeito à previsão do impacto das mudanças dos materiais no abatimento durante a operação.

Desta maneira, o modelo apresenta potencial para ser empregado no método de dosagem por otimização computacional, contribuindo com a modelagem das relações entre as variáveis, especificamente neste caso, entre o abatimento e as variáveis de proporcionamento. Ao utilizar a otimização computacional a partir deste modelo, é possível reduzir o número de experimentos e os recursos demandados pelo processo de definição da formulação, assim como, facilita-se a busca por ótimos globais a fim de se obter formulações com menor intensidade de ligante e mais ecoeficientes.

Inicialmente, levantou-se a hipótese de que o modelo poderia ser utilizado no controle tecnológico de concreto para avaliação do efeito de variações de dosagens e de mudanças nas características dos materiais na operação da central. Entretanto o alto desvio da medição da água impede o modelo de avaliar as mudanças de dosagem na operação, e, além disso, o modelo pode ter superestimado os impactos das mudanças nos materiais no abatimento do tronco de cone neste estudo. Desta maneira, o modelo não se mostra interessante para ser utilizado no controle de processo na central de

concreto neste momento. A central precisa desenvolver o seu controle aperfeiçoando a medição da água adicionada ao concreto a fim de utilizar modelos em sua operação. Além disso, é necessário confirmar o observado neste trabalho referente às variações dos materiais e, caso necessário, adaptar o modelo, para poder começar a utilizá-lo em operação.

4.3.3 Análise de sensibilidade do modelo

Nesta seção, foi feita uma análise de sensibilidade do abatimento do tronco de cone estimado dos concretos cujas estimativas apresentaram maior erro, avaliando o impacto do proporcionamento entre os materiais e das mudanças dos próprios materiais.

Inicialmente, para elucidar como as variáveis influem no abatimento do tronco de cone, cabe revisitar as equações de distância entre partículas, IPS e MPT (eq.(6) e (8)). Por estas equações, é possível averiguar as correlações entre as variáveis de entrada e o resultado da distância entre partículas. Observa-se que as três variáveis – a porosidade do empacotamento, a área superficial e o volume de sólidos – apresentam uma relação negativa com a distância de partículas tanto grossas quanto finas, ou seja, quanto maior o valor destas variáveis, por exemplo, da porosidade do empacotamento (tudo mais constante), menor a distância entre as partículas, e, consequentemente, menor o abatimento, conforme exposto na Figura 35.

Para realizar a análise de sensibilidade, tomaram-se quatro formulações com especificações distintas, nas quais o erro do modelo foi maior: as Formulações 5, 16, 22 e 31 (Tabela 16).

Tabela 16 – Média do abatimento do tronco de cone medido e estimado para as formulações selecionadas

Formulação	**Abatimento do tronco de cone medido médio (mm)**	**Abatimento do tronco de cone estimado médio (mm)**	**Erro (mm)**
5	120	84	36
16	128	74	54
22	226	264	38
31	174	135	39

A análise de sensibilidade consistiu em substituir cada variável da eq.(29) – porosidade do empacotamento, área superficial e volume de sólidos – pelos seus

valores limítrofes e avaliar o impacto em percentual no abatimento estimado para estes concretos de referência. Os limites superiores e inferiores são definidos como os valores das variáveis supracitadas que, dentre os concretos avaliados da central, maximizam e minimizam o abatimento do tronco de cone estimado, ou seja, os termos superior e inferior nesta análise se referem ao abatimento do tronco de cone obtido e não ao valor das variáveis de entrada. Por exemplo, dentre os 224 concretos, tomou-se a menor área superficial dos grossos – variável esta que maximiza o abatimento do tronco de cone – para compor o "limite superior". A avaliação detalhada do modelo mediante as variáveis de distância entre partículas contribui para o domínio da modelagem realizada, assim como pauta a análise de sensibilidade das variáveis de entrada do próprio modelo de distância.

4.3.3.1 Análise de sensibilidade frente às variações de proporcionamento

Nesta etapa, avaliou-se a influência de cada variável considerando as mudanças de proporcionamento, empregando o mesmo Conjunto de Materiais, o M1D0. A Tabela 17 mostra a maior e a menor porosidade do empacotamento, área superficial específica e volume de sólidos tanto para as partículas grossas quanto para as finas encontradas nos 224 concretos avaliados no período. Estas variáveis levam o concreto ao limite superior e inferior de abatimento do tronco de cone estimado.

Tabela 17 – Variáveis da distância de partículas dos concretos dosados na central as quais levam ao limite superior e inferior do abatimento do tronco de cone estimado

Limite	Característica	Valor
Superior	Porosidade dos grossos	16,9%
	Área superficial dos grossos (m^2/cm^3)	0,006
	Volume de sólidos dos grossos	56,7%
	Porosidade dos finos	20,6%
	Área superficial dos finos (m^2/cm^3)	3,37
	Volume de sólidos dos finos	38,6%
Inferior	Porosidade dos grossos	19,2%
	Área superficial dos grossos (m^2/cm^3)	0,010
	Volume de sólidos dos grossos	80,5%
	Porosidade dos finos	22,0%
	Área superficial dos finos (m^2/cm^3)	4,04
	Volume de sólidos dos finos	55,1%

O limite superior do abatimento estimado no que tange à área superficial dos grossos está atrelado a um concreto com maior quantidade de britas, devido a um teor de

argamassa baixo, bem como a uma maior proporção de Areia Britada. A Areia Britada tem uma distribuição granulométrica na qual parte considerável da massa é avaliada nos finos, reduzindo a área superficial dos grossos. O limite inferior do abatimento estimado para a área superficial segue exatamente na direção oposta, possuindo menor quantidade de britas e menor proporção de areia industrial.

A porosidade dos grossos mais baixa é proveniente de um concreto com dimensão máxima 19mm, no qual há um material adicional para ocupar vazios e uma quantidade baixa de brita 9,5mm, atingindo um empacotamento de partículas mais próximo do ótimo. Em contrapartida, a porosidade mais alta é proveniente da dimensão máxima 9,5mm. Nos finos, a variação de porosidade está correlacionada com a proporção entre cimento e finos de areia: quanto mais finos de areia, mais baixa a porosidade.

O limite superior do abatimento para o volume de sólidos dos grossos vincula-se a um concreto com alto volume de pasta, e o limite superior para os finos é alcançado por um concreto com alta quantidade de água e alta relação a/c. Os limites inferiores são obtidos pelo processo contrário.

A fim de realizar a análise de sensibilidade, substituiu-se cada variável de entrada das equações de MPT e IPS (eq. (6) e (8)) pelo limite superior e inferior dos concretos dosados na central e avaliou-se o impacto em percentual do abatimento estimado pelo modelo (eq.(29)) para aquele concreto de referência. Primeiro, substituiu-se apenas uma variável de cada vez para entender sua influência isoladamente. Por último, substituíram-se todas as variáveis concomitantemente.

Esta avaliação é apresentada na Tabela 18, da seguinte maneira: as colunas correspondem ao abatimento do tronco de cone atingido para cada uma das quatro formulações e seu respectivo impacto percentual no abatimento; a primeira linha com dados refere-se aos concretos de referência e, em seguida, é apresentado o bloco com os limites superiores, no qual cada linha mostra o abatimento estimado por meio da substituição na eq.(29) da variável especificada pelo valor apresentado na Tabela 17; a última linha deste bloco, nomeada “Todos”, foi obtida substituindo todas as variáveis pelos valores que levam ao abatimento máximo (Tabela 17); e o bloco do limite inferior segue o mesmo método de análise. Ao substituir todas as variáveis pelos valores limítrofes, todas as Formulações atingem o mesmo abatimento, pois as variáveis de entrada do modelo são iguais.

Observa-se que, em alguns casos, o abatimento estimado ultrapassou os limites de 0 e 300mm do ensaio de abatimento do tronco de cone. Como o modelo utilizado é linear, para qualquer resultado do modelo acima de 300 ou abaixo de 0mm, deve ser considerado o limite do ensaio. Desta forma, nesta análise foram mantidos os resultados do modelo apenas para quantificar o impacto de cada variável.

Tabela 18 – Análise de sensibilidade dos concretos das formulações escolhidas frente às variações de proporcionamento

Formulações		**Formulação 5**		**Formulação 16**		**Formulação 22**		**Formulação 31**	
Impacto de cada parâmetro		**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**	**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**	**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**	**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**
Limite	**Referência**	**84**	**x**	**75**	**X**	**259**	**x**	**138**	**x**
Superior	Porosidade dos grossos	84	0,2%	75	0,5%	274	5,6%	139	1,2%
	Área superficial dos grossos	117	39,6%	112	49,5%	316	22,1%	197	43,2%
	Concentração dos sólidos dos grossos	400	376,8%	303	305,1%	326	25,8%	339	146,1%
	Porosidade dos finos	88	4,4%	80	6,5%	269	3,7%	144	4,1%
	Área superficial dos finos	107	27,8%	93	24,5%	283	9,2%	160	15,9%
	Concentração dos sólidos dos finos	125	49,3%	171	129,2%	414	59,8%	217	57,4%
	Todos	677	707,9%	677	805,6%	677	161,3%	677	391,4%
Inferior	Porosidade dos grossos	52	-37,4%	49	-34,3%	245	-5,3%	111	-19,2%
	Área superficial dos grossos	36	-57,2%	30	-59,9%	164	-36,8%	87	-36,8%
	Concentração dos sólidos dos grossos	-79	-194,7%	-93	-224,1%	-103	-139,6%	-87	-163,4%
	Porosidade dos finos	82	-1,7%	74	-1,3%	258	-0,3%	137	-0,7%
	Área superficial dos finos	58	-30,5%	46	-38,7%	200	-22,7%	101	-26,9%
	Concentração dos sólidos dos finos	-60	-171,0%	-43	-157,9%	42	-83,9%	-27	-119,9%
	Todos	-142	-269,8%	-142	-290,3%	-142	-154,9%	-142	-203,3%

Debruçando-se sobre a Tabela 18, é possível notar que a variável que apresenta o maior impacto no abatimento estimado na região experimental estudada é o volume de sólidos, tanto dos finos quanto dos grossos. O volume de sólidos dos grossos está conectado com a mudança do volume de pasta e, como foi mostrado na Figura 42, existe um intervalo relevante de volume de pasta entre os concretos avaliados na central – de 286l/m^3 a 432l/m^3.

Pelo observado nas Formulações Base (Tabela 21), tomando, por exemplo, o Conjunto de Formulações 1 (dimensão máxima 19mm e f_{ck} 30 MPa), a formulação com o abatimento do tronco de cone de 60mm contém 259l/m^3 de pasta, ao passo que a formulação com abatimento do tronco de cone 200mm consome 318l/m^3 de

pasta. Assim, nestes concretos, observa-se um ganho de 140mm de abatimento com um incremento de 59l/m^3 de pasta, o impacto mostra-se coerente com as variações da ordem de 400mm de abatimento (ou 300 mm considerando os limites do ensaio) para a variação de 144l/m^3 de pasta observada na Tabela 18.

Ao examinar o volume de sólidos dos finos, avaliando o Conjunto de Formulações 1 (dimensão máxima 19mm e abatimento 120mm), nota-se que para compensar a variação de volume de sólidos finos de 34,9% (formulação com 20MPa) para 43,2% (formulação com 40MPa) foi necessário um incremento do volume de pasta de 54l/m^3. Ou seja, a fim de manter o abatimento em 120mm, ao aumentar o volume de sólidos dos finos em 8,3%, adicionaram-se 54l/m^3 de pasta, que, como analisado no parágrafo anterior, equivaleu a um incremento da ordem de 140mm no abatimento. Assim, uma variação de 38,6% para 55,1% no volume de sólidos dos finos (Tabela 17), correspondente a 16,5%, acarretar variações da ordem de 200mm no abatimento se mostra coerente. É importante notar, como já mencionado no início deste item 4.3.3, que as variáveis interagem entre si e as relações, portanto, não são lineares, logo esta análise visa apreciar as ordens de grandeza e não se restringir a proporções.

Após o volume de sólidos, a variável mais relevante é a área superficial das partículas grossas. Apenas com a variação desta característica das quatro formulações, o abatimento estimado já atingiria o abatimento medido. A área superficial dos finos também apresenta impactos relevantes, porém não conseguiria, sozinha, atingir o abatimento medido.

A partir das Formulações Base, não é possível fazer uma análise da área superficial dos grossos e dos finos como foi feita para o volume de sólidos, pois naqueles concretos a oscilação da área superficial não é a dominante em nenhuma série de dados que se possa isolar.

De um ponto de vista físico, é intrigante a constatação de que a área superficial específica das partículas grossas seja uma variável que influencie mais o abatimento do tronco de cone estimado que a área superficial dos finos, uma vez que a primeira é três ordens de grandeza menor que a última. Ou seja, a quantidade de pasta necessária para molhar a área das partículas grossas é muito menor que a quantidade de água demandada para molhar as partículas finas. Como a área superficial específica dos grossos é calculada supondo partículas esféricas através da

distribuição granulométrica destas partículas, esse resultado pode ser um reflexo não só da área em si, mas também da distribuição granulométrica destes materiais na formulação. O modelo estima bem a maioria dos abatimentos, logo, a área superficial específica granulométrica das partículas grossas gera uma boa previsão da fluidez nesta região experimental.

O impacto da porosidade dos grossos no abatimento é baixo, atingindo um intervalo de aproximadamente 30mm, próximo ao erro do ensaio. Como as Formulações Base não apresentam variações nas proporções entre agregados graúdos e tampouco entre os miúdos, a porosidade dos grossos não varia de forma relevante neste conjunto de dados. Já nos concretos da central, os concretos com porosidades limítrofes apresentaram as demais variáveis diferentes também, impedindo a análise da porosidade dos grossos isoladamente. Para obter a precisão adequada a fim de confirmar a sensibilidade do abatimento pela porosidade dos grossos, recomenda-se, para trabalhos futuros, executar experimentos em laboratório.

Nestes concretos, a variação da porosidade dos finos não influencia o abatimento estimado, pois a maior mudança na análise de sensibilidade foi 10mm, dentro do erro do ensaio. Esse fato pode ser explicado pelo uso apenas do cimento como material fino, logo essas variações de porosidade são resultado das mudanças de quantidade e proporção dos finos das areias, as quais não tem influência relevante no empacotamento das partículas finas.

Como sobredito, a análise de sensibilidade demonstrou que a variável que apresenta o maior impacto no abatimento é o volume de sólidos, tanto para os grossos quanto para os finos. Estas variáveis são afetadas diretamente pela quantidade de água no concreto e, assim, faz-se necessário aprimorar a precisão do controle da quantidade de água adicionada ao concreto na operação de dosagem da central.

Examinando especificamente o volume de sólidos dos finos, é sabido que estes consistem nas partículas menores que 100µm, quais sejam, o cimento em sua totalidade e os finos dos agregados. Desta maneira, quanto maior a quantidade de finos nos agregados, especialmente nas areias, maior o volume de sólidos dos finos, reduzindo consideravelmente a distância entre as partículas. Poderia se levantar a hipótese de que as demais variáveis poderiam ser afetadas positivamente pelo aumento dos finos das areias, como a porosidade do empacotamento do finos, porém,

considerando os materiais convencionais utilizados na central, o empacotamento dos finos não tem impacto algum no abatimento do tronco de cone dos concretos. Assim, na central de concreto, uma propriedade dos agregados que se deve mensurar e controlar é a quantidade de finos (abaixo de 100µm) em sua distribuição granulométrica, a fim de avaliar as implicações destas mudanças no abatimento do tronco de cone e viabilizar o uso do modelo na operação.

Ao examinar o volume de sólidos dos grossos, nota-se que esta é a última variável a qual se utiliza para ajustar o abatimento do tronco de cone, desta maneira, sua variação é uma consequência das demais variáveis. Assim, deve-se adotar a estratégia desenvolvida no item 4.1.3, reduzindo a porosidade do empacotamento e o volume de sólidos, para aumentá-lo a fim de manter o MPT constante.

No tocante à área superficial dos grossos, as mudanças mais relevantes ocorrem devido às decisões de dosagem: o proporcionamento dos agregados graúdos e miúdos e a própria seleção de materiais. Desta forma, o controle da área superficial dos grossos por meio da análise granulométrica é necessário na operação de dosagem e especialmente importante ao empregar o método de dosagem por otimização computacional.

Avaliando a porosidade do empacotamento dos grossos, esta revelou-se pouco influente no abatimento do tronco de cone previsto, portanto não é prioritário controlá-la na operação da central. Já ao empregar o método de dosagem, é interessante otimizar esta variável a fim de obter ganhos marginais na eficiência do uso de ligantes no concreto.

Ao ponderar sobre a porosidade do empacotamento dos finos, esta se mostra desprezível tanto para a operação na central quanto para métodos de dosagem, considerando o uso de apenas um material abaixo de 100µm em sua totalidade, neste caso o cimento.

Esta análise de sensibilidade permitiu avaliar quais as variáveis de entrada do modelo mais relevantes e, assim, compreender as implicações sobre quais tipos de controles implementar tanto na operação da central quanto ao usar os métodos de dosagem para que se possa usar o modelo a fim de prever o abatimento do tronco de cone.

4.3.3.2 Análise de sensibilidade frente às variações dos materiais

Em seguida, avaliou-se a influência dos materiais. É importante notar que, pela análise realizada no item 4.3.2, o modelo superestimou o impacto da variação dos materiais no abatimento, por isso, esta análise visa entender a amplitude do abatimento previsto por este modelo, mesmo sabendo que o impacto destas variações no abatimento medido pode ser menor.

A Tabela 19 mostra os materiais que atingem a maior e a menor distância entre partículas tanto para as partículas grossas quanto para as finas dos concretos avaliados no período que levam ao limite superior e inferior de abatimento estimado. Esses materiais limítrofes foram selecionados considerando a área superficial específica e a porosidade do empacotamento gerada nas formulações de concreto.

Tabela 19 – Materiais utilizados nos concretos dosados na central os quais levam ao limite superior e inferior do abatimento do tronco de cone estimado

Material	Limite Superior	Limite Inferior
Brita 19mm	M1D0	M2D1
Brita 9,5mm	M1D0	M1D2
Areia Britada	M1D4	M2D3
Areia Natural	M1D2	M2D3
Cimento	M1D4	M2D1

Entre as britas, o comportamento foi igual, o material do limite superior consistiu-se no mais fino dentre os disponíveis e o limite inferior foi composto por britas mais grossas e com distribuição granulométrica estreita. Ambos os limites apresentaram área superficial específica similares.

Ao observar a areia britada, o limite superior foi atingido pela areia mais fina e com a menor área superficial BET, enquanto o limite inferior consistiu na areia mais grossa e com área superficial BET mais alta do conjunto, além de possuir o maior teor de finos.

A areia natural que atingiu o limite superior foi a mais fina e com menor área superficial específica BET, enquanto o limite inferior foi alcançado pela mais grossa e a segunda maior área superficial BET. Como a distribuição granulométrica do cimento foi muito estável, seu efeito no abatimento foi governado pela área superficial BET, sendo a maior área o limite inferior e a menor o limite superior.

Deste modo, tomaram-se as quatro formulações com especificações distintas, nas quais o erro do modelo foi maior e seu abatimento foi calculado baseado no Conjunto de Materiais M1D0 (Tabela 16). Nestas formulações, substituiu-se cada material pelos materiais analisados no período que levavam ao limite superior e inferior de abatimento e avaliou-se o impacto em percentual do abatimento estimado pelo modelo para o concreto de referência. Esta análise é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Análise de sensibilidade dos concretos das formulações escolhidas frente às variações de materiais

Formulações	**Formulação 5**		**Formulação 16**		**Formulação 22**		**Formulação 31**	
Limite	**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**	**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**	**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**	**Abatimento estimado (mm)**	**Impacto**
Referência	84	x	75	x	259	X	138	X
Superior	86	2,7%	88	18,0%	277	6,8%	153	11,3%
Inferior	49	-41,6%	40	-46,9%	190	-26,6%	94	-31,7%

Nota-se que a amplitude dos abatimentos estimados em decorrência da variação de materiais – que impactam majoritariamente na área superficial e porosidade dos grossos e na área superficial e volume de sólidos dos finos – esteve entre 37mm e 87mm, se mostrando mais intensa nos concretos com maiores abatimentos. Apenas no concreto com a Formulação 22 o abatimento estimado atingiu o abatimento medido (Tabela 15) com a mudança dos materiais.

É importante destacar a variação de 87mm de abatimento do tronco de cone em concretos com a mesma formulação devido a oscilações de lotes de materiais ao longo de apenas dois meses, pois esta alta variação exigiria um controle e uma atuação rápida na operação da central. Este controle abarcaria tanto uma caracterização frequente em termos de granulometria – especialmente dos grossos – e área específica BET – focada nos finos – no recebimento dos materiais de forma a antecipar a atuação, assim como um maior controle da água adicionada ao concreto como discutido no item 4.3.2 na página 108. A atuação consistiria em um ajuste em tempo real das formulações.

Embora a amplitude da variação do abatimento do tronco de cone obtida (87mm) seja factível, na seção 4.3.2, foi encontrado um melhor coeficiente de determinação, bem como menores diferenças entre o abatimento estimado e o medido, ao utilizar apenas um Conjunto de Materiais do que ao utilizar os cinco Conjuntos de Materiais no cálculo

do abatimento do tronco de cone. Este resultado nos indica que o impacto da variação dos materiais no abatimento estimado pelo modelo precisa ser mais estudado a fim de refletir com maior precisão o abatimento medido. Para esta avaliação, recomenda-se coletar os materiais ao longo do tempo, como foi feito neste trabalho, e realizar experimentos executando concretos em laboratório, de forma a garantir condições mais controladas e maior precisão das variáveis analisadas. Com este programa experimental seria possível validar este comportamento do modelo observado na operação e, caso necessário, identificar eventuais ajustes.

A análise de sensibilidade do modelo se mostrou uma ferramenta importante que permitiu a identificação das variáveis de entrada do modelo de distância de partículas mais significativas para o abatimento estimado, assim como avançar no entendimento do impacto das variações dos materiais no abatimento. Estas respostas indicam quais controles devem ser adotados na operação e no laboratório da central a fim de empregar o modelo para a otimização computacional.

5 CONCLUSÕES

Este estudo analisou a ecoeficiência de 120 Formulações Base de uma central de concreto em São Paulo, através da intensidade do ligante. Para uma determinada resistência à compressão, concretos com menor intensidade de ligante são aqueles com dimensão máxima 19mm e menor abatimento do tronco de cone, atingindo 7,5 kg/m^3/MPa. A menor ecoeficiência foi obtida por aqueles com dimensão máxima 9,5mm e maior abatimento, alcançando 10kg/m^3/MPa.

Com o intuito de entender a relação entre as variáveis físicas e o abatimento do tronco de cone, foi realizada uma análise das Formulações Base desta central utilizando o modelo de distância entre partículas para cada fase do concreto (MPT, para partículas grossa, e IPS, para partículas finas). Na etapa seguinte, foram estimados parâmetros para um modelo de previsão da fluidez e compararam-se os abatimentos previstos pelo modelo com os dados de concretos executados em sua operação.

Para o comportamento reológico do concreto, existe uma alta relação entre o MPT e o abatimento, com o coeficiente de determinação (R^2) da função linear ajustada entre 0,98 e 0,99, para os Conjunto de Formulações, dado um f_{ck}. Notou-se também uma alta relação entre o IPS e o f_{ck} para ambos os Conjuntos de Formulação, atingindo o R^2 de 0,97 e 0,98.

Esta constatação permite criar uma estratégia de dosagem baseada em distância de partículas, com objetivo de reduzir a intensidade de ligante do concreto. Para um concreto especificado (f_{ck}, abatimento do tronco de cone e dimensão máxima), deve-se almejar aumentar o volume de sólidos dos grossos mantendo o MPT fixo, através da redução da porosidade do empacotamento e da área superficial dos grossos.

Nas Formulações Base analisadas, há uma oportunidade de redução de volume de pasta – e consequente redução de intensidade de ligante – em formulações com alto f_{ck}, através da redução da porosidade do empacotamento dos grossos destes concretos.

Com base nas correlações observadas, um modelo preditivo de abatimento do tronco de cone em função do MPT e do IPS foi ajustado, obtendo entre o abatimento especificado e o abatimento estimado R^2 de 0,97 para o Conjunto de Formulação 1, R^2 de 0,96 para o Conjunto de Formulação 2 e R^2 de 0,84 ao considerar os conjuntos

de formulação juntos. Essa alta relação mostra que as variáveis utilizadas para avaliar a distância das partículas apresentam relevância no fenômeno físico e sua equação pode descrever quantitativamente o abatimento do tronco de cone.

Para validar o modelo ajustado, foram utilizados 224 concretos dosados na central que consistiam em 22 formulações em uma região experimental para além das atingidas pelas Formulações Base. O coeficiente de determinação entre os abatimentos estimados com os dados do Conjunto de Materiais M1D0 e os abatimentos medidos atingiu 0,75, o que representa uma relação razoável, considerando que são dados de processo (com altas variações em condições de operação em escala real). Já considerando o Conjunto de Materiais do dia mais próximo o coeficiente de determinação é 0,62, representando uma relação média. Notou-se que a correlação é mais fraca quando se usa diferentes conjuntos de materiais.

Como os coeficientes de determinação encontrados são médios, os resultados indicam uma relação relevante, porém o modelo ainda deve ser avaliado, especialmente para as variações dos materiais. Recomenda-se a realização de experimentos laboratoriais, com condições controladas, empregando materiais coletados ao longo do tempo, assim como a avaliação de concretos historicamente dosados em laboratório sob essas condições, a fim de confirmar o observado na central e, se necessário, implementar ajustes no modelo.

Pelo observado nesta pesquisa, o modelo se mostra capaz de estimar razoavelmente o impacto das mudanças de proporcionamento no abatimento do tronco de cone em diversos concretos, porém necessita ser aprimorado no que diz respeito à previsão do impacto das mudanças dos materiais no abatimento do tronco de cone durante a operação.

Desta maneira, o modelo apresenta potencial para ser empregado no método de dosagem por otimização computacional, contribuindo com a modelagem das relações entre as variáveis, especificamente neste caso, entre o abatimento do tronco de cone e as variáveis de proporcionamento. Ao utilizar a otimização computacional a partir deste modelo, é possível reduzir o número de experimentos e os recursos demandados pelo processo de definição da formulação, assim como facilitar a busca

por ótimos globais a fim de se obter formulações com menor intensidade de ligante e, consequentemente, maior ecoeficiência.

Como o alto desvio da medição da água na central impede o modelo de avaliar as mudanças de proporcionamento de cada concreto na operação, e, além disso, o modelo superestimou os impactos das mudanças dos materiais no abatimento do tronco de cone, é necessário um aprimoramento destas questões a fim de se implementar o uso do modelo no controle tecnológico da central. Para tal, é fundamental aperfeiçoar a medição da água adicionada ao concreto, por meio de tecnologias disponíveis como o sensoriamento de umidade dos agregados miúdos e graúdos, e evoluir a caracterização dos materiais na central, através de análises granulométricas frequentes e determinação da área específica BET dos finos. Além disso, é importante uma investigação detalhada em laboratório sobre o impacto das mudanças dos materiais no abatimento do tronco de cone.

A análise de sensibilidade do modelo mostrou que, dentre os concretos utilizados para a validação, o volume de sólidos e a área superficial dos grossos e dos finos têm maior impacto no abatimento do tronco de cone estimado pelo modelo que as demais variáveis. Assim, ajustes finos com relação a estas características, assim como a implementação de um controle na central focado nestas propriedades, podem melhorar a capacidade de predição do modelo e viabilizar seu uso na operação.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

O desenvolvimento do trabalho trouxe pontos os quais podem ser explorados mais a fundo em pesquisas futuras. São eles:

- Realizar um programa experimental para a validação do modelo em laboratório, mantendo as variáveis controladas, e para a investigação sobretudo do impacto das variações das propriedades das matérias primas no abatimento do tronco de cone;
- Utilizar dados históricos de concretos executados em laboratório para validação do modelo;
- Investigar variáveis que não foram contempladas pelo modelo a fim de aumentar a precisão da previsão do modelo, por exemplo, a morfologia dos grãos dos agregados. É importante destacar que é necessário fazer uma avaliação da viabilidade de medir cada variável adicionada ao modelo.

- Implementar o uso do modelo como ferramenta auxiliar na dosagem em laboratório e avaliar a capacidade preditiva do modelo, assim como a intensidade no uso de ligantes e a ecoeficiência das formulações desenvolvidas;
- Realizar um programa experimental na central de concreto avaliando o comportamento reológico com o uso do reômetro com objetivo de entender a capacidade das variáveis de distância de partícula de prever tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade de concretos executados na central.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.

ABNT. **NBR 5739 - Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndrico**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

ABNT. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009 a.

ABNT. **NBR NM 26 - Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009 b.

ABNT. **NBR 7212 - Execução de concreto dosado em central - Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

ABNT. **NBR 8953 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015 a.

ABNT. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015 b.

ABNT. **NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ABNT. **NBR 11768-1 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABRAMS, Duff A. Design of Concrete Mixtures. **Structural Materials Research Laboratory**, California, v. n1, p. 20, 1918.

ALUJAS, Adrian *et al.* Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science**, *[S. l.]*, v. 108, p. 94–101, 2015.

ARORA, Aashay *et al.* Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 103, p. 179–190, 2018.

BANFILL, P. F. G. RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE. **Rheology Reviews**, *[S. l.]*, p. 61–130, 2006.

BARCELO, Laurent *et al.* Cement and carbon emissions. **Materials and Structures**, *[S. l.]*, v. 47, n. 6, p. 1055–1065, 2014.

BOUQUETY, M. N. *et al.* Experimental study of crushed aggregate shape. **Construction and Building Materials**, *[S. l.]*, v. 21, n. 4, p. 865–872, 2007.

CAZACLIU, B.; LÊ, N. D.; DE LARRARD, F. New methods for accurate water dosage in concrete central mix plants. **Materials and Structures**, *[S. l.]*, v. 41, n. 10, p. 1681–1696, 2008.

CEPURITIS, Rolands *et al.* Crushed sand in concrete – Effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology. **Cement and Concrete Composites**, *[S. l.]*, v. 71, p. 26–41, 2016.

CEPURITIS, Rolands *et al.* Influence of crushed aggregate fines with micro-proportioned particle size distributions on rheology of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, *[S. l.]*, v. 80, p. 64–79, 2017.

CHANDWANI, Vinay; AGRAWAL, Vinay; NAGAR, Ravindra. Modeling slump of ready mix concrete using genetic algorithms assisted training of Artificial Neural Networks. **Expert Systems with Applications**, *[S. l.]*, v. 42, n. 2, p. 885–893, 2015.

CIBI. **CIBI**. *[s. l.]*, 2020. Disponível em: https://www.cibi.com.br/. Acesso em: 15 fev. 2020.

DAMINELI, Bruno L. *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, *[S. l.]*, v. 32, n. 8, p. 555–562, 2010.

DAMINELI, Bruno L. *et al.* Viscosity prediction of cement-filler suspensions using interference model: A route for binder efficiency enhancement. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 84, p. 8–19, 2016.

DAMINELI, Bruno Luís. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.

DE LARRARD, F. *et al.* Design of a rheometer for fluid concretes. *In*: 1994, **RILEM Workshop on Special Concretes: Workability and Mixing**. : RILEM, 1994. p. 201–208.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.

DE LARRARD, François. **Concrete mixture proportioning a scientific approach**. 1. ed. London: E & FN Spon, 1999.

DE LARRARD, François; SEDRAN, Thierry. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002.

DEROUSSEAU, M. A.; KASPRZYK, J. R.; SRUBAR, W. V. Computational design optimization of concrete mixtures: A review. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 109, p. 42–53, 2018.

DEWAR, j. d.; ANDERSON, R. **Manual of Ready-Mixed Concrete**. glasgow: blackie academic & professional, 1992.

DÖRR, Aaron; SADIKI, Amsini; MEHDIZADEH, Amirfarhang. A discrete model for the apparent viscosity of polydisperse suspensions including maximum packing fraction. **Journal of Rheology**, *[S. l.]*, v. 57, n. 3, p. 743–765, 2013.

ECRA. **ECRA CCS Project: Report on Phase III**. Duesseldorf: ECRA, 2012.

EILERS, H. Die Viskosität von Emulsionen hochviskoser Stoffe als Funktion der Konzentration. **Kolloid-Zeitschrift**, *[S. l.]*, v. 97, n. 3, p. 313–321, 1941.

ERDOĞAN, S. T. *et al.* Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension. **Cement and Concrete Composites**, *[S. l.]*, v. 30, n. 5, p. 393–402, 2008.

FARRIS, R. J. Prediction of the Viscosity of Multimodal Suspensions from Unimodal Viscosity Data. **Transactions of the Society of Rheology**, *[S. l.]*, v. 12, n. 2, p. 281–301, 1968.

FERREIRA, Gilson Ezequiel; JUNIOR, Carlos Alberto Felix Fonseca. MERCADO DE AGREGADOS NO BRASIL. *In*: CETEM (org.). **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2012.

FLATT, R. J. Towards a prediction of superplasticized concrete rheology. **Materials and Structures**, *[S. l.]*, v. 37, n. 5, p. 289–300, 2004.

FLATT, Robert J.; BOWEN, Paul. Yodel: A Yield Stress Model for Suspensions. **Journal of the American Ceramic Society**, *[S. l.]*, v. 89, n. 4, p. 1244–1256, 2006.

FLATT, Robert J.; ROUSSEL, Nicolas; CHEESEMAN, Christopher R. Concrete: An eco material that needs to be improved. **Journal of the European Ceramic Society**, *[S. l.]*, v. 32, n. 11, p. 2787–2798, 2012.

FUNK, James E.; DINGER, Dennis. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions Applied to Ceramic Manufacturing.** 1. ed. Clemson: Springer Verlag, 1994.

GARTNER, E. M. POTENTIAL IMPROVEMENTS IN CEMENT SUSTAINABILITY. *In*: (Imperial College London, Org.) 2011, Londres. **31st Cement and Concrete Science Conference - Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials**. Londres: Imperial College London, 2011. p. paper 15 1-13.

HALES, Thomas C. A proof of the Kepler conjecture. **Annals of Mathematics**, *[S. l.]*, v. 162, n. 3, p. 1065–1185, 2005.

HAMMOND, Geoff; JONES, Craig. **Inventory of Carbon & Energy**. Bath: University of Bath, 2011.

HELMUTH, R. A. *et al.* **Abnormal concrete performance in the presence of admixturesReport 2006 - Portland Cement Association**. *[S. l.: s. n.]*.

HEWLETT, Peter C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. *[S. l.]*: Elsevier Ltd, 2003.

HU, Jiong; WANG, Kejin. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**, *[S. l.]*, v. 25, n. 3, p. 1196–1204, 2011.

IEA; WBCSD. **Cement technology roadmap 2009 carbon emissions reductions up to 2050**. *[S. l.: s. n.]*.

IEA; WBCSD. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. *[S. l.]*, 2018.

BRASIL - PROCESSO PRODUTIVO DO CONCRETO. Direção: InterCement. Brasil: InterCement, 2016. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=gHzRzKQZkQw

CONCRETO. Direção: InterCement. Brasil: InterCement, 2019. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=6i6tYN4Uwgg

JIAO, Dengwu *et al.* Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and Concrete Composites**, *[S. l.]*, v. 83, p. 146–159, 2017.

KOLIAS, S.; GEORGIOU, C. The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. **Cement and Concrete Composites**, *[S. l.]*, v. 27, n. 2, p. 211–216, 2005.

KRIEGER, Irvin M.; DOUGHERTY, Thomas J. A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres. **Transactions of the Society of Rheology**, *[S. l.]*, v. 3, n. 1, p. 137–152, 1959.

KWAN, A. K. H.; LING, S. K. Lowering paste volume of SCC through aggregate proportioning to reduce carbon footprint. **Construction and Building Materials**, *[S. l.]*, v. 93, p. 584–594, 2015.

LIU, J. *et al.* **Recent advance of chemical admixtures in concrete**. *[S. l.]*: Elsevier Ltd, 2019.

MALVERN. **Difração laser**. *[s. l.]*, 2017. Disponível em: https://www.malvern.com/br/products/technology/laser-diffraction. Acesso em: 9 out. 2017.

MASCOLO, R.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Concreto usinado: análise da variação da resistência à compressão e de propriedades físicas ao longo da descarga do caminhão betoneira. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, *[S. l.]*, v. 6, n. 2, p. 194–210, 2013.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto : estrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.

MENEZES, Mariana *et al.* PEGADA DE CARBONO COMPARATIVA DE CONCRETO ECOEFICIENTE. *In*: 2016, São Paulo. **7o Congresso Brasileiro de Cimento**. São Paulo: ABCP, 2016.

MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. **Journal of Colloid Science**, *[S. l.]*, v. 6, n. 2, p. 162–170, 1951.

MUELLER, S.; LLEWELLIN, E. W.; MADER, H. M. The rheology of suspensions of solid particles. *In*: 2010, Durham. **Proceedings of the Royal Society**. Durham *[s. n.]* p. 1201–1228.

MURATA, J. Flow and deformation of fresh concrete. **Matériaux et Constructions**, *[S. l.]*, v. 17, n. 2, p. 117–129, 1984.

NAIK, Tarun R.; RAMME, Bruce W. Determination of the water content of concrete by the microwave method. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 17, n. 6, p. 927–938, 1987.

NEHDI, M.; RAHMAN, M. A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 34, n. 11, p. 1993–2007, 2004.

NEVILLE, Adam M. **Properties of concrete**. Londres: Pearson, 2011.

NRMCA. **Truck mixer driver's manual**. EUA: national ready mixed concrete Association, 2015.

NUNES, Instituto Pedro. **Picnometria de Helio**. *[s. l.]*, 2017. Disponível em: https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/16. Acesso em: 9 out. 2017.

PCA. **Design and Control of Concrete Mixtures**. 14. ed. EUA: Portland Cement Association, 2011.

PHAM, A. M.; DESCANTES, Y.; DE LARRARD, F. Determination of sieve grading curves using an optical device. **Mechatronics**, *[S. l.]*, v. 21, n. 1, p. 298–309, 2011.

PIASTA, Wojciech; ZARZYCKI, Bartlomiej. The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, *[S. l.]*, v. 140, p. 395–402, 2017.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. Um modelo para previsão da viscosidade mínima de suspensões cerâmicas. **Cerâmica**, *[S. l.]*, v. 46, n. 299, p. 160–165, 2000.

PILEGGI, Rafael G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. São Carlos: UFSCar, 2001.

PILEGGI, Rafael G. **Benefícios da reologia no estudo do concreto fresco**. São Paulo *[s. n.]*.

POWERS, Treval Clifford. **The properties of fresh concrete**. 1. ed. Michigan: Wiley, 1968.

QUEMADA, D. Rheology of concentrated disperse systems and minimum energy dissipation principle. **Rheologica Acta**, *[S. l.]*, v. 16, n. 1, p. 82–94, 1977.

REBMANN, Markus Samuel. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados.** São Paulo: USP, 2017.

ROBINSON, James V. The Viscosity of Suspensions of Spheres. **The Journal of Physical and Colloid Chemistry**, *[S. l.]*, v. 53, n. 7, p. 1042–1056, 1949.

ROSHORE, E. C. **Use of microwave oven to determine water content of fresh concrete**. Vicksburg: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1973.

ROUSSEL, Nicolas *et al.* Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 40, n. 1, p. 77–84, 2010.

SAAK, Aaron W.; JENNINGS, Hamlin M.; SHAH, Surendra P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 34, n. 3, p. 363–371, 2004.

SCRIVENER, Karen L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, *[S. l.]*, v. 88, n. 7, p. 11–21, 2014.

SECCHI, Argimiro R. **Otimização de Processos**. Rio de Janeiro: COPPE UFRJ,

2015.

SNIC. **Despacho regional - Números da indústria**. *[s. l.]*, 2019. Disponível em: http://snic.org.br/numeros-industria.php.

SOBOLEV, Konstantin; AMIRJANOV, Adil. Application of genetic algorithm for modeling of dense packing of concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, *[S. l.]*, v. 24, n. 8, p. 1449–1455, 2010.

TADROS, Tharwat F. **Rheology of dispersions : principles and applications**. 1. ed. Workingham: Wiley-VCH, 2010.

TANIGAWA, Yasuo; MORI, Hiroshi. Analytical Study on Deformation of Fresh Concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, *[S. l.]*, v. 115, n. 3, p. 493–508, 1989.

TATTERSALL, G. H. **Workability and quality control of concrete.** *[S. l.]*: Routledge, 1991.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. *In*: ISAIA, GERALDO CECHELLA (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 439–471.

UNEP. **Eco-efficient cements: Potencial, economically viable solutions for a low-CO2, cement-based material industry**. *[S. l.: s. n.]*.

VOGT, Carsten. **Ultrafine particles in concrete Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design**. Estocolmo *[s. n.]*. v. 103

WALLEVIK, Olafur Haraldsson; WALLEVIK, Jon Elvar. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, *[S. l.]*, v. 41, n. 12, p. 1279–1288, 2011.

WEBB, Paul (Paul A. ..; ORR, Clyde.; MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION. **Analytical methods in fine particle technology**. 1. ed. New York: Micromeritics Instrument Corp, 1997.

WEBMINERAL. **Webmineral**. *[s. l.]*, 2020. Disponível em: www.webmineral.com. Acesso em: 15 fev. 2020.

WESTERHOLM, Mikael *et al.* Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement and Concrete Composites**, *[S. l.]*, v. 30, n. 4, p. 274–282, 2008.

WESTMAN, A. E. R.; HUGILL, H. R. THE PACKING OF PARTICLES. **Journal of the American Ceramic Society**, *[S. l.]*, v. 13, n. 10, p. 767–779, 1930.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology**. 5. ed. New York: Pergamon Press, 1992.

WRI. Navigating the Numbers Greenhouse Gas Data and International Climate Policy. **Library of Congress Control Number**, *[S. l.]*, 2005.

APÊNDICES

Formulações Base

As Formulações Base são apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Formulações Base

	Quantidade de material (kg/m3)						
Formulação	**Cimento**	**Brita 19mm**	**Brita 9,5mm**	**Areia Natural**	**Areia Britada**	**Água**	**Teor de Aditivo[1]**
form1_b1_90_20	204	921	189	974	391	174	0,75%
form1_b1_90_25	233	930	191	954	374	174	0,75%
form1_b1_90_30	267	938	192	432	356	175	0,75%
form1_b1_90_35	306	946	194	407	335	176	0,75%
form1_b1_90_40	349	954	195	380	313	177	0,80%
form1_b1_100_20	208	900	184	482	397	177	0,75%
form1_b1_100_25	237	909	186	462	381	177	0,75%
form1_b1_100_30	272	917	188	439	362	178	0,75%
form1_b1_100_35	311	924	189	414	341	179	0,75%
form1_b1_100_40	355	932	191	386	318	180	0,80%
form1_b1_120_20	215	867	177	492	405	183	0,75%
form1_b1_120_25	245	875	179	471	388	183	0,75%
form1_b1_120_30	281	883	181	448	369	184	0,75%
form1_b1_120_35	321	891	182	422	348	185	0,75%
form1_b1_120_40	367	899	184	394	325	186	0,80%
form1_b1_140_20	222	837	171	499	411	189	0,75%
form1_b1_140_25	253	846	173	478	394	189	0,75%
form1_b1_140_30	290	854	175	454	374	190	0,75%
form1_b1_140_35	332	861	176	428	353	191	0,75%
form1_b1_140_40	379	869	178	399	329	192	0,80%
form1_b1_160_20	232	805	165	502	413	198	0,75%
form1_b1_160_25	265	814	167	480	396	198	0,75%
form1_b1_160_30	304	821	168	455	375	199	0,75%
form1_b1_160_35	347	829	170	428	353	200	0,75%
form1_b1_160_40	396	836	171	398	328	201	0,80%
form1_b1_200_20	246	758	155	508	419	210	0,75%
form1_b1_200_25	282	767	157	485	400	210	0,75%
form1_b1_200_30	322	774	159	460	379	211	0,75%
form1_b1_200_35	368	782	160	432	356	212	0,75%
form1_b1_200_40	420	789	162	400	330	213	0,80%
form1_b0_90_20	216	0	1064	479	395	184	0,75%
form1_b0_90_25	247	0	1075	458	378	184	0,75%
form1_b0_90_30	282	0	1084	435	358	185	0,75%
form1_b0_90_35	323	0	1093	409	337	186	0,75%
form1_b0_90_40	369	0	1103	381	314	187	0,80%
form1_b0_100_20	219	0	1039	486	401	187	0,75%

form1_b0_100_25	251	0	1049	466	384	187	0,75%
form1_b0_100_30	287	0	1059	442	364	188	0,75%
form1_b0_100_35	328	0	1068	416	343	189	0,75%
form1_b0_100_40	375	0	1077	387	319	190	0,80%
form1_b0_120_20	226	0	999	496	409	193	0,75%
form1_b0_120_25	259	0	1010	475	391	193	0,75%
form1_b0_120_30	296	0	1019	450	371	194	0,75%
form1_b0_120_35	339	0	1028	424	349	195	0,75%
form1_b0_120_40	387	0	1037	394	325	196	0,80%
form1_b0_140_20	233	0	964	502	414	199	0,75%
form1_b0_140_25	267	0	975	481	396	199	0,75%
form1_b0_140_30	305	0	978	459	379	200	0,75%
form1_b0_140_35	349	0	993	429	354	201	0,75%
form1_b0_140_40	398	0	1002	399	329	202	0,80%
form1_b0_160_20	244	0	926	505	416	208	0,75%
form1_b0_160_25	279	0	937	483	398	208	0,75%
form1_b0_160_30	319	0	946	457	377	209	0,75%
form1_b0_160_35	365	0	955	429	359	210	0,75%
form1_b0_160_40	416	0	964	398	328	211	0,80%
form1_b0_200_20	258	0	881	505	416	220	0,75%
form1_b0_200_25	295	0	891	482	397	220	0,75%
form1_b0_200_30	337	0	900	455	375	221	0,75%
form1_b0_200_35	385	0	909	426	351	222	0,75%
form1_b0_200_40	440	0	918	394	325	223	0,80%
form2_b1_90_20	200	913	187	517	361	171	0,75%
form2_b1_90_25	229	922	189	496	346	171	0,75%
form2_b1_90_30	263	929	190	472	329	172	0,75%
form2_b1_90_35	300	937	192	445	310	173	0,75%
form2_b1_90_40	343	945	193	416	290	174	0,80%
form2_b1_100_20	204	892	183	526	367	174	0,75%
form2_b1_100_25	233	901	184	504	352	174	0,75%
form2_b1_100_30	267	908	186	480	334	175	0,75%
form2_b1_100_35	306	916	188	453	316	176	0,75%
form2_b1_100_40	349	924	189	423	295	177	0,80%
form2_b1_120_20	211	859	176	537	374	180	0,75%
form2_b1_120_25	241	868	178	515	359	180	0,75%
form2_b1_120_30	276	875	179	489	341	181	0,75%
form2_b1_120_35	316	883	181	462	322	182	0,75%
form2_b1_120_40	361	890	182	431	301	183	0,80%
form2_b1_140_20	218	830	170	545	380	186	0,75%
form2_b1_140_25	249	839	172	522	364	186	0,75%
form2_b1_140_30	285	846	173	496	346	187	0,75%
form2_b1_140_35	326	854	175	468	326	188	0,75%
form2_b1_140_40	373	861	176	437	304	189	0,80%
form2_b1_160_20	229	798	163	548	382	195	0,75%
form2_b1_160_25	261	807	165	525	366	195	0,75%

form2_b1_160_30	299	814	167	498	347	196	0,75%
form2_b1_160_35	342	822	168	464	327	197	0,75%
form2_b1_160_40	391	829	170	436	304	198	0,80%
form2_b1_200_20	240	766	157	549	383	205	0,75%
form2_b1_200_25	275	774	159	525	366	205	0,75%
form2_b1_200_30	315	782	160	498	347	206	0,75%
form2_b1_200_35	359	789	162	467	326	207	0,75%
form2_b1_200_40	410	797	163	434	302	208	0,80%
form2_b0_90_20	212	0	1055	523	364	181	0,75%
form2_b0_90_25	243	0	1065	500	349	181	0,75%
form2_b0_90_30	278	0	1074	475	331	182	0,75%
form2_b0_90_35	318	0	1083	447	312	183	0,75%
form2_b0_90_40	363	0	1093	417	291	184	0,80%
form2_b0_100_20	216	0	1030	531	370	184	0,75%
form2_b0_100_25	247	0	1040	509	355	184	0,75%
form2_b0_100_30	282	0	1049	483	337	185	0,75%
form2_b0_100_35	323	0	1058	455	317	186	0,75%
form2_b0_100_40	369	0	1067	424	296	187	0,80%
form2_b0_120_20	223	0	991	541	377	190	0,75%
form2_b0_120_25	255	0	1001	518	361	190	0,75%
form2_b0_120_30	292	0	1010	492	343	191	0,75%
form2_b0_120_35	333	0	1019	464	323	192	0,75%
form2_b0_120_40	381	0	1028	432	301	193	0,80%
form2_b0_140_20	230	0	956	549	383	196	0,75%
form2_b0_140_25	263	0	967	525	366	196	0,75%
form2_b0_140_30	301	0	976	499	348	197	0,75%
form2_b0_140_35	344	0	985	469	327	198	0,75%
form2_b0_140_40	393	0	994	437	305	199	0,80%
form2_b0_160_20	240	0	923	549	383	205	0,75%
form2_b0_160_25	275	0	933	525	366	205	0,75%
form2_b0_160_30	315	0	942	498	347	206	0,75%
form2_b0_160_35	359	0	951	467	326	207	0,75%
form2_b0_160_40	410	0	960	434	302	208	0,80%
form2_b0_200_20	252	0	891	547	381	215	0,75%
form2_b0_200_25	288	0	901	522	364	215	0,75%
form2_b0_200_30	330	0	910	493	344	216	0,75%
form2_b0_200_35	377	0	918	462	322	217	0,75%
form2_b0_200_40	430	0	927	427	298	218	0,80%

[1]Teor de aditivo em massa sobre a massa do cimento

Na Tabela 22, são apresentados os resultados da intensidade de ligante dos concretos das Formulações Base, discutidos no item 4.1.

Tabela 22 – Intensidade de ligantes por concreto

Conjunto de Formulações	**Dimensão Máxima**	**Abatimento (mm)**	**Intensidade de Ligantes (kg/m^3/MPa) por f_{ck} (MPa)**

			20	25	30	35	40
1	19mm	90	8,2	7,8	7,6	7,6	7,7
1	19mm	100	8,3	7,9	7,8	7,8	7,9
1	19mm	120	8,6	8,2	8,0	8,0	8,1
1	19mm	140	8,9	8,4	8,3	8,3	8,4
1	19mm	160	9,3	8,8	8,7	8,7	8,8
1	19mm	200	9,8	9,4	9,2	9,2	9,3
1	9,5mm	90	8,6	8,2	8,1	8,1	8,2
1	9,5mm	100	8,8	8,4	8,2	8,2	8,3
1	9,5mm	120	9,0	8,6	8,5	8,5	8,6
1	9,5mm	140	9,3	8,9	8,7	8,7	8,8
1	9,5mm	160	9,8	9,3	9,1	9,1	9,2
1	9,5mm	200	10,3	9,8	9,6	9,3	9,4
2	19mm	90	8,0	7,6	7,5	7,5	7,6
2	19mm	100	8,2	7,8	7,6	7,6	7,7
2	19mm	120	8,4	8,0	7,9	7,9	8,0
2	19mm	140	8,7	8,3	8,1	8,1	8,3
2	19mm	160	9,2	8,7	8,5	8,5	8,7
2	19mm	200	9,6	9,2	9,0	9,0	9,1
2	9,5mm	90	8,5	8,1	7,9	7,9	8,1
2	9,5mm	100	8,6	8,2	8,1	8,1	8,2
2	9,5mm	120	8,9	8,5	8,3	8,3	8,5
2	9,5mm	140	9,2	8,8	8,6	8,6	8,7
2	9,5mm	160	9,6	9,2	9,0	9,0	9,1
2	9,5mm	200	10,1	9,6	9,4	9,4	9,5

Na Tabela 23 e na Tabela 24, são apresentadas as distâncias entre partículas das Formulações Base.

Tabela 23 – Distância entre partículas finas das Formulações Base

Formulação	Área superficial volumétrica (m^2/cm^3)	Volume de sólidos	Porosidade do empacotamento	IPS (µm)
form1_b1_90_20	5,13	35,0%	21,1%	0,62
form1_b1_90_25	5,06	36,9%	21,2%	0,57
form1_b1_90_30	4,99	39,0%	21,4%	0,52
form1_b1_90_35	4,92	41,1%	21,5%	0,47
form1_b1_90_40	4,86	43,3%	21,7%	0,42
form1_b1_100_20	5,13	35,0%	21,1%	0,62
form1_b1_100_25	5,06	36,9%	21,2%	0,57
form1_b1_100_30	4,99	38,9%	21,4%	0,52
form1_b1_100_35	4,92	41,1%	21,5%	0,47
form1_b1_100_40	4,86	43,3%	21,7%	0,42

form1_b1_120_20	5,13	34,9%	21,1%	0,62
form1_b1_120_25	5,05	36,8%	21,2%	0,57
form1_b1_120_30	4,98	38,8%	21,4%	0,52
form1_b1_120_35	4,92	41,0%	21,5%	0,47
form1_b1_120_40	4,86	43,2%	21,7%	0,43
form1_b1_140_20	5,12	34,7%	21,1%	0,63
form1_b1_140_25	5,05	36,7%	21,3%	0,58
form1_b1_140_30	4,98	38,7%	21,4%	0,53
form1_b1_140_35	4,91	40,8%	21,6%	0,48
form1_b1_140_40	4,86	43,1%	21,7%	0,43
form1_b1_160_20	5,11	34,4%	21,1%	0,64
form1_b1_160_25	5,03	36,4%	21,3%	0,59
form1_b1_160_30	4,96	38,5%	21,4%	0,53
form1_b1_160_35	4,90	40,6%	21,6%	0,48
form1_b1_160_40	4,84	42,9%	21,7%	0,43
form1_b1_200_20	5,09	34,1%	21,2%	0,65
form1_b1_200_25	5,01	36,1%	21,3%	0,60
form1_b1_200_30	4,95	38,2%	21,5%	0,54
form1_b1_200_35	4,89	40,4%	21,6%	0,49
form1_b1_200_40	4,83	42,7%	21,8%	0,44
form1_b0_90_20	5,13	34,6%	21,1%	0,63
form1_b0_90_25	5,06	36,5%	21,2%	0,58
form1_b0_90_30	4,99	38,6%	21,4%	0,53
form1_b0_90_35	4,92	40,7%	21,5%	0,48
form1_b0_90_40	4,86	43,0%	21,7%	0,43
form1_b0_100_20	5,13	34,5%	21,1%	0,63
form1_b0_100_25	5,06	36,5%	21,2%	0,58
form1_b0_100_30	4,99	38,5%	21,4%	0,53
form1_b0_100_35	4,92	40,7%	21,5%	0,48
form1_b0_100_40	4,86	43,0%	21,7%	0,43
form1_b0_120_20	5,13	34,4%	21,1%	0,64
form1_b0_120_25	5,05	36,4%	21,3%	0,58
form1_b0_120_30	4,98	38,5%	21,4%	0,53
form1_b0_120_35	4,92	40,6%	21,6%	0,48
form1_b0_120_40	4,86	42,9%	21,7%	0,43
form1_b0_140_20	5,12	34,3%	21,1%	0,64
form1_b0_140_25	5,05	36,3%	21,3%	0,59
form1_b0_140_30	4,98	38,4%	21,4%	0,54
form1_b0_140_35	4,92	40,5%	21,6%	0,48
form1_b0_140_40	4,86	42,8%	21,7%	0,44
form1_b0_160_20	5,11	34,1%	21,1%	0,65
form1_b0_160_25	5,03	36,1%	21,3%	0,60
form1_b0_160_30	4,96	38,1%	21,5%	0,54
form1_b0_160_35	4,90	40,3%	21,6%	0,49
form1_b0_160_40	4,84	42,6%	21,7%	0,44
form1_b0_200_20	5,08	33,8%	21,2%	0,67

form1_b0_200_25	5,01	35,7%	21,4%	0,61
form1_b0_200_30	4,95	37,6%	21,5%	0,56
form1_b0_200_35	4,89	39,6%	21,6%	0,51
form1_b0_200_40	4,84	41,7%	21,7%	0,46
form2_b1_90_20	4,67	37,1%	21,0%	0,61
form2_b1_90_25	4,65	38,8%	21,1%	0,56
form2_b1_90_30	4,63	40,7%	21,3%	0,51
form2_b1_90_35	4,62	42,6%	21,4%	0,47
form2_b1_90_40	4,60	44,7%	21,5%	0,42
form2_b1_100_20	4,67	37,0%	21,0%	0,61
form2_b1_100_25	4,65	38,8%	21,1%	0,56
form2_b1_100_30	4,63	40,6%	21,3%	0,51
form2_b1_100_35	4,62	42,6%	21,4%	0,47
form2_b1_100_40	4,60	44,6%	21,5%	0,42
form2_b1_120_20	4,67	36,9%	21,0%	0,62
form2_b1_120_25	4,65	38,6%	21,1%	0,57
form2_b1_120_30	4,63	40,5%	21,3%	0,52
form2_b1_120_35	4,62	42,4%	21,4%	0,47
form2_b1_120_40	4,60	44,5%	21,6%	0,42
form2_b1_140_20	4,67	36,7%	21,0%	0,63
form2_b1_140_25	4,65	38,5%	21,1%	0,57
form2_b1_140_30	4,64	40,3%	21,3%	0,52
form2_b1_140_35	4,62	42,3%	21,4%	0,47
form2_b1_140_40	4,61	44,4%	21,6%	0,42
form2_b1_160_20	4,67	36,3%	21,0%	0,64
form2_b1_160_25	4,65	38,1%	21,2%	0,58
form2_b1_160_30	4,63	40,0%	21,3%	0,53
form2_b1_160_35	4,62	42,0%	21,5%	0,48
form2_b1_160_40	4,60	44,1%	21,6%	0,43
form2_b1_200_20	4,67	35,9%	21,1%	0,65
form2_b1_200_25	4,65	37,8%	21,2%	0,59
form2_b1_200_30	4,63	39,7%	21,4%	0,54
form2_b1_200_35	4,62	41,7%	21,5%	0,49
form2_b1_200_40	4,60	43,8%	21,6%	0,44
form2_b0_90_20	4,70	36,4%	21,0%	0,63
form2_b0_90_25	4,68	38,2%	21,2%	0,58
form2_b0_90_30	4,66	40,1%	21,3%	0,53
form2_b0_90_35	4,64	42,1%	21,4%	0,48
form2_b0_90_40	4,62	44,2%	21,6%	0,43
form2_b0_100_20	4,70	36,4%	21,0%	0,63
form2_b0_100_25	4,68	38,2%	21,2%	0,58
form2_b0_100_30	4,66	40,1%	21,3%	0,53
form2_b0_100_35	4,64	42,0%	21,4%	0,48
form2_b0_100_40	4,62	44,1%	21,6%	0,43
form2_b0_120_20	4,70	36,3%	21,0%	0,63
form2_b0_120_25	4,68	38,1%	21,2%	0,58

form2_b0_120_30	4,66	40,0%	21,3%	0,53
form2_b0_120_35	4,64	41,9%	21,5%	0,48
form2_b0_120_40	4,62	44,1%	21,6%	0,43
form2_b0_140_20	4,70	36,1%	21,0%	0,64
form2_b0_140_25	4,68	37,9%	21,2%	0,58
form2_b0_140_30	4,66	39,8%	21,3%	0,53
form2_b0_140_35	4,64	41,8%	21,5%	0,48
form2_b0_140_40	4,62	44,0%	21,6%	0,43
form2_b0_160_20	4,69	35,7%	21,1%	0,65
form2_b0_160_25	4,67	37,6%	21,2%	0,60
form2_b0_160_30	4,65	39,5%	21,4%	0,54
form2_b0_160_35	4,64	41,5%	21,5%	0,49
form2_b0_160_40	4,62	43,7%	21,6%	0,44
form2_b0_200_20	4,69	35,3%	21,1%	0,67
form2_b0_200_25	4,67	37,2%	21,3%	0,61
form2_b0_200_30	4,65	39,2%	21,4%	0,55
form2_b0_200_35	4,63	41,2%	21,6%	0,50
form2_b0_200_40	4,67	43,4%	21,7%	0,44

Tabela 24 – Distância entre partículas grossas das Formulações Base

Formulação	**Área superficial volumétrica (m^2/cm^3)**	**Volume de sólidos**	**Porosidade do empacotamento**	**MPT (µm)**
form1_b1_90_20	0,006	70,9%	16,9%	65,3
form1_b1_90_25	0,006	69,9%	16,9%	73,5
form1_b1_90_30	0,006	68,9%	17,0%	83,0
form1_b1_90_35	0,006	67,7%	17,1%	94,3
form1_b1_90_40	0,006	66,3%	17,4%	108,2
form1_b1_100_20	0,006	70,4%	16,9%	66,8
form1_b1_100_25	0,006	69,5%	16,9%	75,2
form1_b1_100_30	0,006	68,4%	16,9%	84,9
form1_b1_100_35	0,006	67,2%	17,0%	96,6
form1_b1_100_40	0,006	65,8%	17,2%	110,9
form1_b1_120_20	0,007	69,5%	17,0%	69,8
form1_b1_120_25	0,006	68,6%	16,9%	78,7
form1_b1_120_30	0,006	67,4%	16,9%	88,9
form1_b1_120_35	0,006	66,2%	16,9%	101,2
form1_b1_120_40	0,006	64,7%	17,1%	116,4
form1_b1_140_20	0,007	68,7%	17,1%	73,1
form1_b1_140_25	0,007	67,7%	17,0%	82,3
form1_b1_140_30	0,006	66,5%	16,9%	93,1
form1_b1_140_35	0,006	65,2%	16,9%	106,1
form1_b1_140_40	0,006	63,7%	17,0%	122,3
form1_b1_160_20	0,007	67,4%	17,2%	78,7

form1_b1_160_25	0,007	66,4%	17,1%	88,7
form1_b1_160_30	0,007	65,2%	17,0%	100,4
form1_b1_160_35	0,006	63,8%	16,9%	114,5
form1_b1_160_40	0,006	62,2%	16,9%	132,3
form1_b1_200_20	0,007	65,7%	17,4%	85,8
form1_b1_200_25	0,007	64,6%	17,2%	96,6
form1_b1_200_30	0,007	63,3%	17,1%	109,4
form1_b1_200_35	0,007	61,9%	17,0%	125,0
form1_b1_200_40	0,006	60,3%	16,9%	144,8
form1_b0_90_20	0,007	69,5%	18,1%	65,3
form1_b0_90_25	0,006	68,5%	18,2%	73,3
form1_b0_90_30	0,006	67,4%	18,3%	82,7
form1_b0_90_35	0,006	66,2%	18,5%	93,8
form1_b0_90_40	0,006	64,7%	18,9%	107,4
form1_b0_100_20	0,007	69,1%	18,1%	66,9
form1_b0_100_25	0,007	68,1%	18,1%	75,2
form1_b0_100_30	0,006	66,9%	18,2%	84,8
form1_b0_100_35	0,006	65,7%	18,4%	96,4
form1_b0_100_40	0,006	64,2%	18,7%	110,6
form1_b0_120_20	0,007	68,2%	18,1%	70,3
form1_b0_120_25	0,007	67,2%	18,1%	79,1
form1_b0_120_30	0,007	66,0%	18,1%	89,4
form1_b0_120_35	0,006	64,7%	18,2%	101,7
form1_b0_120_40	0,006	63,1%	18,5%	117,0
form1_b0_140_20	0,007	67,3%	18,1%	73,5
form1_b0_140_25	0,007	66,3%	18,1%	82,7
form1_b0_140_30	0,007	65,1%	18,1%	93,4
form1_b0_140_35	0,007	63,7%	18,1%	106,4
form1_b0_140_40	0,006	62,1%	18,3%	122,4
form1_b0_160_20	0,007	66,1%	18,2%	79,9
form1_b0_160_25	0,007	65,0%	18,1%	89,9
form1_b0_160_30	0,007	63,7%	18,1%	101,6
form1_b0_160_35	0,007	62,3%	18,1%	115,8
form1_b0_160_40	0,006	60,7%	18,2%	133,5
form1_b0_200_20	0,007	64,4%	18,3%	88,5
form1_b0_200_25	0,007	63,3%	18,2%	98,9
form1_b0_200_30	0,007	62,0%	18,1%	110,9
form1_b0_200_35	0,007	60,7%	18,1%	125,2
form1_b0_200_40	0,007	59,2%	18,1%	142,7
form2_b1_90_20	0,007	70,4%	17,0%	61,0
form2_b1_90_25	0,007	69,5%	16,9%	68,6
form2_b1_90_30	0,007	68,5%	16,8%	77,3
form2_b1_90_35	0,006	67,3%	16,9%	87,7
form2_b1_90_40	0,006	66,0%	17,0%	100,5
form2_b1_100_20	0,007	69,9%	17,0%	62,1
form2_b1_100_25	0,007	69,0%	16,9%	69,8

form2_b1_100_30	0,007	68,0%	16,9%	78,8
form2_b1_100_35	0,007	66,8%	16,8%	89,5
form2_b1_100_40	0,006	65,4%	16,9%	102,6
form2_b1_120_20	0,007	69,0%	17,2%	64,7
form2_b1_120_25	0,007	68,1%	17,0%	72,7
form2_b1_120_30	0,007	67,0%	16,9%	82,1
form2_b1_120_35	0,007	65,8%	16,8%	93,4
form2_b1_120_40	0,007	64,4%	16,9%	107,3
form2_b1_140_20	0,008	68,2%	17,3%	67,4
form2_b1_140_25	0,007	67,2%	17,1%	75,8
form2_b1_140_30	0,007	66,1%	17,0%	85,6
form2_b1_140_35	0,007	64,8%	16,9%	97,4
form2_b1_140_40	0,007	63,4%	16,8%	112,1
form2_b1_160_20	0,008	66,9%	17,5%	72,5
form2_b1_160_25	0,008	65,9%	17,3%	81,4
form2_b1_160_30	0,007	64,7%	17,1%	92,0
form2_b1_160_35	0,007	63,4%	17,0%	104,8
form2_b1_160_40	0,007	61,9%	16,9%	120,8
form2_b1_200_20	0,008	65,5%	17,6%	78,2
form2_b1_200_25	0,008	64,4%	17,4%	87,9
form2_b1_200_30	0,008	63,2%	17,2%	99,3
form2_b1_200_35	0,007	61,9%	17,0%	113,3
form2_b1_200_40	0,007	60,3%	16,9%	130,9
form2_b0_90_20	0,007	69,1%	18,1%	61,2
form2_b0_90_25	0,007	68,2%	18,1%	68,7
form2_b0_90_30	0,007	67,1%	18,1%	77,4
form2_b0_90_35	0,007	65,9%	18,3%	87,8
form2_b0_90_40	0,006	64,5%	18,5%	100,5
form2_b0_100_20	0,008	68,6%	18,1%	62,5
form2_b0_100_25	0,007	67,7%	18,1%	70,2
form2_b0_100_30	0,007	66,6%	18,1%	79,1
form2_b0_100_35	0,007	65,4%	18,2%	89,8
form2_b0_100_40	0,007	64,0%	18,4%	102,9
form2_b0_120_20	0,008	67,7%	18,2%	65,4
form2_b0_120_25	0,008	66,8%	18,1%	73,4
form2_b0_120_30	0,007	65,6%	18,1%	82,8
form2_b0_120_35	0,007	64,4%	18,1%	94,1
form2_b0_120_40	0,007	62,9%	18,2%	108,1
form2_b0_140_20	0,008	66,9%	18,3%	68,3
form2_b0_140_25	0,008	65,9%	18,2%	76,7
form2_b0_140_30	0,007	64,7%	18,1%	86,6
form2_b0_140_35	0,007	63,4%	18,1%	98,6
form2_b0_140_40	0,007	61,9%	18,1%	113,4
form2_b0_160_20	0,008	65,6%	18,4%	73,7
form2_b0_160_25	0,008	64,6%	18,3%	82,8
form2_b0_160_30	0,008	63,4%	18,1%	93,6

form2_b0_160_35	0,007	62,0%	18,1%	106,6
form2_b0_160_40	0,007	60,4%	18,1%	122,9
form2_b0_200_20	0,008	64,3%	18,5%	80,4
form2_b0_200_25	0,008	63,1%	18,3%	90,3
form2_b0_200_30	0,008	61,9%	18,2%	102,0
form2_b0_200_35	0,007	60,5%	18,1%	116,4
form2_b0_200_40	0,007	58,8%	18,1%	134,5

Na Tabela 25, é mostrado o abatimento estimado pelo modelo criado e o abatimento especificado das Formulações Base.

Tabela 25 – Abatimento do tronco de cone estimado e abatimento especificado das Formulações Base

Formulação	**Abatimento estimado (mm)**	**Abatimento especificado (mm)**	**Diferença (mm)**
form1_b1_90_20	107	90	17
form1_b1_90_25	108	90	18
form1_b1_90_30	108	90	18
form1_b1_90_35	108	90	18
form1_b1_90_40	108	90	18
form1_b1_100_20	112	100	12
form1_b1_100_25	113	100	13
form1_b1_100_30	113	100	13
form1_b1_100_35	114	100	14
form1_b1_100_40	114	100	14
form1_b1_120_20	124	120	4
form1_b1_120_25	126	120	6
form1_b1_120_30	126	120	6
form1_b1_120_35	127	120	7
form1_b1_120_40	128	120	8
form1_b1_140_20	138	140	2
form1_b1_140_25	140	140	0
form1_b1_140_30	141	140	1
form1_b1_140_35	142	140	2
form1_b1_140_40	143	140	3
form1_b1_160_20	165	160	5
form1_b1_160_25	166	160	6
form1_b1_160_30	167	160	7
form1_b1_160_35	168	160	8
form1_b1_160_40	170	160	10
form1_b1_200_20	197	200	3
form1_b1_200_25	198	200	2
form1_b1_200_30	199	200	1
form1_b1_200_35	201	200	1
form1_b1_200_40	204	200	4

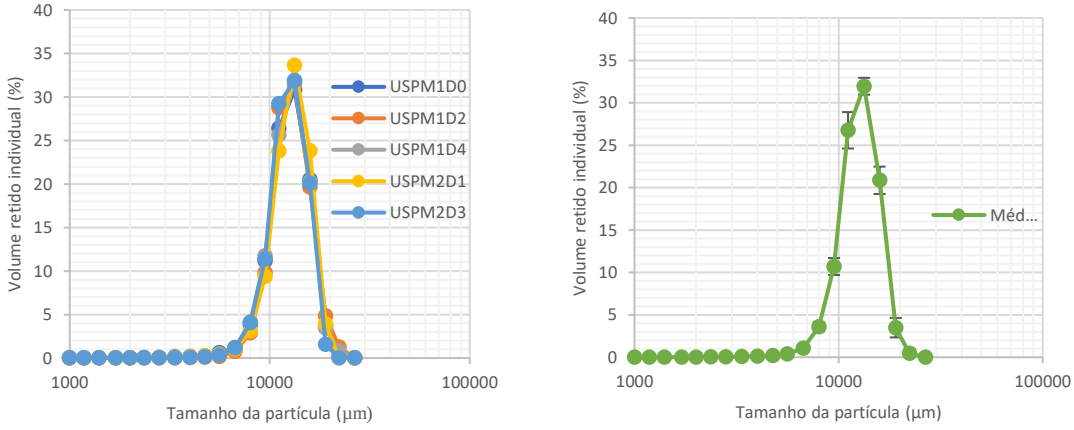
form1_b0_90_20	113	90	23
form1_b0_90_25	113	90	23
form1_b0_90_30	113	90	23
form1_b0_90_35	112	90	22
form1_b0_90_40	112	90	22
form1_b0_100_20	119	100	19
form1_b0_100_25	120	100	20
form1_b0_100_30	119	100	19
form1_b0_100_35	119	100	19
form1_b0_100_40	118	100	18
form1_b0_120_20	134	120	14
form1_b0_120_25	134	120	14
form1_b0_120_30	134	120	14
form1_b0_120_35	134	120	14
form1_b0_120_40	134	120	14
form1_b0_140_20	147	140	7
form1_b0_140_25	147	140	7
form1_b0_140_30	147	140	7
form1_b0_140_35	148	140	8
form1_b0_140_40	148	140	8
form1_b0_160_20	176	160	16
form1_b0_160_25	176	160	16
form1_b0_160_30	177	160	17
form1_b0_160_35	177	160	17
form1_b0_160_40	178	160	18
form1_b0_200_20	215	200	15
form1_b0_200_25	215	200	15
form1_b0_200_30	216	200	16
form1_b0_200_35	217	200	17
form1_b0_200_40	219	200	19
form2_b1_90_20	89	90	1
form2_b1_90_25	89	90	1
form2_b1_90_30	89	90	1
form2_b1_90_35	88	90	2
form2_b1_90_40	87	90	3
form2_b1_100_20	93	100	7
form2_b1_100_25	93	100	7
form2_b1_100_30	93	100	7
form2_b1_100_35	93	100	7
form2_b1_100_40	92	100	8
form2_b1_120_20	105	120	15
form2_b1_120_25	105	120	15
form2_b1_120_30	104	120	16
form2_b1_120_35	104	120	16
form2_b1_120_40	104	120	16
form2_b1_140_20	117	140	23

form2_b1_140_25	117	140	23
form2_b1_140_30	117	140	23
form2_b1_140_35	116	140	24
form2_b1_140_40	116	140	24
form2_b1_160_20	140	160	20
form2_b1_160_25	140	160	20
form2_b1_160_30	140	160	20
form2_b1_160_35	140	160	20
form2_b1_160_40	140	160	20
form2_b1_200_20	167	200	33
form2_b1_200_25	167	200	33
form2_b1_200_30	167	200	33
form2_b1_200_35	167	200	33
form2_b1_200_40	168	200	32
form2_b0_90_20	97	90	7
form2_b0_90_25	97	90	7
form2_b0_90_30	96	90	6
form2_b0_90_35	94	90	4
form2_b0_90_40	93	90	3
form2_b0_100_20	102	100	2
form2_b0_100_25	102	100	2
form2_b0_100_30	101	100	1
form2_b0_100_35	100	100	0
form2_b0_100_40	98	100	2
form2_b0_120_20	114	120	6
form2_b0_120_25	114	120	6
form2_b0_120_30	113	120	7
form2_b0_120_35	112	120	8
form2_b0_120_40	111	120	9
form2_b0_140_20	127	140	13
form2_b0_140_25	127	140	13
form2_b0_140_30	126	140	14
form2_b0_140_35	125	140	15
form2_b0_140_40	125	140	15
form2_b0_160_20	153	160	7
form2_b0_160_25	152	160	8
form2_b0_160_30	151	160	9
form2_b0_160_35	151	160	9
form2_b0_160_40	151	160	9
form2_b0_200_20	185	200	15
form2_b0_200_25	184	200	16
form2_b0_200_30	183	200	17
form2_b0_200_35	183	200	17
form2_b0_200_40	184	200	16

Caracterização das amostras coletadas na central

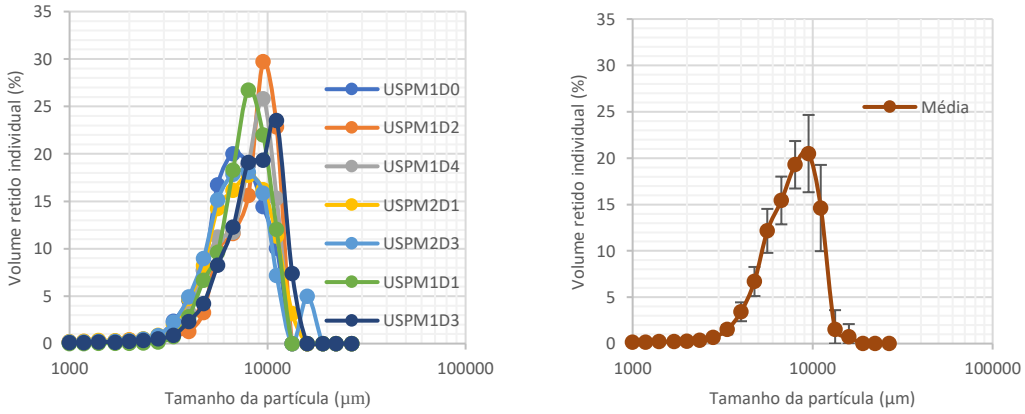
Nesta seção, são apresentadas as distribuições granulométricas dos conjuntos de materiais coletados na central, bem como a área superficial específica BET dos finos das areias.

Figura 46 – (a) Distribuição granulométrica discreta da Brita 19mm (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Brita 19mm



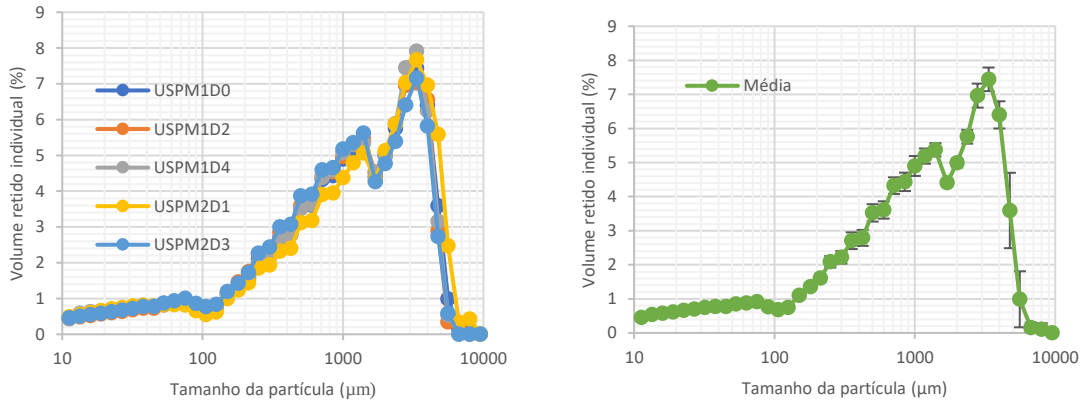
Fonte: própria autora

Figura 47 – (a) Distribuição granulométrica discreta da Brita 9,5mm (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Brita 9,5mm



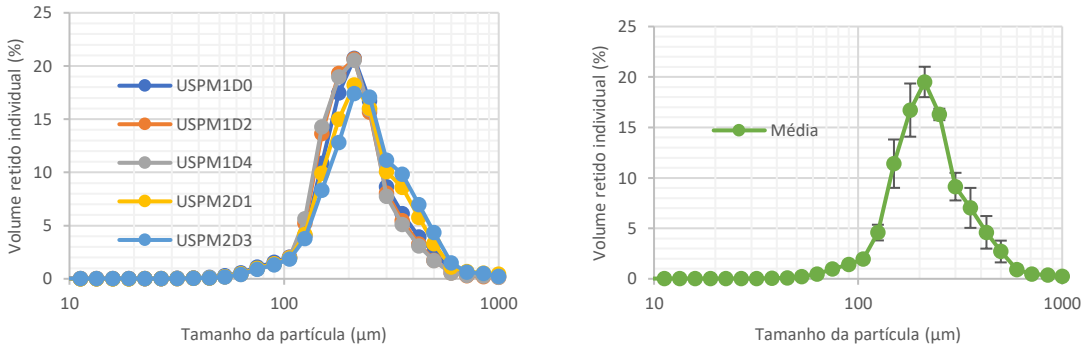
Fonte: própria autora

Figura 48 –(a) Distribuição granulométrica discreta da Areia Britada (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Areia Britada



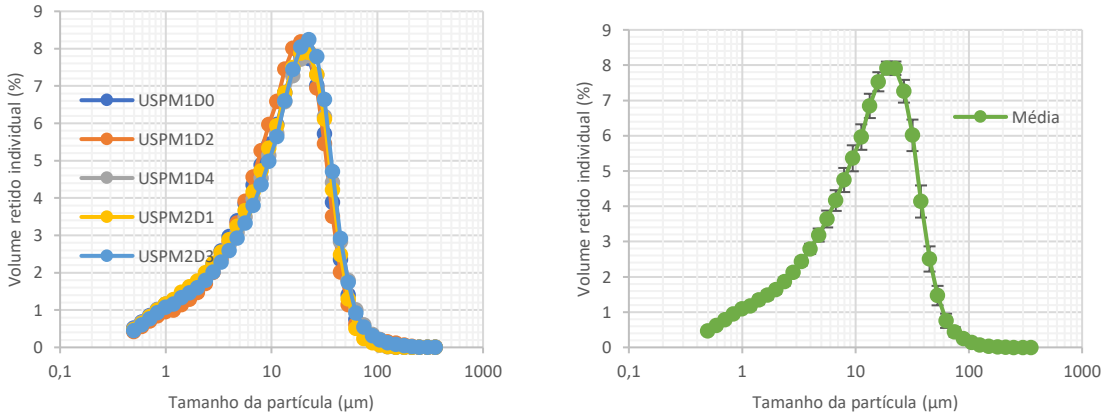
Fonte: própria autora

Figura 49 – (a) Distribuição granulométrica discreta da Areia Natural (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta da Areia Natural



Fonte: própria autora

Figura 50 – (a) Distribuição granulométrica discreta do CP V ARI RS (b) Média e Intervalo de Confiança (grau de confiança 0,90) da distribuição granulométrica discreta do CP V ARI RS



Fonte: própria autora

Tabela 26 – Área específica BET das areias

Área Específica BET (m^2/g)	M1D0	M1D2	M1D4	M2D1	M2D3	Intervalo de confiança
Areia Britada	0,27	0,27	0,24	0,27	0,31	0,27 ± 0,03
Areia Natural	0,20	0,16	0,16	0,18	0,18	0,18 ± 0,01

(1) Grau de confiança 0,90

Concretos dosados na central

Nesta seção, são apresentadas as especificações, as formulações, as variáveis de distância de partículas, bem como os abatimentos estimados dos concretos dosados na central.

Tabela 27- Dados de processo

Concreto	Formulação	Abatimento (mm)	Resistência à compressão 7 dias	Resistência à compressão 28 dias	Cimento (kg/m3)	Água (l/m3)
1	27	120	41,6	50,4	383	157
2	27	115	40,9	50,3	384	157
3	27	120	38,8	47,1	390	153
4	27	120	40,6	47,9	387	163
5	27	50	39,2	47,1	382	168
6	19	170	38,2	44,9	349	185
7	19	165	38,2	47	351	187
8	19	160	36,1	44,5	352	182
9	19	175	38,6	47,6	348	185
10	19	160	37,4	49,5	349	188
11	16	240	26,8	33,1	401	213
12	16	220	27,3	34,7	400	218
13	10	110	44,5	53,1	346	178
14	10	120	40,2	50,6	344	171
15	10	110	42,5	50,8	347	154
16	31	140	33,2	40	333	186
17	31	160	34	42,8	330	189
18	31	180	30,8	39,6	327	185
19	31	180	32,7	40,6	329	180
20	31	180	32	39,4	329	182
21	31	175	33,9	44,1	327	182
22	31	180	33,5	39,2	329	179
23	31	175	34	40,8	327	183
24	31	180	33,1	39,7	333	187
25	31	175	36,9	43,6	331	181
26	31	182	33,4	43,6	332	188
27	23	180	34	42,8	329	196
28	23	175	33,1	41,1	330	189
29	21	110	35,8	41,9	314	160

30	21	120	35,9	43,9	311	164
31	21	110	33,5	43,9	313	160
32	21	120	33,2	42,4	312	166
33	11	130	38,1	45	416	192
34	11	135	38,5	44,8	405	190
35	16	230	30,7	37,2	402	215
36	16	230	30,6	38,6	398	211
37	16	220	30,6	37,5	402	213
38	16	220	31,3	37,1	402	211
39	13	120	36,9	46,2	359	175
40	13	130	38,8	46,5	361	175
41	13	140	36,3	45,2	359	177
42	13	133	40,3	45,4	356	178
43	13	120	42,1	45,6	360	175
44	13	140	42,1	47,8	364	175
45	13	130	34,8	44,4	356	173
46	26	120	43	49	343	155
47	26	110	41,9	49,9	349	168
48	26	110	42,7	50,1	343	163
49	26	110	40,6	45,6	348	161
50	26	120	43,3	48,7	347	160
51	26	120	41,8	49,5	347	163
52	26	110	45,9	51,9	351	163
53	26	115	46,8	52,4	347	167
54	26	100	49,1	57	347	159
55	29	120	36,9	41	318	153
56	29	230	39,7	46,1	335	142
57	29	230	25,9	36,1	320	151
58	29	60	32,7	37,3	317	156
59	20	230	40,8	45,1	386	204
60	20	210	39,3	45,6	386	194
61	20	210	40,7	46,3	388	198
62	7	100	34,1	39,5	329	175
63	7	120	33,9	38,9	331	165
64	7	120	34,6	38,6	334	170
65	7	120	33,9	38,7	332	170
66	7	120	30,7	38,3	328	173
67	7	120	32,2	38,8	327	168
68	7	100	33,5	38,7	332	173
69	7	110	31,7	39,5	327	170
70	14	240	28,4	32,6	399	228
71	5	120	31,9	37,1	255	160
72	21	110	36,8	43,1	312	156
73	21	120	34	41	312	160
74	21	120	29,3	34,5	308	156
75	21	120	34,5	42	313	158

76	21	110	33,4	39,9	311	171
77	21	110	38,5	45	308	158
78	21	115	34,3	45,8	305	156
79	21	120	33,7	44	313	164
80	21	110	30,8	41,8	310	159
81	21	100	36,9	43	308	166
82	21	110	34,3	40,7	308	164
83	21	100	35,9	41,2	314	162
84	26	100	39,1	45,8	348	164
85	26	110	36,8	46,2	347	171
86	26	100	40,3	46,9	352	164
87	26	110	39,5	47,3	347	166
88	26	120	39,5	45,8	346	168
89	26	100	40,4	47,4	348	163
90	26	110	40,6	47,4	348	166
91	26	120	38,3	45,8	344	171
92	26	110	36,7	45,7	350	156
93	26	90	38,8	45,6	346	171
94	26	110	39,4	47,4	345	165
95	26	110	40,8	48	351	166
96	18	180	35,2	42,2	376	201
97	3	150	30	36,3	307	195
98	13	135	42	46,9	361	175
99	13	130	38,4	47,7	357	173
100	13	130	39,9	46,8	359	173
101	13	120	39,4	44,1	357	170
102	13	140	35	43,5	359	178
103	13	140	35,5	43,5	361	170
104	32	210	33,2	40,8	353	188
105	32	210	32,7	40	353	194
106	32	220	32,9	41,1	355	199
107	32	210	37,8	44,4	351	196
108	32	210	36,4	43,8	354	193
109	32	210	38,7	43,1	352	195
110	32	225	35,1	41,6	351	198
111	32	215	38,4	43,8	347	195
112	32	200	37,8	45,7	352	192
113	32	200	37	44,3	352	192
114	32	240	32,4	40,3	352	199
115	14	220	23,4	27,5	402	217
116	14	210	27,3	34,7	401	218
117	14	230	27	35,6	402	223
118	14	230	27,7	35,2	403	223
119	14	230	24,9	32	402	228
120	14	220	22,2	30,9	401	223
121	14	220	25,9	31,8	402	231

122	3	150	30,9	37,4	310	192
123	8	110	31,2	41,7	301	157
124	8	100	32,7	42,2	303	158
125	8	110	32,9	40,5	300	163
126	8	100	31,5	41,9	300	162
127	8	115	35,2	42	298	160
128	8	110	34,3	42,4	302	162
129	8	110	32,4	40,8	300	160
130	20	220	36,7	45,6	383	173
131	20	210	40,6	49,7	385	180
132	20	200	40,8	50	387	178
133	32	240	38	47,7	351	184
134	20	250	42,6	49,9	388	185
135	32	210	36,7	46,6	348	181
136	32	200	34	46,7	347	176
137	32	200	37,2	45,7	349	171
138	33	100	21,3	27,3	226	134
139	25	110	35,1	40,5	298	161
140	25	110	35,1	40,1	305	163
141	25	120	34,8	39,3	300	163
142	25	100	29,6	38,5	303	160
143	25	120	33,7	40,4	301	162
144	21	120	33,6	39,9	309	134
145	21	120	35,1	44,2	310	141
146	26	105	45,2	54,1	348	147
147	21	120	37,3	44,8	311	147
148	21	120	37,3	43,7	314	152
149	26	120	41,7	50,4	350	155
150	26	110	44,5	51,5	345	149
151	26	110	41,8	50,7	349	152
152	21	120	32,6	38,6	309	139
153	26	120	45,8	50,9	344	155
154	26	100	43,2	55,7	346	147
155	3	140	29,7	35,4	307	171
156	21	120	41,7	48	310	145
157	21	120	37,9	45,5	308	139
158	21	110	39,9	46,3	309	138
159	32	200	37,8	44,1	312	164
160	32	220	38,4	47,5	353	161
161	21	100	40,4	49,1	308	129
162	32	210	36,4	43,3	352	166
163	32	210	37,2	44,5	350	168
164	32	230	39,4	46	357	171
165	14	250	32,8	38,7	401	213
166	32	x	37,9	46,7	348	156
167	32	180	38,9	45,2	349	154

168	14	240	31,3	39,1	400	211
169	32	200	39,5	46,5	351	157
170	11	120	35,8	43,6	406	141
171	13	140	37,2	45,4	364	176
172	13	140	44,5	53,4	358	172
173	13	130	39,6	47,1	356	175
174	13	130	46,6	54	356	181
175	13	130	42,2	47,4	356	173
176	13	140	46,2	59,3	361	176
177	13	120	44,4	51,5	364	171
178	13	140	44,4	51,2	358	169
179	13	140	43,3	50,9	358	167
180	13	120	42,7	50,5	365	167
181	13	130	44,7	52,6	358	174
182	1	110	23,5	30,1	279	174
183	1	100	23,6	30,4	273	174
184	1	110	21,2	27,8	276	173
185	1	120	24	31,2	277	178
186	14	220	22,8	29,7	401	224
187	14	230	22	28,3	398	225
188	14	220	25,7	30,4	401	217
189	14	230	22,2	27,5	404	225
190	4	120	28,2	38,4	308	188
191	4	120	32,1	38,9	309	182
192	28	120	48,4	53,9	383	139
193	28	140	43,4	54,1	383	154
194	28	140	51,2	59,7	375	155
195	28	120	49,2	57,3	380	155
196	28	135	52,5	58,9	385	158
197	28	50	48,6	57,4	375	153
198	28	45	49,8	60,8	379	160
199	14	250	25,1	32,7	401	230
200	14	230	25	31,8	401	233
201	14	240	24,9	30,2	400	229
202	14	220	23,4	30,6	402	224
203	30	100	30,3	38,4	317	180
204	30	0	33,7	39,3	322	187
205	30	100	41,9	52,6	321	189
206	30	100	31,2	36,8	319	185
207	30	90	24,3	27,4	321	175
208	30	230	27,6	33,5	317	170
209	30	140	27,9	38,1	325	192
210	30	120	29,9	35,8	321	180
211	30	100	24	28	317	186
212	27	140	43,5	50,2	381	155
213	27	45	40,7	48,6	387	171

214	27	40	44	51,9	384	168
215	27	45	48,2	54,9	383	165
216	17	210	44,2	52,2	328	155
217	17	210	45	53,5	343	147
218	17	190	46,6	53,9	331	153
219	17	210	44,4	56,3	329	154
220	6	220	40,3	48,2	418	198
221	13	130	44	49,9	360	163
222	13	130	47	52,8	362	166
223	13	125	44,8	51,5	357	168
224	13	135	47,3	54,2	354	163
225	13	130	44,5	51,3	365	168
226	13	140	43,6	49,9	356	163
227	13	135	44,4	48,6	363	173
228	13	140	44,9	50,8	360	157
229	26	110	47,4	54,8	344	178
230	26	110	45,3	51,2	345	156
231	26	115	41,7	49,5	340	159
232	26	110	37,4	45,5	350	146
233	14	240	34,2	40,4	402	201
234	14	220	34,8	41,9	452	198
235	14	230	30	37,4	398	206
236	14	230	29,2	33,8	399	211
237	13	140	44,3	51,5	361	172
238	13	130	45,1	53,7	360	165
239	13	140	43,1	54,6	359	165
240	13	135	44,9	57,8	356	167
241	13	140	47	53,8	363	162
242	14	230	23,9	33,7	402	208
243	14	230	26,4	34,7	398	209
244	14	240	27,4	31,9	401	208
245	14	220	26,1	32,2	400	218
246	14	240	25,7	35,2	399	211
247	1	120	28,1	34,2	278	162
248	14	230	29,3	35,9	403	201
249	14	220	22,9	29,7	395	194
250	1	120	28,8	35,8	272	169
251	1	110	30,7	36,2	271	172
252	14	220	31,1	38,4	400	198
253	1	120	29,6	34,9	276	174
254	14	230	27,8	34,9	402	208
255	1	100	28,5	32,3	275	177
256	1	100	23	29,9	271	171
257	1	120	25,1	30,7	278	174
258	14	230	28,6	38,4	400	213
259	1	120	26,2	32,4	276	172

260	1	100	23,2	34	268	161
261	1	110	27,1	34	270	169
262	30	x	36,4	41,2	319	182
263	30	100	36,3	42,4	322	167
264	30	250	35,8	40,2	321	174
265	30	90	34,6	39,4	318	170
266	30	120	35,9	40,6	x	x
267	32	210	33,9	48,5	354	187
268	32	190	34,1	43,6	350	182
269	32	200	34,2	44,2	353	177
270	32	230	37,3	46,2	353	177
271	32	210	36,6	46,7	353	182
272	32	200	38,5	47,4	352	173
273	32	220	34,1	45,8	345	177
274	32	210	35,5	42,8	351	177
275	22	130	37,6	46,1	312	153
276	22	140	42,9	43,9	317	164
277	22	140	37,8	46,8	318	158
278	22	130	38,3	47,4	318	161
279	22	125	39,3	48,7	316	161
280	22	125	40,2	47,8	316	162
281	22	130	40,7	49,4	312	161
282	22	140	37,7	47,1	314	166
283	22	130	38,5	45,5	309	163
284	2	140	26,2	32,4	269	169
285	2	130	25,8	33,2	262	174
286	15	220	31,5	38,1	402	210
287	15	230	31,3	40,5	401	210
288	15	250	28,4	33,2	401	213
289	15	220	35,4	40,9	399	210
290	15	210	30,8	35,5	395	215
291	15	200	29	36	404	208
292	13	140	41,6	49,7	363	175
293	13	140	42,4	54,6	356	167
294	13	130	45,2	53,5	360	162
295	13	120	46,8	54,3	361	168
296	14	230	26,2	32,4	400	188
297	14	225	27,1	32,4	421	224
298	14	240	27,9	34,9	397	223
299	14	220	27	33,1	398	218
300	14	250	27,8	33,2	400	227
301	14	220	25,5	29,9	396	227
302	14	240	25,9	32	403	228
303	14	230	26,8	32,2	402	208
304	32	230	30,2	38,9	351	202
305	32	200	38,1	44,9	351	193

306	32	195	37,8	42,3	354	188
307	32	210	35,9	40,3	345	195
308	2	135	26,2	33,5	263	177
309	2	130	25,5	33,4	264	171
310	9	160	43,1	47,2	351	188
311	9	155	40,9	48	392	186
312	14	240	28,1	31,9	396	223
313	14	220	26,2	32,4	401	213
314	14	250	28,2	34,7	400	213
315	14	240	30,1	34,8	401	223
316	14	230	28,8	32,5	400	218
317	14	225	31,6	36,9	403	208
318	32	230	36,6	41,6	350	185
319	32	200	35,9	41,7	348	190
320	32	200	34,7	42,1	351	195
321	32	230	35,8	41,3	354	202
322	32	220	37,1	43,4	354	185
323	32	215	37,4	43,7	348	182
324	32	230	32,6	39,7	349	187
325	32	220	34,9	44,4	353	182
326	32	230	35,8	42,4	351	187
327	32	230	36,5	42,6	350	197
328	15	220	23,2	27,3	402	226
329	15	230	23,2	28,4	400	217
330	15	220	28,4	33,8	402	211
331	15	235	27,2	33,7	401	212
332	15	240	25,4	32,4	399	214
333	15	220	29,1	34,6	396	214
334	22	130	35,3	42	315	164
335	22	130	36,2	42,4	315	163
336	22	120	38,1	44,8	314	162
337	22	135	35	41,8	314	164
338	22	120	36,2	41,7	317	164
339	22	120	38	44,8	316	162
340	22	120	38,6	45,2	315	156
341	22	120	36,9	43	315	161
342	22	135	37,3	43,8	312	162
343	30	300	29,3	34,9	319	177
344	30	x	30,1	35,1	319	186
345	30	100	30,6	35,4	321	172
346	30	100	30,1	34,3	319	183
347	31	170	37,6	44,8	328	174
348	31	180	38,5	45,1	329	174
349	31	190	41,7	47,8	330	164
350	31	180	36,8	43,6	328	180
351	31	160	40,4	49,4	337	175

352	12	120	42,8	51,2	397	172
353	12	130	39	45,8	395	188
354	12	125	44,2	51,1	400	182
355	12	130	42,8	51,1	396	182
356	12	140	35,9	44,3	399	182
357	12	120	40,4	47,1	394	180
358	13	120	41,4	47,1	362	171
359	13	120	42,1	50,6	359	166
360	15	210	25,2	32,4	396	205
361	15	190	26,9	32,3	404	209
362	15	230	23,4	28	399	202
363	13	130	43,2	48,7	360	172
364	13	120	42,9	48,9	359	176
365	13	120	42,3	47,9	358	162
366	13	130	38,8	48,2	357	169
367	13	120	39,8	47,4	359	173
368	13	110	43	49,9	365	175
369	13	110	43,3	48,2	356	165
370	13	120	42,3	48,1	357	167
371	14	230	28,1	32,5	397	208
372	14	220	25,5	31,6	396	245
373	14	230	25,8	31,1	398	242
374	14	230	27,1	31,4	403	234
375	14	230	28,1	36,1	400	222
376	22	120	35,5	41,8	316	163
377	22	130	37,2	43,7	317	164
378	22	140	38,6	41,9	319	166
379	22	110	38,6	45	312	158
380	32	220	36,4	42,3	351	210
381	32	210	38,5	43,3	350	188
382	32	210	39,6	47,5	350	191
383	32	200	40,6	46,9	351	182
384	32	200	41,4	47,6	348	192
385	32	200	43,1	48,4	356	187
386	32	200	40,4	47,2	353	187
387	32	210	39,8	45,2	352	189
388	32	200	39,2	45,9	354	189
389	24	50	46,8	53	398	229
390	24	50	46,3	53,6	399	163
391	24	120	47,5	54,8	396	158

Tabela 28 – Distância entre partículas finas considerando os conjuntos de materiais do dia mais próximo

Concreto	Área superficial volumétrica (m^2/cm^3)	Volume de sólidos	Porosidade do empacotamento	IPS (µm)
1	3,52	49,0%	21,9%	0,43
2	3,52	49,0%	21,9%	0,43
3	3,52	50,0%	21,9%	0,41
4	3,52	48,0%	21,9%	0,46
5	3,53	46,9%	21,9%	0,48
6	3,57	43,1%	21,8%	0,58
7	3,57	42,7%	21,8%	0,59
8	3,57	43,6%	21,8%	0,57
9	3,57	43,0%	21,8%	0,59
10	3,57	42,5%	21,8%	0,60
11	3,54	44,0%	21,9%	0,56
12	3,54	43,2%	21,9%	0,58
13	3,55	43,3%	21,8%	0,58
14	3,55	44,4%	21,8%	0,55
15	3,55	47,6%	21,8%	0,46
16	3,59	42,0%	21,8%	0,61
17	3,59	41,5%	21,8%	0,63
18	3,59	41,9%	21,7%	0,62
19	3,59	42,8%	21,8%	0,59
20	3,59	42,6%	21,8%	0,59
21	3,59	42,5%	21,7%	0,60
22	3,59	43,0%	21,8%	0,58
23	3,59	42,3%	21,7%	0,60
24	3,59	42,0%	21,8%	0,62
25	3,59	42,7%	21,8%	0,59
26	3,59	41,7%	21,8%	0,62
27	3,60	40,4%	21,7%	0,67
28	3,59	41,6%	21,8%	0,63
29	3,59	44,6%	21,7%	0,54
30	3,59	43,7%	21,7%	0,56
31	3,59	44,5%	21,7%	0,54
32	3,59	43,4%	21,7%	0,57
33	3,41	46,5%	21,9%	0,51
34	3,41	46,4%	21,9%	0,51
35	3,54	43,7%	21,9%	0,57
36	3,54	44,2%	21,9%	0,56
37	3,54	44,1%	21,9%	0,56
38	3,54	44,2%	21,9%	0,55
39	3,54	45,0%	21,9%	0,53
40	3,54	45,0%	21,9%	0,53

41	3,54	44,5%	21,9%	0,55
42	3,54	44,3%	21,9%	0,55
43	3,54	45,0%	21,9%	0,53
44	3,54	45,2%	21,9%	0,53
45	3,54	45,0%	21,9%	0,53
46	3,55	47,6%	21,9%	0,46
47	3,54	45,4%	21,9%	0,52
48	3,55	46,0%	21,9%	0,50
49	3,55	46,7%	21,9%	0,49
50	3,55	46,9%	21,9%	0,48
51	3,55	46,2%	21,9%	0,50
52	3,54	46,4%	21,9%	0,49
53	3,55	45,6%	21,9%	0,52
54	3,55	46,9%	21,9%	0,48
55	3,38	52,3%	21,8%	0,38
56	3,37	55,1%	21,8%	0,32
57	3,38	52,7%	21,8%	0,37
58	3,38	51,7%	21,8%	0,39
59	3,55	42,4%	21,9%	0,61
60	3,55	44,0%	21,9%	0,56
61	3,54	43,5%	21,9%	0,57
62	3,57	43,1%	21,8%	0,58
63	3,56	44,9%	21,8%	0,53
64	3,56	44,2%	21,8%	0,55
65	3,56	44,1%	21,8%	0,56
66	3,57	43,4%	21,8%	0,57
67	3,57	44,3%	21,8%	0,55
68	3,56	43,6%	21,8%	0,57
69	3,57	43,8%	21,8%	0,56
70	3,58	42,3%	21,9%	0,61
71	3,66	41,3%	21,6%	0,62
72	3,59	45,2%	21,7%	0,52
73	3,59	44,5%	21,7%	0,54
74	3,60	45,0%	21,7%	0,53
75	3,59	45,0%	21,7%	0,53
76	3,59	42,4%	21,7%	0,60
77	3,60	44,7%	21,7%	0,53
78	3,60	44,8%	21,7%	0,53
79	3,59	43,9%	21,7%	0,56
80	3,59	44,6%	21,7%	0,54
81	3,59	43,2%	21,7%	0,58
82	3,60	43,6%	21,7%	0,56
83	3,59	44,2%	21,8%	0,55
84	3,55	45,9%	21,9%	0,51
85	3,55	44,5%	21,9%	0,54
86	3,54	46,1%	21,9%	0,50

87	3,55	45,4%	21,9%	0,52
88	3,55	45,0%	21,8%	0,53
89	3,55	45,9%	21,9%	0,51
90	3,55	45,5%	21,9%	0,52
91	3,55	44,4%	21,8%	0,55
92	3,55	47,4%	21,9%	0,47
93	3,55	44,5%	21,8%	0,54
94	3,55	45,6%	21,8%	0,52
95	3,54	45,6%	21,9%	0,51
96	3,47	43,7%	21,8%	0,58
97	3,52	40,9%	21,6%	0,67
98	3,54	44,9%	21,9%	0,53
99	3,54	45,0%	21,9%	0,53
100	3,54	45,1%	21,9%	0,53
101	3,54	45,7%	21,9%	0,51
102	3,54	44,3%	21,9%	0,55
103	3,54	45,9%	21,9%	0,51
104	3,43	43,3%	22,7%	0,59
105	3,43	42,4%	22,7%	0,62
106	3,43	41,5%	22,8%	0,65
107	3,43	41,9%	22,7%	0,64
108	3,43	42,4%	22,8%	0,62
109	3,43	42,1%	22,7%	0,63
110	3,43	41,5%	22,7%	0,65
111	3,44	41,9%	22,7%	0,63
112	3,43	42,5%	22,7%	0,62
113	3,43	42,5%	22,7%	0,62
114	3,43	41,6%	22,7%	0,65
115	3,49	43,8%	22,8%	0,56
116	3,50	43,7%	22,8%	0,57
117	3,49	43,0%	22,8%	0,59
118	3,49	43,0%	22,8%	0,59
119	3,49	42,2%	22,8%	0,61
120	3,50	42,9%	22,8%	0,59
121	3,49	41,9%	22,8%	0,63
122	3,43	40,9%	22,6%	0,67
123	3,45	44,7%	22,7%	0,55
124	3,44	44,6%	22,7%	0,55
125	3,45	43,5%	22,7%	0,58
126	3,45	43,7%	22,7%	0,58
127	3,45	43,9%	22,7%	0,57
128	3,44	43,9%	22,7%	0,57
129	3,45	43,9%	22,7%	0,57
130	3,24	47,4%	21,8%	0,51
131	3,24	46,3%	21,8%	0,54
132	3,24	46,7%	21,8%	0,53

133	3,26	44,0%	21,7%	0,61
134	3,24	45,6%	21,8%	0,56
135	3,26	44,4%	21,7%	0,60
136	3,26	45,1%	21,7%	0,58
137	3,26	46,1%	21,7%	0,55
138	3,36	44,2%	21,4%	0,59
139	3,28	43,7%	21,6%	0,62
140	3,28	43,6%	21,7%	0,62
141	3,28	43,3%	21,6%	0,63
142	3,28	44,0%	21,7%	0,61
143	3,28	43,6%	21,6%	0,62
144	3,27	49,5%	21,7%	0,46
145	3,27	48,1%	21,7%	0,49
146	3,24	49,2%	21,7%	0,47
147	3,27	47,0%	21,7%	0,52
148	3,27	46,1%	21,7%	0,55
149	3,24	47,6%	21,7%	0,51
150	3,24	48,5%	21,7%	0,48
151	3,24	48,2%	21,7%	0,49
152	3,27	48,5%	21,7%	0,48
153	3,24	47,5%	21,7%	0,51
154	3,24	49,0%	21,7%	0,47
155	3,23	44,7%	21,6%	0,60
156	3,27	47,3%	21,7%	0,51
157	3,27	48,4%	21,7%	0,48
158	3,27	48,7%	21,7%	0,47
159	3,28	45,5%	21,6%	0,56
160	3,26	47,9%	21,7%	0,50
161	3,27	50,5%	21,7%	0,43
162	3,26	47,0%	21,7%	0,52
163	3,26	46,7%	21,7%	0,53
164	3,26	46,4%	21,7%	0,54
165	3,27	44,6%	21,8%	0,59
166	3,26	48,7%	21,7%	0,48
167	3,26	49,2%	21,7%	0,46
168	3,27	45,0%	21,8%	0,58
169	3,26	48,6%	21,7%	0,48
170	3,16	55,0%	21,8%	0,34
171	3,23	45,1%	21,8%	0,58
172	3,24	45,3%	21,7%	0,57
173	3,24	44,9%	21,7%	0,59
174	3,24	43,8%	21,7%	0,62
175	3,24	45,1%	21,7%	0,58
176	3,24	44,9%	21,8%	0,59
177	3,23	45,9%	21,8%	0,56
178	3,24	45,8%	21,7%	0,56

179	3,24	46,3%	21,7%	0,55
180	3,23	46,6%	21,8%	0,54
181	3,24	45,0%	21,7%	0,58
182	3,23	41,9%	21,5%	0,69
183	3,24	41,6%	21,5%	0,70
184	3,24	42,0%	21,5%	0,68
185	3,23	41,2%	21,5%	0,71
186	3,27	43,1%	21,8%	0,64
187	3,27	42,8%	21,8%	0,65
188	3,27	44,1%	21,8%	0,61
189	3,27	43,1%	21,8%	0,64
190	3,21	41,3%	21,6%	0,71
191	3,21	42,4%	21,6%	0,67
192	3,23	52,4%	21,8%	0,39
193	3,23	49,6%	21,8%	0,46
194	3,23	49,0%	21,8%	0,47
195	3,23	49,2%	21,8%	0,47
196	3,23	49,0%	21,8%	0,47
197	3,23	49,5%	21,8%	0,46
198	3,23	48,3%	21,8%	0,49
199	3,27	42,2%	21,8%	0,67
200	3,27	41,8%	21,8%	0,68
201	3,27	42,4%	21,8%	0,66
202	3,27	43,2%	21,8%	0,63
203	3,35	45,3%	21,6%	0,56
204	3,34	44,3%	21,6%	0,59
205	3,34	44,1%	21,6%	0,59
206	3,34	44,6%	21,6%	0,58
207	3,34	46,3%	21,6%	0,53
208	3,35	46,9%	21,6%	0,51
209	3,34	43,8%	21,6%	0,60
210	3,34	45,5%	21,6%	0,55
211	3,35	44,3%	21,6%	0,59
212	3,23	49,4%	21,8%	0,46
213	3,22	46,6%	21,8%	0,54
214	3,23	47,2%	21,8%	0,52
215	3,23	47,6%	21,8%	0,51
216	3,28	47,4%	21,6%	0,51
217	3,27	49,6%	21,6%	0,45
218	3,28	47,8%	21,6%	0,50
219	3,28	47,6%	21,6%	0,50
220	3,22	47,1%	21,7%	0,53
221	3,24	47,0%	21,8%	0,52
222	3,24	46,6%	21,8%	0,54
223	3,24	46,0%	21,7%	0,55
224	3,24	46,7%	21,7%	0,53

225	3,23	46,4%	21,8%	0,54
226	3,24	46,8%	21,7%	0,53
227	3,23	45,4%	21,8%	0,57
228	3,24	48,2%	21,8%	0,49
229	3,24	43,2%	21,7%	0,64
230	3,24	47,3%	21,7%	0,52
231	3,24	46,5%	21,7%	0,54
232	3,24	49,4%	21,7%	0,46
233	4,25	46,2%	22,0%	0,42
234	4,22	48,4%	22,1%	0,37
235	4,25	45,3%	22,0%	0,44
236	4,25	44,5%	22,0%	0,45
237	4,13	45,3%	22,0%	0,45
238	4,13	46,6%	22,0%	0,42
239	4,13	46,5%	22,0%	0,42
240	4,13	45,9%	22,0%	0,43
241	4,13	47,2%	22,0%	0,41
242	4,25	45,0%	22,0%	0,44
243	4,25	44,8%	22,0%	0,45
244	4,25	45,0%	22,0%	0,44
245	4,25	43,5%	22,0%	0,48
246	4,25	44,5%	22,0%	0,45
247	4,26	43,5%	21,7%	0,48
248	4,25	46,2%	22,0%	0,41
249	4,25	46,9%	22,0%	0,40
250	4,26	41,9%	21,7%	0,52
251	4,26	41,4%	21,7%	0,53
252	4,25	46,5%	22,0%	0,41
253	4,26	41,3%	21,7%	0,54
254	4,25	45,1%	22,0%	0,44
255	4,26	40,8%	21,7%	0,55
256	4,26	41,4%	21,7%	0,53
257	4,26	41,3%	21,7%	0,54
258	4,25	44,2%	22,0%	0,46
259	4,26	41,7%	21,7%	0,53
260	4,27	43,0%	21,7%	0,49
261	4,27	41,7%	21,7%	0,53
262	4,27	44,2%	21,7%	0,46
263	4,27	46,8%	21,7%	0,40
264	4,27	45,5%	21,7%	0,43
265	4,27	46,2%	21,7%	0,42
266	4,58	51,9%	21,1%	0,29
267	4,14	43,4%	21,9%	0,49
268	4,14	44,0%	21,9%	0,48
269	4,14	45,0%	21,9%	0,45
270	4,14	45,0%	21,9%	0,45

271	4,14	44,2%	21,9%	0,47
272	4,14	45,6%	21,9%	0,44
273	4,15	44,7%	21,9%	0,46
274	4,14	44,9%	21,9%	0,46
275	4,16	45,9%	21,9%	0,43
276	4,16	44,1%	21,9%	0,48
277	4,16	45,2%	21,9%	0,45
278	4,16	44,8%	21,9%	0,46
279	4,16	44,7%	21,9%	0,46
280	4,16	44,5%	21,9%	0,47
281	4,16	44,5%	21,9%	0,46
282	4,16	43,7%	21,9%	0,48
283	4,16	43,9%	21,9%	0,48
284	4,20	40,7%	21,8%	0,56
285	4,20	39,4%	21,7%	0,60
286	4,22	44,2%	22,0%	0,47
287	4,22	44,1%	22,0%	0,47
288	4,22	43,7%	22,0%	0,48
289	4,22	44,0%	22,0%	0,47
290	4,22	43,2%	22,0%	0,49
291	4,22	44,6%	22,0%	0,46
292	4,13	45,0%	22,0%	0,46
293	4,13	46,0%	22,0%	0,43
294	4,13	47,1%	22,0%	0,41
295	4,13	46,0%	22,0%	0,43
296	4,25	48,4%	22,0%	0,37
297	4,24	43,7%	22,0%	0,47
298	4,26	43,0%	22,0%	0,49
299	4,25	43,8%	22,0%	0,47
300	4,25	42,6%	22,0%	0,50
301	4,26	42,4%	22,0%	0,50
302	4,25	42,5%	22,0%	0,50
303	4,25	45,3%	22,0%	0,43
304	4,14	41,0%	21,9%	0,56
305	4,14	42,3%	21,9%	0,52
306	4,14	43,3%	21,9%	0,50
307	4,15	41,8%	21,9%	0,54
308	4,20	39,1%	21,7%	0,61
309	4,20	40,1%	21,7%	0,58
310	4,19	43,8%	21,9%	0,48
311	4,17	46,0%	22,0%	0,43
312	3,63	43,0%	21,9%	0,58
313	3,63	44,6%	21,9%	0,53
314	3,63	44,6%	21,9%	0,53
315	3,63	43,2%	21,9%	0,57
316	3,63	43,9%	21,9%	0,55

317	3,62	45,4%	21,9%	0,51
318	3,49	43,6%	21,9%	0,58
319	3,49	42,8%	21,9%	0,61
320	3,49	42,1%	21,9%	0,63
321	3,49	41,1%	21,9%	0,66
322	3,49	43,8%	21,9%	0,57
323	3,49	44,0%	21,9%	0,57
324	3,49	43,2%	21,9%	0,59
325	3,49	44,3%	21,9%	0,56
326	3,49	43,3%	21,9%	0,59
327	3,49	41,7%	21,9%	0,64
328	3,57	42,0%	21,9%	0,62
329	3,57	43,0%	21,9%	0,58
330	3,57	44,0%	21,9%	0,56
331	3,57	43,9%	21,9%	0,56
332	3,57	43,4%	21,9%	0,57
333	3,57	43,3%	21,9%	0,57
334	3,52	44,1%	21,8%	0,56
335	3,52	44,3%	21,8%	0,56
336	3,52	44,4%	21,8%	0,55
337	3,52	44,0%	21,8%	0,56
338	3,52	44,1%	21,8%	0,56
339	3,52	44,5%	21,8%	0,55
340	3,52	45,7%	21,8%	0,52
341	3,52	44,7%	21,8%	0,54
342	3,52	44,3%	21,8%	0,55
343	3,69	44,9%	21,6%	0,51
344	3,69	43,5%	21,6%	0,55
345	3,69	45,9%	21,7%	0,49
346	3,69	44,0%	21,6%	0,54
347	3,51	43,8%	21,9%	0,57
348	3,51	43,8%	21,9%	0,57
349	3,51	45,6%	21,9%	0,52
350	3,51	42,7%	21,8%	0,61
351	3,50	44,1%	21,9%	0,57
352	3,32	46,7%	22,1%	0,52
353	3,32	44,1%	22,1%	0,59
354	3,31	45,2%	22,1%	0,56
355	3,32	45,0%	22,1%	0,57
356	3,31	45,1%	22,1%	0,56
357	3,32	45,2%	22,1%	0,56
358	3,45	45,6%	22,0%	0,53
359	3,45	46,3%	22,0%	0,51
360	3,57	44,7%	21,9%	0,53
361	3,57	44,4%	21,9%	0,54
362	3,57	45,3%	21,9%	0,52

363	3,45	45,3%	22,0%	0,54
364	3,45	44,7%	22,0%	0,55
365	3,45	47,0%	22,0%	0,49
366	3,45	45,6%	21,9%	0,53
367	3,45	45,2%	22,0%	0,54
368	3,44	45,1%	22,0%	0,54
369	3,45	46,3%	21,9%	0,51
370	3,45	46,1%	21,9%	0,52
371	3,62	44,9%	21,9%	0,52
372	3,62	39,8%	21,9%	0,68
373	3,62	40,2%	21,9%	0,67
374	3,61	41,5%	21,9%	0,62
375	3,61	43,0%	21,9%	0,58
376	3,52	44,3%	21,8%	0,56
377	3,52	44,2%	21,8%	0,56
378	3,52	44,0%	21,8%	0,56
379	3,52	45,0%	21,8%	0,53
380	3,49	39,8%	21,9%	0,71
381	3,49	43,1%	21,9%	0,60
382	3,49	42,7%	21,9%	0,61
383	3,49	44,1%	21,9%	0,57
384	3,49	42,4%	21,9%	0,62
385	3,48	43,5%	21,9%	0,58
386	3,49	43,4%	21,9%	0,59
387	3,49	43,0%	21,9%	0,60
388	3,49	43,1%	21,9%	0,60
389	3,41	38,5%	22,0%	0,77
390	3,41	48,8%	22,0%	0,45
391	3,41	49,5%	22,0%	0,43

Tabela 29 – Distância entre partículas grossas considerando o conjunto de materiais do dia mais próximo

Concreto	**Área superficial volumétrica (m^2/cm^3)**	**Volume de sólidos**	**Porosidade do empacotamento**	**MPT (µm)**
1	0,007	66,7%	16,9%	82,84
2	0,007	66,6%	16,9%	83,04
3	0,007	66,8%	16,9%	82,09
4	0,007	66,0%	16,9%	86,84
5	0,007	65,8%	16,9%	88,49
6	0,008	65,1%	17,0%	85,01
7	0,008	64,9%	17,0%	86,62
8	0,008	65,2%	17,0%	84,37
9	0,008	65,1%	17,0%	85,00
10	0,008	64,8%	17,0%	86,84

11	0,007	59,5%	18,1%	125,31
12	0,007	59,1%	18,1%	127,79
13	0,007	66,2%	17,0%	87,18
14	0,007	66,8%	17,0%	83,16
15	0,007	68,1%	17,0%	75,19
16	0,008	65,5%	17,1%	81,72
17	0,008	65,3%	17,1%	82,68
18	0,008	65,7%	17,1%	80,13
19	0,008	66,1%	17,1%	78,05
20	0,008	65,9%	17,1%	78,84
21	0,008	66,0%	17,1%	78,48
22	0,008	66,2%	17,1%	77,64
23	0,008	65,9%	17,1%	79,06
24	0,008	65,4%	17,1%	81,92
25	0,008	65,9%	17,1%	79,08
26	0,008	65,4%	17,1%	82,36
27	0,008	64,7%	17,1%	85,21
28	0,008	65,2%	17,1%	81,94
29	0,007	68,7%	16,9%	69,05
30	0,007	68,5%	16,9%	70,47
31	0,007	68,7%	16,9%	69,02
32	0,007	68,2%	16,9%	71,77
33	0,008	61,6%	18,3%	106,13
34	0,008	62,0%	18,3%	102,75
35	0,007	59,3%	18,1%	126,84
36	0,007	59,7%	18,1%	123,40
37	0,007	59,5%	18,1%	125,27
38	0,007	59,6%	18,1%	124,42
39	0,007	65,8%	16,9%	87,34
40	0,007	65,8%	16,9%	87,55
41	0,007	65,6%	16,9%	88,52
42	0,007	65,7%	16,9%	88,27
43	0,007	65,8%	16,9%	87,46
44	0,007	65,7%	16,9%	88,12
45	0,007	66,0%	16,9%	86,07
46	0,007	68,0%	17,1%	78,98
47	0,007	66,7%	17,1%	87,62
48	0,007	67,3%	17,1%	83,61
49	0,007	67,3%	17,1%	83,28
50	0,007	67,5%	17,1%	82,51
51	0,007	67,1%	17,1%	84,54
52	0,007	67,1%	17,1%	85,09
53	0,007	66,9%	17,1%	86,36
54	0,007	67,5%	17,1%	82,18
55	0,009	65,4%	18,6%	67,10
56	0,009	65,6%	18,6%	65,90

57	0,009	65,4%	18,6%	66,81
58	0,009	65,2%	18,6%	67,96
59	0,008	62,1%	17,1%	101,24
60	0,008	62,9%	17,1%	95,99
61	0,008	62,5%	17,1%	98,47
62	0,007	66,8%	16,9%	81,53
63	0,007	67,6%	16,9%	76,64
64	0,007	67,1%	16,9%	79,86
65	0,007	67,1%	16,9%	79,50
66	0,007	67,1%	16,9%	79,92
67	0,007	67,5%	16,9%	77,34
68	0,007	66,9%	16,9%	80,64
69	0,007	67,3%	16,9%	78,48
70	0,006	58,0%	18,6%	154,86
71	0,007	70,4%	16,9%	57,89
72	0,007	69,1%	16,9%	66,98
73	0,007	68,8%	16,9%	68,80
74	0,007	69,2%	16,9%	66,23
75	0,007	68,9%	16,9%	67,75
76	0,007	67,9%	16,9%	74,11
77	0,007	69,1%	16,9%	66,87
78	0,007	69,3%	16,9%	65,84
79	0,007	68,4%	16,9%	70,76
80	0,007	68,9%	16,9%	67,72
81	0,007	68,4%	16,9%	71,17
82	0,007	68,6%	16,9%	69,85
83	0,007	68,5%	16,9%	70,32
84	0,007	67,3%	17,0%	80,39
85	0,007	66,7%	17,0%	84,20
86	0,007	67,2%	17,0%	81,03
87	0,007	67,1%	17,0%	81,62
88	0,007	66,9%	17,0%	82,52
89	0,007	67,3%	17,0%	80,30
90	0,007	67,1%	17,0%	81,66
91	0,007	66,8%	17,0%	83,49
92	0,007	67,8%	17,0%	76,80
93	0,007	66,7%	17,0%	83,90
94	0,007	67,2%	17,0%	80,48
95	0,007	67,0%	17,0%	82,11
96	0,009	61,8%	18,3%	92,56
97	0,008	64,7%	18,2%	76,28
98	0,007	65,7%	16,9%	88,09
99	0,007	66,0%	16,9%	86,17
100	0,007	65,9%	16,9%	86,48
101	0,007	66,3%	16,9%	84,31
102	0,007	65,5%	16,9%	89,25

103	0,007	66,2%	16,9%	85,10
104	0,009	64,5%	17,5%	77,63
105	0,009	64,0%	17,5%	80,44
106	0,009	63,4%	17,5%	83,35
107	0,009	63,8%	17,5%	81,28
108	0,009	64,0%	17,5%	80,52
109	0,009	63,9%	17,5%	80,77
110	0,009	63,6%	17,5%	82,25
111	0,009	64,0%	17,5%	80,04
112	0,009	64,1%	17,5%	79,71
113	0,009	64,1%	17,5%	79,73
114	0,009	63,6%	17,5%	82,59
115	0,007	58,9%	17,5%	139,75
116	0,007	58,8%	17,5%	140,08
117	0,007	58,4%	17,5%	143,70
118	0,007	58,4%	17,5%	143,92
119	0,007	58,0%	17,5%	147,14
120	0,007	58,4%	17,5%	143,55
121	0,007	57,8%	17,5%	148,78
122	0,009	65,1%	18,1%	70,16
123	0,008	69,3%	17,1%	62,01
124	0,008	69,1%	17,1%	62,94
125	0,008	68,7%	17,1%	64,79
126	0,008	68,9%	17,1%	64,11
127	0,008	69,0%	17,1%	63,27
128	0,008	68,8%	17,1%	64,57
129	0,008	69,0%	17,1%	63,53
130	0,008	64,6%	17,2%	80,12
131	0,008	64,0%	17,2%	83,66
132	0,008	64,0%	17,2%	83,33
133	0,009	64,7%	17,4%	76,92
134	0,008	63,5%	17,2%	86,33
135	0,009	65,0%	17,4%	75,18
136	0,009	65,5%	17,4%	72,96
137	0,009	65,8%	17,4%	70,93
138	0,008	73,6%	17,2%	35,68
139	0,008	69,1%	17,0%	62,38
140	0,008	68,7%	17,0%	64,63
141	0,008	68,8%	17,0%	63,89
142	0,008	69,0%	17,0%	62,93
143	0,008	68,9%	17,0%	63,35
144	0,008	70,9%	17,0%	52,97
145	0,008	70,3%	17,0%	56,19
146	0,007	68,6%	17,1%	67,50
147	0,008	69,8%	17,0%	58,86

148	0,008	69,3%	17,0%	61,47
149	0,007	67,8%	17,1%	72,03
150	0,007	68,5%	17,1%	68,22
151	0,007	68,1%	17,1%	70,41
152	0,008	70,6%	17,0%	54,82
153	0,007	68,1%	17,1%	70,63
154	0,007	68,7%	17,1%	67,28
155	0,009	66,7%	18,1%	61,92
156	0,008	70,0%	17,0%	57,68
157	0,008	70,6%	17,0%	54,73
158	0,008	70,6%	17,0%	54,47
159	0,009	67,5%	17,4%	62,20
160	0,009	66,5%	17,4%	67,46
161	0,008	71,4%	17,0%	50,74
162	0,009	66,1%	17,4%	69,43
163	0,009	66,1%	17,4%	69,71
164	0,009	65,6%	17,4%	72,27
165	0,007	58,9%	17,8%	139,75
166	0,009	67,1%	17,4%	64,55
167	0,009	67,2%	17,4%	63,66
168	0,007	59,2%	17,8%	137,83
169	0,009	66,9%	17,4%	65,56
170	0,008	65,9%	17,9%	74,90
171	0,008	65,5%	17,0%	83,64
172	0,008	66,0%	17,0%	80,76
173	0,008	65,9%	17,0%	81,61
174	0,008	65,4%	17,0%	84,70
175	0,008	66,0%	17,0%	80,97
176	0,008	65,6%	17,0%	82,93
177	0,008	66,0%	17,0%	80,99
178	0,008	66,2%	17,0%	79,36
179	0,008	66,4%	17,0%	78,15
180	0,008	66,2%	17,0%	79,44
181	0,008	65,8%	17,0%	81,78
182	0,009	67,6%	18,0%	59,72
183	0,009	67,8%	18,0%	58,81
184	0,009	67,8%	18,0%	58,77
185	0,009	67,4%	18,0%	61,09
186	0,007	58,1%	17,8%	146,62
187	0,007	58,1%	17,8%	146,81
188	0,007	58,7%	17,8%	142,20
189	0,007	58,0%	17,8%	147,74
190	0,008	65,5%	17,9%	73,32
191	0,008	66,0%	17,9%	70,58
192	0,008	68,1%	17,1%	69,27
193	0,008	66,9%	17,1%	76,06

194	0,008	67,0%	17,1%	75,42
195	0,008	66,9%	17,1%	76,15
196	0,008	66,5%	17,1%	78,19
197	0,008	67,2%	17,1%	74,09
198	0,008	66,5%	17,1%	78,47
199	0,007	57,7%	17,8%	150,86
200	0,007	57,4%	17,8%	153,13
201	0,007	57,8%	17,8%	149,70
202	0,007	58,1%	17,8%	146,57
203	0,009	64,7%	18,3%	71,16
204	0,009	63,9%	18,3%	75,25
205	0,009	63,8%	18,3%	75,64
206	0,009	64,2%	18,3%	73,56
207	0,009	64,9%	18,3%	69,81
208	0,009	65,5%	18,3%	67,16
209	0,009	63,5%	18,3%	77,52
210	0,009	64,5%	18,3%	71,99
211	0,009	64,2%	18,3%	73,96
212	0,008	66,9%	17,1%	76,59
213	0,008	65,4%	17,1%	85,55
214	0,008	65,8%	17,1%	83,21
215	0,008	66,0%	17,1%	81,69
216	0,009	68,1%	17,6%	56,92
217	0,009	68,3%	17,6%	56,10
218	0,009	68,2%	17,6%	56,85
219	0,009	68,2%	17,6%	56,63
220	0,009	60,1%	18,4%	93,47
221	0,008	66,6%	17,0%	76,97
222	0,008	66,4%	17,0%	78,43
223	0,008	66,3%	17,0%	78,83
224	0,008	66,9%	17,0%	75,71
225	0,008	66,1%	17,0%	80,24
226	0,008	66,8%	17,0%	76,21
227	0,008	65,8%	17,0%	82,03
228	0,008	67,2%	17,0%	73,88
229	0,007	66,1%	17,1%	82,32
230	0,007	67,9%	17,1%	71,51
231	0,007	67,8%	17,1%	72,01
232	0,007	68,6%	17,1%	67,60
233	0,006	60,1%	18,4%	136,91
234	0,006	59,0%	18,4%	147,28
235	0,006	59,9%	18,4%	139,25
236	0,006	59,4%	18,4%	142,98
237	0,007	66,0%	17,0%	88,33
238	0,007	66,7%	17,0%	84,23
239	0,007	66,7%	17,0%	84,10

240	0,007	66,6%	17,0%	84,83
241	0,007	66,8%	17,0%	83,48
242	0,006	59,6%	18,4%	141,91
243	0,006	59,6%	18,4%	141,37
244	0,006	59,6%	18,4%	141,71
245	0,006	58,9%	18,4%	148,33
246	0,006	59,4%	18,4%	143,17
247	0,008	69,0%	18,1%	56,63
248	0,006	60,1%	18,4%	137,11
249	0,006	60,8%	18,4%	131,06
250	0,008	68,6%	18,1%	58,96
251	0,008	68,4%	18,1%	60,12
252	0,006	60,4%	18,4%	134,67
253	0,008	68,0%	18,1%	61,98
254	0,006	59,6%	18,4%	141,82
255	0,008	67,8%	18,1%	62,88
256	0,008	68,4%	18,1%	59,95
257	0,008	68,0%	18,1%	62,22
258	0,006	59,2%	18,4%	144,78
259	0,008	68,2%	18,1%	60,72
260	0,008	69,3%	18,1%	55,00
261	0,008	68,6%	18,1%	58,76
262	0,010	65,0%	19,2%	62,42
263	0,010	66,1%	19,2%	57,02
264	0,010	65,5%	19,2%	59,74
265	0,010	66,0%	19,2%	57,38
266	0,010	80,7%	19,2%	0,39
267	0,008	64,5%	17,2%	86,42
268	0,008	65,0%	17,2%	83,25
269	0,008	65,3%	17,2%	81,35
270	0,008	65,3%	17,2%	81,39
271	0,008	64,9%	17,2%	83,87
272	0,008	65,7%	17,2%	79,39
273	0,008	65,5%	17,2%	80,07
274	0,008	65,4%	17,2%	81,15
275	0,007	69,3%	17,0%	64,98
276	0,007	68,2%	17,0%	71,29
277	0,007	68,7%	17,0%	68,45
278	0,007	68,5%	17,0%	69,68
279	0,007	68,5%	17,0%	69,28
280	0,007	68,4%	17,0%	69,96
281	0,007	68,6%	17,0%	68,62
282	0,007	68,2%	17,0%	71,37
283	0,007	68,5%	17,0%	69,27
284	0,008	69,1%	17,1%	62,49
285	0,008	68,9%	17,1%	63,65

286	0,007	59,8%	18,0%	124,04
287	0,007	59,9%	18,0%	123,73
288	0,007	59,7%	18,0%	125,19
289	0,007	59,9%	18,0%	123,28
290	0,007	59,6%	18,0%	125,57
291	0,007	60,0%	18,0%	122,89
292	0,007	65,8%	17,0%	89,92
293	0,007	66,6%	17,0%	84,76
294	0,007	66,9%	17,0%	82,95
295	0,007	66,3%	17,0%	86,43
296	0,007	60,9%	18,3%	126,69
297	0,007	57,6%	18,3%	155,61
298	0,007	58,3%	18,3%	149,04
299	0,007	58,7%	18,3%	145,67
300	0,007	58,0%	18,3%	152,31
301	0,007	58,1%	18,3%	151,42
302	0,007	57,8%	18,3%	153,88
303	0,007	59,3%	18,3%	140,08
304	0,008	63,3%	17,2%	93,56
305	0,008	64,0%	17,2%	89,16
306	0,008	64,4%	17,2%	86,84
307	0,008	64,1%	17,2%	88,90
308	0,008	68,7%	17,1%	64,92
309	0,008	69,2%	17,1%	62,30
310	0,008	64,1%	18,1%	87,56
311	0,008	63,1%	18,1%	93,50
312	0,007	58,3%	18,2%	144,98
313	0,007	59,0%	18,2%	139,57
314	0,007	59,0%	18,2%	139,34
315	0,007	58,2%	18,2%	146,17
316	0,007	58,6%	18,2%	142,51
317	0,007	59,3%	18,2%	136,65
318	0,008	64,7%	17,4%	84,15
319	0,008	64,4%	17,4%	86,04
320	0,008	63,9%	17,4%	89,12
321	0,008	63,2%	17,4%	93,40
322	0,008	64,7%	17,4%	84,53
323	0,008	65,0%	17,4%	82,28
324	0,008	64,6%	17,4%	84,83
325	0,008	64,9%	17,4%	83,06
326	0,008	64,6%	17,4%	85,13
327	0,008	63,7%	17,4%	90,07
328	0,007	58,6%	18,1%	131,39
329	0,007	59,3%	18,1%	126,12
330	0,007	59,7%	18,1%	122,91
331	0,007	59,7%	18,1%	122,85

332	0,007	59,6%	18,1%	124,01
333	0,007	59,6%	18,1%	123,57
334	0,007	68,2%	17,2%	70,53
335	0,007	68,3%	17,2%	69,88
336	0,007	68,4%	17,2%	69,12
337	0,007	68,2%	17,2%	70,38
338	0,007	68,1%	17,2%	70,83
339	0,007	68,4%	17,2%	69,40
340	0,007	68,9%	17,2%	66,20
341	0,007	68,5%	17,2%	68,56
342	0,007	68,5%	17,2%	68,76
343	0,010	65,3%	19,5%	59,53
344	0,010	64,7%	19,5%	62,89
345	0,010	65,7%	19,5%	57,75
346	0,010	64,9%	19,5%	61,76
347	0,008	66,7%	17,3%	76,35
348	0,008	66,6%	17,3%	76,63
349	0,008	67,4%	17,3%	72,28
350	0,008	66,1%	17,3%	79,50
351	0,008	66,3%	17,3%	78,47
352	0,008	65,1%	17,4%	86,49
353	0,008	63,9%	17,4%	94,14
354	0,008	64,2%	17,4%	92,23
355	0,008	64,3%	17,4%	91,69
356	0,008	64,2%	17,4%	92,18
357	0,008	64,5%	17,4%	90,24
358	0,007	66,1%	17,1%	87,67
359	0,007	66,6%	17,1%	84,30
360	0,007	60,4%	18,1%	118,08
361	0,007	59,9%	18,1%	121,80
362	0,007	60,5%	18,1%	116,74
363	0,007	66,0%	17,1%	87,86
364	0,007	65,8%	17,1%	89,49
365	0,007	66,9%	17,1%	82,32
366	0,007	66,4%	17,1%	85,72
367	0,007	66,0%	17,1%	87,86
368	0,007	65,7%	17,1%	90,12
369	0,007	66,7%	17,1%	83,47
370	0,007	66,6%	17,1%	84,40
371	0,007	59,6%	18,2%	138,09
372	0,007	56,8%	18,2%	163,46
373	0,007	57,0%	18,2%	161,77
374	0,007	57,5%	18,2%	156,95
375	0,007	58,5%	18,2%	148,29
376	0,007	68,3%	17,2%	69,92
377	0,007	68,1%	17,2%	70,90

378	0,007	68,0%	17,2%	71,64
379	0,007	68,8%	17,2%	66,91
380	0,008	62,6%	17,4%	96,99
381	0,008	64,4%	17,4%	85,78
382	0,008	64,3%	17,4%	86,96
383	0,008	64,9%	17,4%	82,83
384	0,008	64,2%	17,4%	87,14
385	0,008	64,4%	17,4%	86,05
386	0,008	64,5%	17,4%	85,58
387	0,008	64,3%	17,4%	86,60
388	0,008	64,2%	17,4%	86,97
389	0,007	60,3%	17,2%	131,70
390	0,007	65,6%	17,2%	92,59
391	0,007	66,1%	17,2%	89,33

Tabela 30 – Distância entre partículas finas considerando o conjunto de materiais do dia M1D0

Concreto	**Área superficial volumétrica (m^2/cm^3)**	**Volume de sólidos**	**Porosidade do empacotamento**	**IPS (µm)**
1	3,52	49,0%	21,9%	0,43
2	3,52	49,0%	21,9%	0,43
3	3,52	50,0%	21,9%	0,41
4	3,52	48,0%	21,9%	0,46
5	3,53	46,9%	21,9%	0,48
6	3,57	43,1%	21,8%	0,58
7	3,57	42,7%	21,8%	0,59
8	3,57	43,6%	21,8%	0,57
9	3,57	43,0%	21,8%	0,59
10	3,57	42,5%	21,8%	0,60
11	3,54	44,0%	21,9%	0,56
12	3,54	43,2%	21,9%	0,58
13	3,55	43,3%	21,8%	0,58
14	3,55	44,4%	21,8%	0,55
15	3,55	47,6%	21,8%	0,46
16	3,59	42,0%	21,8%	0,61
17	3,59	41,5%	21,8%	0,63
18	3,59	41,9%	21,7%	0,62
19	3,59	42,8%	21,8%	0,59
20	3,59	42,6%	21,8%	0,59
21	3,59	42,5%	21,7%	0,60
22	3,59	43,0%	21,8%	0,58
23	3,59	42,3%	21,7%	0,60
24	3,59	42,0%	21,8%	0,62
25	3,59	42,7%	21,8%	0,59
26	3,59	41,7%	21,8%	0,62

27	3,60	40,4%	21,7%	0,67
28	3,59	41,6%	21,8%	0,63
29	3,59	44,6%	21,7%	0,54
30	3,59	43,7%	21,7%	0,56
31	3,59	44,5%	21,7%	0,54
32	3,59	43,4%	21,7%	0,57
33	3,41	46,5%	21,9%	0,51
34	3,41	46,4%	21,9%	0,51
35	3,54	43,7%	21,9%	0,57
36	3,54	44,2%	21,9%	0,56
37	3,54	44,1%	21,9%	0,56
38	3,54	44,2%	21,9%	0,55
39	3,54	45,0%	21,9%	0,53
40	3,54	45,0%	21,9%	0,53
41	3,54	44,5%	21,9%	0,55
42	3,54	44,3%	21,9%	0,55
43	3,54	45,0%	21,9%	0,53
44	3,54	45,2%	21,9%	0,53
45	3,54	45,0%	21,9%	0,53
46	3,55	47,6%	21,9%	0,46
47	3,54	45,4%	21,9%	0,52
48	3,55	46,0%	21,9%	0,50
49	3,55	46,7%	21,9%	0,49
50	3,55	46,9%	21,9%	0,48
51	3,55	46,2%	21,9%	0,50
52	3,54	46,4%	21,9%	0,49
53	3,55	45,6%	21,9%	0,52
54	3,55	46,9%	21,9%	0,48
55	3,38	52,3%	21,8%	0,38
56	3,37	55,1%	21,8%	0,32
57	3,38	52,7%	21,8%	0,37
58	3,38	51,7%	21,8%	0,39
59	3,55	42,4%	21,9%	0,61
60	3,55	44,0%	21,9%	0,56
61	3,54	43,5%	21,9%	0,57
62	3,57	43,1%	21,8%	0,58
63	3,56	44,9%	21,8%	0,53
64	3,56	44,2%	21,8%	0,55
65	3,56	44,1%	21,8%	0,56
66	3,57	43,4%	21,8%	0,57
67	3,57	44,3%	21,8%	0,55
68	3,56	43,6%	21,8%	0,57
69	3,57	43,8%	21,8%	0,56
70	3,58	42,3%	21,9%	0,61
71	3,66	41,3%	21,6%	0,62
72	3,59	45,2%	21,7%	0,52

73	3,59	44,5%	21,7%	0,54
74	3,60	45,0%	21,7%	0,53
75	3,59	45,0%	21,7%	0,53
76	3,59	42,4%	21,7%	0,60
77	3,60	44,7%	21,7%	0,53
78	3,60	44,8%	21,7%	0,53
79	3,59	43,9%	21,7%	0,56
80	3,59	44,6%	21,7%	0,54
81	3,59	43,2%	21,7%	0,58
82	3,60	43,6%	21,7%	0,56
83	3,59	44,2%	21,8%	0,55
84	3,55	45,9%	21,9%	0,51
85	3,55	44,5%	21,9%	0,54
86	3,54	46,1%	21,9%	0,50
87	3,55	45,4%	21,9%	0,52
88	3,55	45,0%	21,8%	0,53
89	3,55	45,9%	21,9%	0,51
90	3,55	45,5%	21,9%	0,52
91	3,55	44,4%	21,8%	0,55
92	3,55	47,4%	21,9%	0,47
93	3,55	44,5%	21,8%	0,54
94	3,55	45,6%	21,8%	0,52
95	3,54	45,6%	21,9%	0,51
96	3,47	43,7%	21,8%	0,58
97	3,52	40,9%	21,6%	0,67
98	3,54	44,9%	21,9%	0,53
99	3,54	45,0%	21,9%	0,53
100	3,54	45,1%	21,9%	0,53
101	3,54	45,7%	21,9%	0,51
102	3,54	44,3%	21,9%	0,55
103	3,54	45,9%	21,9%	0,51
104	3,58	43,4%	21,8%	0,57
105	3,58	42,5%	21,8%	0,60
106	3,58	41,6%	21,8%	0,63
107	3,58	42,0%	21,8%	0,62
108	3,58	42,5%	21,8%	0,60
109	3,58	42,2%	21,8%	0,61
110	3,58	41,6%	21,8%	0,63
111	3,58	42,0%	21,8%	0,62
112	3,58	42,6%	21,8%	0,60
113	3,58	42,6%	21,8%	0,60
114	3,58	41,6%	21,8%	0,63
115	3,58	43,9%	21,9%	0,56
116	3,58	43,8%	21,9%	0,56
117	3,58	43,1%	21,9%	0,58
118	3,58	43,2%	21,9%	0,58

119	3,58	42,3%	21,9%	0,60
120	3,58	43,0%	21,9%	0,58
121	3,58	42,0%	21,9%	0,61
122	3,51	41,4%	21,6%	0,65
123	3,59	44,8%	21,7%	0,53
124	3,59	44,7%	21,8%	0,53
125	3,59	43,6%	21,7%	0,57
126	3,59	43,8%	21,7%	0,56
127	3,59	44,0%	21,7%	0,55
128	3,59	44,0%	21,7%	0,56
129	3,59	44,0%	21,7%	0,55
130	3,55	47,3%	21,9%	0,47
131	3,55	46,2%	21,9%	0,50
132	3,55	46,6%	21,9%	0,49
133	3,58	43,9%	21,8%	0,56
134	3,55	45,5%	21,9%	0,52
135	3,58	44,3%	21,8%	0,55
136	3,58	45,0%	21,8%	0,53
137	3,58	46,0%	21,8%	0,50
138	3,74	44,0%	21,4%	0,53
139	3,61	43,5%	21,7%	0,56
140	3,60	43,5%	21,7%	0,57
141	3,61	43,2%	21,7%	0,57
142	3,61	43,9%	21,7%	0,56
143	3,61	43,5%	21,7%	0,57
144	3,59	49,4%	21,7%	0,42
145	3,59	48,0%	21,7%	0,45
146	3,55	49,1%	21,9%	0,43
147	3,59	46,9%	21,7%	0,48
148	3,59	46,0%	21,7%	0,50
149	3,55	47,5%	21,9%	0,46
150	3,55	48,5%	21,8%	0,44
151	3,55	48,1%	21,9%	0,45
152	3,59	48,4%	21,7%	0,44
153	3,55	47,4%	21,8%	0,47
154	3,55	48,9%	21,8%	0,43
155	3,52	44,8%	21,6%	0,54
156	3,59	47,2%	21,7%	0,47
157	3,60	48,3%	21,7%	0,44
158	3,59	48,6%	21,7%	0,43
159	3,61	45,4%	21,7%	0,51
160	3,58	47,8%	21,8%	0,45
161	3,59	50,4%	21,7%	0,39
162	3,58	46,9%	21,8%	0,48
163	3,58	46,6%	21,8%	0,49
164	3,58	46,3%	21,8%	0,49

165	3,58	44,5%	21,9%	0,54
166	3,58	48,6%	21,8%	0,44
167	3,58	49,1%	21,8%	0,42
168	3,58	44,8%	21,9%	0,53
169	3,58	48,5%	21,8%	0,44
170	3,41	55,1%	21,9%	0,31
171	3,54	45,0%	21,9%	0,53
172	3,54	45,3%	21,9%	0,52
173	3,54	44,8%	21,9%	0,54
174	3,54	43,8%	21,9%	0,57
175	3,54	45,0%	21,9%	0,53
176	3,54	44,8%	21,9%	0,54
177	3,54	45,8%	21,9%	0,51
178	3,54	45,8%	21,9%	0,51
179	3,54	46,2%	21,9%	0,50
180	3,54	46,5%	21,9%	0,49
181	3,54	44,9%	21,9%	0,53
182	3,53	42,0%	21,5%	0,63
183	3,53	41,7%	21,5%	0,64
184	3,53	42,1%	21,5%	0,62
185	3,53	41,3%	21,5%	0,65
186	3,58	42,9%	21,9%	0,59
187	3,58	42,6%	21,9%	0,60
188	3,58	43,9%	21,9%	0,56
189	3,58	42,9%	21,9%	0,59
190	3,49	41,4%	21,6%	0,65
191	3,49	42,5%	21,6%	0,62
192	3,53	52,4%	21,9%	0,36
193	3,53	49,5%	21,9%	0,42
194	3,53	48,9%	21,9%	0,43
195	3,53	49,2%	21,9%	0,43
196	3,53	48,9%	21,9%	0,43
197	3,53	49,4%	21,9%	0,42
198	3,53	48,2%	21,9%	0,45
199	3,58	42,0%	21,9%	0,61
200	3,58	41,6%	21,9%	0,63
201	3,58	42,2%	21,9%	0,61
202	3,58	43,0%	21,9%	0,58
203	3,70	45,1%	21,6%	0,51
204	3,69	44,1%	21,6%	0,54
205	3,70	43,8%	21,6%	0,54
206	3,70	44,4%	21,6%	0,53
207	3,70	46,1%	21,6%	0,48
208	3,70	46,7%	21,6%	0,47
209	3,69	43,6%	21,6%	0,55
210	3,70	45,2%	21,6%	0,51

211	3,70	44,0%	21,6%	0,54
212	3,53	49,3%	21,9%	0,42
213	3,52	46,6%	21,9%	0,49
214	3,52	47,1%	21,9%	0,48
215	3,52	47,6%	21,9%	0,47
216	3,61	47,3%	21,7%	0,46
217	3,59	49,5%	21,7%	0,41
218	3,60	47,7%	21,7%	0,46
219	3,61	47,5%	21,7%	0,46
220	3,50	47,1%	21,8%	0,48
221	3,54	46,9%	21,9%	0,48
222	3,54	46,6%	21,9%	0,49
223	3,54	45,9%	21,9%	0,51
224	3,55	46,7%	21,9%	0,49
225	3,54	46,3%	21,9%	0,50
226	3,54	46,7%	21,9%	0,49
227	3,54	45,4%	21,9%	0,52
228	3,54	48,1%	21,9%	0,45
229	3,55	43,2%	21,8%	0,58
230	3,55	47,2%	21,8%	0,47
231	3,55	46,4%	21,8%	0,49
232	3,55	49,3%	21,9%	0,42
233	3,58	46,3%	21,9%	0,49
234	3,55	48,5%	22,0%	0,44
235	3,58	45,4%	21,9%	0,51
236	3,58	44,7%	21,9%	0,53
237	3,54	45,4%	21,9%	0,52
238	3,54	46,7%	21,9%	0,49
239	3,54	46,7%	21,9%	0,49
240	3,54	46,0%	21,9%	0,50
241	3,54	47,3%	21,9%	0,47
242	3,58	45,2%	21,9%	0,52
243	3,58	45,0%	21,9%	0,53
244	3,58	45,2%	21,9%	0,52
245	3,58	43,7%	21,9%	0,56
246	3,58	44,7%	21,9%	0,53
247	3,53	44,2%	21,5%	0,56
248	3,58	46,4%	21,9%	0,49
249	3,59	47,0%	21,9%	0,47
250	3,53	42,5%	21,5%	0,61
251	3,53	42,0%	21,5%	0,63
252	3,58	46,7%	21,9%	0,48
253	3,53	41,9%	21,5%	0,63
254	3,58	45,2%	21,9%	0,52
255	3,53	41,4%	21,5%	0,65
256	3,53	42,1%	21,5%	0,62

257	3,53	42,0%	21,5%	0,63
258	3,58	44,4%	21,9%	0,54
259	3,53	42,3%	21,5%	0,62
260	3,53	43,7%	21,5%	0,57
261	3,53	42,4%	21,5%	0,61
262	3,65	44,5%	21,5%	0,53
263	3,64	47,1%	21,5%	0,47
264	3,64	45,8%	21,5%	0,50
265	3,65	46,5%	21,5%	0,48
266	4,04	52,4%	20,6%	0,32
267	3,58	43,5%	21,8%	0,57
268	3,58	44,1%	21,8%	0,55
269	3,58	45,1%	21,8%	0,52
270	3,58	45,1%	21,8%	0,52
271	3,58	44,3%	21,8%	0,55
272	3,58	45,7%	21,8%	0,51
273	3,59	44,7%	21,8%	0,53
274	3,58	45,0%	21,8%	0,53
275	3,60	46,0%	21,7%	0,50
276	3,60	44,2%	21,7%	0,55
277	3,60	45,3%	21,7%	0,52
278	3,60	44,9%	21,7%	0,53
279	3,60	44,9%	21,7%	0,53
280	3,60	44,6%	21,7%	0,54
281	3,60	44,6%	21,7%	0,54
282	3,60	43,9%	21,7%	0,56
283	3,61	44,0%	21,7%	0,55
284	3,67	40,8%	21,6%	0,64
285	3,68	39,5%	21,6%	0,68
286	3,54	44,4%	21,9%	0,55
287	3,54	44,4%	21,9%	0,55
288	3,54	44,0%	21,9%	0,56
289	3,54	44,3%	21,9%	0,55
290	3,54	43,4%	21,8%	0,58
291	3,54	44,9%	21,9%	0,54
292	3,54	45,1%	21,9%	0,53
293	3,54	46,1%	21,9%	0,50
294	3,54	47,2%	21,9%	0,47
295	3,54	46,1%	21,9%	0,50
296	3,60	48,5%	21,9%	0,43
297	3,58	43,8%	21,9%	0,56
298	3,60	43,1%	21,9%	0,58
299	3,60	43,9%	21,9%	0,55
300	3,60	42,7%	21,9%	0,59
301	3,60	42,6%	21,9%	0,59

302	3,59	42,7%	21,9%	0,59
303	3,60	45,5%	21,9%	0,51
304	3,58	41,1%	21,8%	0,65
305	3,58	42,4%	21,8%	0,60
306	3,58	43,4%	21,8%	0,57
307	3,58	41,9%	21,8%	0,62
308	3,68	39,1%	21,6%	0,70
309	3,68	40,2%	21,6%	0,66
310	3,45	44,3%	21,8%	0,57
311	3,44	46,5%	21,8%	0,51
312	3,60	43,1%	21,9%	0,58
313	3,60	44,7%	21,9%	0,53
314	3,60	44,7%	21,9%	0,53
315	3,60	43,3%	21,9%	0,57
316	3,60	44,0%	21,9%	0,55
317	3,59	45,5%	21,9%	0,51
318	3,58	43,6%	21,8%	0,57
319	3,58	42,8%	21,8%	0,59
320	3,58	42,2%	21,8%	0,61
321	3,58	41,2%	21,8%	0,64
322	3,58	43,9%	21,8%	0,56
323	3,58	44,1%	21,8%	0,55
324	3,58	43,3%	21,8%	0,58
325	3,58	44,3%	21,8%	0,55
326	3,58	43,4%	21,8%	0,57
327	3,58	41,8%	21,8%	0,62
328	3,54	42,2%	21,9%	0,62
329	3,54	43,3%	21,9%	0,58
330	3,54	44,3%	21,9%	0,55
331	3,54	44,2%	21,9%	0,56
332	3,54	43,7%	21,9%	0,57
333	3,54	43,6%	21,9%	0,57
334	3,60	44,1%	21,7%	0,55
335	3,60	44,3%	21,7%	0,54
336	3,60	44,5%	21,7%	0,54
337	3,60	44,1%	21,7%	0,55
338	3,60	44,2%	21,7%	0,55
339	3,60	44,6%	21,7%	0,54
340	3,60	45,7%	21,7%	0,51
341	3,60	44,8%	21,7%	0,53
342	3,60	44,4%	21,7%	0,54
343	3,65	45,2%	21,5%	0,51
344	3,65	43,8%	21,5%	0,55
345	3,64	46,2%	21,5%	0,49
346	3,65	44,3%	21,5%	0,54
347	3,59	43,8%	21,7%	0,56

348	3,59	43,9%	21,8%	0,56
349	3,59	45,6%	21,8%	0,51
350	3,59	42,7%	21,7%	0,59
351	3,59	44,1%	21,8%	0,55
352	3,42	47,1%	21,9%	0,49
353	3,42	44,5%	21,9%	0,57
354	3,42	45,5%	21,9%	0,54
355	3,42	45,3%	21,9%	0,54
356	3,42	45,5%	21,9%	0,54
357	3,42	45,6%	21,9%	0,53
358	3,54	45,7%	21,9%	0,51
359	3,54	46,4%	21,9%	0,49
360	3,54	45,0%	21,9%	0,53
361	3,54	44,7%	21,9%	0,54
362	3,54	45,6%	21,9%	0,52
363	3,54	45,4%	21,9%	0,52
364	3,54	44,8%	21,9%	0,54
365	3,54	47,0%	21,9%	0,48
366	3,54	45,7%	21,9%	0,51
367	3,54	45,3%	21,9%	0,52
368	3,54	45,2%	21,9%	0,53
369	3,54	46,4%	21,9%	0,49
370	3,54	46,2%	21,9%	0,50
371	3,58	45,1%	21,9%	0,52
372	3,58	39,9%	21,9%	0,68
373	3,58	40,3%	21,9%	0,67
374	3,58	41,7%	21,9%	0,63
375	3,58	43,1%	21,9%	0,58
376	3,60	44,4%	21,7%	0,54
377	3,60	44,2%	21,7%	0,55
378	3,60	44,1%	21,7%	0,55
379	3,60	45,1%	21,7%	0,52
380	3,58	39,8%	21,8%	0,69
381	3,58	43,1%	21,8%	0,58
382	3,58	42,7%	21,8%	0,59
383	3,58	44,2%	21,8%	0,55
384	3,58	42,4%	21,8%	0,60
385	3,58	43,6%	21,8%	0,57
386	3,58	43,5%	21,8%	0,57
387	3,58	43,1%	21,8%	0,58
388	3,58	43,2%	21,8%	0,58
389	3,51	38,6%	21,9%	0,75
390	3,51	48,9%	21,9%	0,44
391	3,51	49,6%	21,9%	0,42

Tabela 31 – Distância entre partículas grossas considerando o conjunto de materiais do dia M1D0

Concreto	Área superficial volumétrica (m^2/cm^3)	Volume de sólidos	Porosidade do empacotamento	MPT (µm)
1	0,007	66,7%	16,9%	82,84
2	0,007	66,6%	16,9%	83,04
3	0,007	66,8%	16,9%	82,09
4	0,007	66,0%	16,9%	86,84
5	0,007	65,8%	16,9%	88,49
6	0,008	65,1%	17,0%	85,01
7	0,008	64,9%	17,0%	86,62
8	0,008	65,2%	17,0%	84,37
9	0,008	65,1%	17,0%	85,00
10	0,008	64,8%	17,0%	86,84
11	0,007	59,5%	18,1%	125,31
12	0,007	59,1%	18,1%	127,79
13	0,007	66,2%	17,0%	87,18
14	0,007	66,8%	17,0%	83,16
15	0,007	68,1%	17,0%	75,19
16	0,008	65,5%	17,1%	81,72
17	0,008	65,3%	17,1%	82,68
18	0,008	65,7%	17,1%	80,13
19	0,008	66,1%	17,1%	78,05
20	0,008	65,9%	17,1%	78,84
21	0,008	66,0%	17,1%	78,48
22	0,008	66,2%	17,1%	77,64
23	0,008	65,9%	17,1%	79,06
24	0,008	65,4%	17,1%	81,92
25	0,008	65,9%	17,1%	79,08
26	0,008	65,4%	17,1%	82,36
27	0,008	64,7%	17,1%	85,21
28	0,008	65,2%	17,1%	81,94
29	0,007	68,7%	16,9%	69,05
30	0,007	68,5%	16,9%	70,47
31	0,007	68,7%	16,9%	69,02
32	0,007	68,2%	16,9%	71,77
33	0,008	61,6%	18,3%	106,13
34	0,008	62,0%	18,3%	102,75
35	0,007	59,3%	18,1%	126,84
36	0,007	59,7%	18,1%	123,40
37	0,007	59,5%	18,1%	125,27
38	0,007	59,6%	18,1%	124,42
39	0,007	65,8%	16,9%	87,34
40	0,007	65,8%	16,9%	87,55
41	0,007	65,6%	16,9%	88,52
42	0,007	65,7%	16,9%	88,27

43	0,007	65,8%	16,9%	87,46
44	0,007	65,7%	16,9%	88,12
45	0,007	66,0%	16,9%	86,07
46	0,007	68,0%	17,1%	78,98
47	0,007	66,7%	17,1%	87,62
48	0,007	67,3%	17,1%	83,61
49	0,007	67,3%	17,1%	83,28
50	0,007	67,5%	17,1%	82,51
51	0,007	67,1%	17,1%	84,54
52	0,007	67,1%	17,1%	85,09
53	0,007	66,9%	17,1%	86,36
54	0,007	67,5%	17,1%	82,18
55	0,009	65,4%	18,6%	67,10
56	0,009	65,6%	18,6%	65,90
57	0,009	65,4%	18,6%	66,81
58	0,009	65,2%	18,6%	67,96
59	0,008	62,1%	17,1%	101,24
60	0,008	62,9%	17,1%	95,99
61	0,008	62,5%	17,1%	98,47
62	0,007	66,8%	16,9%	81,53
63	0,007	67,6%	16,9%	76,64
64	0,007	67,1%	16,9%	79,86
65	0,007	67,1%	16,9%	79,50
66	0,007	67,1%	16,9%	79,92
67	0,007	67,5%	16,9%	77,34
68	0,007	66,9%	16,9%	80,64
69	0,007	67,3%	16,9%	78,48
70	0,006	58,0%	18,6%	154,86
71	0,007	70,4%	16,9%	57,89
72	0,007	69,1%	16,9%	66,98
73	0,007	68,8%	16,9%	68,80
74	0,007	69,2%	16,9%	66,23
75	0,007	68,9%	16,9%	67,75
76	0,007	67,9%	16,9%	74,11
77	0,007	69,1%	16,9%	66,87
78	0,007	69,3%	16,9%	65,84
79	0,007	68,4%	16,9%	70,76
80	0,007	68,9%	16,9%	67,72
81	0,007	68,4%	16,9%	71,17
82	0,007	68,6%	16,9%	69,85
83	0,007	68,5%	16,9%	70,32
84	0,007	67,3%	17,0%	80,39
85	0,007	66,7%	17,0%	84,20
86	0,007	67,2%	17,0%	81,03
87	0,007	67,1%	17,0%	81,62
88	0,007	66,9%	17,0%	82,52

89	0,007	67,3%	17,0%	80,30
90	0,007	67,1%	17,0%	81,66
91	0,007	66,8%	17,0%	83,49
92	0,007	67,8%	17,0%	76,80
93	0,007	66,7%	17,0%	83,90
94	0,007	67,2%	17,0%	80,48
95	0,007	67,0%	17,0%	82,11
96	0,009	61,8%	18,3%	92,56
97	0,008	64,7%	18,2%	76,28
98	0,007	65,7%	16,9%	88,09
99	0,007	66,0%	16,9%	86,17
100	0,007	65,9%	16,9%	86,48
101	0,007	66,3%	16,9%	84,31
102	0,007	65,5%	16,9%	89,25
103	0,007	66,2%	16,9%	85,10
104	0,008	64,4%	17,2%	83,95
105	0,008	63,9%	17,2%	86,94
106	0,008	63,4%	17,2%	90,05
107	0,008	63,8%	17,2%	87,84
108	0,008	63,9%	17,2%	87,03
109	0,008	63,9%	17,2%	87,30
110	0,008	63,6%	17,2%	88,88
111	0,008	64,0%	17,2%	86,51
112	0,008	64,1%	17,2%	86,17
113	0,008	64,0%	17,2%	86,19
114	0,008	63,5%	17,2%	89,24
115	0,006	58,8%	18,6%	147,71
116	0,006	58,7%	18,6%	148,06
117	0,006	58,3%	18,6%	152,01
118	0,006	58,3%	18,6%	152,25
119	0,006	57,9%	18,6%	155,75
120	0,006	58,3%	18,6%	151,84
121	0,006	57,7%	18,6%	157,55
122	0,008	64,8%	18,2%	75,68
123	0,007	69,2%	16,9%	67,12
124	0,007	69,0%	16,9%	68,11
125	0,007	68,7%	16,9%	70,08
126	0,007	68,8%	16,9%	69,35
127	0,007	69,0%	16,9%	68,45
128	0,007	68,7%	16,9%	69,84
129	0,007	68,9%	16,9%	68,74
130	0,008	64,6%	17,1%	85,22
131	0,008	64,0%	17,1%	88,97
132	0,008	64,1%	17,1%	88,63
133	0,008	64,8%	17,2%	81,83
134	0,008	63,6%	17,1%	91,81

135	0,008	65,1%	17,2%	79,99
136	0,008	65,5%	17,2%	77,63
137	0,008	65,9%	17,2%	75,48
138	0,008	73,7%	17,1%	37,95
139	0,007	69,1%	16,9%	66,22
140	0,007	68,7%	16,9%	68,61
141	0,007	68,9%	16,9%	67,82
142	0,007	69,0%	16,9%	66,81
143	0,007	68,9%	16,9%	67,25
144	0,007	71,0%	16,9%	56,29
145	0,007	70,4%	16,9%	59,70
146	0,007	68,7%	17,0%	71,71
147	0,007	69,9%	16,9%	62,53
148	0,007	69,4%	16,9%	65,29
149	0,007	67,9%	17,0%	76,51
150	0,007	68,5%	17,0%	72,47
151	0,007	68,2%	17,0%	74,79
152	0,007	70,6%	16,9%	58,25
153	0,007	68,1%	17,0%	75,02
154	0,007	68,7%	17,0%	71,48
155	0,008	66,7%	18,2%	65,49
156	0,007	70,1%	16,9%	61,28
157	0,007	70,6%	16,9%	58,15
158	0,007	70,7%	16,9%	57,89
159	0,008	67,6%	17,2%	66,18
160	0,008	66,6%	17,2%	71,81
161	0,007	71,4%	16,9%	53,94
162	0,008	66,2%	17,2%	73,89
163	0,008	66,1%	17,2%	74,19
164	0,008	65,6%	17,2%	76,91
165	0,006	59,1%	18,6%	145,05
166	0,008	67,1%	17,2%	68,71
167	0,008	67,3%	17,2%	67,77
168	0,006	59,3%	18,6%	143,00
169	0,008	66,9%	17,2%	69,79
170	0,008	65,8%	18,3%	78,36
171	0,007	65,6%	16,9%	88,83
172	0,007	66,0%	16,9%	85,78
173	0,007	65,9%	16,9%	86,67
174	0,007	65,4%	16,9%	89,95
175	0,007	66,0%	16,9%	86,00
176	0,007	65,7%	16,9%	88,08
177	0,007	66,0%	16,9%	86,03
178	0,007	66,3%	16,9%	84,29
179	0,007	66,5%	16,9%	83,01
180	0,007	66,3%	16,9%	84,39

181	0,007	65,9%	16,9%	86,86
182	0,008	67,6%	18,2%	62,90
183	0,008	67,8%	18,2%	61,93
184	0,008	67,8%	18,2%	61,89
185	0,008	67,3%	18,2%	64,36
186	0,006	58,3%	18,6%	152,41
187	0,006	58,2%	18,6%	152,61
188	0,006	58,8%	18,6%	147,68
189	0,006	58,1%	18,6%	153,61
190	0,008	65,4%	18,2%	77,09
191	0,008	65,9%	18,2%	74,18
192	0,007	68,1%	17,0%	73,61
193	0,007	66,9%	17,0%	80,80
194	0,007	67,1%	17,0%	80,11
195	0,007	66,9%	17,0%	80,90
196	0,007	66,6%	17,0%	83,06
197	0,007	67,3%	17,0%	78,70
198	0,007	66,5%	17,0%	83,35
199	0,006	57,8%	18,6%	156,96
200	0,006	57,5%	18,6%	159,38
201	0,006	57,9%	18,6%	155,71
202	0,006	58,3%	18,6%	152,36
203	0,008	64,8%	18,4%	75,06
204	0,008	64,1%	18,4%	79,44
205	0,008	64,0%	18,4%	79,85
206	0,008	64,4%	18,4%	77,62
207	0,008	65,1%	18,4%	73,62
208	0,008	65,6%	18,4%	70,78
209	0,008	63,6%	18,4%	81,86
210	0,008	64,7%	18,4%	75,95
211	0,008	64,3%	18,4%	78,05
212	0,007	66,9%	16,9%	81,38
213	0,007	65,4%	16,9%	90,87
214	0,007	65,8%	16,9%	88,40
215	0,007	66,0%	16,9%	86,78
216	0,008	68,2%	17,4%	60,69
217	0,008	68,4%	17,4%	59,82
218	0,008	68,2%	17,4%	60,61
219	0,008	68,2%	17,4%	60,38
220	0,009	60,1%	18,4%	99,42
221	0,007	66,7%	16,9%	81,77
222	0,007	66,4%	16,9%	83,32
223	0,007	66,4%	16,9%	83,73
224	0,007	66,9%	16,9%	80,43
225	0,007	66,1%	16,9%	85,23
226	0,007	66,8%	16,9%	80,96

227	0,007	65,8%	16,9%	87,13
228	0,007	67,2%	16,9%	78,49
229	0,007	66,2%	17,0%	87,39
230	0,007	68,0%	17,0%	75,96
231	0,007	67,9%	17,0%	76,48
232	0,007	68,7%	17,0%	71,82
233	0,006	60,0%	18,6%	136,73
234	0,006	58,8%	18,6%	147,14
235	0,006	59,8%	18,6%	139,07
236	0,006	59,3%	18,6%	142,80
237	0,007	66,0%	16,9%	86,30
238	0,007	66,6%	16,9%	82,33
239	0,007	66,6%	16,9%	82,19
240	0,007	66,5%	16,9%	82,90
241	0,007	66,7%	16,9%	81,60
242	0,006	59,5%	18,6%	141,74
243	0,006	59,5%	18,6%	141,19
244	0,006	59,5%	18,6%	141,53
245	0,006	58,7%	18,6%	148,16
246	0,006	59,3%	18,6%	143,00
247	0,008	68,7%	18,2%	57,10
248	0,006	60,0%	18,6%	136,94
249	0,006	60,7%	18,6%	130,87
250	0,008	68,2%	18,2%	59,41
251	0,008	68,0%	18,2%	60,55
252	0,006	60,3%	18,6%	134,49
253	0,008	67,7%	18,2%	62,40
254	0,006	59,5%	18,6%	141,64
255	0,008	67,5%	18,2%	63,28
256	0,008	68,0%	18,2%	60,38
257	0,008	67,6%	18,2%	62,63
258	0,006	59,1%	18,6%	144,61
259	0,008	67,9%	18,2%	61,15
260	0,008	69,0%	18,2%	55,49
261	0,008	68,3%	18,2%	59,20
262	0,010	64,8%	19,2%	62,08
263	0,010	65,9%	19,2%	56,76
264	0,010	65,4%	19,2%	59,43
265	0,010	65,8%	19,2%	57,11
266	0,010	80,5%	19,2%	0,89
267	0,008	64,4%	17,2%	83,96
268	0,008	65,0%	17,2%	80,88
269	0,008	65,3%	17,2%	79,04
270	0,008	65,3%	17,2%	79,08
271	0,008	64,8%	17,2%	81,48
272	0,008	65,6%	17,2%	77,13

273	0,008	65,5%	17,2%	77,79
274	0,008	65,3%	17,2%	78,84
275	0,008	69,2%	17,0%	63,35
276	0,008	68,1%	17,0%	69,48
277	0,008	68,6%	17,0%	66,72
278	0,008	68,4%	17,0%	67,92
279	0,008	68,5%	17,0%	67,53
280	0,008	68,4%	17,0%	68,19
281	0,008	68,6%	17,0%	66,88
282	0,008	68,1%	17,0%	69,56
283	0,008	68,5%	17,0%	67,52
284	0,008	69,1%	17,1%	60,73
285	0,008	68,9%	17,1%	61,84
286	0,007	59,6%	18,1%	123,91
287	0,007	59,7%	18,1%	123,60
288	0,007	59,5%	18,1%	125,05
289	0,007	59,7%	18,1%	123,15
290	0,007	59,4%	18,1%	125,42
291	0,007	59,8%	18,1%	122,77
292	0,007	65,7%	16,9%	87,85
293	0,007	66,5%	16,9%	82,84
294	0,007	66,8%	16,9%	81,08
295	0,007	66,3%	16,9%	84,46
296	0,007	60,8%	18,5%	126,36
297	0,007	57,5%	18,5%	155,28
298	0,007	58,2%	18,5%	148,70
299	0,007	58,6%	18,5%	145,32
300	0,007	57,9%	18,5%	151,96
301	0,007	58,0%	18,5%	151,08
302	0,007	57,7%	18,5%	153,54
303	0,007	59,3%	18,5%	139,74
304	0,008	63,3%	17,2%	90,90
305	0,008	64,0%	17,2%	86,62
306	0,008	64,4%	17,2%	84,37
307	0,008	64,0%	17,2%	86,36
308	0,008	68,6%	17,1%	63,08
309	0,008	69,1%	17,1%	60,54
310	0,008	63,7%	18,2%	87,83
311	0,008	62,8%	18,2%	93,73
312	0,007	58,3%	18,5%	148,48
313	0,007	58,9%	18,5%	142,93
314	0,007	58,9%	18,5%	142,69
315	0,007	58,1%	18,5%	149,73
316	0,007	58,5%	18,5%	145,95
317	0,007	59,2%	18,5%	139,92
318	0,008	64,7%	17,2%	82,42

319	0,008	64,4%	17,2%	84,25
320	0,008	63,9%	17,2%	87,23
321	0,008	63,2%	17,2%	91,39
322	0,008	64,6%	17,2%	82,79
323	0,008	65,0%	17,2%	80,60
324	0,008	64,6%	17,2%	83,08
325	0,008	64,9%	17,2%	81,36
326	0,008	64,5%	17,2%	83,37
327	0,008	63,7%	17,2%	88,16
328	0,007	58,5%	18,1%	133,10
329	0,007	59,1%	18,1%	127,80
330	0,007	59,5%	18,1%	124,57
331	0,007	59,6%	18,1%	124,50
332	0,007	59,4%	18,1%	125,66
333	0,007	59,5%	18,1%	125,22
334	0,008	68,2%	17,0%	69,24
335	0,008	68,3%	17,0%	68,61
336	0,008	68,4%	17,0%	67,87
337	0,008	68,2%	17,0%	69,10
338	0,008	68,1%	17,0%	69,53
339	0,008	68,4%	17,0%	68,14
340	0,008	68,9%	17,0%	65,04
341	0,008	68,5%	17,0%	67,33
342	0,008	68,5%	17,0%	67,52
343	0,010	65,2%	19,2%	60,28
344	0,010	64,5%	19,2%	63,59
345	0,010	65,5%	19,2%	58,53
346	0,010	64,7%	19,2%	62,48
347	0,008	66,6%	17,1%	74,85
348	0,008	66,6%	17,1%	75,12
349	0,008	67,3%	17,1%	70,91
350	0,008	66,1%	17,1%	77,91
351	0,008	66,3%	17,1%	76,92
352	0,008	64,9%	17,3%	83,86
353	0,008	63,7%	17,3%	91,15
354	0,008	64,0%	17,3%	89,34
355	0,008	64,1%	17,3%	88,81
356	0,008	64,0%	17,3%	89,29
357	0,008	64,3%	17,3%	87,43
358	0,007	66,0%	16,9%	86,05
359	0,007	66,5%	16,9%	82,78
360	0,007	60,2%	18,1%	119,69
361	0,007	59,7%	18,1%	123,45
362	0,007	60,4%	18,1%	118,35
363	0,007	66,0%	16,9%	86,22
364	0,007	65,7%	16,9%	87,80

365	0,007	66,8%	16,9%	80,86
366	0,007	66,3%	16,9%	84,15
367	0,007	66,0%	16,9%	86,22
368	0,007	65,6%	16,9%	88,43
369	0,007	66,6%	16,9%	81,97
370	0,007	66,5%	16,9%	82,87
371	0,006	59,5%	18,6%	140,97
372	0,006	56,7%	18,6%	167,09
373	0,006	56,9%	18,6%	165,35
374	0,006	57,4%	18,6%	160,41
375	0,006	58,4%	18,6%	151,47
376	0,008	68,3%	17,0%	68,64
377	0,008	68,1%	17,0%	69,60
378	0,008	68,0%	17,0%	70,32
379	0,008	68,8%	17,0%	65,73
380	0,008	62,6%	17,2%	94,86
381	0,008	64,4%	17,2%	84,00
382	0,008	64,2%	17,2%	85,14
383	0,008	64,9%	17,2%	81,14
384	0,008	64,2%	17,2%	85,31
385	0,008	64,4%	17,2%	84,27
386	0,008	64,4%	17,2%	83,81
387	0,008	64,3%	17,2%	84,80
388	0,008	64,2%	17,2%	85,16
389	0,007	60,2%	17,0%	128,86
390	0,007	65,5%	17,0%	90,96
391	0,007	66,0%	17,0%	87,80

Tabela 32 – Abatimento estimado e abatimento medido para os concretos dosados na central

	Abatimento estimado (mm)		
Concreto	**DiaMaisProx**	**M1D0**	**Abatimento medido (mm)**
6	152	152	170
7	164	164	165
8	142	142	160
9	154	154	175
10	169	169	160
11	261	261	240
12	288	288	220
13	157	157	110
14	126	126	120
15	56	56	110
16	173	173	160
17	155	155	180

18	133	133	180
19	139	139	180
20	140	140	175
21	128	128	180
22	145	145	175
23	161	161	180
24	138	138	175
25	167	167	182
26	118	106	170
27	202	202	180
28	167	167	175
29	78	78	110
30	94	94	120
31	79	79	110
32	104	104	120
33	167	167	130
34	158	158	135
35	274	274	230
36	251	251	230
37	259	259	220
38	253	253	220
39	129	129	120
40	128	128	130
41	139	139	140
42	142	142	133
43	129	129	120
44	128	128	140
45	124	124	130
46	65	65	120
47	121	121	110
48	101	101	110
49	89	89	110
50	84	84	120
51	100	100	120
52	98	98	110
53	115	115	115
54	83	83	100
59	220	220	230
60	171	171	210
61	189	189	210
62	142	142	100
63	98	98	120
64	118	118	120
65	119	119	120
66	131	131	120
67	109	109	120

68	130	130	100
69	120	120	110
70	396	396	240
71	84	84	120
72	63	63	110
73	78	78	120
74	64	64	120
75	69	69	120
76	126	126	110
77	70	70	110
78	65	65	115
79	93	93	120
80	74	74	110
81	105	105	100
82	94	94	110
83	87	87	100
84	93	93	100
85	126	126	110
86	92	92	100
87	104	104	110
88	114	114	120
89	93	93	100
90	104	104	110
91	126	126	120
92	63	63	110
93	125	125	90
94	99	99	110
95	102	102	110
96	175	175	180
97	169	169	150
98	132	132	135
99	124	124	130
100	123	123	130
101	107	107	120
102	146	146	140
103	107	107	140
104	159	169	210
105	185	196	220
106	171	181	210
107	158	169	210
108	164	175	210
109	182	193	225
110	165	176	215
111	154	164	200
112	154	164	200
113	182	193	240

114	142	127	240
115	308	324	220
116	312	328	210
117	345	362	230
118	344	361	230
119	379	398	230
120	346	363	220
121	396	415	220
122	149	158	150
123	62	70	110
124	66	74	100
125	88	96	110
126	82	90	100
127	77	85	115
128	82	89	110
129	77	85	110
130	96	84	220
131	124	111	210
132	118	105	200
133	129	116	210
134	145	131	250
135	109	96	200
136	88	76	200
137	70	58	200
139	96	83	110
140	105	91	110
141	106	93	120
142	94	81	100
143	101	88	120
146	39	29	105
147	42	31	120
148	60	48	120
149	71	60	120
150	49	38	110
151	59	48	110
153	69	58	120
154	40	30	100
155	85	71	140
159	53	42	220
160	71	60	210
162	77	65	210
163	88	76	230
164	36	26	
165	330	302	250
167	28	18	180
168	314	287	240

169	40	30	200
171	147	133	140
172	133	119	140
173	143	129	130
174	173	157	130
175	138	124	130
176	147	133	140
177	124	111	120
178	120	107	140
179	109	96	140
180	108	95	120
181	142	128	130
182	118	102	110
183	119	103	100
184	113	97	110
185	134	117	120
186	399	368	220
187	410	379	230
188	355	326	220
189	404	373	230
190	183	164	120
191	153	135	120
199	445	412	250
200	467	434	230
201	434	402	240
202	397	367	220
221	94	82	130
222	104	92	130
223	116	103	125
224	95	82	135
225	114	101	130
226	95	83	140
227	135	121	135
228	69	57	140
229	176	160	110
230	75	63	110
231	87	75	115
232	36	26	110
233	163	230	240
234	142	208	220
235	187	259	230
236	211	288	230
237	79	118	140
238	52	87	130
239	52	87	140
240	62	99	135

241	43	76	140
242	198	272	230
243	202	277	230
244	197	272	240
245	249	333	220
246	212	289	240
247	17	53	120
248	162	229	230
249	136	199	220
250	42	82	120
251	51	93	110
252	151	217	220
253	58	102	120
254	197	272	230
255	67	112	100
256	50	92	100
257	58	101	120
258	223	302	230
259	49	91	120
260	18	54	100
261	43	84	110
266	159	159	140
267	102	141	210
268	84	120	190
269	66	100	200
270	66	100	230
271	84	120	210
272	53	86	200
273	67	101	220
274	66	101	210
275	16	43	130
276	52	84	140
277	32	61	140
278	39	69	130
279	39	69	125
280	44	75	125
281	41	71	130
282	57	89	140
283	50	81	130
284	71	101	140
285	91	124	130
286	177	246	220
287	177	246	230
288	189	260	250
289	178	247	220
290	201	275	210

291	165	233	200
292	87	127	140
293	61	97	140
294	43	76	130
295	65	102	120
296	101	156	230
297	264	350	225
298	263	348	240
299	235	315	220
300	282	371	250
301	283	372	220
302	289	379	240
303	187	258	230
304	164	211	230
305	127	170	200
306	105	144	195
307	135	178	210
308	101	135	135
309	78	109	130
310	96	150	160
311	78	130	155
312	335	348	240
313	275	287	220
314	275	287	250
315	334	347	240
316	303	316	230
317	247	258	225
318	148	134	230
319	169	153	200
320	192	176	200
321	229	211	230
322	145	130	220
323	134	121	215
324	156	142	230
325	133	119	220
326	156	141	230
327	203	186	230
328	330	333	220
329	283	286	230
330	249	252	220
331	251	254	235
332	267	270	240
333	267	271	220
334	95	85	130
335	90	80	130
336	85	75	120

337	96	85	135
338	95	84	120
339	85	75	120
340	60	51	120
341	80	70	120
342	86	76	135
347	119	106	180
348	80	69	190
349	147	133	180
350	121	109	160
351	133	143	210
352	116	95	120
353	188	161	130
354	160	136	125
355	162	138	130
356	162	137	140
357	154	129	120
358	127	113	120
359	105	92	120
360	218	221	210
361	236	239	190
362	201	204	230
363	132	118	130
364	148	133	120
365	90	78	120
366	120	107	130
367	134	120	120
368	142	127	110
369	103	90	110
370	109	96	120
371	264	274	230
372	508	524	220
373	486	502	230
374	423	437	230
375	348	360	230
376	90	79	120
377	95	84	130
378	99	88	140
379	70	61	110
380	273	252	220
381	162	147	210
382	174	158	210
383	134	121	200
384	180	165	200
385	156	141	200
386	155	141	200

387	166	151	210
388	166	151	200