MARIANA LOBO MARCHIONI

**Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco
utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação
intertravada**

SÃO PAULO, 2012

MARIANA LOBO MARCHIONI

**Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco
utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação
intertravada**

**Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia de
Construção Civil da EPUSP.**

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

SÃO PAULO, 2012

MARIANA LOBO MARCHIONI

**Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco
utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação
intertravada**

**Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia de
Construção Civil da EPUSP.**

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

SÃO PAULO, 2012

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

São Paulo, de novembro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Marchioni, Mariana Lobo

**Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco para peças de concreto para pavimentação intertravada / M.L. Marchioni. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
111p.**

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

1.Concreto 2.Pavimentação de concreto 3.Blocos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Rafael Giuliano Pileggi pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

À todos da Associação Brasileira de Cimento Portland, em especial ao Cláudio Oliveira pelo incentivo e total apoio na realização deste trabalho, sem o qual este não existiria, ao Valter Frigieri que permitiu a dedicação necessária para esta realização, ao perfeccionismo da Erika Mota ao auxiliar nos últimos detalhes do texto e toda a equipe do laboratório da Associação.

Também agradeço a Bloco Renger e seu diretor industrial Valter Ferigato (*in memoriam*) pelo apoio e fornecimento de informações e materiais essenciais para realização deste trabalho.

Agradeço o auxílio dos colegas e funcionários do laboratório de Microestrutura do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica – USP e do professor Murilo Daniel de Mello Innocentini e sua equipe na UNAERP.

Agradeço ainda a minha família, meu pai Osmar Marchioni pela escolha da engenharia civil e da minha mãe Dirce Marchioni pelo incentivo na busca da excelência acadêmica.

Por fim agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

O concreto seco, também chamado de concreto sem abatimento (*no-slump*) é utilizado na produção de artefatos de cimento, como por exemplo em peças de concreto para pavimentação, blocos para alvenaria e tubos de concreto e ainda como camada de subbase de pavimentos com a técnica de concreto compactado a rolo.

A técnica de conformar concretos com reduzido teor de umidade através de equipamentos que aplicam simultaneamente compressão e vibração é amplamente utilizada na produção de artefatos de concreto, como as peças de concreto para pavimentação intertravada. Para as peças de concreto o desafio é ainda maior, pois as especificações de resistência característica à compressão podem chegar a 50 MPa.

A principal característica do concreto seco é o baixo teor de água e elevada coesão, necessitando de energia de compactação e vibração para a eliminação de vazios e o concreto assumir a forma desejada. Esta técnica permite a desfôrma imediata, que garante elevada produtividade e consequente diminuição dos custos de produção. Já a compactação permite obter componentes de concreto com menor consumo de cimento se comparados ao concreto plástico.

Diferentemente de toda literatura e metodologias de dosagem encontradas para o concreto plástico, o concreto seco encontra barreiras técnicas para a aplicação de metodologias que otimizem sua dosagem, em formulações empíricas que não levam em conta de forma adequada as características dos agregados, características estas diretamente ligadas à compacidade das peças, que por sua vez tem grande influência nas características do produto final.

Além disto, há poucos estudos do comportamento reológico do concreto seco, que influenciam a fluidez e coesão da do concreto e que irão determinar a produtividade e qualidade da produção.

Dessa forma, neste trabalho é apresentado uma metodologia para caracterização do concreto seco nos estados fresco e endurecido que permite o desenvolvimento sistemático de formulações com maior facilidade de compactação e que também

resulte na melhoria do desempenho das peças e diminuindo a necessidade de testes em escala real.

O método se baseia em produzir em laboratório um corpo de prova que reproduz as condições de moldagem de uma vibroprensa, eliminando-se a variável da vibração e padronizando as condições de compressão. Nos corpos-de-prova são avaliadas características nos estados fresco e endurecido, além de aspectos do comportamento reológico do concreto, através de técnicas de reologia compressiva.

Para aferir a metodologia foram utilizadas amostras de referência produzidas em uma fábrica de peças de concreto. Com a metodologia proposta, foi possível atingir 90% da resistência mecânica das peças produzidas em uma vibroprensa de alta compactação. Sendo assim esta metodologia poderá ser utilizada em estudos de dosagem de concreto seco, portanto o trabalho desenvolvido é indicado na utilização de dosagens de concreto seco, obtendo-se maior ecoeficiência, a medida que otimiza o consumo de cimento da mistura e facilita o estudo de dosagem de materiais alternativos em substituição aos agregados convencionais.

Palavras chave: Concreto seco. Concreto sem abatimento. Peças de concreto. Pavimento Intertravado. Reologia compressiva.

ABSTRACT

The dry concrete, also known as earth moist concrete or no-slump concrete, is most used to manufacture precast concrete products, as paving blocks, masonry blocks and concrete tubes, and also in rolled compacted concrete pavement. Its most important property is the low water content, and it requires mechanical equipment for its compactation. Paving blocks are normally manufactured using vibrocompression equipment, which at the same time applies both compaction and vibration resulting in paving blocks with high durability and mechanical resistance. Even though this technique is highly used it still lacks studies on some important steps of the manufacturing process. The mix design techniques are mostly empirical and don't deeply consider the aggregate characteristics, that are connected with its compacity and, by that, the characteristics of the paving block. Also, there are only a few studies of the rheology characteristics of dry concrete, which relates with the manufacturing process and the easiness that the mix is compacted. So, the object of this study is to develop a dry concrete characterization methodology that allows the systematic development of mix designs that are easily compacted and also improves the performance of the paving blocks.

Key words: Dry concrete. No-slump concrete. Paving blocks. Interlocking concrete pavement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Artefatos de cimento produzidos utilizando-se concreto seco.....	20
Figura 2 - Pavimento utilizando pedras no estado natural (esquerda) e com pedras talhadas (direita) (Acervo ABCP).....	26
Figura 3 - Seção típica de um pavimento intertravado (Acervo ABCP).	27
Figura 4 - Pavimento intertravado (ABCP, 2005b).	28
Figura 5 – Fluxograma descritivo do processo produtivo de peças de concreto por vibrocompressão.	31
Figura 6 - Faixa de distribuição granulométrica proposta pela Columbia (1969).	37
Figura 7 - Distribuição granulométrica de referência de acordo com o tipo de bloco: (a) bloco de densidade normal. (b) bloco leve. (c) bloco de densidade mediana. (PFEIFFENBERGER, 1985).	38
Figura 8 - Ilustração do método de dosagem ABCP (FERREIRA, 1995).	39
Figura 9 - Diagrama de dosagem IPT adaptado para concreto seco (Tango, 1994).	41
Figura 10 - Distribuição granulométrica recomendada por DOWSON (1981).	42
Figura 11 – Empacotamento de partículas, aonde os vazios vão sendo preenchidos por partículas cada vez menores (OLIVEIRA <i>et al</i> , 2000).	43
Figura 12 – Concreto monodisperso, redução da quantidade de pasta devido à redução de espaços entre os agregados. Ocorre melhora da trabalhabilidade devido o excesso de pasta envolvendo os agregados (WONG, 2002).	44
Figura 13 – Morfologia dos agregados e efeito parede (OLIVEIRA <i>et al</i> , 2000).	46
Figura 14 - Empacotamento x resistência à compressão (HÜSKEN, 2008).	47
Figura 15 – Misturadores, acima da esquerda para a direita: do tipo planetário, horizontal de eixo helicoidal, e abaixo da esquerda para a direita de eixo vertical e de eixo inclinado (betoneira). (Acervo ABCP).	50
Figura 16 - Esquema do ciclo de produção em um equipamento de vibroprensagem. A – posicionamento da fôrma e avanço da gaveta B – alimentação C – gaveta retorna à posição original D – compactação E – subida da fôrma. (OLIVEIRA, 2004)	55
Figura 17 - Prática utilizada para avaliação empírica das características do concreto seco. Considera-se ideal a porção de concreto que após levemente pressionada manualmente apresente coesão entre as partículas sem deixar resíduos na mão. .	56
Figura 18 - Moldagem de corpos de prova de concreto semelhante aos CPs de argamassa (FRASSON, 2000).	57
Figura 19 - Equipamento para moldagem de corpos de prova (OLIVEIRA, 2004). ...	57
Figura 20 - Ensaio de <i>squeeze-flow</i> (Acervo ABCP).	58
Figura 21 - Esquema do reômetro compressivo (DELALONDE <i>et al</i> , 1995).	59
Figura 22 - Curvas de força x tempo em dispersões de celulose microcristalina utilizando o reômetro compressivo (DELADONDE <i>et al</i> , 1995).	59
Figura 23 - Pavimento intertravado com peças de concreto com variação na absorção de água.	61

Figura 24 - Arestas irregulares (Acervo ABCP).....	62
Figura 25 - Ensaio de determinação de resistência mecânica conforme ABNT NBR 9780 (1986).	63
Figura 26 - Peça de concreto com baixa resistência à abrasão.	64
Figura 27 - Esquema dos equipamentos de resistência à abrasão.	64
Figura 28 - Tipos de poros. A – poro fechado B – poro aberto C – poro interconectado D – poro permeável (SENTONE, 2001).	65
Figura 29- Relação entre resistência à compressão e absorção de água. Os resultados em destaque possuem absorção de água inferior à 6% e resistência mecânica superior a 35MPa, atendendo assim os dois requisitos de acordo com a CEN EN 1338 e ABNT NBR 9781, respectivamente (CE-18:600, 2011).....	67
Figura 30 - Esquema do método de Shönlin (Torrent, 2007).....	69
Figura 31 - Equipamento Autoclam (Torrent, 2007).	70
Figura 32 - Esquema do método de Torrent (Torrent, 2007).	71
Figura 33 - Esquema método (Torrent, 2007).	72
Figura 34 - Curvas teóricas para diferentes coeficientes de permeabilidade (Torrent, 2007).	72
Figura 35 - Detalhe do ensaio pela técnica de decaimento de vácuo (INNOCENTINI, 2007).	73
Figura 36 - Permeâmetro a ar <i>in situ</i> (SENTONE, 2011).....	74
Figura 37 - Esquema de funcionamento do aparelho de permeabilidade e detalhamento das dimensões da câmara de vácuo. Onde: A – Bomba de vácuo; B – Câmara de vácuo; C – Mostrador de pressão digital; D – Transdutor de pressão; E – Placa aquisitora de dados (data-logger); F – Válvula solenoide; G – Computador. (SENTONE, 2011).	75
Figura 38 – Processo produtivo vibroprensado para peças de concreto e sugestões para aperfeiçoar o processo.	78
Figura 39 - Placa de apoio perfurada para realização dos ensaios.	84
Figura 40 – Utilizando uma sonda rotativa foram extraídos corpos de prova com diâmetro de 5cm da amostra de peça de concreto coletada na fábrica de referência.	86
Figura 41 - Ferramentas desenvolvidas para compactar os corpos de prova de concreto seco. A – base de apoio para o molde. B – pistão para aplicação da carga. C – molde bi-partido D – suporte do molde E – peças posicionadas para o ensaio.	87
Figura 42 – Sistema posicionado para prensar a massa de concreto seco.....	88
Figura 43 – Funcionamento do extrator de corpos de prova. A – equipamento sem o molde. B – colocação do molde. C – molde fixo no equipamento.	88
Figura 44 – Molde bipartido sendo extraído do suporte.....	89
Figura 45 - Distribuição granulométrica retida discreta dos agregados utilizados na formulação da fábrica de referência.	90
Figura 46 - Mistura de agregados da formulação utilizada nas amostras de referência	91

Figura 47 – Corpos de prova após a prensagem. A – umidade de 7,0%; B – umidade de 7,5%; C – umidade de 8,0%.	93
Figura 48 - A desfôrma era inicialmente feita logo após a moldagem abrindo manualmente o molde bipartido (A) ocasionando fissuras ou mesmo rompendo os corpos de prova (B). Posteriormente a desfôrma passou a ser realizada após 24hs da moldagem com auxílio de um martelo de borracha (C).	94
Figura 49 – Curva força x deslocamento do pistão para testes de variação de massa	96
Figura 50 - Curva de força x deslocamento do pistão comparando T200 e T200FM.	96
Figura 51 - Densidade verde média.....	97
Figura 52 - Resistência mecânica x Densidade Seca	98
Figura 53 – A – corpo de prova extraído da peça de referência B – corpo de prova produzido após ensaio de reometria compressiva C – corpo de prova do T271 onde visualmente pode ser observada a variação de densidade devida a variação da pressão de prensagem aplicada no molde, conforme esquematizado.	99
Figura 54 – Força máxima x recuperação elástica	99
Figura 55 - Absorção de água	100
Figura 56 – Corpos de prova utilizados no ensaio de determinação de permeabilidade ao ar. A – corpo de prova selado; B – corpo de prova sem selar; C – massa utilizada para selar a superfície do corpo de prova para realização do ensaio.	101
Figura 57 - Decaimento de pressão por tempo para corpos de prova selados.	102
Figura 58 – Decaimento de pressão por tempo para corpos de prova não selados.	103
Figura 59 - Estabilização de pressão por massa nos corpos de prova não selados.	104
Figura 60 – Absorção de água por pressão de estabilização.	104

SUMÁRIO

1. Introdução	20
2. Objetivo.....	22
2.1. Estrutura da dissertação	22
3. Revisão bibliográfica	24
3.1. Concreto Seco.....	24
3.2. Pavimento intertravado com peças de concreto.....	25
3.3. Panorama atual de qualidade de peças de concreto disponíveis no mercado.....	28
3.4. Processo produtivo vibroprensado.....	30
3.4.1. Solicitação da produção	31
3.4.2. Definição e caracterização da matéria-prima.....	31
3.4.2.1. Cimento	31
3.4.2.2. Água	32
3.4.2.3. Agregados	32
3.4.2.4. Aditivos químicos	33
3.4.2.5. Adições minerais.....	34
3.4.3. Formulação	35
3.4.3.1. Método Columbia	36
3.4.3.2. Método Besser Company	37
3.4.3.3. Método ABCP	38
3.4.3.4. Método IPT/USP.....	39
3.4.3.5. Método Dowson.....	41
3.4.3.6. Métodos baseados em empacotamento de partículas	42
3.4.4. Controle e recebimento de matéria-prima.....	48
3.4.5. Proporcionamento.....	48
3.4.6. Mistura.....	49
3.4.7. Processo de vibroprensagem	50
3.4.7.1. Tipos de equipamento	53
3.4.7.2. Reometria compressiva.....	58
3.4.8. Cura	59

3.4.9. Controle de qualidade	60
3.4.9.1. Dimensões e tolerâncias	60
3.4.9.2. Avaliação visual	61
3.4.9.3. Resistência mecânica	62
3.4.9.4. Resistência à abrasão	63
3.4.9.5. Densidade	64
3.4.9.6. Porosidade	65
3.4.9.7. Absorção de água	66
3.4.9.8. Permeabilidade ao ar	68
3.4.10. Paletização e armazenagem	76
3.5. Aspectos críticos do processo de vibrocompressão	77
4. Plano de trabalho	80
5. Materiais e métodos	81
5.1. Materiais	81
5.2. Caracterização no estado fresco	81
5.2.1. Reometria compressiva	81
5.2.2. Densidade verde	81
5.2.3. Recuperação elástica	82
5.3. Caracterização no estado endurecido	82
5.3.1. Absorção de água, índice de vazios e massa específica	82
5.3.2. Resistência mecânica	83
5.3.3. Permeabilidade ao ar	83
5.3.3.1. Parâmetros de ensaio	84
5.3.3.2. Tratamento de dados	85
6. Resultados e discussões	86
6.1. Caracterização das peças da amostra de referência	86
6.2. Desenvolvimento do ensaio de reometria compressiva	87
6.2.1. Parâmetros de ensaio	89
6.2.2. Tratamento de dados	90
6.3. Caracterização dos materiais	90
6.4. Formulação	91
6.5. Mistura	91
6.6. Definição da umidade	92

6.7. Execução do ensaio de reometria compressiva	93
6.8. Resultados da caracterização no estado fresco	95
6.9. Resultados da caracterização no estado endurecido.....	97
7. Conclusões.....	105
8. Próximas etapas.....	106
9. Referências.....	107

1. Introdução

A conformação de componentes cimentícios através de vibrocompressão de concretos com reduzido teor de umidade, conhecido como concreto seco, é uma técnica tradicional e bastante difundida no mercado. Os blocos para alvenaria, peças de concreto para pavimentação, tubos de concreto, entre outros, são exemplos de artefatos produzidos dessa maneira (Figura 1).

Figura 1- Artefatos de cimento produzidos utilizando-se concreto seco.

O conceito básico dessa tecnologia está na produção de um concreto com teor de umidade bastante reduzido, com consistência quase seca e reduzida coesão, que é mecanicamente conformado em equipamentos de compactação denominados vibrocompressores. A utilização deste processo na produção de artefatos à base de cimento tem como principal motivação a alta produtividade associada com a eficácia na compactação.

A eficiência obtida na compactação através da vibroprensagem, quantificada pela capacidade de eliminação dos vazios da mistura, determina de maneira direta a coesão no estado fresco e as propriedades no estado endurecido do componente. Isto porque a minimização da porosidade do compacto está associada com o aumento na resistência mecânica e com a diminuição da permeabilidade do produto final, fatores fundamentais de desempenho e durabilidade.

A facilidade de compactação de um concreto seco está intimamente ligada às características físicas de sua formulação, relacionadas com a mobilidade de suas partículas em um volume confinado definido pela geometria do produto. Sob esse aspecto, fatores como a capacidade de escoamento do sistema para o interior da fôrma, ou o atrito entre as partículas são determinantes.

Contudo, as metodologias de dosagem convencionalmente utilizadas na produção de concretos secos são baseadas apenas no conceito de minimização empírica da porosidade da mistura através de ensaios diretos de maximização da massa de partículas capaz de preencher um determinado volume fixo ou mesmo através da adaptação da curva granulométrica com materiais locais em curvas padronizadas disponibilizadas por fabricantes de equipamentos.

Além disso, para avaliar a eficiência das formulações elaboradas usualmente são necessários testes na linha de produção, dada a relação de dependência da capacidade de compactação do equipamento e a compacidade das peças. Com isso cria-se um empecilho na condução de pesquisas neste assunto, uma vez que cada novo teste impacta em custos relativos à parada de produção e em riscos de falhas associadas às formulações experimentadas.

Considerando-se a relevância dos componentes produzidos com concretos secos, é possível inferir que a metodologia de dosagem empírica convencional pode ser considerada uma lacuna tecnológica que limita a otimização e o controle sistemático de formulações desenvolvidas para este fim.

Verifica-se assim a necessidade de desenvolvimento de técnicas que reproduzam etapas críticas do processo de vibroprensagem em escala laboratorial. O presente estudo propõe o desenvolvimento de uma técnica baseada em reometria compressiva usualmente adotada na área de compactação de fármacos e cerâmica.

Este método de ensaio permite estudar a facilidade de compactação, possibilitando desenvolver formulações com o objetivo de reduzir tempos de ciclo de prensagem e desgaste das fôrmas nos equipamentos de vibrocompressão. A técnica gera ainda um corpo de prova que pode ser utilizado para caracterizações no estado endurecido, permitindo assim verificar se a massa atende também as exigências necessárias para o produto final.

Por fim, com intuito de conferir agilidade no processo de controle de qualidade, propõe-se também a adaptação da técnica de permeabilidade superficial como forma de avaliar a eficiência de compactação da peça de forma simples e rápida.

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste na criação de ferramentas e técnicas laboratoriais para caracterização de concreto seco focando na avaliação de uma formulação comercial aplicada na moldagem de componentes para pavimento intertravado, tanto em relação à sua capacidade de compactação no estado fresco (reometria compressiva), quanto em relação ao seu desempenho no estado endurecido (compressão / permeabilidade superficial).

2.1. Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em oito capítulos assim discriminados:

Capítulo 1: Introdução do trabalho contextualizando o assunto investigado na dissertação.

Capítulo 2: Objetivo e estrutura da dissertação.

Capítulo 3: Na revisão bibliográfica são apresentadas as principais características do concreto seco e quais parâmetros devem ser observados no estado fresco e no estado endurecido do concreto. Sendo este estudo baseado no concreto seco para produção de peças de concreto para pavimentação intertravada é feita uma descrição deste tipo pavimento. Parte-se então para a descrição do processo produtivo de peças de através de equipamento de vibroprensagem, detalhando cada etapa do processo, como é feito o controle de qualidade e as possíveis deficiências em cada etapa.

Capítulo 4: Apresentação do plano de trabalho focando nas deficiências observadas no processo vibroprensado apresentado no capítulo 3.

Capítulo 5: Materiais e métodos utilizados para a realização do plano de trabalho.

Capítulo 6: Nos resultados e discussões apresenta-se o método de ensaio proposto para caracterização reológica do concreto seco durante a vibroprensagem e resultados da aplicação deste método no estado fresco e endurecido, inclusive a aplicação do método de determinação de permeabilidade.

Capítulo 7: São apresentadas as conclusões da aplicação dos métodos propostos para caracterização reológica do concreto seco durante a vibroprensagem e da utilização do método de determinação de permeabilidade.

Capítulo 8: Técnicas sugeridas que ainda faltam ser analisadas e podem motivar futuras pesquisas, e sugestão de aplicação deste trabalho.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Concreto Seco

O concreto seco possui baixo teor de umidade, onde a água tem a função prioritária de participar das reações de hidratação do cimento (JUVAS, 1993). Enquanto no concreto plástico a pasta ocupa os espaços deixados pelos agregados, no concreto seco existe uma presença significativa de ar (TANGO, 1994). Ao contrário dos concretos plásticos, que seguem a “Lei de Abrams” onde a resistência do concreto é proporcional a relação água/cimento, no concreto seco ocorre justamente o contrário, onde dentro de um limite máximo, quanto mais água for colocada maior será a resistência alcançada. Isto ocorre porque maiores quantidades de água melhoram consideravelmente a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito interno entre os grãos e facilitando a compactação da mesma (OLIVEIRA, 2004). Na formulação do concreto seco não se fala em relação água/cimento mas em teor de umidade da mistura, que varia entre 5% a 8% da massa total, dependendo do equipamento utilizado (FERNANDES, 2008).

Enquanto no concreto plástico os vazios dos agregados são ocupados pela pasta de cimento mais água, nos concretos secos existe a presença significativa de vazios entre os agregados, os quais devem ser retirados através da vibrocompressão (TANGO, 1994). Desta forma, a qualidade dos vibrocompressores é fundamental para o alcance das resistências desejadas (FRASSON, 2000).

Os concretos secos são caracterizados pelo alto consumo de cimento, na faixa de 350 – 400 kg/m³ e baixo teor de partículas finas quando comparados ao concreto plástico¹ (HÜSKEN, 2007). O teor de cimento está intimamente ligado à eficiência de compactação do equipamento, sendo que os equipamentos mais eficientes exigem menores teores de cimento, considerando-se uma mesma dosagem e materiais.

No estado fresco, as características mais importantes do concreto seco são a trabalhabilidade e a coesão. A trabalhabilidade é definida como a propriedade que determina o esforço mínimo exigido para manipular uma quantidade de concreto,

¹ O consumo de cimento típico em um concreto plástico de baixa resistência é de 255kg/m³ (MEHTA, MONTEIRO, 2008),

com perda mínima de homogeneidade e depende do teor de umidade, do formato, da textura dos agregados e do empacotamento das partículas (DOWNSON, 1981).

A coesão está relacionada a resistência, à segregação e à exsudação (MEHTA, MONTEIRO, 2008). No caso do concreto seco, a coesão tende a ser baixa devido ao teor de água insuficiente para molhar totalmente as partículas de cimento. Esta propriedade é importante para garantir que a peça não quebre ou ocorra segregação dos agregados durante seu manuseio e depende do teor de finos, do formato e porosidade dos agregados. A coesão da mistura pode ser melhorada através do aumento do teor de finos da mistura, onde o responsável pela maior contribuição é o próprio cimento. Esta propriedade também depende do formato das partículas, onde aquelas que são arredondadas e com bordas suaves resultam em melhor coesão. Também podem ser utilizados aditivos para melhorar esta propriedade (DOWNSON, 1981).

No estado endurecido as principais características a serem observadas no concreto seco são a resistência mecânica e a durabilidade. O crescimento da resistência do concreto depende do tipo e do consumo de cimento e ainda do processo de cura utilizado, que devem ser adequados ao processo. A resistência mecânica também é diretamente relacionada à capacidade de compactação do equipamento e ao teor de umidade da mistura, e também a distribuição granulométrica dos agregados. Já a durabilidade está relacionada com a capacidade do concreto em resistir à ação da água e a ataques químicos. Esta característica depende da resistência à penetração de água no material, que está relacionada aos poros do concreto, que por sua vez dependem também do teor de umidade e da compactação da mistura (DOWNSON, 1981).

3.2. Pavimento intertravado com peças de concreto

O pavimento intertravado tem como origem histórica a pavimentação com pedras talhadas, que pode ser considerado o primeiro pavimento com peças pré-fabricadas e que surgiu com o objetivo de melhorar o rolamento do pavimento antes feito com pedras em estado natural (Figura 2).

Contudo, com a crescente urbanização e aparecimento do automóvel no século XIX o processo de talhar a pedra tornou-se inviável e passou-se a utilizar argila cozida

na fabricação das peças. Após a Segunda Guerra Mundial, com a necessidade de reconstruir a Europa, surgiram as peças pré-moldadas de concreto, material mais durável que a argila para este uso. O desenvolvimento das máquinas de vibrocompressão permitiu a fabricação em série destas peças, ocorrendo assim sua difusão. No Brasil, as peças pré-moldadas de concreto começaram a ser utilizadas na década de 70 (HALLACK, 1998).

Figura 2 - Pavimento utilizando pedras no estado natural (esquerda) e com pedras talhadas (direita) (Acervo ABCP).

O pavimento intertravado é definido como um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento. O intertravamento do sistema é obtido pela contenção lateral, conforme especificado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 15953 (2011). A seção típica está demonstrada na Figura 3.

Figura 3 - Seção típica de um pavimento intertravado (Acervo ABCP).

O uso do pavimento intertravado é indicado em calçadas, praças, parques, vias públicas, estacionamentos e pátios de cargas, entre outros. Têm como principais características a execução simples com equipamentos de pequeno porte e a rápida liberação ao tráfego, não exigindo tempo de cura ou secagem, além de possibilitar a manutenção pontual (HALLACK, 1998). As peças utilizadas podem ter diferentes formatos e também pigmentos incorporados à sua massa permitindo variação de cores. Na Figura 4 está um exemplo de pavimento intertravado.

Figura 4 - Pavimento intertravado (ABCP, 2005b).

De acordo com a ABNT NBR 15953 (2011) as peças de concreto para pavimentação podem ser definidas como o componente pré-moldado de concreto utilizado como material de revestimento em pavimento intertravado. Elas devem apresentar uma camada superficial com acabamento confortável para o tráfego de pessoas e veículos ao mesmo tempo em que suportem as cargas as quais são solicitadas.

As peças de concreto para pavimentação devem atender à norma ABNT NBR 9781 (1986). Como condições gerais, a norma define as dimensões máximas das peças e os materiais constituintes. Como condições específicas, define as variações dimensionais e a resistência característica à compressão.

3.3. Panorama atual de qualidade de peças de concreto disponíveis no mercado

Foi realizado um estudo pela Comissão de Estudo de Piso Intertravado (CE-18:600.11) do Comitê Brasileiro de Cimento Concreto e Agregados (ABNT/CB-18) com o intuito de avaliar as condições das peças oferecidas no mercado na região de

São Paulo (CE-18:600, 2011). Para isso foram coletadas amostras em sete fábricas de diferentes portes com e sem selo de qualidade da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Nessas peças determinou-se a resistência à compressão, de acordo com a ABNT NBR 9780 (1986) e absorção de água de acordo com a CEN (The European Committee for Standardization) EN 1338 (2013) e obtiveram-se os resultados reunidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização de peças de concreto para pavimentação intertravada disponíveis no mercado (CE-18:600, 2011).

	Formato	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão	CV	Média Fábrica	Desvio padrão	CV	Absorção (%)
Fábrica 1	retangular	41,0	3,8	9%	35	8,49	24%	5,9
	16 faces	29,0	6,1	21%				6,3
Fábrica 2	retangular	40,8	2,5	6%	44,9	5,80	13%	4,5
	16 faces	49,0	3,4	7%				3,3
Fábrica 3	16 faces	36,5	7,3	20%	-	-	-	5,1
Fábrica 4	retangular	44,3	7,3	16%	39,3	7,14	18%	5,3
	16 faces	34,2	3,4	10%				6,2
Fábrica 5	retangular	46,5	6,4	14%	47,5	1,34	3%	3,1
	16 faces	48,4	4,5	9%				3,3
Fábrica 6	retangular	28,4	2,5	9%	27,7	1,06	4%	-
	16 faces	26,9	5,5	20%				6,8
Fábrica 7	retangular	44,7	5,9	13%	-	-	-	4,1
Média	-	39,1	4,9	13%	-			4,9
Requisito	-	35	-		-			≤6

No requisito de resistência à compressão foram reprovadas 4 amostras que não atingiram a resistência mínima exigida de 35MPa de acordo com a ABNT NBR 9781 (1986). As peças reprovadas também apresentaram absorção de água superior ao requisito de 6% exigido pela CEN EN 1338 (2003). Essas amostras podem apresentar baixa durabilidade ou mesmo vir a sofrer ruptura ou desgaste excessivo.

Tal fato reforça a importância de estudar métodos de ensaio que facilitem esses estudos de formulação, que hoje são feitos empiricamente e exigem testes em fábrica, o que nem sempre é viável.

Outro fator que pode ser observado é que das amostras ensaiadas três apresentaram coeficiente de variação igual ou superior a 20% na resistência mecânica, indicando baixa precisão no processo entre peças da mesma amostra.

Quando comparando ainda os resultados na mesma fábrica, na Fábrica 1, por exemplo, o coeficiente de variação de 24% indica baixa precisão no processo, e apenas duas fábricas apresentaram coeficiente de variação inferior a 10%, indicando boa precisão no processo. Ou seja, observa-se que há uma variação de qualidade tanto entre peças da mesma amostra como entre peças fabricadas no mesmo local. Através da observação do processo produtivo nas fábricas essas variações podem ser explicadas por diferentes fatores, tais como a falta de controle de umidade dos agregados, balanças não aferidas, equipamento de vibroprensagem mal aferido, entre outras. Dessa forma, verifica-se a necessidade de estudar maneiras de uniformizar o processo produtivo com o intuito de minimizar esta variação.

Os resultados demonstram que o processo produtivo das peças de concreto para pavimentação ainda requer estudos para uniformizá-lo e garantir melhor desempenho das peças produzidas evitando futuras patologias nos pavimentos executados.

Além do processo vibroprensado, as peças de concreto para pavimentação também podem ser produzidas através dos processos dormido e virado. Estes processos utilizam concreto plástico moldado em fôrmas plásticas ou metálicas e têm baixa produtividade quando comparados ao processo vibroprensado, além de demandarem um consumo de cimento superior para atingir a resistência mecânica exigida para as peças de concreto. Sendo assim, esses processos não serão tratados neste trabalho.

3.4. Processo produtivo vibroprensado

Na Figura 5 está descrito o fluxograma ilustrativo das principais etapas do processo produtivo vibroprensado, que estão detalhadas em sequência. Este fluxograma foi elaborado com base nas observações em fábricas de peças de concreto para pavimentação.

Figura 5 – Fluxograma descritivo do processo produtivo de peças de concreto por vibrocompressão.

3.4.1. Solicitação da produção

O processo produtivo inicia-se definindo o tipo de peça a ser produzida. Dentre os diferentes tipos de peças normalmente produzidas pode se variar a resistência mecânica, o formato e a cor especificada para o produto; fatores que devem ser considerados na definição das matérias-primas, formulação do concreto seco e configurações dos equipamentos de vibrocompressão.

3.4.2. Definição e caracterização da matéria-prima

Os materiais constituintes do concreto seco para fabricação das peças de concreto para pavimentação são os mesmos do concreto convencional (cimento, agregados, água) sendo a principal diferença o teor de umidade da mistura.

3.4.2.1. Cimento

Para garantir a velocidade necessária na produção normalmente utilizam-se cimentos com alta resistência inicial, dessa forma, na fabricação das peças utiliza-se principalmente o cimento Portland de alta resistência inicial, CP V ARI (FERNANDES, 2008).

Também é possível produzir peças de concreto utilizando os cimentos compostos. Nesse caso, utiliza-se os cimentos de classe 40MPa, que atingem resistências mecânicas mais altas com menores idades. Ao utilizar os cimentos compostos podem ser necessárias alterações nas condições de cura das peças para acelerar o ganho de resistência e não ocorrer perdas na produtividade.

3.4.2.2. Água

Com a função de participar da reação de hidratação do cimento, a água de amassamento tem importância fundamental na resistência do concreto seco. Antes de mais nada deve ser garantida a sua qualidade evitando assim efeitos negativos na resistência do concreto ou manchamentos à sua superfície. A água utilizada não deve conter matérias orgânicas e teores excessivos de substâncias inorgânicas, sendo recomendado basicamente a utilização de água potável, ainda que águas não potáveis nem sempre são prejudiciais ao concreto (NEVILLE, 1997).

3.4.2.3. Agregados

A estrutura granular dos agregados ocupa entre 60 % a 80% do volume do concreto, tendo assim grande importância nas características do concreto. Normalmente utiliza-se agregados minerais, compreendendo areia, pedregulho e pedra britada provenientes de jazidas naturais (MEHTA, MONTEIRO, 2008). Esses agregados são classificados de acordo com a ABNT NBR 7211 (2005) como grãos, quando os grãos passam pela peneira de abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de abertura de malha 4,75mm e miúdos quando passam na peneira de abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm.

As seguintes características têm influência no concreto: distribuição granulométrica, porosidade do grão, forma e textura superficial, presença de substâncias deletérias, resistência à compressão, absorção de água e módulo de elasticidade.

A absorção de água e teor de umidade dos agregados devem ser considerados na formulação do concreto, pois alteram o teor de água total da mistura. A porosidade, forma, textura superficial e a distribuição granulométrica vão influenciar principalmente as características no estado fresco, alterando trabalhabilidade do concreto seco.

No estado endurecido, a presença de substâncias deletérias pode afetar as reações de hidratação do cimento ou afetar a durabilidade do concreto. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos agregados dependem da composição mineralógica. A porosidade do agregado também influencia na resistência mecânica. A distribuição granulométrica afeta também as características do concreto

endurecido, devido sua relação com a compactação e consequentemente com a resistência mecânica do concreto seco.

No caso específico da produção de peças de concreto para pavimentação são utilizados os mesmos agregados normalmente usados na produção de concreto convencional, levando em conta a dimensão máxima do agregado permitida pelo equipamento. Nas peças de concreto, limita-se o diâmetro em 6,3mm, para garantir um bom rolamento e acabamento superficial. No caso de equipamentos que permitam trabalhar em duas camadas, pode ser utilizado o diâmetro máximo de 12,7mm (FERNANDES, 2008).

Para formular um concreto seco é essencial conhecer a curva granulométrica dos agregados. Dentre as técnicas disponíveis para a determinação da distribuição granulométrica dos agregados, normalmente se utiliza o peneiramento. No caso das peças de concreto para pavimentação, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR NM 248 (2003).

Outras determinações feitas nos agregados são a massa específica e massa unitária. De acordo com a ABNT NBR NM 52 (2009), a massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Este dado é usado nas dosagens de concreto e argamassa, para determinar a contribuição de volume que cada material fornece à mistura, e também pode ser usado para determinar o volume de vazio do material, ao usar este dado com a massa unitária (FERNANDES, 2008).

A massa unitária ou densidade aparente corresponde à relação entre a massa suficiente para preencher um dado recipiente e o volume desse recipiente. Na produção de blocos e peças de concreto para pavimentação, este dado é utilizado nas transformações de quantidades de material de massa para volume ou vice-versa, possibilitando a medição de agregados em massa quando não se dispõe de balança (FERNANDES, 2008).

3.4.2.4. Aditivos químicos

Os aditivos, conforme definição da ABNT NBR 17768 (1992), são produtos que adicionados em pequena quantidade nos concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas

condições, ou seja, eles têm a função de melhorar características específicas das misturas de concreto. Existem diversos tipos de aditivos químicos com diferentes funções, tais como aumentar a plasticidade do concreto, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar as taxas de resistência nas primeiras idades, entre outros (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

No caso do concreto seco para produção de peças de concreto um dos usos mais comuns são os aditivos para facilitar a compactação da mistura sem a necessidade de alterar o teor de umidade (FERNANDES, 2008). Nesta categoria, podem ser utilizados os aditivos químicos tensoativos, sendo os surfactantes incorporadores de ar ou redutores de água. Estes aditivos começam a atuar no sistema cimento-água no momento que são adicionados, atuando na tensão da água adsorvendo na superfície das partículas de cimento.

Os surfactantes incorporadores de ar são constituídos de uma cadeia hidrocarbônica apolar com um grupo polar aniônico e atuam promovendo a formação de bolhas de ar aumentando a coesão e plasticidade do concreto.

Os redutores de água atuam como plastificantes e os mais recentes são os policarboxílicos à base de éter, conhecidos como superplastificantes. Ao serem adsorvidos, eles atuam conferindo uma forte carga negativa às partículas de cimento, diminuindo assim a tensão superficial da água circundante e elevando a fluidez da mistura. (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Ao facilitar o adensamento do concreto seco é possível obter peças mais compactas e conseqüentemente com resistência mecânica superior, além de reduzir o atrito da mistura com o molde do equipamento, aumentando sua vida útil (FERNANDES, 2008).

3.4.2.5. Adições minerais

Também podem ser feitas as adições minerais ao concreto com o objetivo de melhorar certas características como controle de eflorescência, aumentar a resistência à abrasão, à compressão ou à tração na flexão (CRUZ, 2003). Adições minerais são materiais com área específica normalmente elevada, podendo ou não possuir atividade pozzolânica. Os materiais com atividade pozzolânica, podem ser naturais ou industriais, normalmente subprodutos de processos industriais. Essas

adições interferem no comportamento reológico do concreto assim que adicionados, modificando a trabalhabilidade do concreto fresco, enquanto os efeitos químicos podem levar dias a meses para aparecerem (MEHTA, MONTEIRO, 2008). Pode-se utilizar como adição ao concreto: sílica ativa, metacaulim ou filler.

A mistura utilizada para a produção de peças de concreto para pavimentação pode ainda contar com pigmentos que podem ser utilizados em toda a peça ou apenas na camada superficial, quando utilizado equipamento que produz peças de dupla camada. Normalmente os teores de pigmentos variam de 3% a 5% da massa do cimento. Recomenda-se a utilização de pigmentos de base inorgânica, que garantem maior vida útil à coloração ao resistirem melhor a radiação ultravioleta, ao contrário dos pigmentos orgânicos. As cores mais comuns para concreto são o preto e tons de vermelho e amarelo, que são constituídos basicamente de óxido de ferro. Outras cores podem ser utilizadas, como azul e verde, à base de cobalto e cromo, respectivamente, porém o alto custo desses pigmentos limita sua utilização.

A utilização de pigmentos não altera significativamente as propriedades do concreto, não sendo verificadas alterações que comprometam sua durabilidade e trabalhabilidade, porém podem ocorrer pequenas alterações no estado fresco, principalmente na trabalhabilidade, devendo este aspecto ser considerado na formulação podendo ser corrigida essas alterações com a utilização dos aditivos. (ABCP, 2002).

3.4.3. Formulação

A formulação da mistura de concreto, de modo simplificado, consiste em definir a proporção mais econômica de cada um dos materiais disponíveis para produzir as peças com a qualidade necessária. O maior desafio da formulação do concreto seco é obter tanto qualidade adequada no estado endurecido quanto trabalhabilidade e coesão adequadas no estado fresco de forma econômica (DOWNSON, 1981). O traço do concreto é a forma mais usual de se expressar essas quantidades de materiais, podendo estar em massa ou volume, relativo à quantidade de cimento ou em valores absolutos (TANGO, 1994).

O objetivo de todas as metodologias é atingir o máximo de compactação, obtendo assim uma peça com resistência mecânica adequada e menos porosa, resultando

em maior durabilidade. Para obter a máxima compactação é essencial que a mistura tenha máxima densidade, o que está intimamente relacionada à correta seleção dos agregados. O teor de umidade também influencia na compacidade e depende do tipo de equipamento utilizado. Equipamentos com menor eficiência de compactação exigem misturas com mais água para atingir a compacidade necessária (FERNANDES, 2008).

O teor de cimento também está relacionado às características dos agregados e à eficiência do equipamento, onde para atingir dada resistência mecânica o teor de cimento é reduzido quanto mais eficiente o equipamento. Deste modo observa-se que o processo de formulação está intimamente ligado ao processo de vibroprensagem, e assim, o processo habitual é o desenvolvimento da formulação e posterior teste no equipamento.

Após a verificação das peças obtidas são feitos eventuais ajustes na formulação, até atingir as características desejadas nas peças. Este fator torna-se um obstáculo para testes de novas formulações, dado que toda alteração exige a parada da linha de produção, o que nem sempre é viável.

Diversos autores apresentam metodologias para obtenção de concretos secos, seja para a produção de blocos de concreto para alvenaria, seja para peças de concreto utilizadas em pavimentos intertravados. São as mais utilizadas aquelas de fabricantes de equipamentos, como o método proposto pela Columbia (COLUMBIA, 1969) e pela Besser Company (PFEIFFENGERGER, 1985) e também os métodos propostos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (FERREIRA, 1995), o método IPT/USP adaptado para concreto seco (TANGO, 1994) e o método proposto por DOWNSON (1981).

3.4.3.1. Método Columbia

O método proposto pela Columbia (1969), fabricante de equipamentos de vibrocompressão, consiste basicamente em encontrar agregados que estejam dentro de uma faixa granulométrica indicada (Figura 6). Essa faixa granulométrica é fruto da experiência do fabricante e com ela é possível obter uma mistura com boa trabalhabilidade e resulta em boa aparência e resistência mecânica. Com os

agregados escolhidos, a metodologia propõe testes no equipamento da fábrica com teores de cimento variando entre 14 % a 15% e teor de umidade entre 5,0 e 5,5%.

Figura 6 - Faixa de distribuição granulométrica proposta pela Columbia (1969).

Essa metodologia vem da experiência da Columbia e está ligada aos seus equipamentos e não considera outras propriedades físicas e mineralógicas dos agregados.

3.4.3.2. Método Besser Company

O método adotado pela Besser Company de formulação para blocos foi proposto inicialmente por PFEIFFENBER (1985) e adaptado por MEDEIROS (1993) para equipamentos nacionais. Esse método também consiste em definir agregados que se adaptem a uma distribuição granulométrica definida (Figura 7).

Com a granulometria definida são feitos traços pilotos variando o teor de cimento de acordo com a resistência desejada para o bloco de concreto. O teor de umidade varia de 6,0% a 7,0% dependendo do equipamento, sendo definido no traço piloto.

soquete, até preencher todo o volume. Os recipientes são pesados e aquele que apresentar a maior massa é considerada a proporção ideal.

Figura 8 - Ilustração do método de dosagem ABCP (FERREIRA, 1995).

Já a quantidade ótima de água deve ser a maior possível até o limite em que as peças aumentam a coesão e começam a aderir na parede da fôrma. Já a quantidade de cimento está relacionada à resistência desejada, considerando que traços com menor consumo de cimento, geralmente levam a resistências menores e a medida que o consumo de cimento é aumentado as resistências também aumentam. O método considera um traço de 1:6 em massa como “rico” e traços com proporção 1:10 a 1:15 como “pobres”. A proporção de agregados continua a mesma independente do consumo de cimento, porém pode ser necessário ajustes do teor de água ao variar o teor de cimento.

Este método é muito simples e se baseia na tentativa e erro, não considerando conceitos científicos para atingir a proporção ideal dos materiais. O método ainda não considera a contribuição da granulometria do cimento na proporção.

3.4.3.4. Método IPT/USP

O método IPT/USP proposto por TANGO (1994) é uma adaptação para concreto seco do método de dosagem IPT/USP idealizado inicialmente para concreto plástico. Para a formulação do concreto utilizando este método expressa-se o traço em massa e quantidades relativas ao cimento, no seguinte formato:

1: a : p : x (cimento : areia : pedra : água)

Onde a é o teor de agregado miúdo/cimento, p é o teor de agregado graúdo/cimento e x a relação água/cimento.

A relação de agregados graúdos e miúdos em função do cimento também pode ser expressa como $m = a + p$.

O método define a proporção de argamassa de acordo com a Equação 1, que está relacionada com o aspecto superficial da peça e o teor de água/materiais secos (H) de acordo com a Equação 2.

$$\alpha = \frac{(1+a)}{(1+a+p)} = \frac{(1+a)}{(1+m)} \quad \text{Equação 1}$$

$$H = \frac{x}{(1+a+p)} = \frac{x}{(1+m)} \quad \text{Equação 2}$$

O método proposto por Tango (1994) consiste em seis passos: ajuste dos agregados, estabelecimento da resistência média desejada, estimativa dos teores agregado/cimento (m), determinação da proporção de argamassa (ALFA) e umidade ótima (Hót), confecção de misturas experimentais e traçado do diagrama de dosagem.

O 1º passo, ajuste dos agregados, consiste em atingir uma proporção entre os agregados graúdos e miúdos que resulte na maior massa unitária possível, com a única ressalva de no caso dos blocos trabalhar com um $d_{\text{máx}}$ inferior a $\frac{1}{2}$ da menor parede do bloco. Para peças de concreto para pavimentação essa exigência não se aplica. De qualquer forma, a proporção pode ser ajustada no 4º passo do ajuste da proporção de argamassa. No 2º passo, para estabelecer a resistência média desejada considera-se a resistência característica visada e um desvio padrão que leva em conta características da fábrica. Para o 3º passo, estimativa dos teores agregado/cimento (m), são definidos três traços, sendo um “rico”, “médio” e “pobre”. Utilizado o $m_{\text{médio}}$ são confeccionadas peças com diferentes proporções argamassa/concreto seco (ALFA) e opta-se por aquela que apresente no estado fresco um bom aspecto superficial, massa unitária mais elevada e boa trabalhabilidade. Já a quantidade de água é a maior possível para que a peça não esboroe, mas não tão grande para que ocorra aderência na forma ou perda de formato. Com os dados obtidos nos quatro primeiros passos são confeccionadas peças com os três traços (“rico”, “médio” e “pobre”) sendo necessárias pelo menos três peças por traço para cada idade de resistência, e essas peças são ensaiadas à compressão.

Por fim, com os dados de resistência mecânica à compressão obtidos com as misturas experimentais é possível traçar o diagrama de dosagem como o da Figura 9. A vantagem de construção do diagrama facilita a obtenção de outros traços, desde que mantidas as condições pesquisadas.

Figura 9 - Diagrama de dosagem IPT adaptado para concreto seco (Tango, 1994).

3.4.3.5. Método Dowson

A metodologia de dosagem proposta por DOWSON (1981) é específica para peças de concreto para pavimentação e também se baseia em um ajuste dos agregados em uma curva granulométrica (Figura 10). A curva granulométrica, nesse caso, foi obtida em um estudo utilizando um equipamento para medição de vazios onde foi encontrada a granulometria que resultasse no menor volume de vazios, resultando assim em uma peça mais compacta.

Figura 10 - Distribuição granulométrica recomendada por DOWSON (1981).

Os teores de cimento e água são ajustados de acordo com o equipamento disponível na fábrica.

Essa metodologia considera a importância do empacotamento das partículas na formulação e utiliza o equipamento de medição de volume de vazios para encontrar a curva granulométrica com o melhor empacotamento. Porém, tal curva se aplicaria apenas aos agregados utilizados nos estudos e não poderia ser extrapolada para quaisquer agregados.

Em comum, estes métodos propõem soluções empíricas para definição dos agregados, considerando de forma parcial as teorias de empacotamento de partículas. Também não tratam do comportamento reológico destas misturas e os teores de cimento e água são definidos empiricamente por tentativa e erro.

3.4.3.6. Métodos baseados em empacotamento de partículas

Sendo o concreto um material que contém agregados de diferentes tamanhos e formas na sua composição, seu comportamento depende parcialmente das propriedades das partes que o compõem e parcialmente das interações entre elas. (STROEVEN et al, 1999). Desta forma, o estudo do empacotamento de partículas torna-se necessário para entendimento do comportamento e das características do concreto.

O empacotamento de partículas de um concreto seco, devem considerar misturas polidispersas contínuas, onde existam partículas de diferentes tamanhos e formas (HÜSKER, 2008). Isto torna o estudo do empacotamento de partículas mais complicado, pois nem sempre é possível reproduzir materiais com distribuição granulométrica precisa (CASTRO, 2009).

O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (Figura 11) (OLIVEIRA *et al*, 2000).

Figura 11 – Empacotamento de partículas, aonde os vazios vão sendo preenchidos por partículas cada vez menores (OLIVEIRA *et al*, 2000).

Supondo um concreto composto de agregados de apenas uma dimensão – sistema monodisperso – o volume de pasta de cimento precisará ser maior que o volume de espaços entre os agregados, para conseguir preencher todos os espaços na mistura. Porém, se forem utilizados diversos tamanhos de agregados – sistema polidisperso – os agregados menores preencherão os espaços entre os agregados maiores, resultando em um volume menor de espaços vazios, que por sua vez resulta em redução na quantidade necessária da pasta de cimento, ou caso mantenha o volume de pasta, o excesso auxilia na dispersão dos agregados, melhorando a trabalhabilidade da mistura (WONG, 2002).

Figura 12 – Concreto monodisperso, redução da quantidade de pasta devido à redução de espaços entre os agregados. Ocorre melhora da trabalhabilidade devido o excesso de pasta envolvendo os agregados (WONG, 2002).

Os estudos teóricos e experimentais, relacionados ao empacotamento de partículas geraram duas abordagens básicas, uma discreta, que considera as partículas individualmente, tendo Furnas (Equação 3) como principal expoente e outra contínua, proposta por Andreasen (Equação 4), que trata as partículas como distribuições contínuas (OLIVEIRA et al, 2000):

$$CPFT(\%) = 100x \left(\frac{D^{\log \bar{r}} - D_s^{\log \bar{r}}}{D_L^{\log \bar{r}} - D_s^{\log \bar{r}}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

$$CPFT(\%) = 100x \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \quad \text{Equação 4}$$

Onde: CPFT é a porcentagem de partículas menores que D, D é o diâmetro da partícula, D_s é o diâmetro da menor partícula, D_L é o diâmetro da maior partícula, $\bar{r}$ é o quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume na malha imediatamente inferior e q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

Andreasen determinou que para maximizar o empacotamento, o coeficiente de distribuição q deveria estar entre 0,33 e 0,50, e estudos posteriores de Funk e Dinger mostraram que o expoente que propicia a máxima densidade de empacotamento é 0,37 (OLIVEIRA et al, 2000).

A partir da análise destes dois modelos foi proposto um terceiro modelo por Funk e Dinger, conhecido como modelo de Alfred, que pode ser considerado um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas e Andreasen, chegando na Equação 5:

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100$$

Equação 5

Simulações computacionais verificaram que valores de q menores ou igual a 0,37 podem favorecer o empacotamento máximo para distribuições infinitas, enquanto para valores acima de 0,37 verifica-se sempre uma porosidade residual (CASTRO, 2009).

Estudos apontam que, pela comparação entre as densidades obtidas experimentalmente, a eficiência de empacotamento resultante das diversas distribuições de máxima densidade estudadas é expressa conforme a sequência a seguir (OLIVEIRA et al, 2000):

Alfred > Andreasen > Furnas

Diversos fatores podem alterar o empacotamento de partículas, como aqueles relacionados às características das partículas, tais como a morfologia, porosidade, densidade e o efeito parede, explicado detalhadamente a seguir (Figura 13).

No caso da morfologia, os modelos de empacotamento apresentados consideram partículas esféricas, porém nem sempre isto é verdade. Sabe-se que quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, pois se verifica o atrito entre as partículas a partir do contato de suas superfícies irregulares. Quanto menor o tamanho das partículas, maior será esse efeito, devido a maior área superficial específica (CASTRO, 2009).

Outro fator é a porosidade interna das partículas, que podem ser totalmente densas, com porosidade interna fechada ou com porosidade aberta, sendo que o ideal é que se utilizem partículas densas com a menor porosidade possível. Quanto à densidade das partículas, em sistemas com grandes diferenças de densidades, deve-se tomar cuidado no processo de compactação para evitar possíveis segregações (OLIVEIRA et al, 2000).

Também deve ser levado em conta o “efeito parede”, que ocorre quando a relação entre os diâmetros das partículas finas em relação às grossas, seja tal, que faça com que as partículas finas “considerem” a superfície de contato com as partículas grossas como uma superfície plana (parede), o que resulta em maior porosidade próximo a superfície das partículas grossas. Para evitar este fenômeno o quociente entre os diâmetros deve ser de pelo menos dez vezes (OLIVEIRA *et al*, 2000).

Figura 13 – Morfologia dos agregados e efeito parede (OLIVEIRA *et al*, 2000).

Alem dos fatores relacionados às características das partículas, as técnicas de compactação também podem afetar o empacotamento das partículas. Mesmas distribuições granulométrica podem gerar empacotamentos distintos, dependendo da técnica de compactação utilizada. Dessa forma, deve ser verificado sempre se a distribuição planejada é adequada à técnica de compactação utilizada (OLIVEIRA *et al*, 2000). Para obter a melhor compactação, o ideal é que os grãos sejam naturalmente arredondados e com textura regular (DOWSON, 1981). Agregados com superfícies muito ásperas induzem a altas forças de atrito entre as partículas durante a compactação, o que por consequência reduz a densidade de empacotamento dos agregados (WONG, 2002).

O estado de dispersão das partículas também influencia no empacotamento de partículas, pois ao utilizar partículas muito finas, com tendência a se aglomerar, isto pode resultar na alteração do diâmetro mínimo - o que reduz a densidade de empacotamento - e também o fato destes aglomerados equivalerem a partículas ocas, o que prejudica a resistência mecânica do produto final.

Ao introduzir o conceito de empacotamento de partículas para a formulação de concreto é possível melhorar suas características mecânicas e também otimizar o consumo de cimento, o que resultaria em um produto mais econômico e menos agressivo ao meio ambiente. Com a otimização da densidade de empacotamento também é possível reduzir a energia necessária para compactação das peças.

Hüsken (2008) propôs uma dosagem de concreto seco utilizando a equação de Alfred. Os resultados de Hüsken mostraram que o concreto atingiu maiores valores de resistência à compressão quando a distribuição granulométrica dos agregados foi melhorada, ou seja, com um melhor empacotamento (Figura 14).

Figura 14 - Empacotamento x resistência à compressão (HÜSKEN, 2008).

Outros trabalhos, como o de Wong (2002) também mostraram a influência positiva de utilizar conceitos de empacotamento de partículas para concretos de alto desempenho.

Para utilizar os conceitos de empacotamento de partículas para dosagem de concreto é necessário estabelecer as relações entre a densidade de empacotamento, tanto dos agregados como dos materiais cimentícios e também as propriedades da pasta de cimento (WONG, 2002).

O método de dosagem proposto por Wong (2002) divide a dosagem em um sistema de três camadas, onde a densidade de empacotamento dos materiais cimentícios vai determinar a necessidade de água e o excesso de água vai influenciar na reologia e coesão da pasta de cimento. A segunda camada, dos agregados finos, vai determinar a demanda de pasta de cimento e o excesso de pasta terá efeito na

fluidez da argamassa. Por fim, a terceira camada, dos agregados graúdos, vai determinar a necessidade de argamassa e o excesso de argamassa vai afetar a trabalhabilidade da mistura. Para Wong, (2002), ao correlacionar estes três fatores é possível prever as propriedades do concreto produzido e otimizar sua dosagem.

Para o caso do concreto seco, o trabalho de Hüsken (2008) utilizou a equação de Alfred e desenvolveu um algoritmo para auxiliar a composição da mistura do concreto considerando m ingredientes, incluindo aqueles não sólidos, como o ar e a água. Utilizando a metodologia proposta, Hüsken (2008) testou diversas dosagens em laboratório e também produziu peças para pavimentação em um equipamento de laboratório. Analisando os resultados, pode-se assumir que a melhora na distribuição granulométrica, resultado da utilização dos conceitos de empacotamento de partículas, levou a maiores valores de resistência à compressão nas dosagens estudadas.

Ainda que atingida a melhor proporção dos agregados, os teores de água e cimento continuam dependentes da eficiência do equipamento, sendo assim observada a necessidade de desenvolvimentos de técnicas que permitiriam testes em laboratório das formulações, facilitando assim a aplicação de novas tecnologias.

3.4.4. Controle e recebimento de matéria-prima

Para garantir que o produto final atenda as especificações é necessário um controle no recebimento das matérias-primas, verificando se elas atendem aqueles definidos na formulação. Caso se verifique alterações podem ser necessárias adaptações na formulação do concreto.

É importante que o armazenamento das matérias-primas seja feito de forma correta evitando assim alterações que afetariam o produto final. Quando comprado ensacado, o cimento deve ser armazenado em locais livre de umidade, protegidos de vento, em pilhas de no máximo 15 sacos distantes 30cm das paredes e sob uma base seca, como paletes de madeira (ABCP, 2005a). Já os agregados devem preferencialmente ser armazenados em baias separadas e cobertas a fim de manter a umidade constante.

3.4.5. Proporcionamento

O proporcionamento trata-se do processo onde as matérias-primas são dosadas para então serem misturadas e assim produzir o concreto (MEHTA, MONTEIRO, 2008). Para maior precisão, o proporcionamento dos materiais deve ser feito em massa, com exceção da água e dos aditivos, que podem ser dosados em volume com precisão. Principalmente no caso das areias, a dosagem em volume pode levar à erros de medição devido ao inchamento dos grãos de areia em contato com a umidade (FERNANDES, 2008).

Nas indústrias de pequeno porte o proporcionamento costuma ser feito em volume, utilizando padiolas de madeira, carrinhos de mão ou mesmo latas. Contudo, a melhor forma de realizar o proporcionamento do concreto é através de centrais de concreto gravimétricas, onde o proporcionamento é feito em massa de modo automático ou semi-automático.

3.4.6. Mistura

Após a correta formulação e proporcionamento, os componentes do concreto devem ser misturados para garantir a perfeita homogeneização. No caso do concreto seco, a consistência de “farofa” exige um misturador de boa eficiência para garantir homogeneização. Os misturadores disponíveis são os planetários, os horizontais de eixo helicoidal, os de eixo vertical fixo, os horizontais de pás e os de eixo inclinado (betoneira) (Figura 15).

Figura 15 – Misturadores, acima da esquerda para a direita: do tipo planetário, horizontal de eixo helicoidal, e abaixo da esquerda para a direita de eixo vertical e de eixo inclinado (betoneira). (Acervo ABCP).

Os planetários são os que possuem melhor eficiência de mistura, seguido pelos horizontais de eixo helicoidal, que são ideais quando se utiliza misturas com pigmentos. Os de eixo inclinado não conseguem misturar o concreto seco de forma eficiente e, portanto não são indicados para a produção deste tipo de concreto (FERNANDES, 2008).

Deve-se verificar a capacidade, o tempo mínimo de mistura e a sequência ideal de mistura para cada tipo de misturador utilizado. A sequência pode ser feita da seguinte maneira: adicionar primeiro os agregados, colocar o cimento e misturar os materiais secos por cerca de 1 minuto. Após esse período é adicionada a quantidade necessária de água e aditivo e mistura-se novamente por 2 à 4 minutos. (MEDEIROS, 1998).

3.4.7. Processo de vibroprensagem

Após as etapas de aquisição, controle, proporcionamento e mistura do concreto inicia-se o processo de conformação da massa nas peças de concreto através dos

equipamentos de vibrocompressão, que realizam prensagem e vibração simultâneas (OLIVEIRA, 2004).

A prensagem consiste em uma operação onde a massa contida em uma matriz rígida ou flexível (molde) é conformada através da aplicação de pressão. O objetivo dessa operação é obter peças uniformes com geometria pré-estabelecida e microestrutura adequada às necessidades do produto final. Para atingir este objetivo é desejável que a massa possua elevada fluidez, facilitando o enchimento do molde, e elevada densidade de preenchimento para que seja mínima a quantidade de ar a ser expulsa no processo de prensagem (ALBERO, 2000).

No processo vibroprensado, a prensagem é responsável por aplicar a carga de compressão no concreto para retirar o ar aprisionado. (OLIVEIRA, 2004). Já a função da vibração é acomodar melhor os agregados e facilitar o enchimento da fôrma (OLIVEIRA, 2004). A vibração é transmitida aos componentes da mistura do concreto, reduzindo as forças de atrito, fluidificando a mistura e liberando as bolhas de ar aprisionadas (RIXNER, 2001).

Alterações na formulação no intuito de obter misturas onde as características físicas dos agregados e sua distribuição granulométrica apresentem melhor empacotamento de partículas, menor atrito e maior mobilidade através do volume do molde poderiam reduzir a força necessária para compactação e a necessidade de vibração.

A umidade da mistura também influencia a prensagem, pois a água atua como plastificante dos aglomerados, facilitando o processo. Porém em excesso, a água aumenta o grau de saturação da mistura reduzindo a efetividade da carga aplicada, pois parte da carga aplicada passa a aumentar a pressão da água nos poros e não aumentar a tensão de contato entre as partículas (ALBERO, 2001).

No caso específico do processo de vibroprensagem o excesso de água também dificulta a alimentação dos moldes. Dessa forma, deve ser utilizado um teor de umidade ótimo para atender as duas condições: facilidade de alimentação e prensagem, devendo ser o maior teor de água possível sem afetar a trabalhabilidade da mistura. Uma mistura com água insuficiente pode perder até 60% de sua

resistência por dificuldade de compactação, além do desgaste do molde, que pode ser acelerado pelo atrito excessivo entre a mistura e o molde do equipamento.

O tipo de equipamento tem grande influência no teor de água, pois equipamentos de grande porte exigem um teor de água menor para compactar as peças, enquanto equipamentos de menor porte necessitam de misturas com mais água para atingir a compacidade adequada (FERNANDES, 2008).

Outro fator que deve ser considerado na prensagem é a recuperação elástica, ou seja, a expansão do material que ocorre após a retirada da carga devido à energia elástica que permanece armazenada na peça. Essa expansão gera tensões de tração na peça e pode ocasionar fissuras e está relacionada principalmente com a distribuição granulométrica das partículas da mistura. Durante o processo de prensagem a velocidade com que a carga é aplicada influencia diretamente na recuperação elástica da peça, cujo efeito aumenta com o aumento da pressão de prensagem, devido ao maior número de pontos de contato entre as partículas por unidade de volume e o valor de deformação elástica em cada um dos pontos de contato (ALBERO, 2001).

Assim, uma menor velocidade de aplicação da carga reduz a recuperação elástica, ao permitir mais tempo para as partículas se reordenarem e atingirem posições mais estáveis. O teor de umidade também influencia neste fator, sendo que, misturas com maior plasticidade apresentam menor recuperação, (ALBERO, 2001). Dessa forma, para garantir uma recuperação elástica mínima podem ser alterados parâmetros no processo de prensagem ou na formulação da peça, buscando granulometrias que apresentem melhor empacotamento de partículas.

Também são importantes as características da peça no estado “verde”, ou seja, logo após a conformação, quanto necessita de coesão para resistir às etapas seguintes no processo produtivo, neste caso, transporte interno, o processo de cura e a armazenagem (ALBERO, 2000).

Outra questão associada à prensagem é a falta de uniformidade da compacidade nas peças, que pode ser ocasionada pela fricção das partículas entre estas e as paredes do molde ou do preenchimento não uniforme deste (ALBERO, 2001). Este

efeito é mais acentuado no caso da conformação dos blocos de concreto devido a espessura das paredes e não é tão acentuado nas peças de concreto.

3.4.7.1. Tipos de equipamento

Os equipamentos de vibrocompressão podem ser do tipo hidráulico ou pneumático sendo o primeiro tipo considerado mais eficiente. Os pneumáticos empregam um pistão movido a ar comprimido e atingem menor energia de compactação quando comparados aos hidráulicos, exigindo assim um maior consumo de cimento para atingir uma mesma resistência quando comparado com uma vibroprensa hidráulica. Os equipamentos hidráulicos empregam bombas e pistões a óleo e atingem maior energia de compactação. Nesses equipamentos também é possível controlar o tempo de alimentação, prensagem, acomodação e extrusão das peças, dessa forma é possível manter constantes as características das peças mesmo alterando matérias-primas. (FERNANDES, 2008).

Em um equipamento de vibrocompressão o processo é composto de três etapas que formam um ciclo, sendo elas o tempo de alimentação, tempo de compactação e tempo de acomodação ou alívio (Figura 16). Esses tempos devem ser regulados no equipamento de forma a garantir uma peça compacta e com a espessura de acordo com o especificado pela produção. (FERNANDES, 2008). O ciclo completo varia de 8 à 25 segundos, dependendo do equipamento (OLIVEIRA, 2004).

O tempo de alimentação é a etapa onde a mistura é colocada na fôrma e é regulável nos equipamentos de vibrocompressão. Este ciclo inicia com o posicionamento da forma e avanço da gaveta (Figura 16-A) e a alimentação propriamente dita, onde a gaveta permanece sobre a fôrma com os agitadores ligados (Figura 16-B), terminando este tempo quando a gaveta retorna a sua posição original (Figura 16-C). Caso o tempo de alimentação seja insuficiente a fôrma não se enche suficientemente resultando assim em uma peça de concreto menos compacta.

Caso o tempo seja superior ao necessário, a peça de concreto fica com espessura maior que a desejada. Durante a alimentação também ocorre a vibração do equipamento (OLIVEIRA, 2004). No tempo de compactação da mistura aplica-se a força para conformar o concreto seco no molde da peça, sendo mantida também a vibração (Figura 16-D). O tempo de compactação varia de 3 a 6 segundos e caso

esse tempo seja insuficiente, a peça de concreto terá uma espessura maior que o especificado (OLIVEIRA, 2004). O tempo de alívio ocorre após atingir a altura desejada na peça, quando a vibração é desligada e ocorre a subida da fôrma (Figura 16-E) (OLIVEIRA, 2004).

a

b

c

d

e

Figura 16 - Esquema do ciclo de produção em um equipamento de vibropressagem. A – posicionamento da fôrma e avanço da gaveta B – alimentação C – gaveta retorna à posição original D – compactação E – subida da fôrma. (OLIVEIRA, 2004)

Normalmente é feito o controle de processo através do tempo de compactação, quando este tempo está acima do esperado costuma-se reduzir o tempo de alimentação, pois a dificuldade na compactação pode ser resultado de excesso de material. Porém, de fato, este aumento de tempo pode ocorrer devido a alterações na umidade e nas características dos agregados que resultam em aumento no atrito, dificultando a compactação. Outra forma de controlar esta etapa é através da massa das peças recém compactadas.

Atualmente, no processo produtivo vibroprensado não são considerados o comportamento reológico relativo à facilidade de compactação da mistura de concreto. O modo de avaliar a trabalhabilidade do concreto seco costuma ser feita de forma empírica, e depende da experiência do responsável pela produção do concreto, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Prática utilizada para avaliação empírica das características do concreto seco. Considera-se ideal a porção de concreto que após levemente pressionada manualmente apresente coesão entre as partículas sem deixar resíduos na mão.

Há, portanto, a necessidade de se avaliar de maneira quantitativa o comportamento reológico do concreto seco durante o processo de prensagem. Para tanto, pode-se lançar mão de técnicas que reproduzam os esforços de prensagem na massa.

Porém quaisquer estudos no concreto seco barram na dificuldade de moldar em laboratório corpos de prova que reproduzam as características de fábrica. No trabalho de FRASSON (2000) os corpos de prova foram moldados de forma similar a corpos de prova de argamassa, utilizando molde bipartido e um soquete para compactação (Figura 18). Este método, porém, sofre influência do operador, além da

aplicação de carga ocorrer de forma diferente ao processo produtivo, sendo assim necessário desenvolver um método que permita a aplicação mecânica de força para compactar o corpo de prova.

Figura 18 - Moldagem de corpos de prova de concreto semelhante aos CPs de argamassa (FRASSON, 2000).

No trabalho de OLIVEIRA (2004) foi desenvolvido um equipamento similar ao ensaio Marshall utilizado em asfalto para moldar corpos de prova de concreto seco, utilizando um soquete com massa deslizante de 5,8kg e altura de queda útil de 53cm, possibilitando a aplicação de até 30 joules/golpe (Figura 19). Ainda que este método já exclua a interferência do operador, e permite uma primeira análise da força necessária para moldar o corpo de prova na densidade desejada, esta análise das características da massa no estado fresco ainda é limitada.

Figura 19 - Equipamento para moldagem de corpos de prova (OLIVEIRA, 2004).

Dessa forma, buscou-se nas metodologias de ensaio de reometria compressiva um método que permitisse estudar as características reológicas do concreto seco assim como moldar em laboratório corpos de prova que reproduzissem as características de fábrica.

3.4.7.2. Reometria compressiva

Dentre as técnicas de reometria compressiva mais usadas, o *squeeze-flow* é o método adequado para ensaios em argamassa e consiste na compressão de uma amostra cilíndrica não confinada entre duas placas paralelas controlando a força aplicada no material e registrando a deformação resultante, conforme o material se espalha para fora da área das placas (Figura 20). A configuração normalmente adotada utiliza uma amostra com diâmetro igual o da placa superior e espessura inicial de 10mm, podendo ser alterada em casos específicos. (CARDOSO; PILEGGI, 2010).

Figura 20 - Ensaio de *squeeze-flow* (Acervo ABCP).

Para simular o que ocorre com o concreto seco durante sua aplicação na produção de peças de concreto para pavimentação é necessário que o material esteja confinado, portanto o método de *squeeze-flow* não é adequado. No trabalho de DELALONDE et al (1995) foi desenvolvido um equipamento para a caracterização reológica de dispersões de pós através da prensagem uniaxial da massa, onde um pistão aplica compressão na amostra confinada em molde rígido com diâmetro correspondente permitindo medir a compressibilidade da mistura (Figura 21).

Figura 21 - Esquema do reômetro compressivo (DELALONDE et al, 1995).

Este equipamento foi utilizado para caracterizar dispersões de celulose microcristalina na compressão e relaxação. Na fase de compressão é possível obter informações da variação de densidade em relação à força aplicada pelo pistão e na fase da relaxação, é possível verificar seu comportamento quanto à viscoelasticidade. No trabalho de DELALONDE *et al* (1995) foram escolhidos os resultados com a melhor relação água/celulose de acordo com o ensaio de fluxo realizado previamente obtendo uma curva de força x tempo para as duas fases (Figura 22).

Figura 22 - Curvas de força x tempo em dispersões de celulose microcristalina utilizando o reômetro compressivo (DELADONDE *et al*, 1995).

A adaptação deste método uso em concreto seco é a proposta deste trabalho.

3.4.8. Cura

A cura tem como objetivo evitar a perda de umidade do concreto garantindo assim a hidratação adequada do cimento resultando em uma peça de concreto com a resistência mecânica e durabilidade esperada (MEHTA, MONTEIRO, 2008). A cura de peças de concreto para pavimentação é similar à cura dos demais concretos utilizados em pré-moldados e pode ser feita através de métodos simples como cobertura com lona plástica, cura em câmara úmida e cura a vapor. Os métodos mais eficientes são a cura úmida por aspersão de água e a cura a vapor em ambiente saturado, sendo que o tipo de cimento utilizado na produção da peça determina o método cura mais adequado para garantir o ganho rápido de resistência mecânica em idades iniciais, condição necessária na produção de peças de concreto (FERNANDES, 2008).

3.4.9. Controle de qualidade

No controle de qualidade das peças de concreto a ABNT NBR 9781 (1986) fornece requisitos de dimensão, tolerâncias, análise visual e resistência à compressão. Outros parâmetros que não considerados nesta norma, como a resistência à abrasão, densidade e porosidade tem influência na durabilidade do produto, ou podem ser usado como controle de qualidade na fábrica.

3.4.9.1. Dimensões e tolerâncias

A ABNT NBR 9781 (1986) define as dimensões máximas das peças em 400mm de comprimento, largura mínima de 100mm e espessura mínima de 60mm . Outras normas, como a CEN EN 1338 (2003) e a ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas) NTC 2017 (2007) não limitam apenas dimensões máximas, mas definem uma relação entre o comprimento e a espessura que deve ser menor ou igual a 4.

Sendo assim, não se limitam espessuras menores que 60mm desde que a dimensão da peça seja suficiente para não comprometer seu desempenho. No pavimento intertravado essa relação tem grande importância no desempenho do sistema, peças com grandes larguras e pequena espessura não proporcionam o intertravamento e o pavimento deixaria de ter um comportamento flexível, além de serem peças mais suscetíveis à ruptura (HALLACK, 2008). Quanto a variação dimensional, a ABNT NBR 9781 (1986) limita em 3 mm no comprimento e largura

das peças e 5 mm na altura. As variações dimensionais têm relação com o ajuste do equipamento e com o desgaste das fôrmas e influenciam o aspecto visual do pavimento e também dificultam o assentamento das peças, e podem levar a irregularidades na superfície do pavimento.

3.4.9.2. Avaliação visual

A ABNT NBR 9781 (1986) especifica a inspeção visual nas peças de concreto para verificar a existência de defeitos, porém não entra em detalhes como fazer esta inspeção. Já a CEN EN 1338 (2003) detalha o modo como a inspeção visual deve ser feita, especificando requisitos de aparência, textura e cor. Quanto à aparência das peças, deve ser observada a presença de fissuras ou descamações, e no caso de peças com duas camadas, se há delaminação entre elas. No caso da textura e da cor devem ser comparadas as peças de um lote para verificar se não há diferenças com o que foi especificado pelo fabricante.

Aspectos visuais também são indicativos de deficiências na produção das peças, quando ao observar a tonalidade de diferentes peças de um mesmo lote após serem molhadas (Figura 23). A variação de tonalidade nas peças, é um indicativo da variação da absorção de água, onde as peças mais escuras tem maior absorção, portanto são mais porosas e suscetíveis a problemas de durabilidade (FERNANDES, 2008).

Figura 23 - Pavimento intertravado com peças de concreto com variação na absorção de água.

Outro indicativo é a diferença de coloração nas peças do mesmo lote, causado por variações na umidade da mistura, onde misturas mais secas apresentam

tonalidades mais escuras. Essa variação demonstra variação na densidade das peças, parâmetro correlacionado com a resistência mecânica (OLIVEIRA, 2004).

Arestas irregulares (Figura 24) nas peças de concreto são indicativos de teor de umidade insuficiente na mistura resultando em problemas de coesão e compactação (FERNANDES, 2008).

Figura 24 - Arestas irregulares (Acervo ABCP).

3.4.9.3. Resistência mecânica

No controle de qualidade do concreto normalmente se especifica a resistência mecânica dado que esta propriedade possui método de ensaio relativamente simples e está correlacionada com outras propriedades (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

No requisito de resistência, a ABNT NBR 9781 (1986) exige resistência à compressão característica maior ou igual a 35MPa para solicitação de veículos comerciais e maior ou igual a 50MPa para tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão. O ensaio de resistência à compressão é feito conforme a ABNT NBR 9780 (1986) que consiste em acoplar duas placas auxiliares de dimensão $90\pm 5\text{mm}$ na prensa de laboratório de modo que fiquem alinhadas e então posicionar a peça centralizada nestas placas. Inicia-se então o carregamento continuamente até a ruptura completa por compressão Figura 25.

Figura 25 - Ensaio de determinação de resistência mecânica conforme ABNT NBR 9780 (1986).

A resistência mecânica das peças de concreto pode ainda ser determinada utilizando compressão em toda a face da peça, conforme adotado pela ASTM C-936 (2008), onde os requisitos são de no mínimo 55MPa na média, e nenhuma peça deve ter menos de 50MPa.

3.4.9.4. Resistência à abrasão

O requisito de abrasão não é atualmente citado na ABNT NBR 9781 (1986) e está relacionado ao desgaste do produto e, portanto tem grande influência na utilização final no caso de pavimentos. A resistência a abrasão depende principalmente das características da superfície da peça, sendo a camada de 1-3mm do topo crítica para esse requisito, como pode ser observado Figura 26. Os teores de cimento, de água, o tipo de cimento, de agregado, a utilização de pigmentos e o tipo de cura são fatores que vão influenciar a resistência à abrasão. Ainda que exista uma correlação entre resistência à compressão e abrasão, nem sempre essa relação é verificada, e peças com resistência à compressão adequada podem apresentar baixa resistência à abrasão devido a problemas na superfície da peça (ASLANTAS, 2004).

Figura 26 - Peça de concreto com baixa resistência à abrasão.

Para a avaliação desta propriedade está disponível o método ensaio da CEN EN 1338 (2003) onde a abrasão se dá pelo desgaste causado pelo contato da peça de concreto com um material abrasivo pressionado por um cilindro metálico ou o método de ensaio da ASTM C 418-05 (2005) onde a abrasão ocorre por jateamento de areia contra a peça de concreto.

Figura 27 - Esquema dos equipamentos de resistência à abrasão.

(A) – Abrasão com desgaste através de cilindro metálico e material abrasivo adotado pela CEN EN 1338. (EN 1338, 2003).

(B) – Abrasão por jateamento de areia adotado pela ASTM C 418-05. (Acervo ABCP).

3.4.9.5. Densidade

Uma peça de concreto bem compactada é resultado de uma boa mistura e eficiência do equipamento de vibrocompressão, sendo usado como referência para peças de concreto uma massa específica entre 2200 a 2300 kg/m³ (FERNANDES, 2008). A densidade está correlacionada com a resistência mecânica e assim pode ser utilizada como controle de qualidade na fábrica. Logo após a moldagem determina-se este parâmetro e caso esteja abaixo do esperado podem ser feitas correções na produção.

3.4.9.6. Porosidade

A porosidade do concreto está relacionada à condução de agentes degradantes ao interior da peça, e assim tem influência na durabilidade e ainda pode ser correlacionada com a resistência mecânica (MEHTA, MONTEIRO, 1994). Peças de concreto com baixa porosidade vão apresentar melhor desempenho em relação à durabilidade quanto ao ataque de sais e carbonatação (BULLEN, 1992).

A formação dos poros nas peças de concreto depende, entre outras coisas, do empacotamento das suas partículas e da reatividade dos grãos que podem alterar a microestrutura conforme a evolução das reação de hidratação. Esses poros podem ser do tipo fechados ou isolados, abertos, interconectados ou permeáveis (Figura 28). Os fechados não possuem nenhuma ligação com o meio externo e assim não tem ligação com os fenômenos de transporte. Os poros abertos tem ligação com o meio externo, mas não se conectam a nenhum outro poro, enquanto os interconectados tem ligação com o meio externo e também a outros poros. Já os poros permeáveis tem ligação com o meio externo de uma face à outra do meio poroso (SENTONE, 2011).

Figura 28 - Tipos de poros. A – poro fechado B – poro aberto C – poro interconectado D – poro permeável (SENTONE, 2001).

A relação entre a quantidade de poros interconectados em função do total de espaços vazios, denominada porosidade efetiva é um parâmetro fundamental para a permeabilidade dos materiais (SENTONE, 2011). Ainda têm influência, o tamanho dos poros e sua tortuosidade, ou seja, o tamanho médio efetivo do caminho de um fluido para atravessar um meio poroso (SCHEIDEGGER, 1974).

O transporte de massa em meios porosos se dá por difusão, capilaridade e permeabilidade. A permeabilidade de um material poroso pode ser definida como a medida macroscópica da facilidade a qual um fluido pode fluir através dos espaços de um meio poroso (INNOCENTINI; SEPULVEDA, ORTEGA, 2005). Ou seja, o fenômeno da permeabilidade refere-se à capacidade de transporte de um fluido através de um meio poroso impulsionado por um gradiente de pressão entre o material e o meio externo, tratando da interação fluido e estrutura porosa, não sendo uma propriedade intrínseca a nenhum dos materiais (SENTONE, 2011).

A difusão corresponde ao transporte de massa, em nível molecular, impulsionado pela ocorrência de um gradiente de concentração entre dois meios, no sentido da maior concentração para a menor (CALLISTER, 2002). Este fenômeno é o principal responsável pela entrada de gás carbônico em materiais cimentícios, principalmente na fase gasosa, podendo provocar reações de carbonatação (HELENE, 1993). A absorção capilar é ocasionada pelas tensões capilares e ocorre logo após o contato superficial do líquido com o meio poroso. Ao contrário da permeabilidade, este fenômeno é a medida do fluxo de um líquido sob pressão em materiais não saturados (MOREIRA; FIGUEREIDO, HELENE, 2001). No caso do concreto, a capilaridade é responsável pelo transporte de íons ao seu interior (HELENE, 1993).

Os poros abertos e interconectados permitem o transporte de massa através de difusão e capilaridade, enquanto os poros permeáveis permitem os três tipos de transporte de massa.

A porosidade das peças de concreto normalmente é avaliada através do ensaio de absorção de água. Neste trabalho também se propõe a avaliação da porosidade através do método de permeabilidade ao ar.

3.4.9.7. Absorção de água

A determinação de absorção de água na peça de concreto consiste na razão da massa seca e da massa saturada. O transporte da água se dá por capilaridade e preenche apenas parte dos poros abertos, interconectados e permeáveis. Para permitir maior entrada de água nos poros as peças podem ser fervidas, porém a alta temperatura modifica a microestrutura do concreto. Também pode ser utilizado um dessecador, com o intuito de expulsar o ar dos poros e assim permitir maior entrada de água.

Na Figura 29 pode-se observar que a absorção de água tem relação diretamente proporcional com a resistência mecânica. A CEN EN 1338 (2003) especifica absorção de água igual ou inferior a 6% e pode-se se observar na Figura 29 que as amostras que não atenderem este requisito apresentaram resistência mecânica inferior a 35MPa, ou seja, de acordo com a ABNT NBR 9781 estariam reprovadas.

Figura 29- Relação entre resistência à compressão e absorção de água. Os resultados em destaque possuem absorção de água inferior à 6% e resistência mecânica superior a 35MPa, atendendo assim os dois requisitos de acordo com a CEN EN 1338 e ABNT NBR 9781, respectivamente (CE-18:600, 2011).

Apesar do método não fornecer um indicativo preciso da porosidade das peças a absorção de água pode ser usada como controle da produção, fornecendo um indicativo da resistência mecânica da peça. Porém, este método de ensaio, apesar

de simples, tem duração de cerca de 48 horas para ser executado, não permitindo uma avaliação rápida da porosidade.

3.4.9.8. Permeabilidade ao ar

Outro método para avaliar a porosidade do concreto é a determinação da permeabilidade ao ar, onde se obtém a velocidade de percolação do fluxo de ar sob pressão na peça de concreto.

A medida da permeabilidade traz informações sobre o empacotamento de partículas, porosidade, umidade dos poros e problemas estruturais como fissuras e descontinuidades no produto acabado. Dessa forma pode ser utilizado como controle de qualidade no processo produtivo, identificando rapidamente peças com problemas na sua microestrutura. Vale ressaltar que fatores como umidade, temperatura e deformação da estrutura porosa influenciam nesta medida sem, no entanto, estar relacionados a problemas estruturais. (SENTONE, 2011).

Normalmente o cálculo do coeficiente de permeabilidade é feito através da Lei de Darcy, onde a velocidade de um fluido que atravessa um meio poroso homogêneo é constante, no regime laminar, conforme Equação 6:

$$Q = \frac{-kA(\Delta h)}{L} \quad \text{Equação 6}$$

Onde Q (m³/s) corresponde à vazão, k (m/s) à condutividade hidráulica e depende do fluido e do meio poroso, A (m²) é a seção transversal, Δh (m) é a diferença de altura nos piezômetros e L (m) a distância da trajetória do fluxo.

A Lei de Darcy é válida apenas para escoamentos laminares e não considerada efeitos que podem influenciar na medida da permeabilidade, tais como a adsorção, condensação capilar, efeitos de borda e presença de íons no fluido (SCHEIDEGGER, 1974). A correção de tais efeitos pode se dar a partir da adaptação da Lei de Darcy.

Estão disponíveis diversos métodos para avaliação da permeabilidade de materiais porosos, tanto em laboratório como *in situ*.

O método de laboratório *Cembureau* é amplamente aceito e consiste em aplicar uma pressão em regime permanente a um corpo de prova de material poroso determinando a pressão de saída. O fluxo vai depender da diferença da pressão, da

espessura do corpo de prova, da estrutura dos poros e da viscosidade do gás utilizado no teste. O coeficiente de permeabilidade é calculado utilizando uma adaptação da Lei de Darcy para fluidos compressíveis sob condições de fluxo estacionário (KOLLEK, 1989).

Dos métodos de avaliação de permeabilidade *in situ* podem ser citados os de superfície e os intrusivos. Os de superfície são aplicados diretamente à superfície do concreto, sendo os principais os métodos de Schönlin, Autoclam, Torrent e Zia-Guth. Os intrusivos utilizam orifícios no concreto executados para realização dos ensaios e são eles os Figg-Poroscope, TUD, Parrot, Paulmann and Germann (TORRENT, 2007). Os métodos de superfície trazem como vantagem de serem não destrutíveis.

O método de Schönlin propõe o decaimento de vácuo para medição da permeabilidade, onde uma câmara é posicionada na superfície do concreto e é aplicado vácuo na superfície do concreto até uma pressão média de 20 mBar, quando desliga-se a bomba e a válvula é fechada (Figura 30). Mede-se então o decaimento de pressão por tempo até a estabilização com a pressão atmosférica, causado pelo fluxo estacionário através do corpo de prova.

Figura 30 - Esquema do método de Shönlin (Torrent, 2007).

Pode então ser determinada uma constante de permeabilidade através de uma equação adaptada da Lei de Darcy, porém o método desconsidera algumas condições de contorno que tornariam a Lei de Darcy inválida.

O método Autoclam mede permeabilidade ao ar através de materiais porosos, tanto em laboratório como *in situ*. A câmara simples é posicionada na superfície do material e a sua pressão interna é aumentada acima de 0,5 bar utilizando uma seringa conectada à tubulação de retirada do ar, quando inicia-se o teste, medindo o decaimento da pressão por 15 minutos ou até a pressão chegar à zero (TORRENT, 2007).

Figura 31 - Equipamento Autoclam (Torrent, 2007).

Determina-se então o coeficiente de permeabilidade ao ar como o valor absoluto da inclinação da reta no gráfico entre 5 minutos e 15 minutos. Caso o teste não chegue a duração de 15 minutos este coeficiente pode ser calculado utilizando uma aproximação gráfica (TORRENT, 2007).

O método de Torrent também utiliza o decaimento de vácuo, mas neste caso a aplicação se dá em uma câmara dupla, onde a câmara externa tem a pressão regulada por todo o ensaio para excluir a influência do ar que possa vir da superfície, garantindo assim o fluxo unidirecional, permitindo a determinação do coeficiente de permeabilidade k utilizando a Lei de Darcy.

O ensaio consiste em aplicar vácuo nas duas câmaras até que estejam fixas na superfície, então a Válvula 2 (Figura 29) é fechada, permitindo a entrada de ar na câmara interna apenas. O aumento da taxa de pressão é registrado e está relacionado diretamente à permeabilidade do material testado. O teste é finalizado

quando a câmara interna atinge uma pressão de aproximadamente 20mbar ou após 12 minutos.

Figura 32 - Esquema do método de Torrent (Torrent, 2007).

O método Zia-Guth também trabalha com permeabilidade ao ar em uma câmara dupla, onde após estabelecer o vácuo nas duas câmaras é permitida a entrada de ar da câmara externa para a interna através do concreto, sendo medida a taxa de aumento de pressão na câmara interna (Figura 33).

Figura 33 - Esquema método (Torrent, 2007).

O teste resulta em uma curva de pressão por tempo. Para obter um coeficiente de permeabilidade a curva obtida no teste é comparada com curvas teóricas disponibilizadas pelos autores do método para diferentes coeficientes escolhendo a mais próxima (Figura 34).

Figura 34 - Curvas teóricas para diferentes coeficientes de permeabilidade (Torrent, 2007).

Ainda utilizando a técnica de decaimento de vácuo foi desenvolvido um equipamento utilizando câmara simples e *software* de aquisição de dados desenvolvido pelo Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini com financiamento do CNPQ (CNPq Universal

n. 019/2004, processo 474155/2004-8). A técnica consiste em posicionar uma ventosa cilíndrica ligada a uma bomba à vácuo na superfície da peça a ser analisada. Um transdutor de pressão mede a pressão no interior da ventosa, e após a bomba ser acionada essa pressão é reduzida até um valor desejado. Então o fornecimento de ar é interrompido e a pressão dentro da ventosa eleva-se devido à permeação do ar atmosférico através da amostra, até que a pressão no interior da ventosa se iguale a pressão atmosférica. O ensaio mede a pressão no interior da ventosa em função do tempo. Quanto mais rapidamente ocorre a recuperação de pressão no interior da ventosa, maior é a permeabilidade da peça (Figura 35).

Figura 35 - Detalhe do ensaio pela técnica de decaimento de vácuo (INNOCENTINI, 2007).

Este equipamento desenvolvido por INNOCENTINI (2007) foi adaptado para um protótipo móvel conforme Figura 36.

Figura 36 - Permeômetro a ar *in situ* (SENTONE, 2011).

O equipamento conta com uma bomba à vácuo ligada a uma câmara que fica em contato com a superfície da amostra. Ao ligar a bomba à vácuo um transdutor registra as variações de pressão ao longo do tempo de ensaio, que são coletadas por uma placa aquisidora de dados e registradas no *software* da placa. Através de um mostrador digital é possível controlar visualmente o momento de estabilização da pressão de vácuo quando a bomba é acionada, e da pressão atmosférica, marcando o final do ensaio. O equipamento conta ainda com uma válvula solenóide que restringe o fluxo de ar no sentido dos corpos de prova para à bomba de vácuo garantindo que a recuperação de vácuo ocorra de uma face para a outra da amostra (Figura 37)

Figura 37 - Esquema de funcionamento do aparelho de permeabilidade e detalhamento das dimensões da câmara de vácuo. Onde: A – Bomba de vácuo; B – Câmara de vácuo; C – Mostrador de pressão digital; D – Transdutor de pressão; E – Placa aquisitora de dados (data-logger); F – Válvula solenoide; G – Computador. (SENTONE, 2011).

A técnica permite a análise quantitativa dos dados ao determinar o coeficiente de permeabilidade k e também a análise qualitativa, ao comparar os dados experimentais com valores de referência, sendo assim uma alternativa para o controle de qualidade do processo produtivo.

Em comum, esses métodos atuam com o princípio de aplicar pressão na superfície do concreto através de uma câmara selada e registram a taxa da pressão até o equilíbrio. Essa taxa é diretamente relacionada a permeabilidade já que o fluxo ocorre através dos poros do material ensaiado (TORRENT, 2007).

A determinação da permeabilidade ao ar é um ensaio rápido e de fácil execução e que permite uma avaliação melhor da porosidade do concreto em relação ao ensaio de absorção de água, podendo tanto ser feito de forma qualitativa como quantitativa, determinado o coeficiente de permeabilidade k , dependendo do método de ensaio adotado e da observação das condições de contorno para validade de Lei de Darcy.

Neste trabalho será estudado o método proposto por SENTONE (2011) para avaliar a qualidade das peças de concreto.

3.4.10. Paletização e armazenagem

Na última etapa do processo produtivo, as peças são estocadas, paletizadas para evitar assim quebras, e são entregues desta forma ao cliente final.

3.5. Aspectos críticos do processo de vibrocompressão

Apesar do uso bastante difundido do pavimento intertravado, observando as peças disponíveis no mercado ainda se verifica grande variabilidade na qualidade, tanto entre diferentes fabricantes como entre peças de um mesmo fabricante, como descrito no Item 3.3. O processo é muito dependente do equipamento utilizado pelo fabricante, e existem uma grande número de fabricante e porte de vibrocompressoras. A dependência do equipamento também dificulta a realização de pesquisas com o concreto seco ao exigir que a fábrica interrompa a linha de produção para realização de testes *in loco*.

Após a análise do processo produtivo descrito no Item 3.4 foram verificados os pontos críticos do processo e quais ações poderiam ser tomadas com o intuito de uniformizar e melhorar o processo de fabricação, buscando assim maior qualidade no produto final. Na Figura 38 estão as principais etapas já descritas e quais seriam essas ações.

Na definição da matéria-prima observa-se a necessidade de melhor detalhar a caracterização dos materiais, em especial dos agregados, para assim ser possível aplicar as teorias de empacotamento de partículas com o objetivo de otimizar a formulação.

Partindo para o concreto seco no estado fresco, observa-se a inexistência de técnicas de caracterização neste estado. Na etapa de mistura podem ser aplicadas técnicas de caracterização reológica e assim verificar os melhores tempos e ordem de entrada de materiais.

Na etapa de vibroprensagem, que pode ser considerada a etapa mais crítica no processo, não são realizados quaisquer tipos de controles sistematizados, sendo este controle baseado em métodos empíricos e observações que dependem da experiência do operador do equipamento. Nesta etapa propõe-se a aplicação de técnicas de caracterização reológica sob o esforço de compressão com o objetivo de caracterizar de forma sistematizada o concreto seco. Esta técnica permitiria ainda a realização de ensaios em laboratório, facilitando assim estudos de novas formulações ao desvincular a necessidade de testes no equipamento da fábrica. A

técnica de caracterização reológica gera ainda um corpo de prova que pode ser utilizado para a caracterização no estado endurecido.

Por fim, no controle de qualidade a adoção do método de permeabilidade ao ar permitiria um controle rápido e simples das peças de concreto já acabadas.

Figura 38 – Processo produtivo vibroprensado para peças de concreto e sugestões para aperfeiçoar o processo.

Sendo a etapa de vibroprensagem a mais crítica do processo, neste trabalho foi focado o desenvolvimento de uma técnica para a caracterização reológica do

concreto seco durante sua prensagem. Além do desenvolvimento desta técnica, também verificou a validade da utilização do método de permeabilidade ao ar como controle de qualidade das peças de concreto.

4. Plano de trabalho

Neste trabalho foram desenvolvidas ferramentas e técnicas aplicadas em reologia compressiva para avaliar o processo de vibroprensagem em laboratório. O método desenvolvido permite obter corpos de prova que pode ser caracterizados tanto no estado fresco como no estado endurecido, facilitando o desenvolvimento de dosagens para concreto seco.

Para aferir o método proposto utilizou-se como referência peças fabricadas em uma indústria com a utilização de uma vibroprensa hidráulica de alta capacidade de compactação da marca SCHLOSSER.

Nesta indústria, foram coletadas amostras de peças de concreto e foram avaliadas suas características no estado endurecido com o objetivo de compará-las com as características obtidas nos corpos de prova produzidos no ensaio de reometria compressiva. Os corpos de prova produzidos no laboratório, utilizaram a mesma formulação e materiais das amostras produzidas na fábrica de referência.

Durante o ensaio de reologia compressiva, também se avaliou a recuperação elástica, neste caso, com o objetivo de estudar o comportamento da mistura de concreto seco e verificar a sensibilidade desta propriedade que pode ser utilizada posteriormente nos estudos de formulações. Esta técnica de ensaio gera um corpo de prova que é utilizado após a cura para as caracterizações no estado endurecido.

No estado endurecido do concreto seco, já na etapa controle de qualidade, foi aplicada a técnica de determinação da permeabilidade ao ar através do decaimento de vácuo nos corpos de prova obtidos após o ensaio de reometria compressiva, verificando assim a funcionalidade dessa técnica no controle de qualidade das peças de concreto.

5. Materiais e métodos

5.1. Materiais

Na fábrica de referência foram coletadas as peças de concreto, os agregados e o aditivo, para posteriormente reproduzir o traço da fábrica em laboratório. O cimento utilizado foi o cimento CP IV ARI.

5.2. Caracterização no estado fresco

As técnicas descritas a seguir foram utilizadas no concreto seco produzido em laboratório ainda no estado fresco, sendo que a técnica de reometria compressiva foi adaptada para determinar dois parâmetros importantes para a análise deste material: a densidade verde e a recuperação elástica.

5.2.1. Reometria compressiva

O método de ensaio proposto, foi adaptado para o concreto seco a partir da metodologia descrita por DELADONDE et al (1995) e apresentada no item 3.4.7, em que a massa de concreto fica confinada no molde rígido e é prensada até atingir a coesão e compacidade desejada. Obtendo-se os dados de força, tempo e deslocamento do pistão, é possível estudar características importantes da massa, simulando assim as condições que ocorrem no processo vibroprensado. Para adaptação do método foi necessário desenvolver peças e equipamentos específicos para este estudo, permitindo assim a prensagem da mistura de concreto seco e extração de corpos de prova íntegros para posteriores caracterizações no estado endurecido.

5.2.2. Densidade verde

A densidade verde é determinada logo após a desmoldagem do corpo de prova, 24 horas após o ensaio de reometria compressiva. Considerou-se a massa utilizada no ensaio de reometria e o volume determinado com as dimensões obtidas após a desmoldagem (Equação 7).

$$Densidade\ verde = \frac{Massa\ inicial}{Volume\ corpo\ de\ prova} \quad \text{Equação 7}$$

5.2.3. Recuperação elástica

A recuperação elástica é determinada através da diferença da altura após a desmoldagem do corpo de prova, medida com o auxílio de um paquímetro e a altura inicial do corpo de prova, sendo esta obtida na prensagem durante o ensaio de reologia compressiva (Equação 8).

$$\text{Recuperação elástica} = \text{Altura após 24hs} - \text{Altura inicial} \quad \text{Equação 8}$$

5.3. Caracterização no estado endurecido

As técnicas no estado endurecido foram utilizadas nos corpos de prova produzidos em laboratório e naqueles obtidos na amostra de referência.

5.3.1. Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica são determinados com base na ABNT NBR 9778 (2009), sendo necessárias algumas modificações no método de ensaio. Os corpos de prova não foram submetidos à temperaturas acima de 50°C para não ocorrer perda de resistência devido a decomposição do C-S-H do cimento hidratado. Sendo assim, os corpos de prova foram mantidos na estufa com temperatura à 40°C e utilizou-se um dessecador para substituir a fervura, utilizado para retirar ar dos corpos de prova. O dessecador consiste em um recipiente de vidro onde são colocadas as peças imersas em água destilada e através de uma bomba à vácuo retira-se o ar dos poros permeáveis. As peças foram mantidas na estufa a 40°C até constância de massa e em seguida pesadas para determinar a massa seca (m_s). As mesmas peças são submersas durante três dias e colocadas no dessecador para retirada de todo o ar dos poros permeáveis. As peças são então pesadas na balança hidrostática para determinação da massa imersa (m_i), e pesadas para determinação da massa saturada (m_{sat}). Com essas três valores calculam-se os parâmetros desejados de acordo com as Equações 9, 10, 11, 12, 13:

$$\text{Absorção: } A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

$$\text{Índice de vazios: } IV = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

$$\text{Massa específica da amostra seca: } \rho_s = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad \text{Equação 11}$$

$$\text{Massa específica da amostra saturada: } \rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad \text{Equação 12}$$

$$\text{Massa específica da amostra saturada: } \rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Equação 13}$$

5.3.2. Resistência mecânica

A resistência mecânica dos corpos de prova foi determinada conforme a ABNT NBR 5739 (2007) que trata do ensaio para determinação de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Os ensaios foram feitos com os corpos de prova saturados e capeados com pasta de enxofre. A resistência à compressão foi calculada de acordo com a Equação 14.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad \text{Equação 14}$$

onde:

f_c é a resistência à compressão, em MPa;

F é a máxima força alcançada, em Newtons;

D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros.

Como os corpos de prova possuem relação h/d menor que 1,94 foi necessário corrigir a força F de acordo com o fator de correção indicado na Tabela 2:

Tabela 2 - Fator de correção para a força ABNT NBR 5739 (2007)

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Como indicado na ABNT NBR 5739 (2007), nos casos onde a relação h/d não está indicada na Tabela 2, adota-se a interpolação linear.

5.3.3. Permeabilidade ao ar

Para determinar a permeabilidade ao ar dos corpos de prova foi utilizada uma adaptação da metodologia de ensaio proposta por SENTONE (2011) utilizando o

equipamento desenvolvido pelo Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini conforme Item 3.4.9.8.

5.3.3.1. Parâmetros de ensaio

O procedimento do ensaio proposto por SENTONE (2011) para corpos de prova de argamassa consiste em secar em estufa os corpos de prova até constância de massa e posicionar o corpo de prova em uma superfície vazada de forma a não impedir o fluxo de ar (Figura 39). Neste trabalho os ensaios foram realizados com umidade ambiente, registrando a umidade do ar no momento do ensaio.

Figura 39 - Placa de apoio perfurada para realização dos ensaios.

Para garantir que o fluxo de ar ocorra exclusivamente entre a superfície inferior e superior as laterais dos corpos de prova podem ser seladas, neste caso foi utilizada resina epóxi. Também foram feitos ensaios com corpos de prova não selados para avaliar a influência deste fator.

O *software* de aquisição de dados permite controlar a velocidade de leitura, ou seja, quantos pontos por segundo serão coletados e a velocidade de gravação de dados, ou seja, quantos pontos serão coletados em 1 segundo. Antes de iniciar o ensaio propriamente dito deve ser criado vácuo na parte superior do corpo através do acionamento da bomba, sendo observado no mostrador digital do equipamento um patamar de pressão de estabilização máximo obtido, que vai depender do material do corpo de prova estudado. Quanto menos poroso o material maior será o resultado da estabilização. Para materiais com baixa porosidade ou praticamente

impermeáveis, como o caso dos metais, este patamar é atingido a $-0,90 \pm 0,01$ bar. Valores de estabilização inferiores à este já indicam maior porosidade, tamanho elevado dos poros, fissuras e quebras. Também podem indicar vazamentos no equipamento, dessa forma indica-se antes de iniciar as medições verificar se a estabilização em uma superfície metálica atinge o patamar indicado (SENTONE, 2011).

Após a estabilização se dá início ao ensaio, sendo adotado que depois de 30 segundos antes de desligar a válvula solenoide e a bomba à vácuo, evitando assim a perda de pontos iniciais. Após o desligamento permite-se a recuperação de ar através dos poros do corpo de prova, e são coletados os pontos de pressão-tempo. O ensaio termina quando ocorre a estabilização da pressão com a pressão atmosférica.

Cada corpo de prova foi ensaiado três vezes e cada amostra consistia em três corpos de prova.

5.3.3.2. Tratamento de dados

Para obter as curvas de pressão x tempo o *software* gera uma planilha de Excel com estes pontos, sendo desprezados os primeiros 30 segundos referentes ao período de estabilização da pressão. As curvas foram traçadas com a média de cada corpo de prova e média de cada amostra.

Ainda que esse método de ensaio permita análises quantitativas, neste trabalho foi feita apenas a análise qualitativa, comparando os tempos de recuperação através das curvas de pressão x tempo. Como os corpos de prova apresentavam espessuras diferentes, este fator poderia levar à discrepâncias na determinação do coeficiente de permeabilidade k , e sendo o objetivo do ensaio funcionar como controle de qualidade produtivo este coeficiente não seria necessário.

Esta análise permite comparar a permeabilidade de diferentes materiais, permitindo a sua utilização como forma de controle de qualidade da produção.

6. Resultados e discussões

6.1. Caracterização das peças da amostra de referência

Para permitir uma melhor comparação entre as peças produzidas na fábrica e as geradas após o ensaio de compactação foram extraídos das peças inteiras coletadas na fábrica corpos de prova com diâmetro de 5 cm com auxílio de uma sonda rotativa (Figura 40).

Figura 40 – Utilizando uma sonda rotativa foram extraídos corpos de prova com diâmetro de 5cm da amostra de peça de concreto coletada na fábrica de referência.

Essas peças foram caracterizadas no estado endurecido e os resultados estão reunidos na Tabela 3. A densidade verde foi estimada considerando uma umidade de 6% na massa com o objetivo de posteriormente comparar esta característica com os corpos de prova moldados no ensaio de reometria compressiva. Este dado de umidade foi obtido com o fabricante.

Tabela 3 – Resultados da caracterização no estado endurecido

Requisito	Ref. da fábrica
Densidade Verde (kg/m ³)	2283
Densidade Seca (kg/m ³)	2154
Resistência à compressão axial (MPa) e desvio padrão	29,06 ±9,03
Coefficiente de Variação da resistência	31%
Absorção de água (%)	6,88

6.2. Desenvolvimento do ensaio de reometria compressiva

Para adaptar a metodologia proposta foi necessário desenvolver dispositivos específicos para este método de ensaio. Na Figura 41 está a representação esquemática do projeto dos componentes desenvolvidos: base de apoio ao molde (Figura 41-A), pistão para aplicação da força de compactação (Figura 41-B), molde bipartido para o corpo de prova (Figura 41-C) e cilindro para manter o molde fixo e suportar a aplicação de força durante a compactação do corpo de prova (Figura 41-D). A Figura 41-E apresenta o conjunto montado para o ensaio.

Figura 41 - Ferramentas desenvolvidas para compactar os corpos de prova de concreto seco. A – base de apoio para o molde. B – pistão para aplicação da carga. C – molde bi-partido D – suporte do molde E – peças posicionadas para o ensaio.

Foi adotado o diâmetro de 50mm para o molde com base no diâmetro máximo permitido para o agregado em peças de concreto para pavimentação de 12,7mm.

O conjunto permite suportar as cargas de compactação e obter um corpo de prova íntegro. Estes dispositivos foram acoplados em uma máquina universal de ensaios, neste caso uma EMIC DL 10000 com célula de carga de 100kN obtendo assim um equipamento similar ao utilizando por DELADONDE et al (1995). Estas peças foram montadas conforme a Figura 42.

Figura 42 – Sistema posicionado para prensar a massa de concreto seco.

Para permitir a retirada do corpo de prova íntegro foi necessário desenvolver um equipamento de extração do molde bipartido do suporte. O funcionamento do equipamento está esquematizado na Figura 43 onde o molde e o corpo de prova são posicionados no equipamento, este é travado através de parafusos e utilizando um motor elétrico o molde é empurrado para fora do cilindro.

Figura 43 – Funcionamento do extrator de corpos de prova. A – equipamento sem o molde. B – colocação do molde. C – molde fixo no equipamento.

Na Figura 44 observa-se uma foto ilustrativa do corpo de prova sendo extraído do molde utilizando o equipamento desenvolvido.

Figura 44 – Molde bipartido sendo extraído do suporte

6.2.1. Parâmetros de ensaio

No processo produtivo vibroprensado a mistura é colocada mecanicamente no molde e aplica-se uma força de compactação para conformar a peça. O controle na fábrica é feito no tempo de alimentação da mistura, quando insuficiente as peças serão menos compactas e quando excessivo as peças terão dimensão superior a necessária (FERNANDES, 2008). Isto ocorre pois quando em excesso, não é possível compactar a mistura na altura desejada.

No método de ensaio proposto a mistura foi colocada manualmente no molde, e a forma de simular o tempo de alimentação foi obtida variando-se a quantidade de massa. Já o programa da prensa de ensaio permitiu a variação da velocidade de deslocamento do pistão e a execução de dois tipos de testes, controlando a força máxima a ser atingida ou a altura desejada para o corpo de prova, configurando a posição de parada do pistão. Dessa forma, foi possível fixar uma determinada força e verificar o quanto ela compacta uma determinada massa de concreto seco ou ainda fixar uma altura para o corpo de prova e verificar qual foi a força necessária para compactá-lo.

Para cada ensaio foram moldados de 6 até 12 corpos de prova, limitando em no máximo 1 hora de moldagem para evitar o início da pega do cimento, o que poderia afetar os resultados.

6.2.2. Tratamento de dados

Foram obtidas informações de força x deformação x tempo, permitindo a análise das características relativas à compactação da mistura de concreto. Os primeiros pontos obtidos têm força zero ou negativa relacionados ao momento anterior ao pistão iniciar a prensagem da mistura e foram desprezados, sendo considerados os pontos de força x deformação x tempo após o início da prensagem, ou seja, quando a força passa a crescer. Foram então traçadas as curvas força x deformação para cada corpo de prova e determinada a curva média para cada amostra.

6.3. Caracterização dos materiais

Foram coletados na fábrica os agregados utilizados na produção da amostra de referência, sendo eles o agregado miúdo com $d_{\text{máx}}=4,75$ (areia artificial), agregado miúdo com $d_{\text{máx}} 4,75$ (areia natural) e agregado graúdo com $d_{\text{máx}}=12,5\text{mm}$ (pedrisco). Foi determinada a distribuição granulométrica dos agregados utilizando a série R40/3 de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310 e método de ensaio NBR NM 248 (Figura 45). A utilização da série de peneiras com maior precisão que a série normal adotada usualmente tem como objetivo fornecer informações mais precisas da dimensão dos agregados permitindo assim estudos posteriores de empacotamento de partículas, que exigem uma caracterização mais detalhada dos agregados.

Figura 45 - Distribuição granulométrica retida discreta dos agregados utilizados na formulação da fábrica de referência.

O cimento CP V ARI e o aditivo à base de éter-policarboxilato utilizado na fabricação da amostra de referência e nos estudos de laboratório não foram caracterizados, pois estas medidas não seriam relevantes para o estudo.

6.4. Formulação

A formulação de referência, utilizada nos estudos, foi fornecida pelo fabricante e utiliza proporção de agregados conforme a distribuição granulométrica apresentada na Figura 46, utilizando a série 40/3 de peneiras para obter maior precisão.

Figura 46 - Mistura de agregados da formulação utilizada nas amostras de referência

A proporção de cimento e agregados foi de 1:6,28 e o consumo de cimento da ordem de 317 kg/m³.

A umidade utilizada na mistura não foi a mesma utilizada pela fábrica, sendo necessário ajustar a umidade ideal para a prensagem em laboratório, de acordo com a metodologia desenvolvida.

6.5. Mistura

A mistura dos materiais foi feita em uma argamassadeira Perfecta de 20L sendo adotada a sequência de acordo com o Item 2.4.6. Utilizou-se a velocidade média como padrão.

6.6. Definição da umidade

O teor de umidade do concreto está intimamente ligado ao equipamento, para cada pressão de prensagem existe um teor ótimo de umidade da massa que vai resultar em um valor máximo do grau de compactação e assim a máxima compacidade. Dessa forma, foi necessário definir a umidade ideal para a prensagem em laboratório. A referência de umidade para o concreto seco varia de teores entre 6% e 8% da massa total.

A partir da formulação anidra da fábrica de referência foram feitas misturas com teores de umidade de 6,0%, 6,5%, 7,0%, 7,5% e 8,0% com teor de aditivo fixado 1% da massa de cimento, de acordo com o fabricante do aditivo.

Para a definição de umidade utilizou-se o método proposto de reometria compressiva para testar as formulações com variação de umidade de 6% a 8%. A parada do pistão foi configurada para obter um corpo de prova de 80mm, obtendo assim a mesma espessura da peça da fábrica de referência. O cálculo de massa necessária para moldar cada corpo de prova foi feita com base na massa específica real obtida nas peças da fábrica de referência, 2500kg/m^3 , com um acréscimo de 5% à massa calculada devido a perda de água da peça. Dessa forma, para um corpo de prova de 80mm foi utilizada 435g de massa.

A massa definida foi então colocada no molde, prensada, o molde foi extraído do suporte e imediatamente depois foram retirados os corpos de prova para análise visual.

Observando os corpos de prova obtidos, o teor de umidade adotado foi o maior possível sem que ocorresse dificuldade de desmoldagem, análogo ao que ocorre no processo produtivo vibroprensado, onde quanto maior o teor de água, mais difícil de encher a fôrma, porém mais fácil de compactar, sendo necessário utilizar um teor de umidade ótimo para essas duas condições.

Na análise visual dos corpos de prova, as misturas com umidades de 6,0%, 6,5% e 7,0% os corpos de provas foram extraídos facilmente do dispositivo de moldagem, a partir da mistura com umidade de 7,5% a massa começou a aderir nas paredes do molde e alguns corpos de prova se quebraram. Na mistura com umidade de 8,0% os

corpos de prova se encontravam aderidos ao molde e a maior parte se quebrou no momento de ser desmoldado (Figura 47).

Figura 47 – Corpos de prova após a prensagem. A – umidade de 7,0%; B – umidade de 7,5%; C – umidade de 8,0%.

Foi adotada então umidade de 7,0% por ser o maior teor de umidade onde não se observou quebras dos corpos de prova.

6.7. Execução do ensaio de reometria compressiva

Com umidade de 7,0% foram feitos então ensaios variando a massa dos corpos de prova (T200, T215, T230, T271) simulando a influência do tempo de alimentação no processo de vibrocompressão de acordo com a Tabela 4. A massa inicial foi de 271g (T271), sendo essa massa necessária para resultar em uma massa específica real 2500 kg/m^3 . Nestes testes foi configurada a parada do pistão para obter um corpo de prova com altura de 50mm, com a força máxima sendo aquela ao atingir a altura específica. A altura foi reduzida para atenuar o efeito da variação de densidade ao longo da altura do corpo de prova devido o método de prensagem uniaxial. Foi definida a altura de 50mm para manter a relação altura/diâmetro igual a 1, possibilitando a execução do método de ensaio de resistência à compressão axial de acordo com a ABNT NBR 5739.

Tabela 4 - Informações dos testes realizados

Teste	Massa (g)	Número de corpos de prova	Altura especificada (mm)	Força máxima (kN)
T200	200	60	50	-
T215	215	60	50	-
T230	230	60	50	90
T271	271	48	50	90
T200FM	200	12	-	90

Também foram feitas simulações sem limitar a altura do corpo de prova, T200FM, com o objetivo de avaliar a máxima compactação que a mistura permite. Neste caso, o limitante seria a força máxima aplicada pelo pistão, que no caso foi considerada o limite do equipamento de 90kN. Para este teste optou-se por utilizar a menor quantidade de massa que resulta em corpos de prova com relação altura/diâmetro igual a 1 (200g). Em todos os testes a velocidade de aplicação da carga foi de 1mm/s.

Após a prensagem esses corpos de prova foram imediatamente colocados na câmara úmida ainda no molde-bipartido e desmoldados depois de 24 horas com auxílio de um martelo de borracha para evitar que fissuras causadas na desfôrma levassem a alterações nos ensaios no estado endurecido. Nos primeiros ensaios a desfôrma era imediata, mas observou-se que a baixa resistência mecânica obtida nesses primeiros ensaios podia ser resultado da desfôrma. Ao alterar para desfôrma após 24 horas e utilizar o martelo de borracha ao invés de abrir manualmente o molde este problema foi resolvido.

Figura 48 - A desfôrma era inicialmente feita logo após a moldagem abrindo manualmente o molde bipartido (A) ocasionando fissuras ou mesmo rompendo os corpos de prova (B). Posteriormente a desfôrma passou a ser realizada após 24hs da moldagem com auxílio de um martelo de borracha (C).

Após a desmoldagem já foi possível avaliar as características da massa no estado fresco, sendo elas as curvas de força x deslocamento, a densidade verde e a recuperação elástica. A caracterização no estado endurecido foi realizada após 28 dias de cura contados a partir da moldagem.

6.8. Resultados da caracterização no estado fresco

Nas curvas de força x deslocamento do pistão foi considerado apenas o trecho de prensagem, ou seja, o trecho de deslocamento a partir do qual a mistura passou a aplicar uma força no pistão. É possível identificar quatro curvas distintas para os Testes T200, T215, T230 e T271, mostrando que o método de ensaio é sensível a alterações na quantidade de massa prensada (Figura 49).

O deslocamento máximo do pistão para os Testes T200, T215, T230 e T271 foi de 95,01mm, 95,02mm, 92,03mm e 82,17mm resultando em corpos de prova de 49,99mm, 49,98mm, 52,97mm e 62,83mm respectivamente (Tabela 5). Ainda que o *software* estivesse configurado para compactar corpos de prova com espessura de 50mm, nos Testes T230 e T271 o ensaio foi interrompido antes desta dimensão ao atingir o limite de carga do equipamento, ou seja, não foi possível compactar a massa naquela dimensão. Esse fato pode ser relacionado no processo com a fase do tempo de alimentação. Assim como acontece na prática, onde houve excesso de massa não foi possível atingir a dimensão especificada de 50mm.

Tabela 5 - Informações obtidas após o ensaio de reometria compressiva no estado fresco

Teste	Altura especificada (mm)	Altura obtida após compactação (mm)	Força máxima (kN)
T200	50	49,99	21,68
T215	50	49,98	72,74
T230	50	52,97	90
T271	50	62,83	90
T200FM	-	46,34	90

Nos testes T200 e T215 foi possível compactar a massa na altura desejada, porém não foi atingida a máxima compactação que a mistura permite resultando em peças menos compactas.

Figura 49 – Curva força x deslocamento do pistão para testes de variação de massa

Na Figura 50, comparando os testes T200 e T200FM observa-se que no segundo caso a mistura foi compactada o máximo que o equipamento permite, sendo o deslocamento máximo do pistão de 98,66mm resultando em corpos de prova com altura de 46,34mm. No processo produtivo vibroprensado não há limitação de altura, o equipamento comprime a massa o máximo possível, sendo assim coerente com o método de ensaio do teste T200FM.

Figura 50 - Curva de força x deslocamento do pistão comparando T200 e T200FM.

Ainda relacionado ao tempo de alimentação, quando a alimentação é insuficiente o produto tem baixa densidade, podendo ser observado isto no teste T200 (Figura 51). A densidade verde vai subindo conforme se adiciona mais massa. Comparando as

densidades obtidas nos testes T215, T230 e T271 com a densidade verde estimada da fábrica pode se afirmar que foi atingido o objetivo de conformar peças com compactidade similar à fábrica de referência.

Vale ressaltar que o comportamento de um fluido é dependente da pressão de aplicação da carga e do tempo de aplicação (SCHRAMM, 2006), sendo assim, ao realizar o ensaio de compactação com pressão e tempo de aplicação de carga diferentes dos parâmetros da vibroprensa o concreto pode apresentar também comportamento diferente.

Figura 51 - Densidade verde média

6.9. Resultados da caracterização no estado endurecido

Os valores obtidos na caracterização no estado endurecido estão reunidos na Tabela 6. Os resultados do teste T200FM, que estão em destaque, foram aqueles que mais se aproximaram da referência, sendo 97% da densidade seca e 92% da resistência média da fábrica de referência.

Tabela 6 - Resultados no estado endurecido

Requisito	Ref. da fábrica	T200	T215	T230	T271	T200FM
Densidade Verde (kg/m ³)	2283	2135	2248	2273	2286	2257
Densidade Seca (kg/m ³)	2154	1986	2091	2114	2126	2099
Resistência à compressão axial (MPa) e desvio padrão	29,06 ±9,03	17,32±2 ,02	25,75±1 ,18	25,32±1 ,40	25,14 ±2,67	26,81±2,2 3
Coefficiente de Variação da resistência	31%	12%	5%	6%	11%	8%
Absorção de água (%)	6,88	8,44	4,67	5	6,44	4,23

Na Figura 52 pode-se observar uma relação linear crescente entre a densidade seca e a resistência mecânica.

Figura 52 - Resistência mecânica x Densidade Seca

Os testes T230 e T271 ficaram fora da linha de tendência, apresentando resistência mecânica inferior à obtida ao teste T200FM apesar da densidade seca superior. A ocorrência pode ser explicada pelo fato que nestes dois casos a quantidade de massa utilizada não permitiu uma compactação uniforme no método de prensagem uniaxial, ou seja, ainda que a densidade seca se mantivesse alta, a compactação inadequada ocasionou redução na resistência mecânica. Isto ocorre devido à variação da pressão decorrente do método de prensagem utilizado, em que a fricção das partículas entre elas e a superfície do molde impede que a pressão seja transmitida integralmente e de maneira uniforme, por todo o corpo de prova levando a variações de densidade ao longo da peça, como pode ser observado na Figura 53 (ALBERO, 2000).

Figura 53 – A – corpo de prova extraído da peça de referência B – corpo de prova produzido após ensaio de reometria compressiva C – corpo de prova do T271 onde visualmente pode ser observada a variação de densidade devida a variação da pressão de prensagem aplicada no molde, conforme esquematizado.

Nos testes T230 e T271 também se verificaram valores altos de recuperação elástica (2,26mm e 2,65mm, respectivamente), conforme Figura 54.

Ainda analisando este parâmetro observa-se a relação diretamente proporcional entre a força máxima aplicada e a recuperação elástica. Para reduzir a recuperação elástica sem alterar o teor de umidade e a força de aplicação de carga, dado que estas são características do equipamento, podem ser alteradas as características dos agregados.

Figura 54 – Força máxima x recuperação elástica

A porosidade dos corpos de prova foi avaliada através da absorção de água apresentada na Tabela 6 e Figura 55. Nos testes em que houve variação de massa

(T200, T215, T230 e T271) a absorção de água foi superior no teste T200, em que a quantidade de massa foi insuficiente, obtendo assim uma peça menos compacta na espessura configurada. A absorção de água foi diminuindo proporcionalmente com o aumento de massa, indicando peças mais compactas, até o teste T271, onde observou-se um crescimento da absorção de água. Isto pode ser explicado pelo o fato que o excesso de massa não permitiu a compactação adequada, resultando em peças com variação de densidade, como foi demonstrado na Figura 53. Dessa forma, a absorção de água foi inferior, indicando um corpo de prova mais compacto no teste T215 em que a quantidade de massa foi ideal. Sendo assim pode-se dizer que a quantidade de massa adequada leva ao corpo de prova com menor porosidade.

Já no teste T200FM, onde permitiu aplicar força máxima, obteve-se o corpo de prova com melhor compactação, apresentando o menor valor de absorção de água.

Figura 55 - Absorção de água.

Na permeabilidade ao ar os testes foram conduzidos com os corpos de prova selados com epóxi e também sem selar, para verificar a influência da recuperação de ar nas laterais. Quando se determina o coeficiente de permeabilidade k , para que a Lei de Darcy seja válida deve ser garantido que o fluxo de ar ocorra apenas entre as laterais, porém como o objetivo neste caso é realizar a análise qualitativa como

forma de controle de produção, o ideal é que o ensaio seja o mais simples e rápido possível. Também foram feitas determinações com a câmara de ar posicionada na superfície inferior e superior dos corpos de prova. Ainda que teoricamente a posição não tivesse influência na permeabilidade, dado que esta é uma propriedade intrínseca que reflete a microestrutura do material, alguns efeitos de superfície podem ocasionar variações nos resultados (SENTONE, 2011). Para selar a superfície entre o corpo de prova e a câmara de ar foi utilizada massa de calafetar (Figura 56).

Figura 56 – Corpos de prova utilizados no ensaio de determinação de permeabilidade ao ar. A – corpo de prova selado; B – corpo de prova sem selar; C – massa utilizada para selar a superfície do corpo de prova para realização do ensaio.

Nas curvas de decaimento de pressão x tempo com os corpos de prova selados pôde-se observar um aumento no tempo de recuperação nos testes T200, T215, T230 e T200FM, condizente com o aumento na compactidade dos corpos de prova, que também foi verificado nas determinações de absorção de água. Já no T271 a recuperação de pressão foi superior quando comparada aos outros testes, ainda que nas outras determinações essa peça se mostrou menos compacta. Este fato pode ser devido à altura do corpo de prova, até 15mm superior que os corpos de prova dos outros testes levando a uma recuperação de ar mais longa. Pode-se afirmar que ainda que o ensaio seja sensível à variação de porosidade nas peças, é imprescindível que os corpos de prova possuam a mesma altura, mesmo que não esteja sendo determinado o coeficiente de permeabilidade k (Figura 57).

Figura 57 - Decaimento de pressão por tempo para corpos de prova selados.

Nos corpos de prova não selados a mesma tendência foi observada, com decaimento de pressão reduzindo do teste T200 até o teste T200FM, com exceção do T271. Pode-se dizer que para um controle qualitativo em um processo produtivo o ensaio poderia ser realizado sem selar as laterais dos corpos de prova, tornando o processo mais rápido (Figura 58).

Figura 58 – Decaimento de pressão por tempo para corpos de prova não selados.

A própria pressão de estabilização já pode ser considerada um resultado, em que a maior pressão indica um corpo de prova mais compacto. Na Figura 59 estão indicadas as pressões de estabilização para os testes de variação de massa (T200, T215, T230 e T271), variando de -0,68 bar (T200) até -0,85 bar para o T230, indicando esta amostra como a menor porosidade dentre estes testes, como esperado. No T200FM, com força máxima, a estabilização ocorreu na pressão de -0,83 bar indicando uma porosidade próxima ao T230, ressaltando que o corpo de prova com 200g apresenta altura inferior ao de 230g (Figura 57), o que pode interferir no valor de estabilização de pressão.

Figura 59 - Estabilização de pressão por massa nos corpos de prova não selados.

O método aplicado de permeabilidade ao ar se mostrou sensível às variações de porosidade das amostras, de forma análoga ao ensaio de absorção de água (Figura 60).

Figura 60 – Absorção de água por pressão de estabilização.

Sendo este método de ensaio rápido (máximo de 40 min / corpo de prova), simples e não destrutivo, além de utilizar um equipamento de pequeno porte e apenas um operador, verifica sua funcionalidade como proposta de método de ensaio de controle de qualidade no processo produtivo das peças de concreto, como maneira de rapidamente identificar problemas na produção e também avaliar alterações no processo.

7. Conclusões

Dentre as metodologias usadas para realizar o ensaio de reometria compressiva, a opção de utilizar quantidade reduzida de massa e permitir a compactação até o limite da célula de carga se mostrou a mais adequada. Os corpos de prova obtidos neste método apresentaram características próximas daqueles extraídos das peças da fábrica de referência, atingindo 97% da densidade seca e 92% da resistência mecânica da fábrica de referência. Esse método também é o que mais se aproxima do que ocorre no processo vibroprensado.

A densidade seca e a resistência à compressão são os parâmetros que oferecem a melhor avaliação das características entre os corpos de prova moldados e os extraídos.

O método de ensaio para determinar o índice de vazios pode ter sido prejudicado pela superfície externa das peças moldadas, sendo necessário utilizar outro método para ser possível uma comparação precisa.

Sendo obtido nos corpos de prova moldados após o ensaio de reometria, valores compatíveis com aqueles da amostra de referência, a metodologia desenvolvida mostrou-se uma ferramenta viável para a melhoria das técnicas de dosagem podendo ser utilizada para melhorar o desempenho dos produtos à base de cimento, inclusive a otimização do consumo de cimento tornando-os mais sustentáveis.

O método de determinação da permeabilidade se mostrou sensível à variação de porosidade nas amostras e sendo um método de ensaio rápido e simples poderia ser adotado como controle de qualidade do processo produtivo, dada a correlação da porosidade com a resistência mecânica das peças.

8. Próximas etapas

As etapas de formulação e mistura apresentadas na Figura 38, não foram desenvolvidas neste trabalho e podem ser estudadas em pesquisas futuras.

Um projeto granulométrico para otimizar a formulação de concreto seco pode ser feito com base nas teorias de empacotamento de partículas, buscando atingir a melhor proporção dos agregados da fábrica de referência, ou mesmo incluindo mais agregados caso necessário com o objetivo de obter uma granulometria final o mais compacta possível. Essa formulação será avaliada utilizando as técnicas no estado fresco e no estado endurecido com o objetivo de observar se há uma melhora nos resultados.

9. Referências

ALBERO A. J. L., **A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte I – O preenchimento das cavidades do molde.** Cerâmica Industrial. São Carlos, v.5, n.1, p. 23, set./out. 2000.

ALBERO A. J. L., **A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte III: Variáveis do Processo de Compactação.** Cerâmica Industrial. São Carlos, v. 6, n. 1, p. 26-27. mai./jun. 2001.

ALLEN, T. **Particle size measurement.** Londres: Chapman & Hall, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units.** ASTM C 936. 2008.

_____. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting.** ASTM C 418, 2005.

ASLANTAS, O. **A study on abrasion resistance of concrete paving blocks.** Dissertação (mestrado). The graduate school of natural and applied sciences – Middle East Technical University. Ankara, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Armazenamento de cimento ensacado.** FT-2. São Paulo: ABCP, 2005a.

_____. **Determinação da estabilidade da cor e influência do uso de pigmentos no concreto.** Relatório de ensaio n. 24274. São Paulo, 2002.

_____. **Praças, Caminhos e Pátios.** 2a. Edição. São Paulo: ABCP, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aditivos para concreto de cimento Portland – Especificação.** NBR 11768. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** NM 52. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Agregados para concreto – Especificação.** NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** NBR 9778. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução.** NBR 15953. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **Peças de concreto para pavimentação – Determinação da resistência à compressão.** NBR 9780. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Peças de concreto para pavimentação – Especificação.** NBR 9781. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.** NBR ISO 3310-1. Rio de Janeiro, 1997.

BETIOLI, A. M. et al. **Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares.** Ambiente construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, 2009.

BULLEN, F. **The variation in durability of concrete segmental paving units.** Pave 92. New Zeland, 1992. p. 229 a p.228.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI R. G.; JOHN V. M. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização.** BT/PCC/545. Departamento de Engenharia de Construção Civil – EPUSP. São Paulo, 2010.

CASTRO, A. L. DE AND PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Cerâmica, Mar 2009, vol.55, no.333, p.18-32.

CALLISTER, W. D. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos, 2002. 589 p.

CE-18:600 – Comissão de Estudo de Piso Intertravado. **Estudo de peças de concreto disponíveis no mercado na região de São Paulo.** ABNT/CB-18 – Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados. 2011. Não publicado.

COLUMBIA MACHINE, INC. **Instruction Manual**. Vancouver, 1969.

CRUZ L, O. M. **Pavimento intertravado de concreto – estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

DELALONDE, M. et al. **The rheology of wet powders: a measuring instrument, the compresso-rheometer**. International journal of pharmaceutics. 130 p. 147 – 151. Elsevier. 1995.

DOWSON, A. **Mix Design for Concrete Block Paving**. Procedures 1st International Conference on CBP. 1980. p. 121-127.

FERNANDES, I. **Blocos e pavers: produção e controle de qualidade**. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais LTDA, 2008.

FERREIRA, S. J. **Produção de blocos de concreto para alvenaria – práticas recomendadas**. ABCP – Boletim Técnico 103. São Paulo, 3^a edição, 1995.

FRASSON, A. J. **Metodologia de dosagem e processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 162 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HÜSKEN, G; BROUWERS, H. J. H. **A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study**. Cement and Concrete Research, n. 38, p. 1246-1259, 2008.

INNOCENTINI, M. D. M.; SEPULVEDA, P.; ORTEGA, F. **Permeability of Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**. Wiley-VCH, Weinheim - Germany (2005) 313.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACIÓN. **Ensayo de dureza de rocas, por frotamiento**. IRAM 1539.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. **Adoquines de concreto para pavimentos**. NTC 2017. Bogotá, 2007.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. **Método de ensayo para determinar la Resistencia a la abrasion de materiales para pisos y pavimentos, mediante arena y disco metalico**. NTC 5147, 2002.

JUVAS, K. **Very dry precasting concrete**. Special Concretes: Workability and Mixing. Proceeding of the International RILEM Workshop. London, 1993. p. 153-168.

KOLLEK, J. J. **The determination of permeability of concrete by Cembureau method: a recommendation**. Mater. Struct. 22 (1989) 225-230.

MEDEIROS, J. S., SABBATINI, F. H. **Alvenaria Estrutural não armada de blocos de concreto: Produção de Componentes e Parâmetros de Projeto**. Escola Politécnica – boletim técnico. São Paulo, 1993.

MOREIRA, H. P.; FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. R. L. **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros**. Boletim Tecnico da Escola Politecnica da USP, Sao Paulo, 2001. 16p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Editora Pini. 3a edição. São Paulo, 2008.

NEVILLE, A.M.; GIAMMUSSO, S.E. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 296 p. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OLIVEIRA, I. R., STUDART, A. R. , PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. Fazendo Arte Editorial. São Paulo, 2000.

PFEIFFENBERGER, L. E. **Aggregate graduations used for various products formed on the block machine**. Besser Block. Alpena, 1985.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. Tese (doutorado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

RIXNER, S., SCHINDELBECK, H., WEISSIG, D. **Fundamentos sobre la compactación del hormigón**. Wacker. Munique, 2002.

ROMANO, R. C. O et al. ***Impacto do misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas***. Ambiente construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, 2009.

SCHEIDEGGER, A.E. ***The Physics of Flow through Porous Media***, University of Toronto Press, Toronto (1974).

SENTONE, D. T. ***Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade ao ar de revestimentos de argamassa***. 2001. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 2011.

SCHRAMM, G. ***Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos***. Artliber Editora LTDA. São Paulo, 2006. p. 27.

STROEVEN, M.; STROEVEN, P. ***SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration***. Cement and concrete research. Países Baixos, 1999. p. 1299-1304.

TANGO, C. E. S. ***Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais***. 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. Florianópolis, Brazil, Aug. 21 – 24 , 1994.

THE EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. ***Concrete paving blocks: Requirements and test methods***. EN 1338. Bruxelas, 2003.

TORRENT R., BASHEER M., GONÇALVES A. F. ***Non-destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover. RILEM TC189-NEC: State of the Art Report***. 2007. p.35-70.

WONG, H. H. C., KWAN A. K. H.. ***Packing Density: A key concept for mix design of high performance concrete***. Hong Kong, China. 2002.