

DANILO AGUIAR NIZA

CONCRETOS SECOS COM AGREGADOS DE RCD

**A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E EFEITOS NA
COMPACTAÇÃO**

São Paulo

2021

DANILO AGUIAR NIZA

CONCRETOS SECOS COM AGREGADOS DE RCD

A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E EFEITOS NA COMPACTAÇÃO

Versão Corrigida

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

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr.
Sérgio Cirelli Angulo

São Paulo

2021

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

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

São Paulo, 06 de Janeiro de 2021

Assinatura do autor:  _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Niza, Danilo Aguiar

CONCRETOS SECOS COM AGREGADOS DE RCD - A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E EFEITOS NA COMPACTAÇÃO / D. A. Niza – versão corr. – São Paulo, 2021.

100 p.

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

1. Método de compactação em laboratório 2. concreto seco 3. agregado reciclado 4. distribuição descontínua de tamanho de partículas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t

COMISSÃO JULGADORA

CONCRETOS SECOS COM AGREGADOS DE RCD

A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E EFEITOS NA
COMPACTAÇÃO

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

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Ângulo

Universidade de São Paulo/ USP

Prof. Dr. Wellington Longuini Repette

Universidade Federal de Santa Catarina/ UFSC

Prof. Dr. Paulo Cesar Correia Gomes

Universidade Federal de Alagoas/ UFAL

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
minha noiva Pamela e ao meu finado
irmão de 4 patas, o Nick que juntos me
forneceram forças e vibrações para
atravessar todas as etapas desse caminho.
Obrigado!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me guiou por esse caminho, me dando forças quando nem eu mesmo tive, fazendo eu acreditar no meu potencial.

Ao meu pai Vandair e minha mãe Guiomar, que na base da minha criação humilde moldaram meu caráter e que me ensinaram acima de tudo que o caminho correto é sempre o mais digno, embora, muitas vezes o mais doloroso.

A minha noiva Pamela, que nunca duvidou do meu potencial, sempre acreditou na minha capacidade e me levou para cima nos momentos difíceis. Ela que segurou a barra num dos momentos mais difíceis da minha vida sendo uma das pessoas mais importantes nesse trajeto até a conclusão dessa dissertação. Sem palavras para enaltecer essa mulher, é um privilégio ter sua companhia ao meu lado.

Ao meu orientador, Sérgio Angulo, pela paciência, compreensão e orientação de maneira a proporcionar diálogos abertos. Sua orientação foi exemplar em todos os aspectos. Obrigado pelas oportunidades oferecidas ao longo desse trajeto e pela amizade construída.

Aos professores Rafael Pileggi, Vanderley John, Antonio Figueiredo, Maria Alba, Antonio Carlos Vieira pelos valiosos ensinamentos transmitidos durante as disciplinas.

À equipe do LME (Cesar, Markus, Marco, Fábio, Vitor, Franco, Engrácia, Carla e Milton) pela assistência durante os trabalhos desenvolvidos e experiência adquirida ao longo do meu período de pesquisador. Para as secretárias do programa Wandréa, Bete e Eliany no suporte e resolução de dúvidas que inevitavelmente surgiram. Para a equipe do Laboratório, Jenício, Renata, Adilson e Jessica.

Aos colegas de estudo (Raphael Baldusco, Delver, Plínio, Camila, Pedro, Rony, Amanda, Fábio, Jordão, Estevão, Daniel Brito, Lidiane, Lígia, Roberto, Sérgio, Ramoel, Alan, Delver, Christian, Leonardo, Karen, Daniele, Mariê). À Caroline Pessoa que me deu um grande suporte durante o desenvolvimento da minha pesquisa. Aos meus amigos Guilherme (grande incentivador para entrar no PPGEC), José, Gabriel e Marcel amigos que contribuíram e ajudaram a tornar essa jornada mais divertida.

Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.

(Rocky Balboa)

“Don’t hate the player, hate the game.”

“Friendship is everything. Friendship is more than talent. It is more than the government. It is almost the equal of family.”

(Mario Puzo)

I don't want to be a product of my environment; I want my environment to be a product of me.

(Frank Costello – Jack Nicholson)

RESUMO

Concretos secos são utilizados para fabricação de artefatos cimentícios como blocos, telhas e peças de pavimentação e apresentam vantagens como alta produtividade, controle dimensional preciso dos produtos e baixa produção de resíduos. No entanto, existem poucas pesquisas sobre otimização de formulações deste material cimentício. Uma possível razão para isso pode ser a dificuldade em reproduzir a energia de compactação industrial em escala de laboratório. Além disso, estudos de concretos secos utilizando agregados reciclados obtidos a partir de resíduos de construção e demolição raramente exploram aspectos como a otimização da distribuição granulométrica das misturas, efeito e controle da quebra de partículas durante a compactação. O objetivo deste trabalho é propor novos protocolos de compactação de concretos secos com base no método em escala de laboratório denominado reometria compressiva. O método utiliza uma prensa universal para realizar a compactação do concreto seco em moldes cilíndricos, obtendo parâmetros como o trabalho envolvido na compactação, a relaxação e a recuperação elástica do concreto seco, parâmetros que não são obtidos durante a fabricação em escala industrial. A metodologia abordou conceitos como a alteração da extensão granulométrica das misturas de concreto seco a partir do uso de descontinuidades (gaps), variações do volume de compactação a ser moldado e utilização 100% de substituição de agregado natural por agregado reciclado. Os resultados obtidos mostraram que a introdução de descontinuidades (gap) na distribuição granulométrica das misturas com agregados reciclados resultou no aumento da energia de compactação e melhorou o desempenho do concreto seco obtendo resultados semelhantes aos concretos produzidos com agregados naturais. A quebra do agregado reciclado durante a compactação também aumentou o volume de argamassa (volume de cimento e areia da mistura), densificando o material, reduzindo seus vazios intergranulares e aumentando a resistência à compressão.

Palavras-chave: Método de compactação em laboratório, concreto seco, agregado reciclado, distribuição descontínua de tamanho de partículas.

ABSTRACT

Dry concretes are used to manufacture cementitious artifacts such as blocks, tiles and paving pieces and have advantages such as high productivity, precise dimensional control of products and low waste production. However, there is little research on optimization of formulations of this cementitious material. One possible reason for this may be the difficulty in reproducing industrial compaction energy on a laboratory scale. In addition, studies of dry concrete using recycled aggregates obtained from construction and demolition residues rarely explore aspects such as the optimization of the granulometric distribution of the mixtures, effect and control of particle breakage during compaction. The objective of this work is to propose new protocols for compacting dry concretes based on the laboratory scale method called compressive rheometry. The method uses a universal press to carry out the compacting of dry concrete in cylindrical molds, obtaining parameters such as the work involved in compacting, the relaxation and the elastic recovery of dry concrete, parameters that are not obtained during manufacturing on an industrial scale. The methodology addressed concepts such as changing the granulometric extension of dry concrete mixtures using discontinuities (gaps), variations in the volume of compaction to be molded and using 100% substitution of natural aggregate for recycled aggregate. The results obtained showed that the introduction of discontinuities (gap) in the granulometric distribution of mixtures with recycled aggregates resulted in an increase in the compaction energy and improved the performance of dry concrete, obtaining results similar to those produced with natural aggregates. The breakdown of the recycled aggregate during compaction also increased the volume of mortar (volume of cement and sand in the mixture), densifying the material, reducing its intergranular voids and increasing the resistance to compression.

Keywords: Laboratory compaction method, dry concrete, recycled aggregate, discontinuous particle size distribution.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Processo de fabricação de blocos de concreto [1,5]..... | 18 |
| Figura 2 – Deformações dos grãos ao longo da compactação [9] | 19 |
| Figura 3 – Vibroprensas comercializadas. Da esquerda para direita: manual, pneumática e hidráulica (<i>Fonte: Atlanmaq e Vibrafort</i>) | 20 |
| Figura 4 – Consumo de cimento estimado para fabricação de artefatos em diferentes tipos de vibroprensas (adaptado de Fernandes [14]) | 21 |
| Figura 5 – Limites granulométricos para blocos e pavers [14](esq.), Limites granulométricos para Blocos proposto por Pfeiffenberguer em 1985 (Besser Company)[19](dir.)..... | 23 |
| Figura 6 - Sequência de moldagem dos corpos-de-prova adotado por Poon [20] | 29 |
| Figura 7 - Sequência de moldagem dos corpos-de-prova. Compactação das camadas (a,b, c e d), compactação final com martelo de borracha e desfôrma (Frasson [21]). | 30 |
| Figura 8 - – Equipamento utilizado para moldagem dos corpos de prova de concreto seco (Felipe, [22])...... | 31 |
| Figura 9 – Equipamento para moldagem de corpos de prova (Oliveira [4]). | 31 |
| Figura 10 – Configuração de ensaio e equipamento do VB- Test [24] e da versão modificada [23]..... | 32 |
| Figura 11 – Configuração do ensaio de proctor convencional e modificado [23]..... | 33 |
| Figura 12 – Representação esquemática do Martelo tipo Kango e sua aplicação para moldagem de cps cilíndricos e cúbicos- [23]..... | 34 |
| Figura 13 - Efeito da quantidade e do tamanho de partícula no empacotamento [27] | 36 |
| Figura 14 - Distribuições bimodais sob efeitos da gravidade [28]. | 37 |
| Figura 15 - Exemplificações de curvas granulométricas discretas (esq.) e acumuladas (dir.) | 38 |
| Figura 16 - (esq.) empacotamento de partículas com diferentes relações d_l/d_s , y_2 = partículas grossas [28]; (dir.) porosidade x relação de partículas grossas [31] | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 17 - Efeito parede e efeito “estado solto” numa distribuição granulométrica polimodal [32](esq.); Efeito parede com relação à densidade volumétrica e contorno da interface da partícula [27](dir.). | 39 |
| Figura 18– Influência dos agregados na redução da porosidade e trabalhabilidade [33]. | 40 |
| Figura 19 – densidade relativa x arredondamento relativo [27] | 41 |
| Figura 20– Modelos esquemáticos apresentando duas formas de empacotamento para uma mesma distribuição granulométrica [27]. | 41 |
| Figura 21 - Representação esquemática do reometro compressivo utilizado por Delalonde. (adaptado de MARCHIONI [25]). | 42 |
| Figura 22 - Representação dos estágios de compressão e relaxação da amostra compactada. (adaptado de Delalonde [39]) | 43 |
| Figura 23 – Ilustração dos componentes elaborados para execução o ensaio de reometria compressiva (adaptado de Marchioni. 2012) | 44 |
| Figura 24 – Procedimento de compactação para concretos secos utilizando prensa de laboratório. | 45 |
| Figura 25 - Extrator automático personalizado dos dois moldes semicilíndricos acoplados. Os dois moldes se sobrepõem à amostra de concreto seco. | 47 |
| Figura 26 - Distribuições discretas de tamanho de partícula para diferentes frações de tamanho: agregados naturais - NA “-” implica que a fração está passando nesse tamanho de peneira. “+” Implica que a fração é retida nesse tamanho de peneira | 51 |
| Figura 27- Limites para distribuições de tamanho de partículas (volume acumulado retido) dos agregados utilizados para a produção de blocos de concreto [46]. | 52 |
| Figura 28 - Distribuições de tamanho de partículas (discreta) das misturas secas (cimento e agregados). | 53 |
| Figura 29 – Carga de compactação vs Deslocamento do pistão para NA (a) e NAg (b), (c) Teor de água ótimo para os concretos secos em relação com a densidade e trabalho de compactação(c), (d) eficiência da compactação vs teor de água dos concretos secos | 55 |
| Figura 30 - Ciclos de prensagem (acima) e cargas máximas vs deslocamentos durante o primeiro ciclo de compactação (abaixo). | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 31- (a) Trabalho de compactação vs. Volume de referência do molde, (b) Densidade relativa (c) e Vazios entre partículas vs. Trabalho de compactação, e (d) Densidade relativa vs. Volume de vazios. | 58 |
| Figura 32- (a) Relaxação vs. volume de Vazios; (b) Relaxação vs. recuperação elástica em relação com a energia (trabalho de compactação). | 59 |
| Figura 33 – (a) Resistência à compressão vs trabalho de compactação; (b) Resistência à compressão vs volume vazios interpartículas; (c) Resistência à compressão vs. densidade/densidade máxima dos concretos secos; (d) Influencia do Gap nas propriedades. | 60 |
| Figura 34 - μ CT imagens de microestrutura dos concretos secos. Condições de volume de referência moldadas > %.100..... | 62 |
| Figura 35– Teor de substituição de dos agregados miúdos de RCD (tracejado) e agregados graúdos de RCD (sólido) em relação à resistência a compressão [53]. | 65 |
| Figura 36– Distribuição granulométrica das frações de ARM | 68 |
| Figura 37 – Distribuição discreta de tamanho da mistura de concreto seco com ARM (esq.) e limites especificados pela literatura para blocos de concreto (curva acumulada de agregados) (dir.)..... | 69 |
| Figura 38 – Deslocamento máximo do pistão no primeiro ciclo de compactação agregados sem gap a) e com gap b) - Densidade aparente (c) e eficiência de compactação (d) vs teor de água dos concretos secos com agregados reciclados | 72 |
| Figura 39 –(a) Trabalho de compactação vs. Volume de referência do molde, (b) Densidade relativa (c) e Vazios entre partículas vs. Trabalho de compactação, e (d) Densidade relativa vs. Volume de vazios. | 73 |
| Figura 40 – (a) Relaxação vs. volume de vazios; (b) Relaxação vs. recuperação elástica em relação com a energia (trabalho de compactação). | 74 |
| Figura 41 – (a) Resistência à compressão vs trabalho de compactação; (b) Resistência à compressão vs volume vazios interpartículas; (c) Resistência à compressão vs. densidade/densidade máxima dos concretos secos;..... | 75 |
| Figura 42 – - μ CT imagens da microestrutura dos concretos secos em volumes de compactação do molde >100%. | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 43 – Distribuição granulométrica das misturas após compactação em relação à referência (esq.). Parcela de materiais distribuídos ao longo da extensão granulométrica (dir.) – volume >100 % com acúmulo de finos | 78 |
| Figura 44 – Partículas acumuladas entre 500 e 100 micra (quebra do ARM) vs Vazios Intergranulares dos volumes de controle moldados | 79 |
| Figura 45 – Consumo de cimento das formulações de concreto seco considerando diferentes tipos de vibroprensas e o método de reometria compressiva. | 84 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Tipos de máquinas, carga de compactação e produtividade. | 20 |
| Tabela 2 – Especificações normativas dos blocos de concreto (NBR 6136)..... | 22 |
| Tabela 3 - Absorção de água, densidade e porosidade dos agregados..... | 51 |
| Tabela 4 Formulações de concreto seco. | 52 |
| Tabela 5 - Densidades e porosidades das misturas secas (cimento + agregados)..... | 54 |
| Tabela 6– Condições de Volume de controle de compactação das misturas secas..... | 48 |
| Tabela 7 - Fator de correção para estimar a resistência à compressão dos corpos de prova conforme ABNT NBR 5739 (2007)..... | 49 |
| Tabela 8 - Absorção de água, densidade e porosidade dos agregados..... | 67 |
| Tabela 9 – Formulação de concreto seco com ARM..... | 69 |
| Tabela 10 - Volume teórico do molde, volume utilizado e massa dos cps usando ARM..... | 70 |
| Tabela 12 Requisitos da Norma de Desempenho (Adaptado da NBR 15575)..... | 91 |
| Tabela 13 - Teste T – Concretos secos com agregados Naturais..... | 94 |
| Tabela 14 - Teste T – Concretos secos com agregados reciclados mistos..... | 95 |
| Tabela 15 – Resumo da Análise de Variância | 96 |
| Tabela 16 – Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) - Trabalho | 97 |
| Tabela 17 - Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) - Densidade | 98 |
| Tabela 18 - Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à compressão – 28 dias | 99 |
| Tabela 19 – Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) – Volume de Vazios | 100 |

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 Objetivo geral | 24 |
| 1.2 Objetivos específicos | 25 |
| 1.3 Justificativa e contribuições | 25 |
| 1.4 Estrutura da dissertação | 28 |
| 2 MÉTODO LABORATORIAL DE COMPACTAÇÃO POR REOMETRIA COMPRESSIVA - NOVOS PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS COM AGREGADOS NATURAIS | 29 |
| 2.1 Metodologia: parâmetros adotados para o método de Reometria Compressiva..... | 42 |
| 2.1.1 Condições de controle do volume compactado e misturas..... | 47 |
| 2.1.2 Teor de umidade ótima | 48 |
| 2.1.3 Análises do estado endurecido | 49 |
| 2.1.4 Materiais utilizados e elaboração das formulações | 50 |
| 2.2 Resultados e discussões | 55 |
| 2.2.1 Análise no estado fresco- Teor de umidade ótima | 55 |
| 2.2.2 Análises das curvas de compactação | 57 |
| 2.2.3 Análises no estado endurecido | 60 |
| 2.3 Conclusões do capítulo | 62 |
| 3 OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO SECOS COM AGREGADOS RECICLADOS ATRAVÉS DA REOMETRIA COMPRESSIVA | 64 |
| 3.1 Metodologia..... | 67 |
| 3.1.1 Distribuição granulométrica dos materiais | 67 |
| 3.1.2 Composição avaliada..... | 68 |
| 3.1.3 Volume de referência..... | 69 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1.4 | Teor de umidade ótima | 70 |
| 3.1.5 | Compactação | 70 |
| 3.1.6 | Análise no Estado Endurecido | 70 |
| 3.1.7 | Avaliação da quebra dos agregados durante a compactação | 71 |
| 3.2 | Resultados e Discussões | 72 |
| 3.2.1 | Avaliação da carga de compactação durante a produção dos corpos de prova.. | 72 |
| 3.2.2 | Resultados do estado endurecido | 75 |
| 3.2.3 | Quantificação da quebra dos agregados durante a compactação | 77 |
| 3.3 | Conclusões do capítulo..... | 80 |
| 4 | CONCLUSÕES GERAIS DA PESQUISA | 82 |
| 4.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 85 |
| 5 | PUBLICAÇÕES | 86 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 87 |
| | APÊNDICES..... | 91 |

1. INTRODUÇÃO

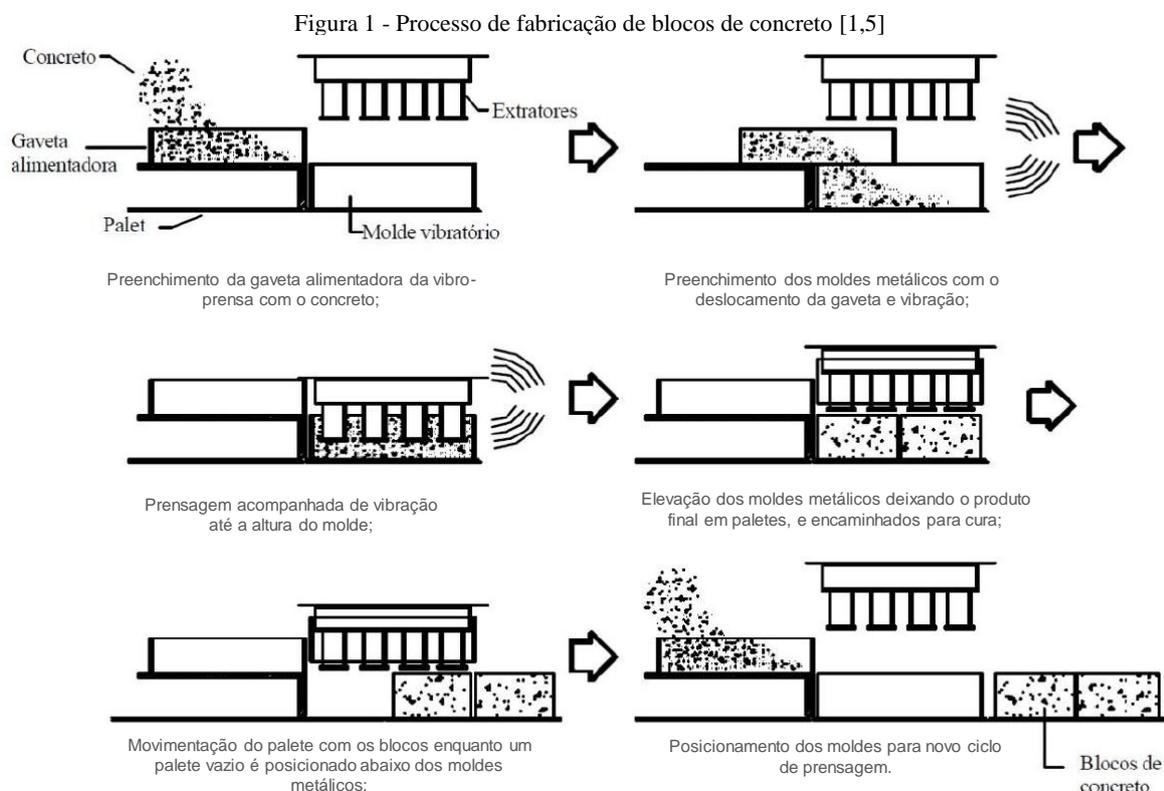
Blocos de concreto e peças de pavimentação são confeccionados utilizando concreto de consistência seca, denominado concreto seco. Essa nomenclatura se dá pelos baixos teores de água utilizados nas misturas (entre 4 e 9 %) em relação ao total de material seco. O seu processo de fabricação consiste em etapas de compactação e vibração da mistura cimentícia.

Esse processo de fabricação apresenta vantagens como ganho de produtividade nos processos industriais, melhoria do controle de qualidade na fábrica, incluindo a redução na geração de resíduos durante a fabricação [1].

Devido à quantidade menor de água ou de pasta de cimento no concreto seco, os vazios da estrutura granular dos agregados não são totalmente preenchidos, o que gera misturas porosas, que contêm macrodefeitos, que reduzem suas propriedades mecânicas [2][3]. Os vazios presentes no esqueleto granular são preenchidos parcialmente pela pasta de cimento durante os processos de compactação, combinado ou não com vibração, obtendo-se um produto final conformado (pré-fabricado) [2].

Os equipamentos utilizados na fabricação destes artefatos cimentícios com concreto seco são vibroprensas, que são basicamente formadas pela associação de um silo de armazenamento, gaveta, sistema de compressão (sapatas, vigas flutuantes e pistão), forma e sistema de vibração [4]. As vibroprensas conciliam a vibração e compactação das misturas.

A Figura 1 apresenta o processo de fabricação de blocos [1,5]. O processo de vibração auxilia na desaglomeração do cimento e reduz o atrito entre as partículas, proporcionando um rearranjo melhor das partículas no esqueleto granular [6]. A compactação também reorganiza as partículas; porém, forçando o preenchimento da pasta de cimento nos vazios deixados pelos agregados. Durante esse processo, na parte interna dos moldes, pode ocorrer até mesmo quebra de partículas, enrijecendo e/ou densificando a estrutura do material, e, assim, garantido a conformação final do produto [7,8].

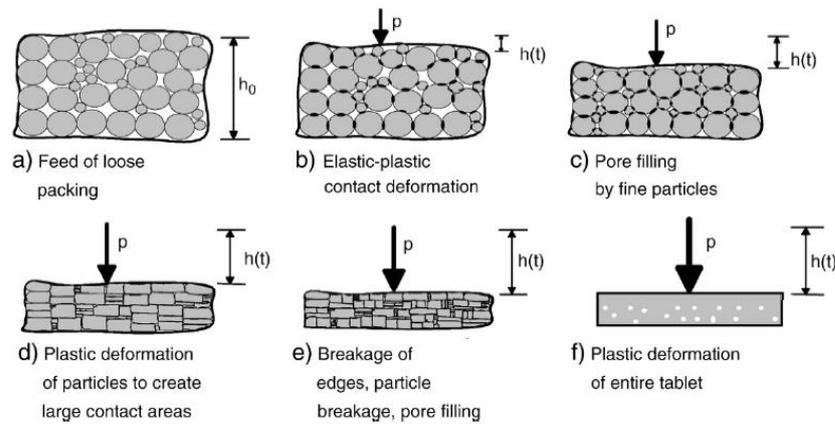


A reorganização das partículas durante o processo de compactação depende de algumas propriedades dos agregados, tais como a distribuição granulométrica e forma das partículas, resultando em uma densidade de empacotamento da mistura.

A compactação depende também das características do material (quando frágil, sujeito a quebra) (Figura 2), do esqueleto granular, da energia e do tipo de prensagem a ser empregada (compactação isostática ou axial) [7].

Inicialmente a compactação da amostra ocorre por movimentos de translação e rotação das partículas, à medida que a carga é aplicada, ocorrendo resposta elástica ou deformação plástica, por contato das partículas (Figura 2a e b). Partículas podem se romper durante o carregamento, preenchendo os vazios devido à geração de fração mais fina (Figura 2c). A deformação plástica tende a aumentar através do aumento do contato das partículas (Figura 2e e f), gerando maior redução de vazios e empacotamento, mas depende de cargas elevadas de compressão.

Figura 2 – Deformações dos grãos ao longo da compactação [9]



Uma das principais características para se garantir uma prensagem adequada dos materiais particulados é a sua relação carga de compactação/densidade, ou seja, o aumento da densidade observado através do acréscimo de carga aplicada no processo de compactação.

A pasta de cimento (ou qualquer outro tipo de ligante), além de permitir a consolidação do material, reduz o atrito entre as partículas, agindo como lubrificantes do sistema granular e contribuindo para mobilidade à mistura. [10]. Para se garantir uma mistura adequada dos materiais, [2,11], misturadores de maior energia e uso de aditivos dispersantes podem ser necessários, pois o teor da água nas misturas são reduzidos.

A qualidade do artefato está ligada à eficiência das vibroprensas. Pode-se controlar as cargas aplicadas ou a altura de compactação nas máquinas. Cargas de compactação elevadas conferem melhor desempenho mecânico e maior densidade [12]. O controle da altura e, portanto, do volume do molde a ser preenchido, bem como uso de misturas de elevada compacidade podem alterar a razão de compactação (volume dos grãos compactados/volume da peça conformada), incorporando mais ou menos vazios durante a compactação [13]

Os tipos de vibroprensas para fabricação de blocos de concreto e peças de pavimentação, são classificadas pela capacidade de compactação (Figura 3), sendo do tipo manual, pneumáticas e hidráulicas (que apresenta maiores cargas de compactação). Cada tipo de máquina apresenta ciclos de produção (Tabela 1) resultando diferentes capacidades de produção, sendo um parâmetro importante para os indicativos de produtividade de cada fabricante.

Figura 3 – Vibroprensas comercializadas. Da esquerda para direita: manual, pneumática e hidráulica (Fonte: Atlanmaq e Vibrafort)



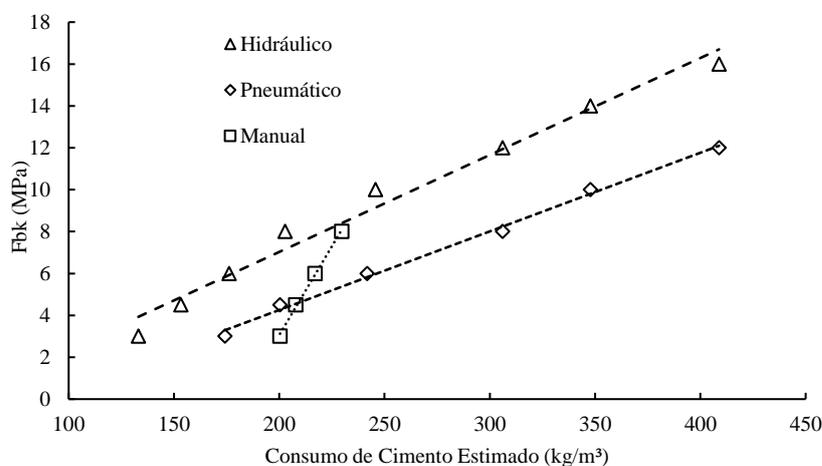
Tabela 1 – Tipos de máquinas, carga de compactação e produtividade.

| Tipo de Máquina | Tensão de Compactação | Capacidade de produção – Peças/dia | Número de Ciclos por minuto |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Hidráulico | 4000 a 9000 kgf/cm ² (*) | 9600 a 11700 blocos 14x19x39 | 3,0 a 6,0 |
| Pneumático | 500 a 1500 kgf/cm ² (*) | 3000 a 5000 – blocos 14x19x39 | 2,5 a 4,0 |
| Manual | 20 a 290 kgf/cm ² (**) | 1500 a 3000 – blocos de 14x19x39 | Não informado |

(*) Empresa Vibrafort
 (**) Empresa Atlanmaq

As Vibroprensas, devido às cargas elevadas de compactação, permite reduzir o consumo de cimento, para uma dada resistência das misturas cimentícias secas, incorporando geralmente teores elevados de agregados.[14]. Em pesquisa realizada em catálogos de fabricantes e adaptando alguns traços de concreto citados por Fernandes para fabricação de blocos de concreto de classes de resistências diversas em cada tipo de máquina existente, foi possível elaborar os dados apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Consumo de cimento estimado para fabricação de artefatos em diferentes tipos de vibroprensas (adaptado de Fernandes [14])



Considerando o mercado de fabricação de blocos, empresas que investem em máquinas do tipo hidráulico tem vantagem em relação à quantidade e qualidade do produto fabricado, atendendo diferentes classes de produtos e requisitos especificados nas normas de acreditação de blocos de concreto (NBR 6136/2016 [15] - Tabela 2) e de Desempenho de edificações habitacionais (NBR -15575 partes 2 e 4 [16,17]).

A solução adotada por empresas que não possuem vibroprensas com elevada carga de compactação para atender aos requisitos se resumem a elaborar formulações com maior consumo de cimento e/ou aumento do tempo de ciclo de compactação. Ambas alternativas são desfavoráveis do ponto de vista econômico e ambiental, por aumentar o consumo de cimento, para uma dada resistência do produto [18].

Com relação controle de qualidade da indústria, a ABCP junto à Bloco Brasil cataloga as empresas que atendem as especificações exigidas e concedem o selo da ABCP para blocos de concreto. Empresas que recebem essa certificação são qualificadas para incorporar o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H ¹), que faz parte do Sistema de avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços de Obras (SiAC) ². Os blocos de concreto devem atender aos requisitos da NBR 6136, apresentados na Tabela 2 abaixo.

¹ http://pbqp-h.mdr.gov.br/projetos_siac.php

² <https://certificacaoiso.com.br/pbqp-h/#o-que-e>

Tabela 2 – Especificações normativas dos blocos de concreto (NBR 6136)

| Requisitos -NBR 6136 | | Classe | | |
|---|------------------------|---|---|---|
| | | A | B | C |
| Fbk - Resistência à Compressão (MPa) | | $f_{bk} \geq 8,0$ Com função estrutural | $4,0 \leq f_{bk} \leq 8,0$ Com função estrutural | $f_{bk} \geq 3,0$ Com ou sem função estrutural |
| Absorção de Água (%) | Agregado Normal | $\leq 9,0$ Individual $\leq 8,0$ Média | $\leq 10,0$ Individual $\leq 9,0$ Média | $\leq 11,0$ Individual $\leq 10,0$ Média |
| | Agregado Leve | $\leq 16,0$ - Individual $\leq 13,0$ - Média | | |
| Retração Linear (%) | | $\leq 0,065$ | | |

Atender aos requisitos de qualidade permitem que as empresas se credenciem para fornecer seus produtos às obras incentivadas pelo Governo Federal, como, por exemplo o programa “Minha Casa Minha Vida”, aumentando sua visibilidade no mercado.

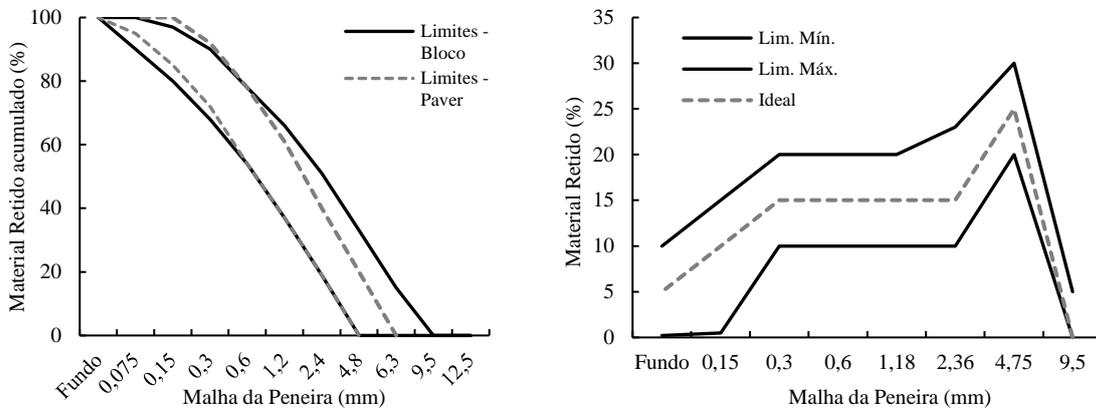
Quanto ao sistema construtivo de alvenaria de blocos de concreto, a norma de desempenho de edificações ([16,17]) apresenta as exigências na Tabela 11 (APÊNDICES), onde são considerando as especificações técnicas para os seguintes ensaios: resistência às solicitações de peças suspensas, resistência a impactos de corpo mole e duro, verificação a exposições de ação de calor e choque térmico e estanqueidade à água.

Empresas com capacidade de produzir blocos de concreto com qualidade superior, seja por meio de investimento em vibroprensas com maior eficiência de compactação, ou por métodos de elaboração de formulações que permitem atender aos requisitos de certificação, tendem a obter retorno do investimento mais rápido do que as que não investem nestas alternativas.

Um dos aspectos importantes para melhoria de desempenho dos blocos de concreto é o desenvolvimento de formulações com base nas características das vibroprensas e agregados disponíveis. As metodologias mais conhecidas/ adotadas para o desenvolvimento de blocos de concreto foram elaboradas com base na capacidade de compactação das vibro-prensas e adequando limites granulométricos dos agregados para cada tipo de produto.

Fernandes [14] adotou em sua metodologia de dosagem os limites sugeridos pela fábrica de equipamentos para blocos e pavers Columbia Machine (mundial) e outras curvas testadas em fabricas do Brasil e Mercosul (Figura 5a). Jablonski [19] adotou os limites de Pfeiffenberguer de 1985 sugerido pela Besser Company (Figura 5b). Estes limites visam à redução dos vazios entre os agregados e melhor acabamento superficial do produto. Quanto menor a dimensão do agregado miúdo na mistura, melhor o aspecto final do produto, porém menor a resistência do produto para um consumo fixo de cimento[14]. Após adequação da composição nos limites, os testes são realizados em escala de fábrica.

Figura 5 – Limites granulométricos para blocos e pavers [14](esq.), Limites granulométricos para Blocos proposto por Pfeiffenberguer em 1985 (Besser Company)[19](dir.)



Testes experimentais de formulações de concreto seco na fábrica requerem interferência na linha de produção, utilização de insumos em quantidades elevadas e tempo que não podem ser medidos diretamente em ganhos financeiros para a empresa.

Pesquisas relacionadas a concretos secos são pouco frequentes em literaturas científicas. Uma possível razão seja a dificuldade em reproduzir as cargas de compactação empregada pelas fábricas em estudos de menor escala (como em laboratório), o que seria de grande interesse acadêmico e industrial, por não interferir na produção.

Diversos autores buscam alternativas para reproduzir as condições de compactação e vibração realizadas nas fábricas como: utilização de formas metálicas preenchidas com concreto seco e submetidas a força de compressão axial [7]; moldes cilíndricos 5x10cm preenchidos em camadas submetidas por golpes manuais [8–10] e adaptações de ensaios reológicos (como o squeeze flow), onde as misturas são submetidas a compressão axial, porém em estado confinado, utilizando prensas (máquinas de ensaio universais) em escalas laboratoriais, sendo possível obter até 90% da densidade de peças de pavimentação produzidas por vibro-prensas hidráulicas utilizadas em fábricas de grande porte. Este último método é denominado reometria compressiva [11].

Misturas secas (cimento, agregados) com maior densidade de empacotamento (ou menor volume de vazios) podem ser obtidas pela alteração da extensão granulométrica das partículas. Os vazios deixados pelos grãos maiores devem ser preenchidos por grãos menores e assim sucessivamente dando origem as distribuições bimodais e polimodais (3 ou mais) [12]. Estas

distribuições podem apresentar intervalos (gaps) ou não ao longo da extensão granulométrica, sendo denominadas distribuições descontínuas e contínuas, respectivamente.

Para que as diferentes distribuições de tamanho de grãos de cimentos e agregados facilitem o empacotamento e mobilidade, as partículas menores devem se encaixar nos vazios deixados pelas partículas de maior tamanho [13–15]; as melhores condições obedecem a relações de razão de tamanhos de partículas ($D_{\text{maior}}/d_{\text{menor}} \sim 10$).

Considerando as especificações técnicas vigentes na norma brasileira (NBR 6136:2016[24]), em blocos de concreto para aplicação em alvenarias de vedação as exigências com relação à absorção de água ($\leq 10\%$) e resistência característica a compressão ($f_{bk} \geq 3,0$ MPa) não são elevadas, a incorporação de agregados oriundos de resíduos de construção e demolição é possível, substituindo, em parte ou totalmente, os agregados naturais, conforme diversas pesquisas indicam [5,16–19] [20–23].

Considerando seu processo de fabricação por vibroprensagem e a baixa demanda de água dos concretos secos, estes podem ser uma solução ecoeficiente para uso na indústria da construção civil, desde que as soluções sejam otimizadas e pensadas na aplicação em produtos ou sistemas construtivos, considerando-se as limitações dos agregados de RCD, como sua heterogeneidade, a porosidade e absorção de água elevadas, e menor resistência mecânica das partículas.

No geral, há pouca literatura dedicada a otimização da granulométrica de agregados reciclados para uso em concretos secos.

1.1 Objetivo geral

Propor novos protocolos de compactação de concretos secos por reometria compressiva, explorando usos de descontinuidades granulométricas, volumes de compactação e a utilização de agregados naturais e reciclados.

1.2 Objetivos específicos

É proposto neste trabalho novos protocolos experimentais para um método laboratorial de compactação de concreto secos, que permite mensurar parâmetros de controle importantes (energia de compactação, outros efeitos relevantes como relaxação e recuperação elástica que ocorre durante ou após a compactação), nem sempre possíveis de serem determinados durante o processo de fabricação, sem a necessidade de interrupção do ciclo produtivo.

O primeiro objetivo específico, que será apresentado no capítulo 2, é a aplicação do método em concretos secos com agregados naturais. Utilizando conceitos como empacotamento de partículas, alterações na extensão granulométricas com utilização de descontinuidades (Gaps) ou não, volumes de compactação e densidade de empacotamento das misturas de concreto seco, foram elaborados concretos secos com agregados naturais e analisadas suas propriedades no estado fresco e endurecido.

Posteriormente, no capítulo 3, foram realizados ensaios com os agregados reciclados mistos para verificar o comportamento dos concretos secos na compactação, bem como a quebra do agregado reciclado ocorrida neste processo.

1.3 Justificativa e contribuições

As propriedades físicas e mecânicas dos artefatos de concreto seco (ex. blocos vazados de alvenaria e peças de pavimentação) são obtidas através do processo de compactação e, com isso, a capacidade de carga de prensagem das vibroprensas interfere diretamente em seu desempenho.

Embora o controle tecnológico dos insumos seja realizado previamente para garantir que atendam aos requisitos especificados em normas, os métodos de elaboração das formulações (dosagem dos traços) devem ser realizados em escala de fábrica, o que torna essa parte do processo um potencial para ser melhorado do ponto de vista produtivo.

Uma das alternativas para melhoria está no desenvolvimento de ensaios em escala de laboratório para elaborar formulações de concreto seco e analisar suas propriedades físicas e mecânicas, sem a interrupção da linha de produção, e posteriormente realizar a correlação com os produtos fabricados, similar ao método de verificação de dosagem de concreto convencional realizado por laboratórios de controle tecnológico.

Essa estratégia também permite controlar as alterações provenientes dos insumos, como a troca de fornecedores de agregados, gerando alterações em suas características (ex. teores de materiais pulverulentos, forma do agregado, tamanho etc.), além de reduzir os insumos utilizados (como o cimento, a água) e otimizar o tempo da linha de produção das fábricas, uma vez que não será interrompida.

Outro ponto que pode ser abordado é a alteração dos limites granulométricos comumente utilizados pela indústria. Embora estes limites sejam elaborados visando atender as especificações de produto e considerando as características dos agregados utilizados, as abordagens utilizadas não abordam conceitos de empacotamento de partículas, através de alterações na extensão granulométrica, como a exclusão de uma certa fração de agregado (inclusão de descontinuidades), quebra de partículas no processo.

Otimizar a extensão granulométrica das formulações de concreto seco, através da introdução de intervalos granulométricos gerando descontinuidades propositais, podem favorecer a redução dos vazios pela acomodação das partículas melhorando sua compactidade, o que resulta em menor volume de pasta de cimento para preenchimento, em acréscimo de resistência à compressão e conseqüente menor absorção de água dos blocos fabricados.

Com a alteração no empacotamento de partículas, melhora-se a eficiência de compactação das vibroprensas, o que possibilita a redução do consumo de cimento ou de água, uma vez que, para obter melhores produtos (que atendam às especificações de norma em diversas classes) é utilizado um maior consumo de ligante por parte de empresas que não possuem vibroprensas de maior eficiência de compactação.

Outra vantagem está na introdução de agregados com características menos favoráveis que os convencionais, como os agregados reciclados de RCD ou resíduos de produção do próprio concreto seco, como fonte de substituição ao agregado convencional.

As condições de fabricação decorrentes da vibroprensagem e os tipos de produtos fabricados não estruturais (ex. blocos de vedação de concreto) tornam viável a incorporação desse tipo de agregado em maiores teores de substituição e é também uma solução eco-eficiente, uma vez que estudos indicam substituição parcial dos agregados naturais pelos reciclados em teores bem limitados, especialmente para uso em concreto estrutural.

Embora a compactação possa gerar a quebra deste tipo de agregado, os finos gerados podem preencher os vazios intergranulares, podendo promover aumento da densidade aparente e ganho de resistência mecânica.

Do ponto de vista de aplicabilidade na indústria, o método que será apresentado nesta dissertação não exige alto investimento pela fábrica e permite incorporar até mesmo agregados provindos dos próprios resíduos de produção (ex. blocos de concreto quebrados na desforma).

A metodologia também permite a adesão de pequenos fabricantes, que atualmente não conseguem atingir as exigências mínimas normativas com seus produtos a competir com empresa de maior expressão no mercado.

1.4 Estrutura da dissertação

O capítulo 1 apresentou a introdução aos temas que serão abordados nesta dissertação, como a definição do concreto secos vibro-prensados, como são produzidos, conceitos básicos sobre concretos secos vibro-prensados, os métodos adotados por alguns autores para realização de testes, os fatores que afetam a compactação e a potencial utilização de agregados reciclados em concretos secos.

No capítulo 2, foram discutidas as limitações dos métodos laboratoriais em reproduzir a energia de compactação fornecida pelas vibroprensas industriais, métodos normativos para avaliação do concreto seco no estado fresco; os parâmetros que podem melhorar a compactação de misturas secas por compressão uniaxial (sem vibração), usando ou não conceitos de empacotamento de partículas. A proposta da metodologia de reometria compressiva foi apresentada e a aplicabilidade demonstrada.

No capítulo 3, foi investigada o comportamento na compactação e a quebra de agregados reciclados durante a fabricação de concretos secos, usando esse método de laboratório. Melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos secos usando agregados reciclados de RCD foram observadas usando um melhor controle do volume compactado das misturas secas, elevando a energia e compactação e uso de distribuições granulométricas descontínuas.

2 MÉTODO LABORATORIAL DE COMPACTAÇÃO POR REOMETRIA COMPRESSIVA - NOVOS PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS COM AGREGADOS NATURAIS

O processo contínuo de fabricação de produtos cimentícios vibro-prensados dificulta a realização de testes experimentais e adequação das formulações de concretos secos, e métodos em escala laboratorial normalizados que simulem adequadamente a condição industrial não estão disponíveis.

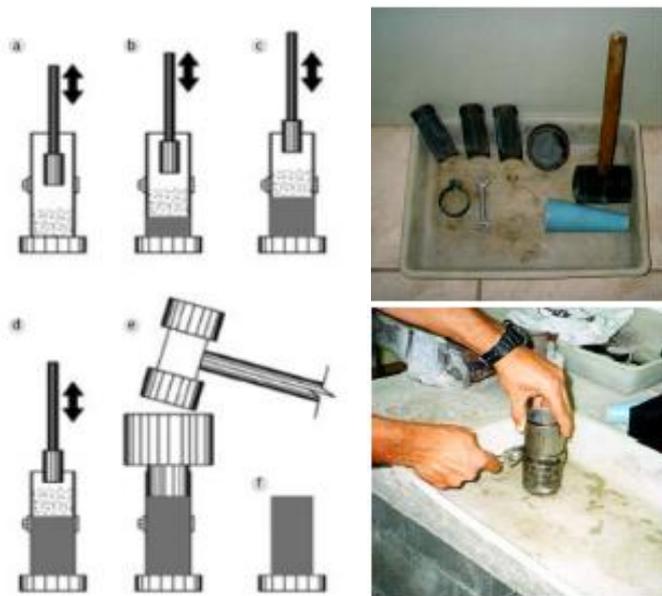
Diversos autores têm procurado reproduzir as condições de compactação e vibração realizadas nas fábricas. Poon [20] utilizou formas metálicas (225x105x75 mm) preenchidas com o concreto seco e submetidas a compressão axial com cargas de 600 KN por um minuto (Figura 6), compactando o material com a utilização de uma prensa. Em suas formulações de concreto seco com agregado natural, obteve resultados de resistência a compressão de blocos e peças de pavimentação da ordem de 16,0 e 58,0 MPa, respectivamente.

Figura 6 - Sequência de moldagem dos corpos-de-prova adotado por Poon [20]



Frasson Júnior, Oliveira e Prudêncio Junior [21], utilizaram moldes cilíndricos tri-partido de dimensões 5x13 cm para produzir corpos de prova cilíndricos 5x10cm. O concreto seco então é preenchido no molde e compactado com um soquete manual com 20 golpes, em quatro camadas de altura igual, resultado em alturas do corpo de prova entre 10,3 e 10,5cm. O acabamento é realizado por martelo de borracha até a altura de 10 cm e assim iniciando a desforma. A Figura 7 ilustra o método de moldagem.

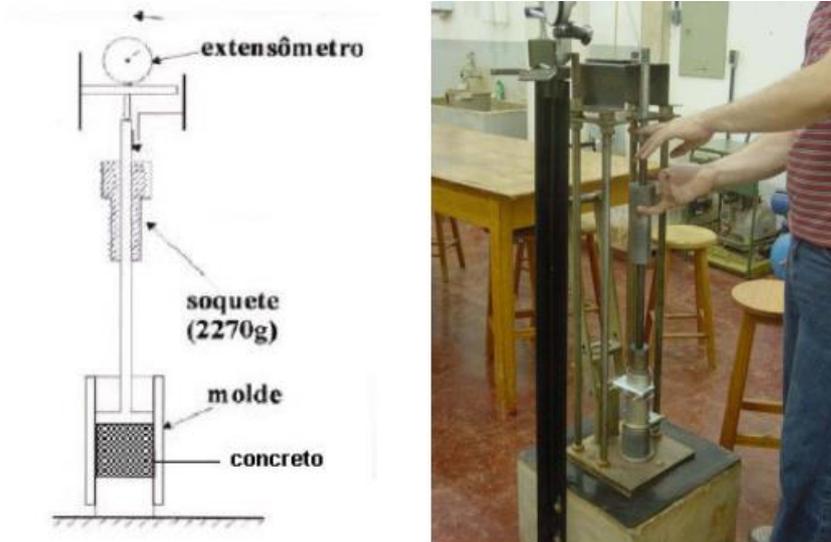
Figura 7 - Sequência de moldagem dos corpos-de-prova. Compactação das camadas (a,b, c e d), compactação final com martelo de borracha e desfôrma (Frasson [21]).



Neste método, a umidade ótima da mistura é determinada de forma empírica, através da umidade superficial nos moldes. A coesão é avaliada através da carga suficiente para esmagar os corpos de prova. Já massa específica é avaliada no estado fresco através da geometria do corpo de prova e correlacionada com a resistência à compressão após 28 dias de cura.

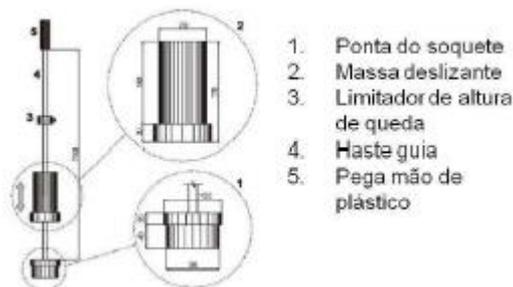
Felipe [22], com base no método proposto por Frasson, utilizou energia padronizada para compactar os corpos de prova, através do lançamento de soquete com massa e altura conhecida (similar ao método de proctor), com isso, foi possível controlar o deslocamento (em mm) durante a compactação. Como observado por Frasson (Figura 8), o elevado número de golpes tende a atingir uma massa específica máxima. Neste caso, após empregar maior carga de compactação, foi possível alcançar mais de 80% da massa específica do concreto seco quando comparado aos valores obtidos pelas condições reais de fabricação.

Figura 8 - - Equipamento utilizado para moldagem dos corpos de prova de concreto seco (Felipe, [22]).



Oliveira [4] adaptou o ensaio Marshall (pavimentação - Figura 9), usando corpo de prova cilíndrico de 9x8 cm, com energia fixa (deslocamento de soquete com massa e altura conhecida), obtendo correlação satisfatória (R^2 acima de 0,98) entre a resistência à compressão do corpo de prova e a de peças de pavimentação. Adotando essa metodologia, o autor foi capaz de correlacionar a energia de compactação do corpo de prova em condições laboratoriais com o tempo de vibração de uma peça de pavimentação a partir de um mesmo valor de massa específica do concreto seco.

Figura 9 - Equipamento para moldagem de corpos de prova (Oliveira [4]).



Como o desempenho do concreto seco está relacionada com a energia de compactação do equipamento de prensagem utilizado [1,14], os métodos laboratoriais citados acima apresentam dificuldade para reproduzir a energia de prensagem obtida pelas vibroprensas.

Outro desafio é o método de laboratório ser capaz de descrever as condições reológicas dos materiais sob compactação. Alguns métodos normatizados foram desenvolvidos para avaliar a trabalhabilidade de concretos secos como o *Modified VB-Test*, *Proctor compaction test* e o *Kango Hammer test*. Cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens [23] como será apresentado a seguir:

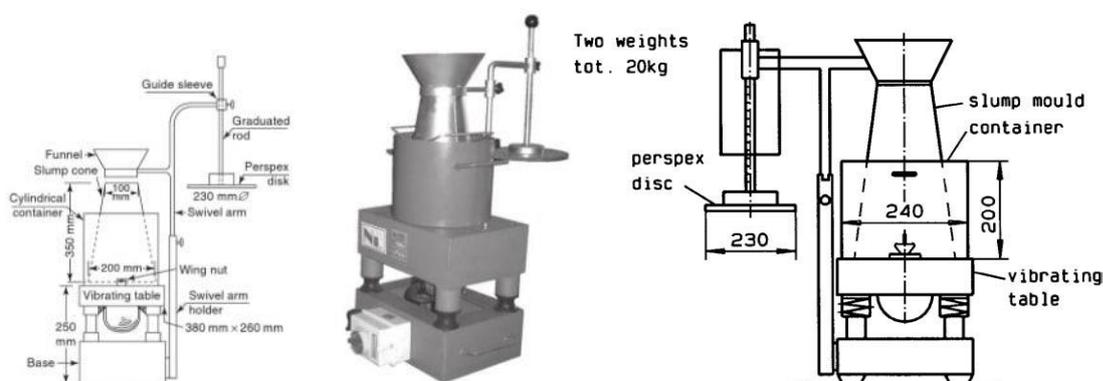
Modified VB-Test

Desenvolvido na Suécia, este método adapta o teste de consistência denominado VB-Test utilizado para avaliar a mobilidade e capacidade de compactação de concretos secos no estado fresco, utilizando a vibração. O ensaio mede o esforço relativo necessário para uma certa massa de concreto alterar de forma por meio de vibração[24].

Através de um molde cônico similar ao utilizado na realização do Slump test, o molde cônico é colocado dentro de uma caixa, onde o fundo está uma segunda forma cilíndrica. O molde cônico é preenchido pelo concreto e compactada com golpes manuais em 4 camadas de 25 golpes (similar ao slump-test) até preencher todo o cone de concreto. Após o preenchimento do concreto, retira-se o molde cônico e inicia-se a vibração até que toda a caixa de concreto seja preenchida e conseqüentemente o molde cilíndrico abaixo esteja preenchido. A quantidade de esforço necessário para a mudança de forma (denominado esforço de remodelagem) é calculado como o tempo em segundos, indicando o grau de trabalhabilidade de cada concreto.

A modificação adotada, está na utilização de 2 pesos de 10 kg que são utilizados para compactar a amostra durante a vibração, o que torna compactação mais eficaz e rápida. A Figura 10 apresenta o equipamento utilizado no VB-test e sua versão adaptada.

Figura 10 – Configuração de ensaio e equipamento do VB- Test [24] e da versão modificada [23]



Sua aplicação é recomendada para uma simulação do processo de compactação real (compactação+vibração) e utilizado na produção de tubos de concreto e blocos de pavimentação. Como vantagem, temos que o método é fácil de utilizar, mesmo nas fábricas e simula o método de fabricação dos artefatos cimentícios. Sua desvantagem está relacionada ao manuseio e preparo da amostra, que está relacionado a experiência de quem vai realizar o ensaio, além do método não ilustrar em seu resultado, pequenas alterações que podem ter sido feitas durante a formulação da mistura de concreto seco.

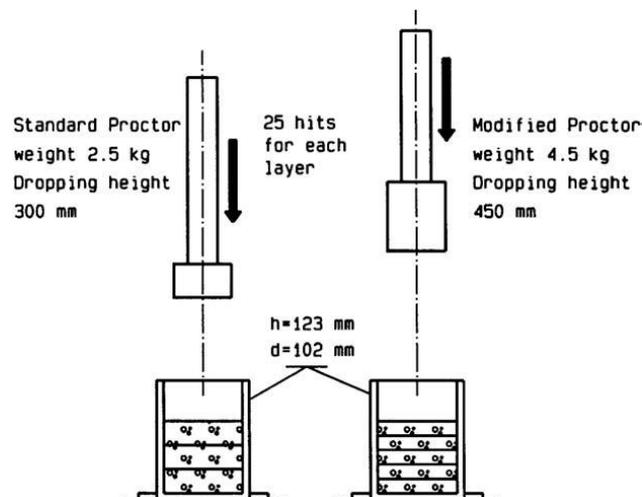
Modified Proctor Test

O Proctor Compaction Test foi desenvolvido nos Estados Unidos e para a utilização no ramo da mecânica dos solos para determinar o teor de água ótimo que promove a melhor compactação dos diferentes tipos de solos, através de uma carga constante de compactação. Em misturas cimentícias, é utilizado para caracterização de concreto massa (utilizado em barragens), pavimentos de concreto e solo cimento para estabilização de solos.

No teste modificado, a amostra é compactada em 5 camadas, cada uma com 25 golpes, usando um peso de 4,5 kg. O peso se move ao longo de uma haste e a altura de queda é de 45 cm. O princípio do teste padrão e modificado é apresentado na Figura 11.

A densidade será calculada com base no peso, volume e teor de água da amostra. Ao alterar o teor de água, é possível descobrir a densidade máxima e o teor de água correspondente. Normalmente, são necessários quatro a seis testes, gerando uma curva de umidade ótima. O tamanho da amostra para cada teste é de cerca de 3 kg.

Figura 11 – Configuração do ensaio de proctor convencional e modificado [23]



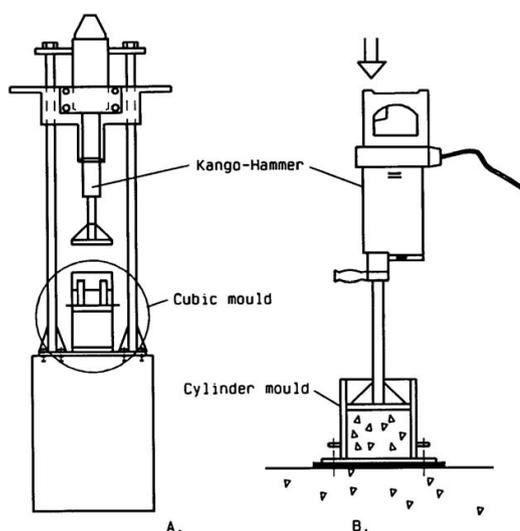
Sua aplicação é realizada tanto em campo como em laboratório, uma vez que os dispositivos são portáteis e baratos, sendo uma das suas vantagens. Como desvantagem, podemos citar o fato de o método não considerar o efeito da vibração durante a compactação.

Kango Hammer Test

Este método foi baseado nas normas BS 1924:1975 - “Methods of test for stabilized soils” (Métodos de teste para solos estabilizados) e BS 1377:1975 – “Vibrating hammer method” (Método do martelo vibratório). Uma amostra de concreto em um molde de aço (cúbico ou cilíndrico) é compactada com uma carga constante e vibrada simultaneamente, sendo determinada sua densidade compactada e posteriormente realizada a sua resistência a compressão em baixas idades (ex. 3 e 7 dias).

Geralmente sua aplicação é realizada para analisar a trabalhabilidade de estradas que utilizam concretos compactados a rolo em sua construção. O tamanho da amostra varia de acordo com o tipo de molde (aprox. 6 a 9 kg). A amostra é compactada em 2 a 3 camadas com um martelo vibratório do tipo “Kango” 900, 950 (ou semelhante). A carga de compactação, tempo de vibração e frequência são constantes. O cálculo da densidade é semelhante ao usado no teste de compactação Proctor. O equipamento é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação esquemática do Martelo tipo Kango e sua aplicação para moldagem de cps cilíndricos e cúbicos- [23]



Os resultados dos testes mostraram uma boa correlação com os resultados dos testes de compactação de amostras retiradas de obras de pavimentação de estradas onde concreto compactado a rolo foi utilizado em sua construção.

Em geral, nenhum dos métodos é capaz de determinar o comportamento reológico envolvido durante o processo de compactação. Nesse sentido, o presente trabalho procura explorar o uso da reologia compressiva como um método de compactação em escala de laboratório. Esse tipo de método reológico é mais utilizado no campo farmacêutico [20–22], mas raramente em tecnologias para produtos cimentícios.

A reometria compressiva pode simular as condições de prensagem industriais em laboratório [25], produzindo corpos de prova com densidades similares aos industriais, com melhor controle das variáveis envolvidas no processo (carga de compactação, umidade dos materiais, influência do operador), com esforço laboratorial e tempo reduzido. A metodologia pode ser adaptada utilizando ciclos de compactação, configurando-se carga ou deslocamento máximo, e diversos ciclos.

Marchioni, em seu trabalho [25], utilizou a reometria compressiva para moldagem de corpos de prova cilíndricos com dimensões 50x50mm, com um ciclo de compactação (cerca de 90KN), atingindo 97% da densidade seca e 92% da resistência à compressão, em comparação a corpos de prova extraídos diretamente de peças de pavimentação. Silva et al [26] utilizou a mesma metodologia utilizando agregados reciclados separados por densidade, em substituições integrais ao agregado natural, obtendo resistências a compressão semelhantes aos concretos secos de referência.

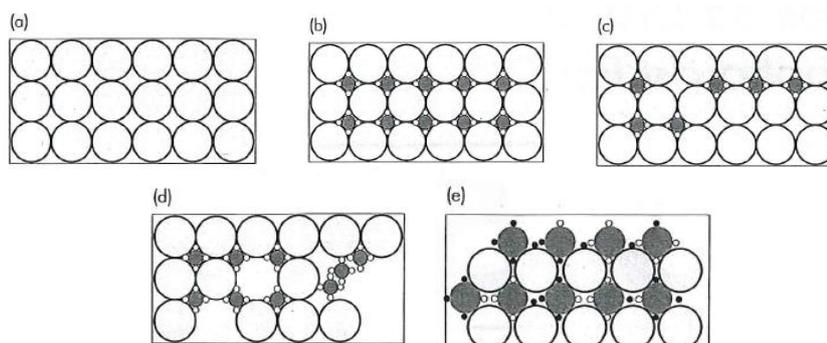
Em se pensando sobre um método laboratorial, a energia de compactação é o parâmetro chave para atingir os requisitos de densidade e resistência do concreto seco [11,12]. Para compactar adequadamente os materiais particulados, também é fundamental conhecer a relação entre carga e densidade; ou seja, a densidade do sistema compactado é maior com o acréscimo de carga de compactação [24]. A energia resultante dos diferentes tipos de máquinas utilizadas no processo de fabricação pode melhorar a compactação [25,26]. Tais parâmetros podem ser obtidos por métodos de reometria compressiva.

O comportamento da compactação é afetado pelas características da mistura, que, por sua vez, afetará a microestrutura do material [24]. O processo de compactação envolve reorganização, deformação e quebra de partículas. A pasta de cimento atua como lubrificante para um sistema granular, reduzindo o atrito entre os agregados [27].

O maior empacotamento das partículas gera uma estrutura granular mais sólida, com menor volume de vazios, o que pode favorecer o processo envolvido na compactação e obtenção de resistências das peças. Os vazios deixados pelos grãos maiores são preenchidos por grãos menores e assim sucessivamente. Os principais fatores que afetam o empacotamento das partículas são: distribuição granulométrica, morfologia, porosidade dos agregados.

A Figura 13 ilustra o efeito da distribuição granulométrica e a sequência de preenchimento das partículas com relação ao empacotamento. Ao preencher os vazios existentes das partículas maiores (a) com partículas menores (b) aumenta-se a densidade do empacotamento (condição teórica mais favorável). A deficiência de partículas pequenas (c), deficiência de partículas maiores (d) e a distribuição inadequada das partículas (e) interferem diretamente na quantidade de vazios, reduzindo o empacotamento.

Figura 13 - Efeito da quantidade e do tamanho de partícula no empacotamento [27]



Entre os tipos de distribuições granulométricas de partículas, podemos citar:

➤ **Monomodais:** única distribuição de tamanho de partículas, que gera um empacotamento aproximado de 0,60 a 0,64, definido através da Equação 1 abaixo considerando partículas esféricas:

$$\rho_{emp} = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_s} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: ρ_{emp} = densidade relativa de empacotamento;

ρ_{bulk} = densidade volumétrica do sistema de partículas;

ρ_s = densidade máxima da partícula sólida

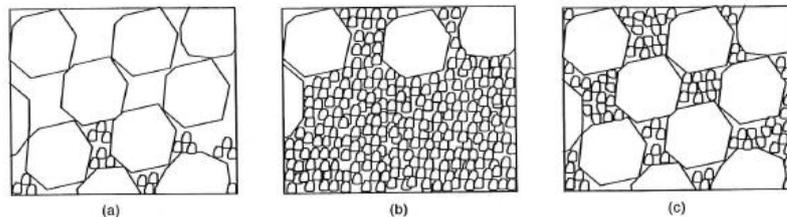
O máximo empacotamento (teórico) se dá quando a densidade relativa de empacotamento é igual a 1. Quanto maior o empacotamento, maior a densidade do material e menor os vazios.

- **Bimodais:** dois tamanhos de partículas distintas;
- **Polimodais:** três ou mais tamanhos distintos.

Em ambos os casos o empacotamento está relacionado ao tamanho dos grãos e extensão granulométrica.

A Figura 14 apresenta uma distribuição bimodal com diferentes tamanhos de grãos. É possível observar como o empacotamento é afetado pela quantidade de cada partícula. Os agregados miúdos não preenchem todos os vazios quando há excesso de agregados graúdos (a); os agregados maiores se acumulam na superfície quando há excesso de agregado miúdo (b); condição ideal de empacotamento: partículas maiores e menores bem distribuídas (c).

Figura 14 - Distribuições bimodais sob efeitos da gravidade [28].



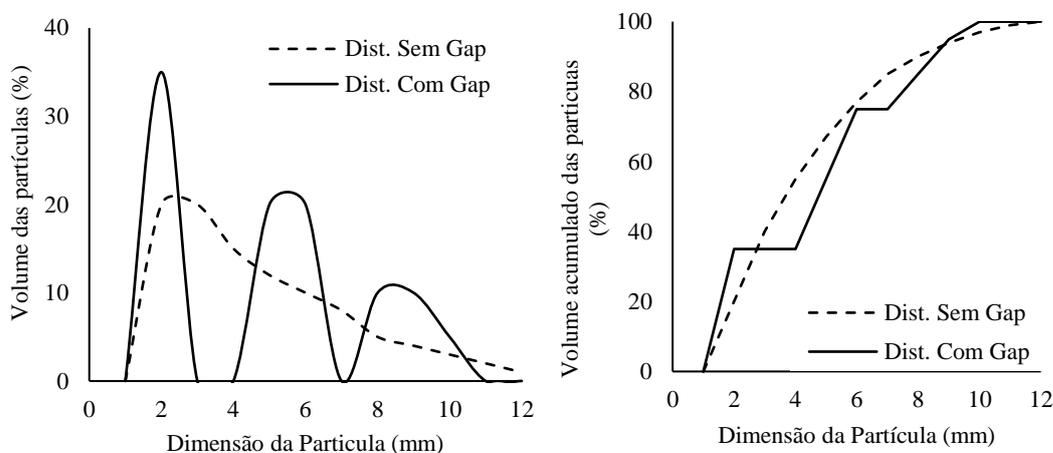
O máximo empacotamento é obtido pela relação entre as partículas menores e maiores (Figura 14). À medida que se aumenta o número de partículas maiores na distribuição granulométrica, os vazios intergranulares são preenchidos pelas partículas menores. Quando o percentual das partículas menores não é o suficiente para preencher os vazios, aumenta-se a porosidade.

As distribuições das partículas bimodais e polimodais podem ser descontínuas ou contínuas (Figura 15) como descritas abaixo:

➤ Descontínuas: apresentam descontinuidades (gaps) ao longo da sua extensão granulométrica (relação entre as partículas de dimensão máxima e mínima dentro de uma mesma distribuição – d_{max} / d_{min}), onde se verifica a ausência de certos tamanhos de partículas;

- Contínuas: Não apresentam descontinuidades na sua extensão granulométrica;

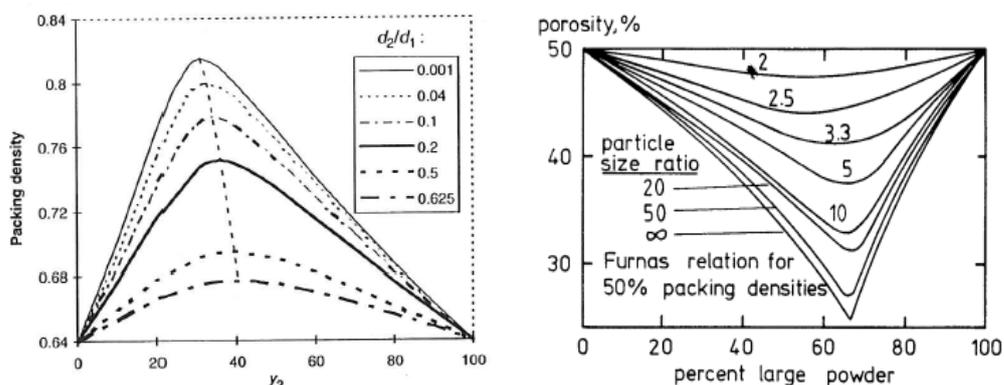
Figura 15 - Exemplificações de curvas granulométricas discretas (esq.) e acumuladas (dir.)



Com relação à máxima densidade de empacotamento, podemos considerar que a distribuição granulométrica contínua é a que promove maior densidade de empacotamento[29]. O elevado empacotamento das distribuições polimodais contínuas, por outro lado, favorecem o fenômeno chamado “efeito parede”. O “efeito parede” é maior, quanto menor a diferença de diâmetro entre as partículas grandes (d_l) e pequenas (d_s). Esse fenômeno ocorre quando a relação d_l/d_s fica menor do que 10; pois nesta condição, começa a haver interação entre elas, prejudicando a movimentação das partículas na mistura [27,30].

À medida que se aumenta a razão d_l/d_s (Figura 16) os vazios intergranulares são preenchidos, favorecendo o empacotamento das misturas, sem gerar efeito parede nos caso aonde esta relação é superior a 10. A densidade de empacotamento da mistura binária ideal é uma função crescente de cada fração de partícula na densidade de empacotamento residual. A proporção ótima aumenta a densidade de empacotamento da mistura, e diminui a porosidade residual; vazios granulares deixados pelos agregados [28].

Figura 16 - (esq.) empacotamento de partículas com diferentes relações d_l/d_s , y_2 = partículas grossas [28]; (dir.) porosidade x relação de partículas grossas [31]

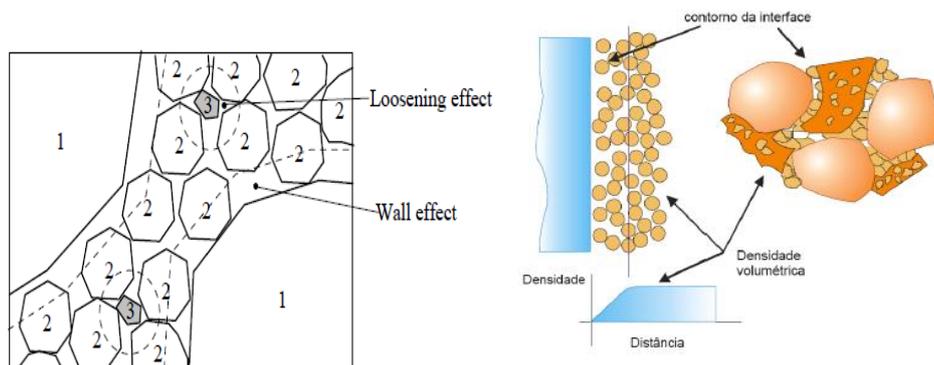


O efeito parede é gerado quando as partículas não se encaixam perfeitamente nos vazios deixados pelas partículas de maior tamanho (Figura 17). Como resultado, as partículas de tamanho maior são forçadas fazendo com que a estrutura granular das partículas dilate e aumentando o volume de vazios, o que diminui a densidade do volume compactado [27,32].

Outro fenômeno que pode ocorrer é o efeito de “estado solto” (Figura 17), quando as partículas menores conseguem se acomodar entre as partículas maiores, reduzindo os vazios e aumentando o empacotamento.

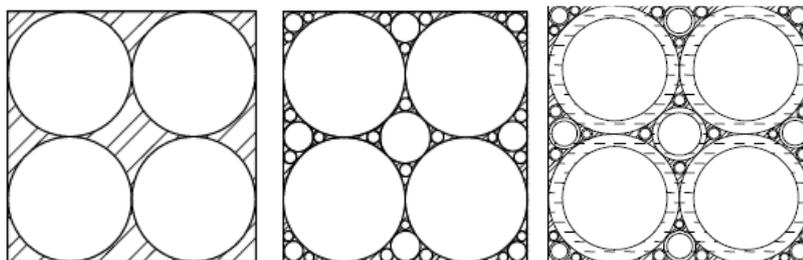
Tanto os efeitos de parede quanto o de “estado solto” dependem do tamanho das partículas, a interação entre elas e da proporção volumétrica das partículas de tamanhos diferentes. Isto implica que a classificação do agregado é um fator de controle para estes dois efeitos [32].

Figura 17 - Efeito parede e efeito “estado solto” numa distribuição granulométrica polimodal [32](esq.); Efeito parede com relação à densidade volumétrica e contorno da interface da partícula [27](dir.).



A partir de um único tamanho de partícula do agregado, o volume de pasta para preencher os vazios e reduzir os poros da estrutura granular é maior. Numa formulação polimodal os diferentes tamanhos de partículas reduzem a porosidade da estrutura granular, implicando na redução de pasta de cimento. Se mantido o volume de pasta, aumenta-se a trabalhabilidade, pois a pasta envolve os agregados, aumentando a distância entre os mesmos (Figura 18) [32]. Estes conceitos são usados para o desenvolvimento de formulações de concretos fluidos. Nos concretos secos, o comportamento do material granular é observado devido a acomodação das partículas.

Figura 18– Influência dos agregados na redução da porosidade e trabalhabilidade [33].

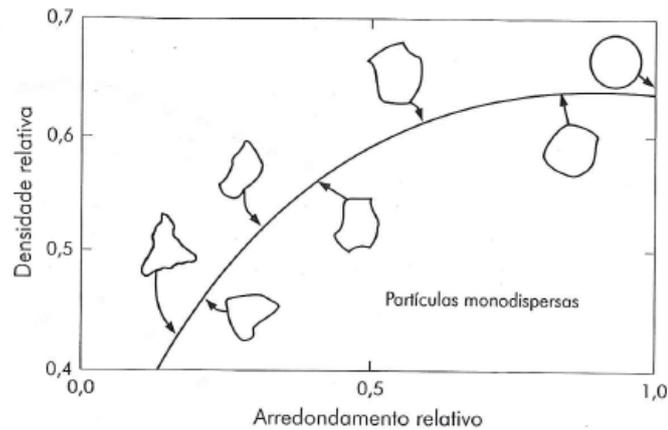


As descontinuidades que respeitem relação entre tamanhos próximo a 10 e tenha ampla extensão granulométrica proporcionam compactação e melhor mobilidade, pois reduzem o efeito parede entre as partículas. O maior empacotamento pode vir a gerar maiores cargas de compactação para se obter corpos de prova de dimensões semelhantes, mas, por outro lado, pode gerar a condição de máxima compactação mais rapidamente. As metodologias de dosagem de blocos de concreto mais atuais geralmente não contemplam formulações com descontinuidades induzidas.

A morfologia dos agregados (Figura 19) também é um aspecto que deve ser observado. Quanto maior a tendência à esfericidade apresentada pelas partículas de agregados, melhor será seu empacotamento e maior sua mobilidade ou seja, menor sua demanda de água [34]. Além disto, segundo Souza [35], em concretos secos a morfologia das partículas assume um papel relevante, uma vez que há grande contato entre os grãos e a lubrificação gerada pela pasta é reduzida, pois não há grande quantidade de pasta de cimento na mistura. Sendo assim, misturas constituídas por grãos com menos angulosidades terão menor atrito e, assim, serão mais facilmente prensadas, isto é, demandarão menos energia para a compactação.

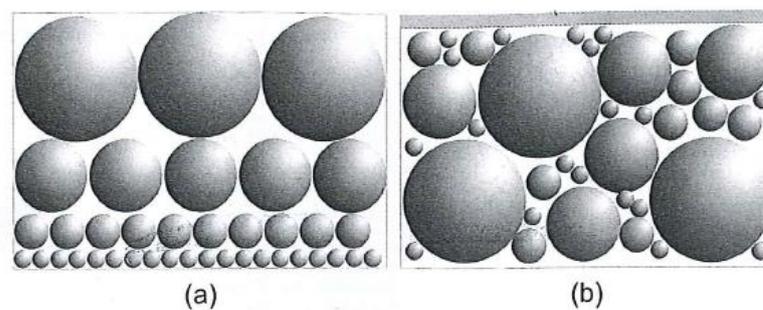
Sousa [35] e Buttler [36] constataram que a granulometria e a forma dos agregados utilizados exercem uma forte influência sobre a umidade ideal de moldagem, a trabalhabilidade e, por consequência, também sobre a resistência à compressão e a massa específica de blocos de concreto seco. Não por acaso, diversos métodos de elaboração de formulações de blocos estabelecidos (Besser Company, Columbia) levam em conta as características dos agregados utilizados para a determinação da proporção ideal dos constituintes da mistura [36].

Figura 19 – densidade relativa x arredondamento relativo [27]



A posição de equilíbrio em que as partículas de agregados são dispostas também interfere na densidade de empacotamento da mistura. Para uma mesma distribuição granulométrica, caso a disposição das partículas esteja inadequada, devido a ordem que foram inseridas na mistura, pode-se obter distintos níveis de empacotamentos, como pode ser observado na Figura 14 [37]. Os processos de mistura e compactação ditam este tipo de comportamento. A Figura 20 ilustra uma distribuição granulométrica com camadas monodispersas (a) e o empacotamento aleatório submetido à vibração. A faixa cinza representa a redução no espaço ocupado pelas partículas devido ao melhor empacotamento [27].

Figura 20– Modelos esquemáticos apresentando duas formas de empacotamento para uma mesma distribuição granulométrica [27].



Um fenômeno que ocorre durante a compactação e que não é controlado pela indústria é a relaxação (acomodação plástica). Essa acomodação plástica representa a dissipação de energia do material, após a aplicação de uma carga[38], resultado do comportamento viscoelástico do material. Esse comportamento ocorre devido a lubrificação das partículas da pasta (suspensão do ligante com a água, aditivos) [39,40].

Outro comportamento que ocorre é a recuperação elástica. A recuperação elástica indica a parte da energia não dissipada após a compactação, resultado do contato elástico entre as partículas de agregados. Por se caracterizar por uma deformação expansiva, no sentido contrário ao da aplicação da carga, contribui para o aumento de fissuração (defeitos) na estrutura do material [9]. O controle da recuperação elástica é muito importante, ao fim da compactação, pois microfissuras podem surgir devido à rápida recuperação elástica e reduzir o desempenho mecânico das peças [9].

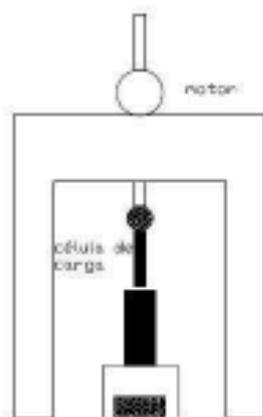
Estudos na área de fármacos [39] apontam que a recuperação elástica diminui à medida que aumenta-se o teor de água em sistemas granulares pois a água atua como lubrificante criando uma película na superfície das partículas, reduzindo as forças de atrito e dissipando parte da energia usada na compactação. Em estado confinado, a carga de compactação gera forças de atrito entre as partículas e o molde.

2.1 Metodologia: parâmetros adotados para o método de Reometria Compressiva

A metodologia utilizada neste trabalho é uma adaptação da metodologia proposta por Marchioni [25] que reproduz as condições de compactação de uma prensa hidráulica industrial usando uma máquina de teste de laboratório convencional.

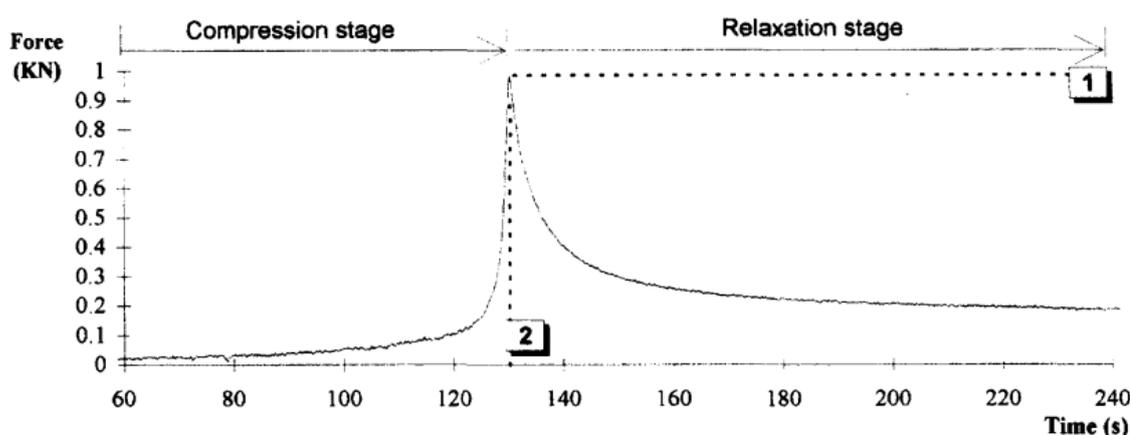
Baseado no trabalho de Delalonde [39], onde foi desenvolvido um equipamento para caracterização reológica de pós úmidos através da prensagem uniaxial aplicada por um pistão na amostra, que se encontrava em estado de confinado por um molde rígido, sendo possível medir a compressibilidade da mistura, como apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Representação esquemática do reometro compressivo utilizado por Delalonde. (adaptado de MARCHIONI [25])



Inicialmente foram utilizadas dispersões de celulose micro cristalina com variações nos teores de água da mistura, sendo possível verificar os estágios de compressão e relaxação da amostra. O protocolo do ensaio gerou uma curva de aplicação de carga ao longo do tempo de duração do ensaio (Figura 22). Durante o processo de compactação, pode-se obter dados da variação de densidade devido a força aplicada pelo pistão, já na etapa de relaxação, foi possível analisar o comportamento quanto a viscoelasticidade do material.

Figura 22 - Representação dos estágios de compressão e relaxação da amostra compactada. (adaptado de Delalonde [39])



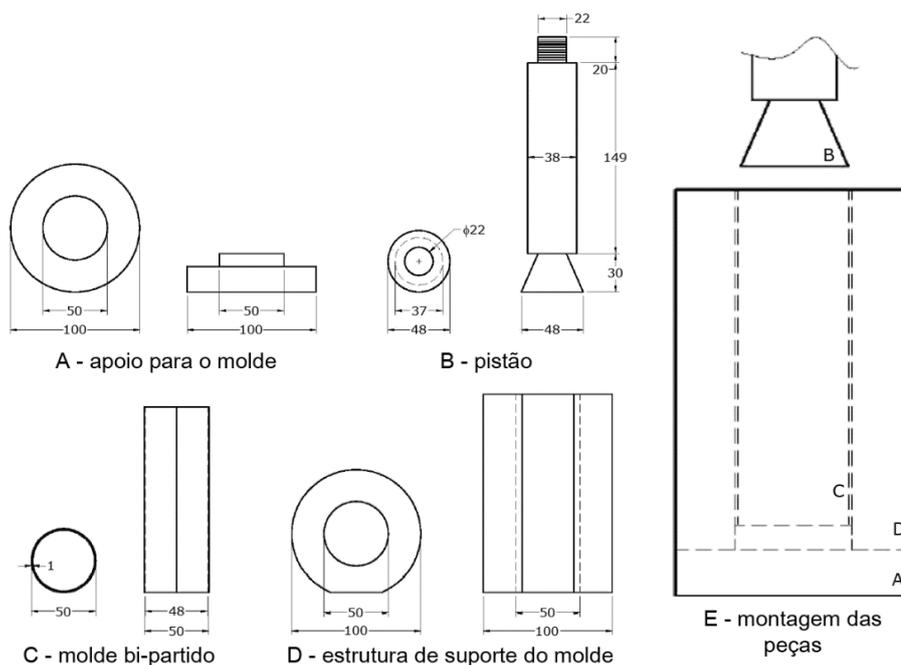
Utilizando um protocolo de ensaio similar ao apresentado anteriormente, (Figura 22), implementamos a determinação quantitativa dos parâmetros do concreto seco (energia de compactação, relaxação e recuperação elástica), com quantidades reduzidas de materiais e esforço reduzido, se comparado aos métodos de controle de qualidade em escala industrial comumente utilizados. Para cada mistura, cerca de 2.000 g de materiais foram misturados por 3 min usando um misturador de argamassa de laboratório. O comportamento durante a prensagem das misturas de concreto seco foi avaliado pelo método de compactação em escala de laboratório proposto neste trabalho e descrito a seguir.

A mistura de concreto seco é compactada usando uma máquina universal de ensaios (Emic – Linha DL – Modelo DL10000), com célula de carga de 100 kN, e um conjunto de componentes (inclusive um pistão acoplado à célula de carga) elaborados para realização do ensaio de reometria compressiva (Figura 23).

A configuração do ensaio permite contato permanente do pistão com o material, transmitindo a carga de compactação à mistura de concreto seco que está dentro do molde (estado confinado). O deslocamento do pistão é variável, de acordo com a configuração a ser executada, sendo os limites mínimos e máximos de 0,01 a 500 mm/min e precisão de 0,01 mm. A fim de evitar danos à célula de carga do equipamento, optou-se por limitar sua carga máxima de compactação a 90 kN, respeitando a margem de 10% de trabalho recomendável pelos responsáveis pela calibração do equipamento. A célula de carga apresenta precisão de 0,01 (1%) do valor medido. Os parâmetros utilizados por Marchioni foram adotados com base em testes que foram realizados previamente e fixados os melhores parâmetros que possibilitaram as correlações obtidas em seus resultados.

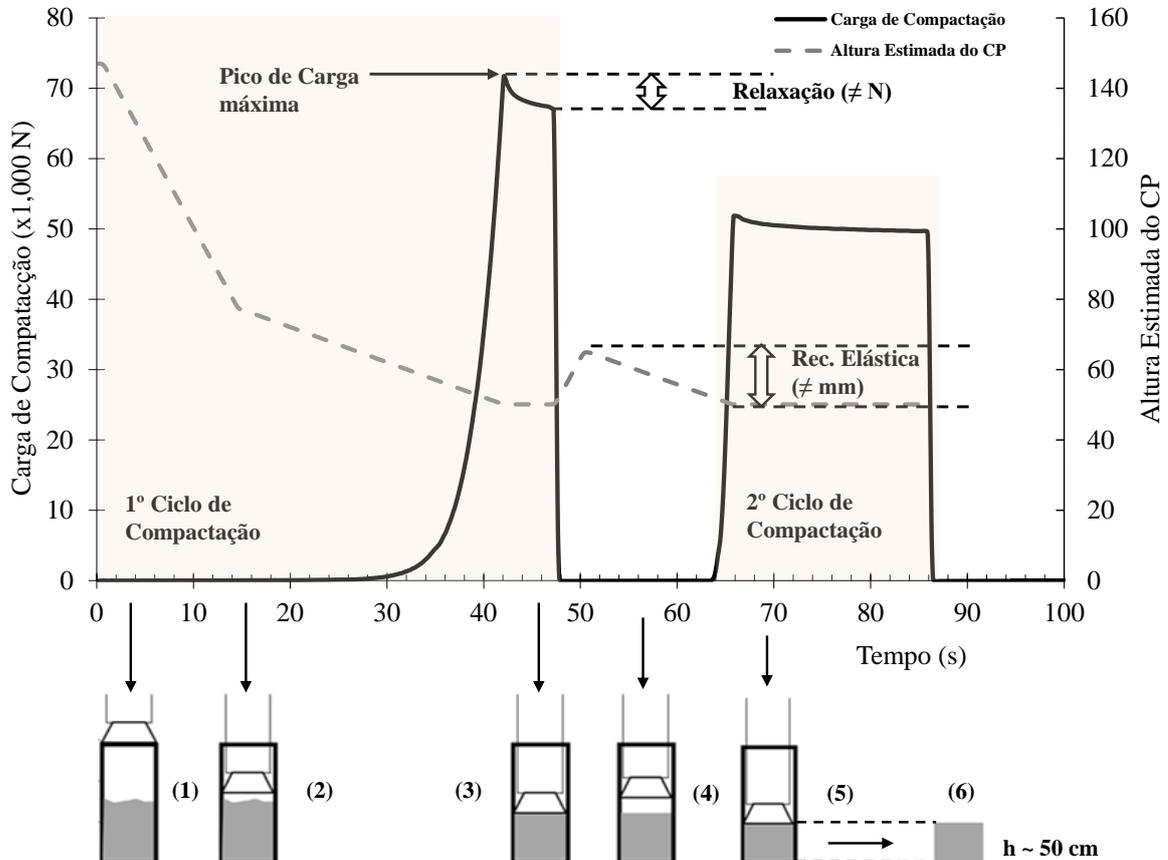
Para fabricação dos componentes foi utilizado aço inoxidável para evitar deformações do molde quando as cargas de compressão aplicadas à mistura atuam no molde, criando a condição restringida esperada no ensaio.

Figura 23 – Ilustração dos componentes elaborados para execução o ensaio de reometria compressiva (adaptado de Marchioni. 2012)



Abaixo Figura 24 será apresentado o protocolo de compactação, com base nas etapas de realização do ensaio:

Figura 24 – Procedimento de compactação para concretos secos utilizando prensa de laboratório.



Representação esquemática do corpo de prova durante o ensaio. Altura final aproximada de 50 cm.

- Etapa 1: Iniciando o primeiro ciclo de compactação, a amostra é colocada no molde e o pistão da prensa é disposto na altura do molde metálico (147 mm) que acopla os moldes bi-partidos, considerando este o valor inicial do deslocamento do molde;
- Etapa 2: O pistão é deslocado para baixo, a uma taxa constante de deslocamento de 5 mm/s, seguido por 30 mm adicionais a uma taxa de deslocamento de 1 mm/s;
- Etapa 3: Inicia-se a compressão da massa de concreto seco dentro do molde confinado. O pistão desloca-se aproximadamente 100 mm de profundidade pelo molde, gerando uma amostra de aproximadamente 50 mm de altura. Nesta etapa, obtém-se a carga máxima de compactação, sendo possível determinar o trabalho obtido durante a compactação (N.m), medido pela área sob a curva força máxima vs deslocamento para o primeiro ciclo de compactação. Em seguida, o pistão foi mantido nessa posição por 5 s, que representa o tempo do ciclo de compactação de vibroprensas utilizadas pelas fábricas, após o qual foi medida a diminuição da carga, isto é, a relaxação. A relaxação

é uma acomodação plástica para dissipar a energia após a compactação [39]. A energia é dissipada pelo comportamento viscoelástico devido à presença de água ou outros aditivos que lubrificam as partículas e permitem a reorganização do esqueleto granular [20,40]. A relaxação (R) foi determinado no primeiro ciclo de compactação usando a Equação 2.

$$R (N/N) = 100 \times \frac{F_{(max,ciclo I)} - F_{(max,ciclo I+5s)}}{F_{(max,ciclo I)}} \quad (\text{Eq. 1})$$

- Etapa 4: O pistão foi elevado em 20 mm (taxa de deslocamento de 5 mm/s)
- Etapa 5: Inicia-se o segundo ciclo de compactação, com o pistão novamente deslocado 20 mm para a posição de referência, exercendo carga sobre a amostra, onde foi mantido por mais 20 s. Um segundo ciclo de compactação foi utilizado como uma alternativa à vibração usada pelas prensas vibratórias, a fim de melhorar a acomodação das partículas e melhorar a coesão do concreto seco. Na metodologia adotada neste trabalho, não foi possível utilizar plataformas vibratórias para favorecer a acomodação dos materiais durante a compactação, uma vez que a estrutura da prensa era fixa ao local que estava apoiado. Como recomendação para trabalhos futuros, é sugerido a vibração prévia da massa de material seco a ser preenchido no molde a fim de verificar se o segundo ciclo de compactação pode ser removido desta metodologia.
- Etapa 6: O pistão inicia o deslocamento no sentido oposto (subindo), descomprimindo a amostra de concreto seco e gerando um corpo de prova de aproximadamente 50 cm de altura, dentro do molde bi-partido.

A mudança na altura da amostra registrada entre o primeiro e o segundo ciclo de compactação permitiu calcular a recuperação elástica. A altura de 147 mm é o ponto de partida do pistão (mm). No primeiro ciclo, a amostra foi totalmente compactada. No segundo ciclo, a altura da amostra aumentou devido à recuperação elástica.

A recuperação elástica é a fração de energia que não se dissipa; portanto, o material se expande (deformando em uma direção oposta à carga), gerando microdefeitos em sua microestrutura [41]. A recuperação elástica ($\epsilon_{e,rec}$) foi determinada pela Equação 3

$$\epsilon_{e,rec} \left(\% \frac{mm}{mm} \right) = 100 \times \frac{(147 - \Delta S_{Fmin,ciclo II}) - (147 - \Delta S_{Fmax,ciclo I})}{(147 - \Delta S_{Fmax,ciclo I})} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde $\Delta S_{F(max,ciclo I)}$ é o deslocamento registrado no pico de carga máxima no primeiro ciclo de compactação e $\Delta S_{F(min,ciclo II)}$ é o deslocamento registrado para a primeira carga medida no segundo ciclo de compactação. Vale ressaltar que o método não permite um controle mais

preciso da deformação do corpo de prova e ou dos moldes metálicos utilizados uma vez que a compactação é realizada em moldes rígidos e confinados, impossibilitando a utilização de medidores do tipo LVDT, sendo uma das limitações do método.

Após a conclusão dos ciclos de compactação, cada amostra foi extraída juntamente com os dois moldes semicilíndricos acoplados usando um extrator automático personalizado (Figura 25); sendo os moldes removidos após 24 h.

Figura 25 - Extrator automático personalizado dos dois moldes semicilíndricos acoplados. Os dois moldes se sobrepõem à amostra de concreto seco.



2.1.1 Condições de controle do volume compactado e misturas

O volume de referência compactado ($98,2 \text{ cm}^3$ - Tabela 4) foi definido pelo deslocamento máximo do pistão. Assim, a altura de todas as amostras foi de $\sim 5 \text{ cm}$. No processo de fabricação, as alturas dos moldes geralmente são fixas e a quantidade de material que os preenche depende do tempo de alimentação da vibro-prensa. O controle desse tempo é importante para garantir a compacidade da mistura. Um tempo de alimentação mais longo implica que é necessário mais concreto para preencher o molde para reduzir os vazios e, assim, aumentar a densidade e a resistência final [17].

Para cada mistura, foram consideradas três condições diferentes de volume moldado (Tabela 3). Eles foram aplicados aumentando sucessivamente a carga de compactação. A condição de maior volume moldado não foi fixada para todas as misturas, pois foi obtida a partir de testes exploratórios. Ultrapassamos intencionalmente as condições de volume moldado compactado para analisar como a energia de compactação melhoraria o desempenho correspondente do concreto seco.

Tabela 3– Condições de Volume de controle de compactação das misturas secas.

| Misturas | Volume de referência do molde cilíndrico (cm ³) | Volume moldado, em relação ao referencial (%) | Volume granular compactado (cm ³) | Massa granular compactada (g) (*) |
|------------------------|---|---|---|-----------------------------------|
| Cimento - NA (sem gap) | 98.2 | 90 | 88,4 | 166,5 |
| | | 98 | 96,2 | 182,3 |
| | | 104 | 102,0 | 192,7 |
| Cimento - NA (com gap) | 98.2 | 90 | 88,4 | 171,7 |
| | | 98 | 96,2 | 186,8 |
| | | 106 | 106,0 | 192,7 |

(*) A massa não inclui água. Foi determinado como volume granular compactado \times densidade de empacotamento.

2.1.2 Teor de umidade ótima

Considerando que a água tem a função de aumentar a mobilidade da mistura através da redução de atrito entre as partículas, foram realizados ensaios com teores de umidade diferentes nas misturas de concreto seco a fim de se obter o concreto seco com maior densidade aparente e menor exsudação após a compactação.

Inicialmente o teor ideal de água foi determinado para as três misturas diferentes usando um volume granular compactado fixo de 98% (Tabela 3). A massa de água foi calculada considerando a massa de cada mistura seca. Realizamos testes exploratórios variando a proporção de água para o teor de sólidos entre 0,04 e 0,09 (nas etapas de 0,01) para a mistura de referência (cimento-NA com e sem gap)

Dezoito corpos de prova, três para cada mistura e cada conteúdo de água foram moldados. A massa e o volume geométrico (obtidos pelas medidas de diâmetro e altura) de cada amostra de concreto foram determinados e a densidade geométrica foi calculada. Este procedimento foi realizado para as 54 amostras.

2.1.3 Análises do estado endurecido

As amostras de concreto seco foram desmoldadas após 24 horas e curadas em uma câmara úmida (> 98% R.H.) por 27 dias. Três (ou seis) amostras foram testadas para determinar a resistência à compressão de 28 dias. Foram determinadas a massa e as dimensões (altura e diâmetro médios), bem como a densidade geométrica (massa / volume geométrico) de cada amostra. Para estimar a densidade real das amostras, assumimos que a quantidade de água quimicamente ligada era 0,23 da massa do cimento. As densidades reais preliminares calculados pela lei da mistura são apresentados na Tabela 3. A porosidade das amostras foi determinada (Eq. 1) considerando suas geometrias e densidades reais.

A resistência à compressão foi determinada em 28 dias para três amostras por série, de acordo com a ABNT NBR 5739: 2007. A Tabela 4 resume os coeficientes usados para corrigir os resultados em função da relação altura / diâmetro (h / d).

Tabela 4 - Fator de correção para estimar a resistência à compressão dos corpos de prova conforme ABNT NBR 5739 (2007).

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

Na configuração adotada para moldagem dos corpos de prova por reometria compressiva, a relação h/d obtida foi de 1,00. Em trabalhos analisados com diferentes classes de concreto [41] e argamassa [42] a variação da altura dos corpos de prova cilíndricos não apresentaram diferenças estatísticas que invalidam a sua aplicação, sendo as principais características que prejudicam a resistência à compressão dos corpos de prova analisados, a classe de resistência do concreto/argamassa e o formato do corpo de prova (cúbicos ou cilíndricos).

Apesar do pequeno número de amostras, os resultados do trabalho de compactação e da resistência à compressão foram comparados estatisticamente com o teste t-Student (Tabela 12 e Tabela 13) para verificar se havia uma diferença significativa entre as misturas.

2.1.4 Materiais utilizados e elaboração das formulações

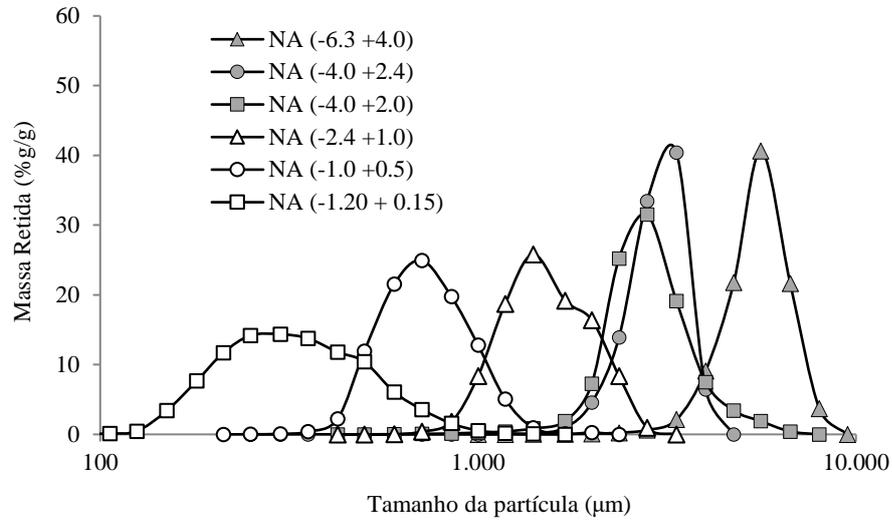
Foram coletados 50 quilos de agregados naturais de quartzo (NA) de diferentes frações de tamanho: a) Seixo britado (6,3 a 4,8 mm) da cidade de Castilho (São Paulo), b) fração grossa da areia normalizada comercializada pelo IPT (4,0 a 2,4 mm), c) areia de cava (4,8-0,15 mm) de jazida localizada na cidade de Itaquaquecetuba (São Paulo); e d) areia fina (1,2-0,15 mm) de jazida localizada na cidade de Bofete (estado de São Paulo).

Cada fração de agregado foi homogeneizada e separadas em amostras de aproximadamente 1 kg para posteriormente ser realizado o peneiramento por 10 minutos para as diferentes frações de tamanho de partícula através de peneirador vibratório de escala de laboratório. A separação em intervalos de peneiras (conforme Tabela 6) foi utilizada para separar os agregados graúdos (entre 6,3 e 4,0mm) dos agregados miúdos (abaixo de 4,0mm) e posteriormente compor a distribuição granulométrica das misturas atendendo os limites granulométricos especificados para formulações de blocos de concreto adotados por Fernandes [14]. Após a realização do peneiramento, a distribuição de tamanhos das diferentes frações foi determinada por análise dinâmica de imagens (DIA) [43,44].

A análise foi realizada com o equipamento QicPic da Sympatec, utilizando uma unidade de dispersão a seco gravitacional (GRADIS) e uma unidade de alimentação automática (VIBRI / L). Para as análises foram utilizadas cerca de 1000 g das amostras de fração mais grossa (> 4,8 mm) e 200 g das amostras de fração mais fina (<4,8 mm), procurando-se garantir massa mínima necessária para se obter representatividade estatística.

O parâmetro usado para definir o tamanho das partículas foi o parâmetro “BR_min”(diâmetro mínimo da partícula) por apresentar maior similaridade aos resultados obtidos pelo peneiramento [45]. A Figura 26 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados após a separação das frações e realização da Análise Dinâmica de Imagens.

Figura 26 - Distribuições discretas de tamanho de partícula para diferentes frações de tamanho: agregados naturais - NA “-” implica que a fração está passando nesse tamanho de peneira. “+” Implica que a fração é retida nesse tamanho de peneira



Para todas as misturas de concreto seco, foi utilizado um cimento Portland do tipo CPV ARI (alta resistência inicial - contendo aproximadamente 95% de clínquer), comumente utilizado na indústria devido ao rápido ganho de resistência à compressão aos 7 dias (equiparável ao resultado obtido pelos cimentos do tipo CP II, III e IV em idades de 28 dias) o que favorece o processo de desforma dos blocos de concreto. Sua densidade foi de 3,1 g / cm³ (determinado pela picnometria de gás Hélio). A distribuição granulométrica do cimento foi determinada por difração a laser (Malvern Mastersizer) com faixa de operação entre 100 e 0,1 µm. Os parâmetros estatísticos da fração passante foram: d₉₀ = 42,5 µm, d₅₀ = 16,8 µm e d₁₀ = 2,28 µm.

Com base nas formulações utilizadas numa fábrica de blocos de concreto situado em São Paulo, foram acrescentados 2 aditivos nas formulações, um retardador de pega a base de ácido carboxílico (para controlar a trabalhabilidade, em baixos teores de água), e um aditivo plastificante (reduzidor de água) convencional, a base de lignossulfonatos (para evitar a aglomeração das partículas de cimento), ambos em 0,3% m.c., em relação massa de cimento.

A densidade aparente (D_{ap}) e real (D_{real}), a absorção de água e a porosidade (P_{ag}) dos agregados (Tabela 5) foram determinadas pelos métodos padrão brasileiros (NBR NM 52: 2009, NBR NM 53: 2009 e NBR NM 30: 2001).

Tabela 5 - Absorção de água, densidade e porosidade dos agregados.

| Agregado | Absorção de água (% g/g) | Densidade aparente D _{ap} (g/cm ³) | Densidade real D _{real} (g/cm ³) | Porosidade P _{ag} (%cm ³ / cm ³) |
|----------|-----------------------------|--|--|---|
| NA | 0,42 | 2,61 | 2,63 | 0,9 |

Nota: a porosidade foi calculada por $P_{ag} = 1 - (D_{ap}/D_{real}) \times 100$. Deduções baseadas nas normas ASTM. A densidade aparente (DA) é igual à massa específica aparente (ASTM) da norma atual de agregados. A densidade real (DR) é igual à massa específica dos agregados, sem incluir os poros no interior dos agregados.

As misturas de concreto seco foram formuladas seguindo os limites de tamanho de agregados recomendados para a produção de componentes de concreto pré-moldado pelos produtores das máquinas industriais, Pffeinberger (prensas hidráulicas da Columbia) [37] (Figura 27). Esses limites são comumente usados pelos produtores brasileiros de blocos de concreto.

Os conceitos de empacotamento e dispersão de partículas foram aplicados nas formulações, gerando distribuições granulométricas com e sem descontinuidade (gaps) dos tamanhos de partículas ao longo da extensão granulométrica. Os intervalos foram introduzidos nas faixas de tamanho de 100mm (compreendendo o intervalo entre o cimento e areia) e no intervalo de 1000mm (correspondendo ao intervalo entre areia e agregado graúdo/pedrisco) com o objetivo de reduzir o efeito parede nas formulações de concreto seco, respeitando a relação $dl/ds < 10$ como apresentado na Figura 16.

A Tabela 6 resume as formulações de concreto seco com e sem gaps estudados neste trabalho. O teor de cimento (~ 9% do volume da mistura seca) e agregados (~ 91% do volume da mistura seca); sendo constantes em todas as formulações.

A Figura 28 mostra a distribuição granulométrica discreta das misturas secas (agregados e cimento) das formulações de concreto seco. Há uma descontinuidade na extensão granulométrica das misturas de cimento e agregado perto de 100 μm . A formulação denominada NAg não apresenta massa retida de partículas com tamanho de 1.000 μm (1,0 mm) na extensão granulométrica da mistura. Este intervalo foi escolhido para favorecer o empacotamento das partículas mantendo a razão ~ 10 dl / ds.

Tabela 6 - Formulações de concreto seco.

| Formulações com Agregado Natural (NA) | | | | | | |
|---|-----------------|--|---------------------------------|-----------------|--|---------------------------------|
| Materiais (intervalo de tamanho - mm) | NA (Sem GAP) | | | NAg (Com gap) | | |
| | Massa (%g/g) | Volume (%cm ³ /cm ³) | Consumo (kg/m ³) | Massa (%g/g) | Volume (%cm ³ /cm ³) | Consumo (kg/m ³) |
| Cement (-0.075) | 10,30 | 9,00 | 238 | 10,29 | 7,13 | 237 |
| NA (-6.30+4.00) | 17,94 | 17,87 | 414 | 13,46 | 13,51 | 310 |
| NA (-4.00+2.00) | 8,97 | 8,97 | 207 | - | - | - |
| NA (-4.00+2.40) | 8,97 | 9,14 | 207 | 31,40 | 33,9 | 724 |
| NA (-2.40+1.00) | 13,46 | 13,70 | 311 | - | - | - |
| NA (-1.00+0.50) | 13,46 | 13,01 | 311 | - | - | - |
| NA (-1.20+0.15) | 26,92 | 27,62 | 622 | 44,85 | 45,46 | 1034 |

Figura 27- Limites para distribuições de tamanho de partículas (volume acumulado retido) dos agregados utilizados para a produção de blocos de concreto [46].

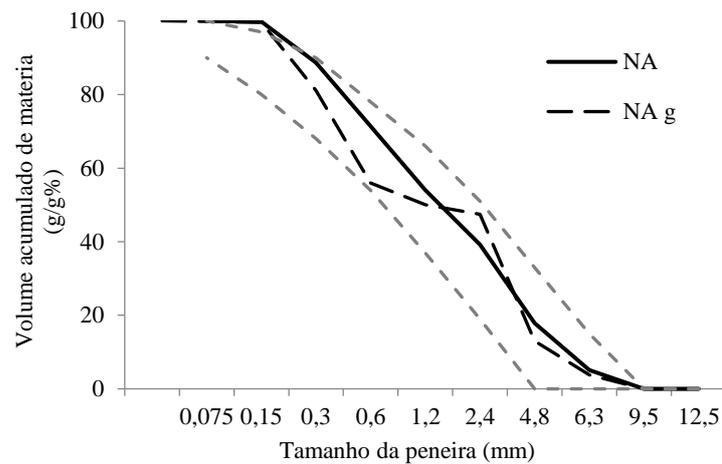
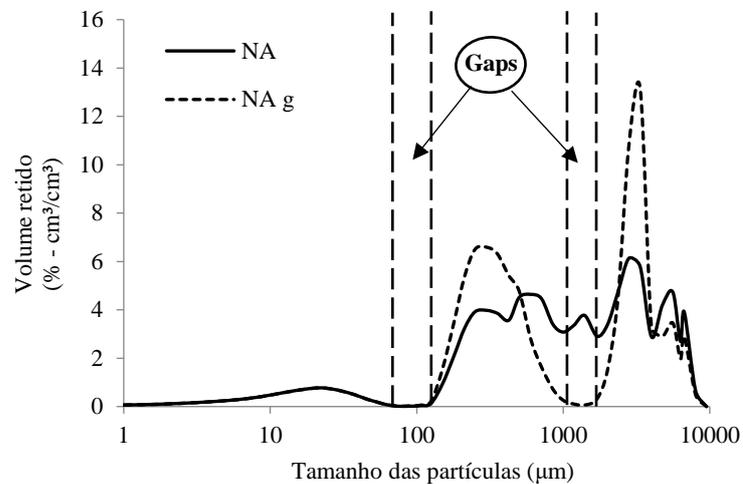


Figura 28 - Distribuições de tamanho de partículas (discreta) das misturas secas (cimento e agregados).



O gap empregado na distribuição granulométrica, tende a favorecer o empacotamento da mistura, a partir da redução do efeito parede. Para verificar a eficiência do gap foi analisada a densidade de empacotamento (D_{tap}) de cada mistura seca (cimento e agregados) usando o módulo do equipamento Geopyc 1360 (marca registrada Micromeritics) [38]. O método determina os vazios intergranulares entre as partículas no estado compactado.

A determinação foi realizada em ~ 40 g de amostra de cada mistura seca em um recipiente de 81 cm^3 ($\varnothing = 5,08 \text{ cm}$ x $h = 4,0 \text{ cm}$) do dispositivo (pistão de 145 N). Para superar as limitações em relação à massa utilizada (de 20 a 24% em massa da amostra compactada), a medição foi realizada em triplicata e, a mesma medida, foi realizada pelo menos 6 vezes.

As densidades aparentes das misturas cimento-agregado (D_{apmix}) foram determinadas pela Equação 4, usando o princípio da lei da mistura. O volume aparente (V_{ap}) dos agregados foi obtido dividindo a massa pela densidade aparente listada na Tabela 1. O volume de cimento foi

obtido dividindo a massa pela densidade real (DR) (consulte a seção 0) porque assumimos a porosidade do cimento como zero.

As densidades reais das misturas cimento-agregado ($D_{realmix}$) foram determinadas usando uma expressão semelhante à Eq. 1 (ver nota de rodapé na tabela 3).

$$D_{pmix} = [(M_c + M_{ag}) / (V_c + V_{apag})] \quad (\text{Eq. 4})$$

Na Eq. 4, M_c é a massa (g), V_c é o volume (cm^3) de cimento e M_{ag} é a massa (g) e V_{apag} é o volume aparente (cm^3) dos agregados.

Os vazios entre partículas nas misturas cimento-agregado (mistura V_{inter}) foram determinados usando a Equação 5 A porosidade das partículas das misturas ($P_{part-mix}$) foi determinada usando a Equação 6.

$$V_{inter - mix} = [1 - (D_{tap} / D_{pmix})] \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$P_{part - mix} = [1 - (D_{pmix} / D_{realmix})] \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

A porosidade total (P_{tot}) foi calculada como a soma dos vazios entre as partículas e a porosidade das partículas (Tabela 7). Como era de se esperar, a mistura seca contendo gap na formulação teve uma densidade de empacotamento superior à da mistura sem gap.

Tabela 7 - Densidades e porosidades das misturas secas (cimento + agregados).

| Misturas secas | Densidade de empacotamento (g/cm^3) | Densidade aparente da mistura (g/cm^3) | Densidade real da mistura (g/cm^3) | Porosidade das partículas da mistura (% cm^3/cm^3) | Vazios interparticulares da mistura (% cm^3/cm^3) | Porosidade total da mistura (% cm^3/cm^3) |
|----------------|---|--|--|---|--|--|
| NAg (com gap) | 1,942 ± 0,013 | 2,532 | 2,619 | 3,29 | 23,33 | 26,62 |
| NA (sem gap) | 1,895 ± 0,015 | 2,523 | 2,624 | 3,86 | 24,90 | 28,76 |

Nota: $D_{realmix} = (M_c + M_{ag}) / (V_c + V_{realag})$.

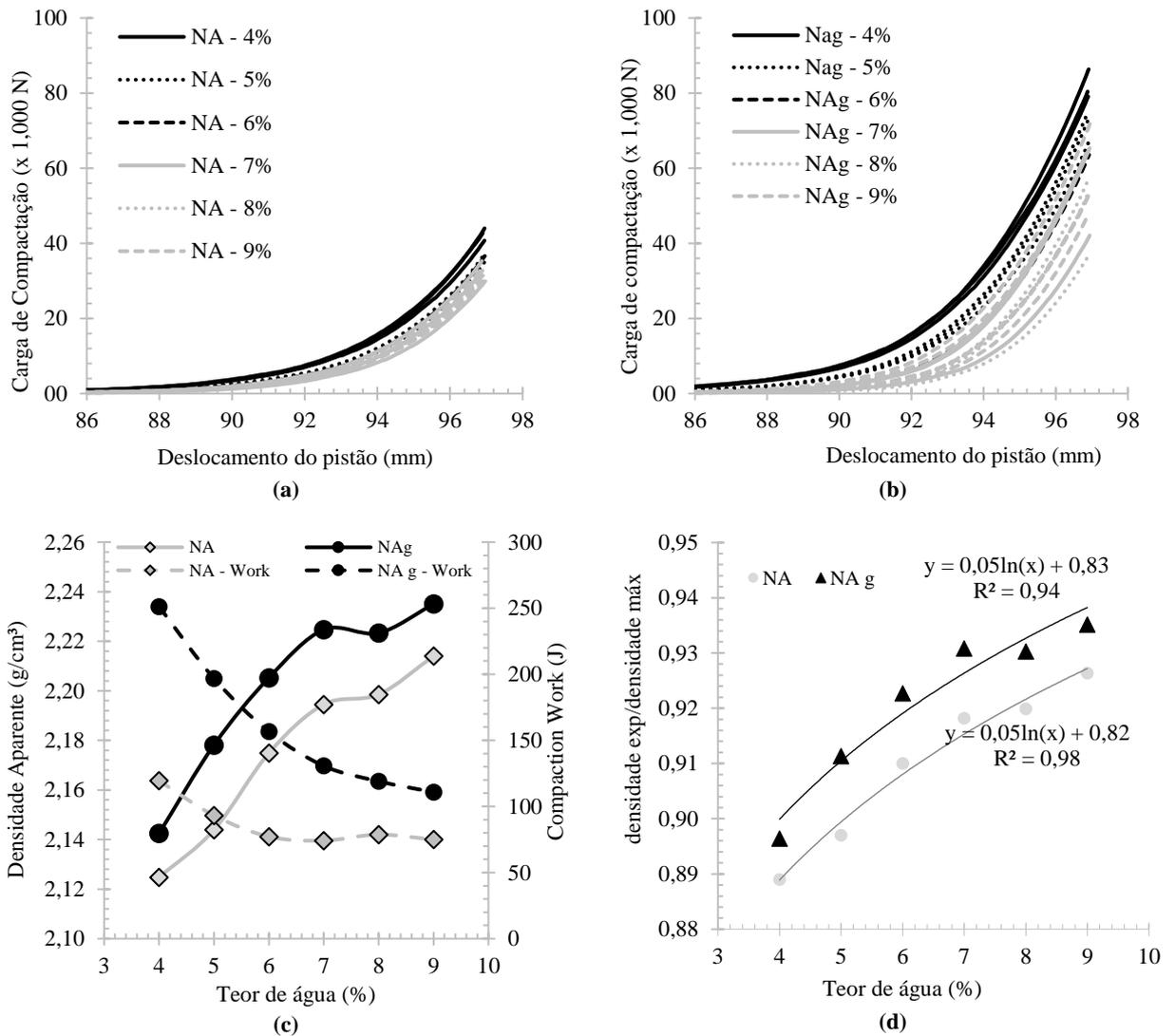
V_{real} (volume real) foi obtido pela divisão da massa pela densidade real de cada material listado na tabela

2.2 Resultados e discussões

2.2.1 Análise no estado fresco- Teor de umidade ótima

A Figura 29 a seguir, apresenta as análises da compactação no estado fresco do concreto seco.

Figura 29 – Carga de compactação vs Deslocamento do pistão para NA (a) e NAg (b), (c) Teor de água ótimo para os concretos secos em relação com a densidade e trabalho de compactação(c), (d) eficiência da compactação vs teor de água dos concretos secos



A carga de compactação para os diferentes teores de água foi maior nas misturas de concreto seco com gap. Teores mais altos de água causam uma diminuição na energia de compactação (Figura 29a), pois a água aumenta o conteúdo da pasta de cimento e da viscosidade, reduzindo o atrito entre as partículas e facilitando a compactação.

O teor ideal de água para a mistura de referência (cimento e agregados naturais) foi de 7% em massa dos materiais secos (Figura 29c), valor próximo ao adotado pelos fabricantes de blocos de concreto. Embora as densidades do concreto seco sejam levemente mais altas para maiores conteúdos de água, esse valor apresentou menor exsudação após a compactação. O extravasamento de água pelos vãos do molde e do cilindro, durante a compactação pode prejudicar a análise de dados, uma vez que não podemos quantificar qual o teor real de água utilizado na mistura seca, interferindo nas análises.

O teor de água é fixo para estabelecer uma resistência de pasta de cimento semelhante para as distribuições granulométricas com e sem gap. Ambas as condições garantem resultados próximos às densidades máximas de compactação.

As formulações com gap podem atingir densidades semelhantes com menor teor de água, embora aumentem o trabalho de compactação. A densidade obtida no teor ideal de água da mistura sem gap (7%) pode ser alcançada com aproximadamente 5,6%, quando se tem a formulação com gap. Essa redução de água pode aumentar a resistência à compressão.

Pode ser visto na Figura 29d que a densidade de um concreto seco produzido com uma distribuição granulométrica com gap é sempre maior do que a produzida sem gap. Assim, o volume dos vazios a serem preenchidos por um volume constante de água e cimento é menor e os concretos resultantes são mais densos.

As densidades máximas dos concretos seco na compactação foram admitidas igual a $2,39 \text{ g/cm}^3$, quando se admite que não há mais vazios intergranulares, e todo o volume de vazios deixados pelos agregados são preenchidos por pasta de cimento. Esses valores são estimados pela lei da mistura usando a densidade aparente dos agregados, a densidade do cimento e o teor total de água (7 % g / g). É a condição em que a pasta de cimento, ainda fresca preenche todos os vazios entre partículas e a porosidade dos agregados é desconsiderada.

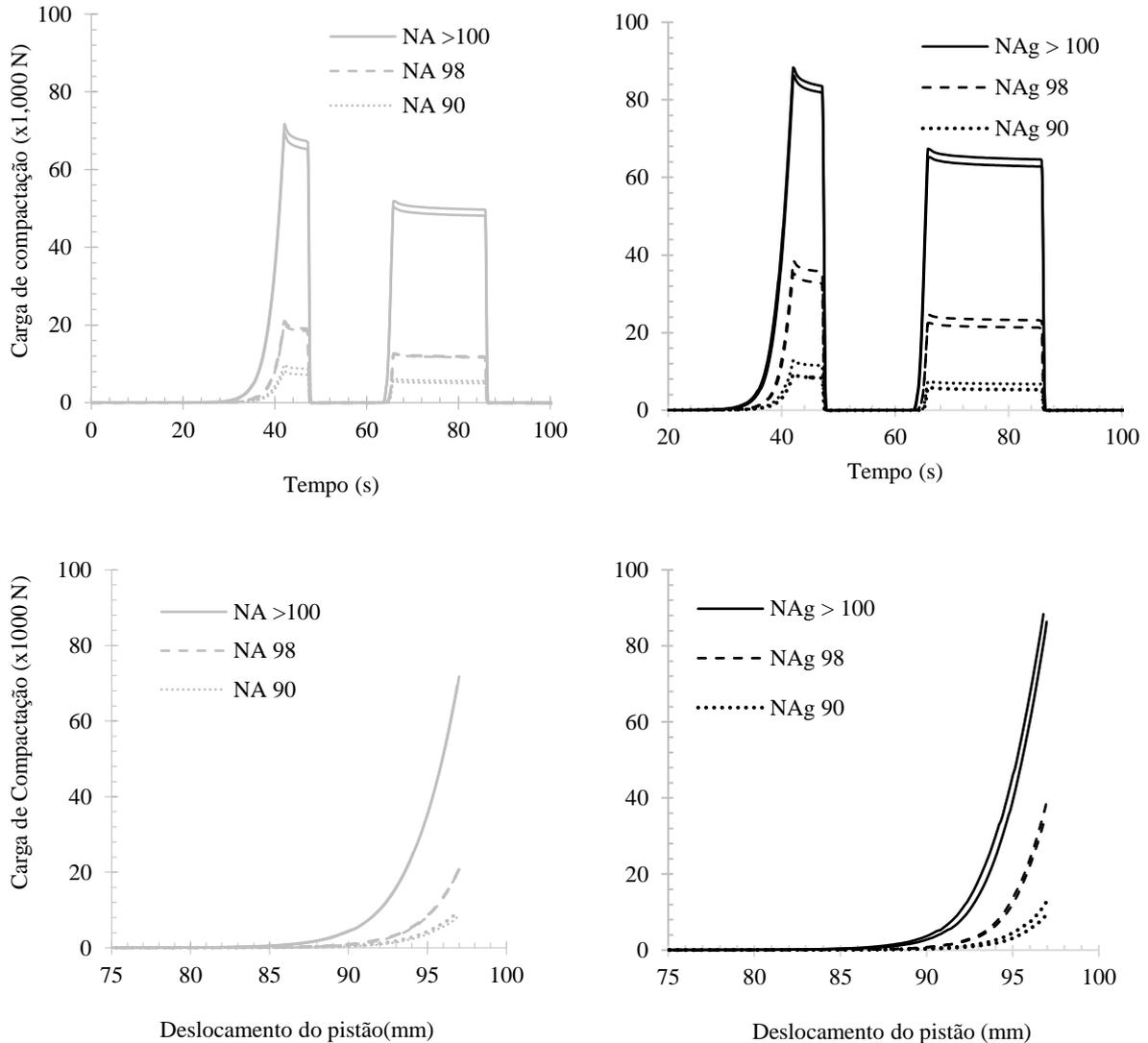
As densidades máximas na compactação também são diferentes das densidades reais estimadas dos concretos listados na Tabela 7, onde apenas o volume dos sólidos (pasta de cimento hidratada e fração sólida não porosa dos agregados) é considerado. Neste caso, a porosidade da pasta de cimento (vazios capilares) e poros dos agregados (quando presentes, especialmente no caso dos agregados reciclados) são desconsideradas.

A eficiência da compactação é então estimada (Figura 29d) usando a razão entre a densidade experimental e a densidade máxima de compactação. O aumento no teor de água aumenta a eficiência da compactação, bem como a distribuição granulométrica com gap.

2.2.2 Análises das curvas de compactação

A seguir, são apresentadas as análises das curvas de compactação obtidas pelo método de reometria compressiva.

Figura 30 - Ciclos de prensagem (acima) e cargas máximas vs deslocamentos durante o primeiro ciclo de compactação (abaixo).



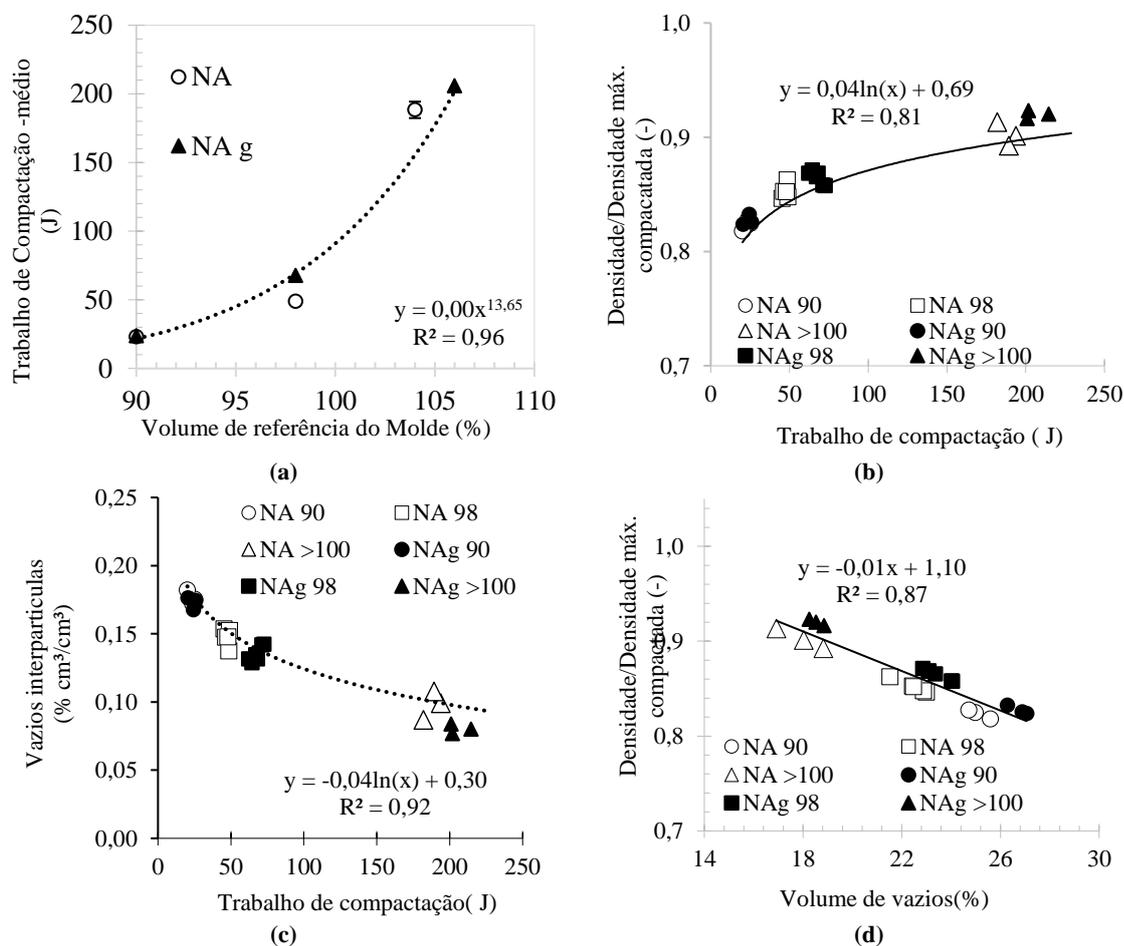
A configuração de ensaio adotada através da reometria compressiva, garante uma altura fixa do pistão que aplica a carga na amostra de concreto seco confinada, semelhante às sapatas/extratores (Figura 1) da vibroprensa. Como no processo de fabricação dos blocos de concreto, tanto o volume do molde e o deslocamento do pistão podem ser fixos, a única variação de características como densidade, volume de vazios e desgastes dos equipamentos, está relacionado ao controle de vazão da massa de concreto seco que preenche o molde. Uma quantidade maior de massa gera maior densidade aparente, menores vazios e consequente

ganho de resistência do bloco; porém, pode contribuir também para maior desgaste no equipamento, aumentando o custo operacional das fábricas.

A Figura 30 mostra os valores de carga de compactação ao longo do tempo durante os ciclos de compactação, bem como o pico de carga (carga máxima no primeiro ciclo de compactação) e os respectivos deslocamentos do pistão. Em todas as misturas, o volume compactado granular acima da referência do molde (volume moldado > 100%) exibe a maior carga de compactação, seguido por 98% e 90% das condições do volume de referência do molde.

O trabalho durante o primeiro ciclo de compactação foi determinado calculando a área sob as curvas de pico de carga versus deslocamento, como apresentado abaixo.

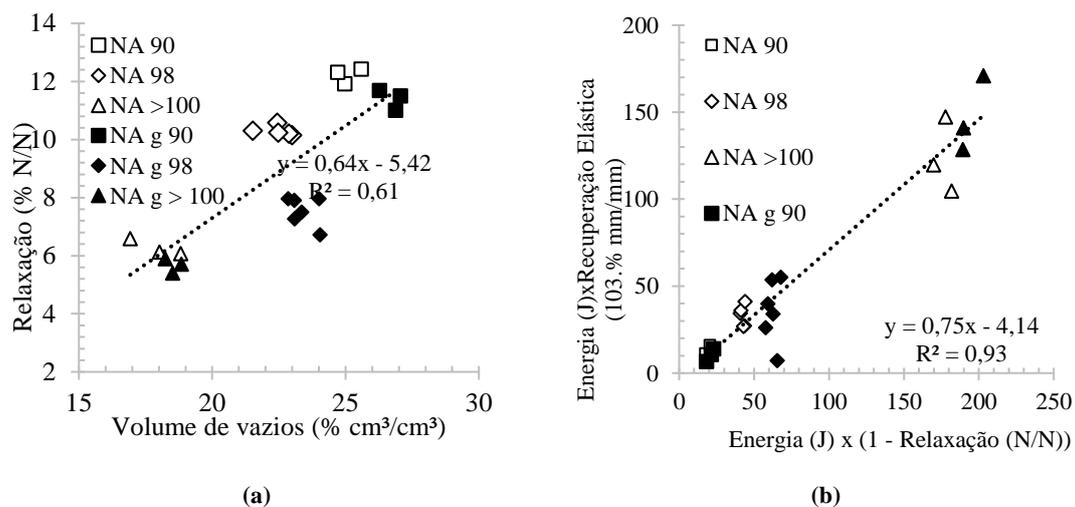
Figura 31- (a) Trabalho de compactação vs. Volume de referência do molde, (b) Densidade relativa (c) e Vazios entre partículas vs. Trabalho de compactação, e (d) Densidade relativa vs. Volume de vazios.



O trabalho na compactação aumenta com o aumento do volume de referência do molde (Figura 31a) e é sistematicamente mais alto para os concretos gap devido ao aumento da densidade de empacotamento da mistura granular (Tabela 7). A densidade relativa dos concretos aumenta com o trabalho de compactação (Figura 31b); assim, os vazios entre partículas - expressos numericamente como $[1 - (\text{densidade experimental} / \text{densidade máxima})]$ - diminuem (Figura 31c). Uma energia de compactação mais alta implica um concreto mais denso e menos poroso (Figura 31d).

Observa-se que um volume maior de vazios leva a valores de relaxação mais altos (Figura 32a). Os poros dissipam as tensões internas durante a compactação de um material. No entanto, as distribuições com gap reduzem a relaxação dos concretos seco. O aumento na densidade de empacotamento da mistura granular implica uma redução nos vazios (entre partículas).

Figura 32- (a) Relaxação vs. volume de Vazios; (b) Relaxação vs. recuperação elástica em relação com a energia (trabalho de compactação).

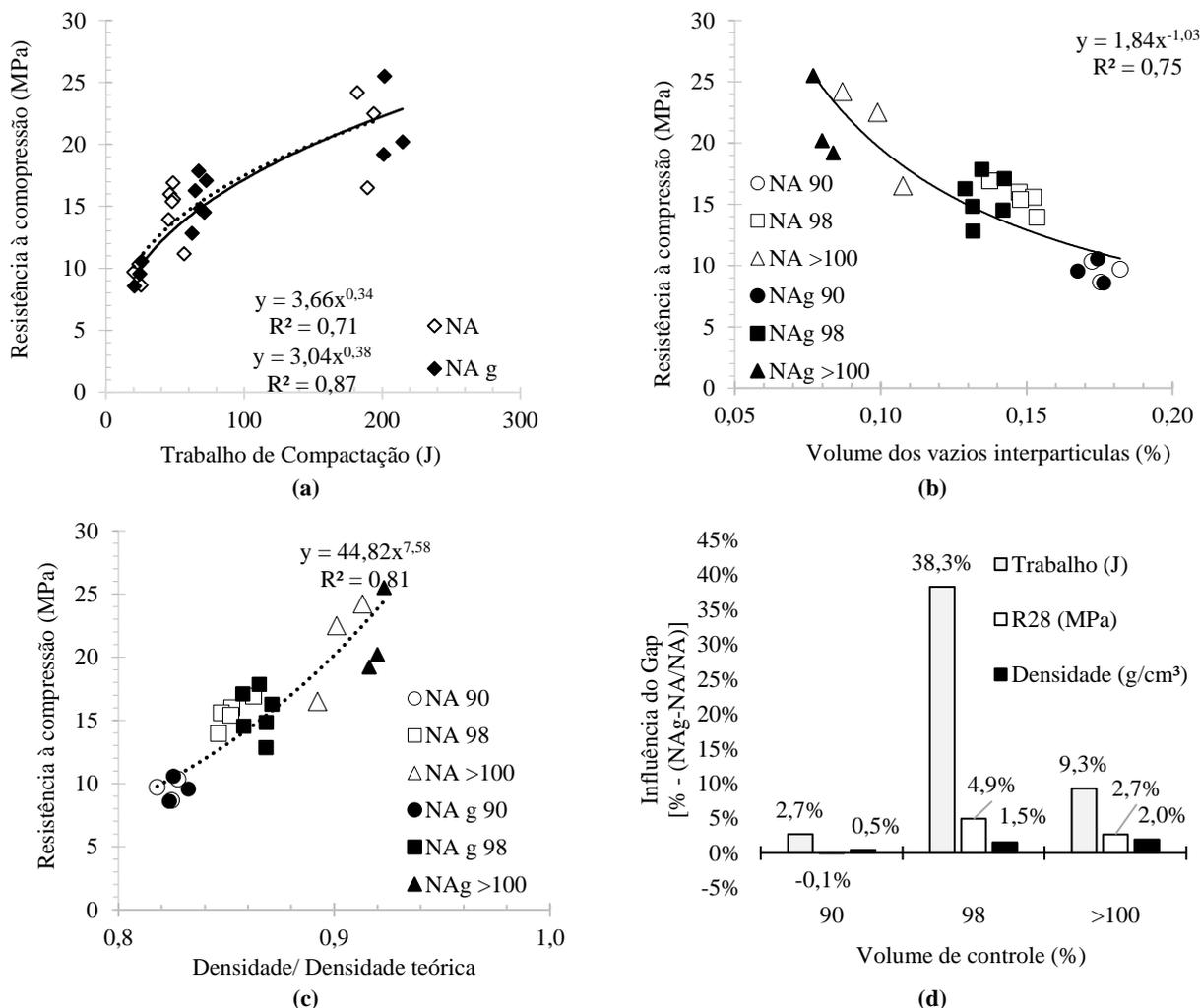


A recuperação elástica ocorre logo após a prensagem e representa a quantidade de energia não dissipada durante a relaxação devido ao contato com um corpo elástico rígido (Figura 32b). Assim, essa deformação é recuperada como uma resposta elástica. As recuperações elásticas aumentam com o aumento da energia total (trabalho de compactação) para as misturas com gap. Essa resposta elástica da compactação pode gerar novos vazios e microfissuras nos concretos seco.

2.2.3 Análises no estado endurecido

A seguir são apresentadas as análises no estado endurecido das formulações de concreto seco.

Figura 33 – (a) Resistência à compressão vs trabalho de compactação; (b) Resistência à compressão vs volume vazios interpartículas; (c) Resistência à compressão vs. densidade/densidade máxima dos concretos secos; (d) Influência do Gap nas propriedades.



Na análise do estado endurecido dos concretos secos foi observado um aumento na resistência à compressão devido ao aumento da energia de compactação (Figura 33a), independentemente da presença ou não de gaps no concreto seco. O aumento da energia de compactação promoveu a redução de vazios, aumentando a densidade relativa (Figura 33b).

Os valores de resistências à compressão do seco com um gap e o mesmo teor de água conteúdo são um pouco maiores, principalmente para volumes de referência de molde <100%. As diferenças estatísticas (APÊNDICES – Análises Estatísticas) confirmadas para 90 e 98% do volume de referência são devidas ao aumento da densidade de empacotamento das partículas da mistura seca [31], apesar da pequena quantidade de amostras testadas. Nas análises

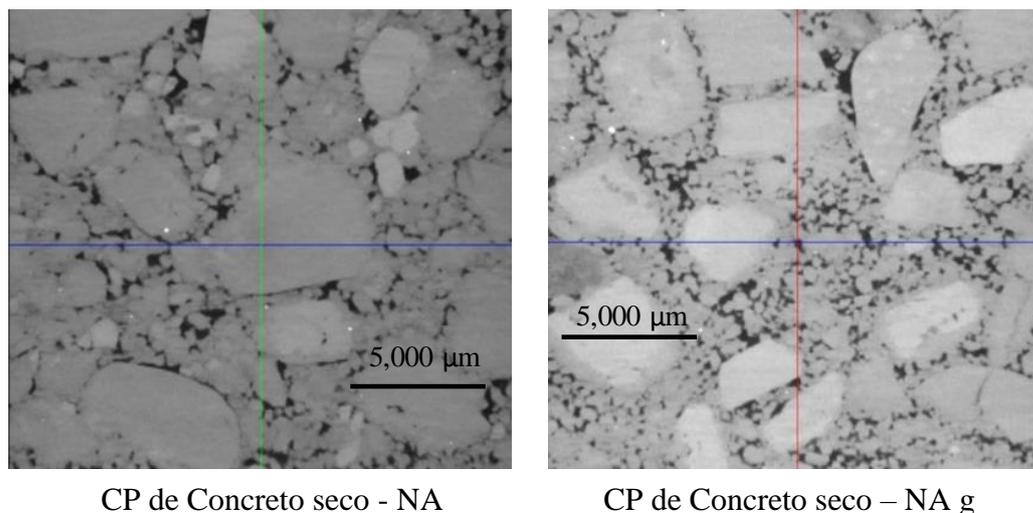
estatísticas realizadas (Teste T) apresentadas na Tabela 12, foram comparados os resultados médios das variáveis: Trabalho, Resistência a compressão, Densidade e Volume de vazios, para cada volume de compactação adotado, considerando os resultados das amostras com gap e sem gap. No geral, os testes T apresentaram que não existem diferenças significativas entre as médias das amostras, independente da variável adotada e do volume compactado, salvo a densidade e o volume de vazios, das amostras de 98% de volume de compactação.

Como esperado, os vazios entre partículas são macro-defeitos nos concretos secos vibroprensados que prejudicam significativamente a resistência à compressão dos materiais cimentícios [41].

As misturas com gap não aumentaram a resistência à compressão do concreto seco para o teor ótimo de água. O incremento da carga de compactação, gerado a partir da alteração do volume de controle, teve maior influência sobre a resistência à compressão e densidade do que a inclusão dos gaps na distribuição granulométrica. Uma produção mais rápida pode ser alcançada para uma densidade-alvo usando menos água (Figura 29c), levando também a um aumento da resistência à compressão, não sendo possível avaliar neste estudo.

Imagens de microtomografia (μ CT) (Figura 34) foram realizadas para verificar o tamanho do defeito das amostras (condições do volume de referência moldado > 100%). Para testes de microtomografia, o equipamento XRADIA-Zeiss 510 foi empregado nas seguintes condições: tamanho da amostra (20 mm x 20 mm x 20 mm), resolução máxima de imagem de 20 μ m, 0,39 x fonte objetiva Raio-X de 160kV-10W, 1020 x 1024 resolução de detector de pixels, 21.097 μ m de FOV, 17% de transmissão, fonte de amostra de 43 mm e 100 mm

Figura 34 - μ CT imagens de microestrutura dos concretos secos. Condições de volume de referência moldadas > %.100



CP de Concreto seco - NA

CP de Concreto seco – NA g

2.3 Conclusões do capítulo

O método de compactação laboratorial que usa uma máquina de teste universal permitiu obter parâmetros quantitativos como energia de compactação (trabalho), relaxação (acomodação viscoelástica durante a compactação) e recuperação elástica (alteração no volume após a compactação, devido ao contato rígido entre as partículas). Foi estabelecida correlação entre energia de compactação e parâmetros do estado endurecido (vazios, densidade e resistência à compressão), bem como entre relaxações e recuperações elásticas das misturas, comprovando a aplicabilidade do método.

A energia de compactação das misturas aumentou com a diminuição do teor de água. As misturas com gap na distribuição granulométrica promoveram o aumento da densidade de empacotamento e diminuíram os vazios intergranulares dos agregados. Reduz o teor de água necessário para atingir uma densidade-alvo e pode levar a uma produção mais rápida do concreto seco e de produtos de maiores resistência à compressão.

Além da redução da água nas misturas, o gap facilita a compactação devido ao aumento de mobilidade das partículas. Esta característica permite a redução do ciclo de compactação das vibroprensas e possivelmente reduzir o desgaste dos pistões que aplicam a compactação na mistura seca.

O aumento nos volumes compactados granulares das misturas (agregados e cimento) aumentou a energia e a densidade de compactação; reduziu a porosidade dos concretos seco. Volumes maiores de poros intergranulares geraram maiores relaxações, pois os poros dissiparam parte

da energia da compactação. A parte da energia que não é dissipada foi convertida na recuperação elástica.

Considerando os métodos utilizados atualmente para elaboração de formulações de concreto seco, análise estatística apresentada e os ensaios para atendimento aos requisitos de normas técnicas serem realizados em escala de fábrica, o método proposto oferece uma alternativa para o desenvolvimento de formulações mais ecoeficientes. Podem se estabelecer correlações entre as propriedades físicas e mecânicas obtidas no corpo de prova do método (50x50 mm) com os componentes pré-fabricados de escala industrial.

3 OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO SECOS COM AGREGADOS RECICLADOS ATRAVÉS DA REOMETRIA COMPRESSIVA

A utilização de agregados oriundos de resíduos de construção e demolição (RCD) para produção de concretos pode ser viável quando as exigências mecânicas são reduzidas como no caso de artefatos como blocos de concreto (resistência à compressão mínima – $f_{b,k} = 3,0$ MPa – tipo vedação [15]).

Os agregados de RCD são heterogêneos, ora constituído quase exclusivamente por concreto, ora misturado com cerâmica vermelha. Os agregados reciclados provenientes de resíduos cimentícios (concretos, argamassas) apresentam elevada absorção de água, devido à pasta de cimento aderida no agregado natural e, devido a porosidade, possuem densidade inferior aos agregados naturais [47]. A área superficial elevada e sua forma também interferem na demanda de água.

A absorção de água do agregado reciclado é muito influenciada pelo teor de cerâmica vermelha presente no agregado [48]. A elevada absorção de água dos agregados reciclados torna os concretos convencionais menos fluídos e interfere nas propriedades do estado fresco, sendo necessário, geralmente, compensar a absorção de água do agregado na mistura ou saturar previamente o agregado [49].

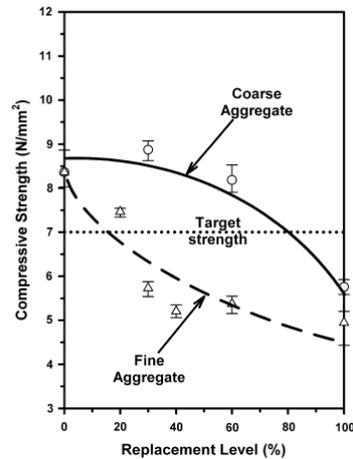
Os blocos de concreto e peças de pavimentação podem ser uma solução viável para utilização deste material em suas composições, porque não dependem exclusivamente da água para adquirem trabalhabilidade [20]. Nestas condições, alguns fatores devem ser considerados como o teor de substituição (preferencialmente em volume), a parcela a ser substituída (agregado graúdo ou miúdo) e qual a densidade do agregado reciclado, para se obter melhores produtos, sem alterar as propriedades mecânicas finais.

Diversas pesquisas realizadas no Brasil [8,12,26,36,50] e no mundo afora [47,51–53] recomendam substituição parcial dos agregados naturais de 20 a 50 % (em relação ao volume) por agregados reciclados. Muitos estudos restringem a utilização de fração areia. Além disso, a substituição parcial evita os efeitos negativos no estado fresco e a redução de desempenho mecânico dos concretos secos no estado endurecido.

A substituição deve ser realizada em volume, pois a densidade do material é diferente da parcela que será substituída, interferindo na densidade de empacotamento da mistura [53]. Soutsos [53],

sugere os teores de até 20% de substituição em relação à fração miúda (de 5mm até 0,075mm) e até 60% em relação aos agregados graúdos, para se obter blocos de concreto de até 7 MPa, sem alteração do consumo de cimento (fixado em 100kg/m³ em todos os níveis de substituição). Teores de partículas acima de 20% demandaram mais água e cimento, aumentando o consumo de cimento, para se atender aos níveis de especificação mínimos (Figura 35).

Figura 35– Teor de substituição de dos agregados miúdos de RCD (tracejado) e agregados graúdos de RCD (sólido) em relação à resistência a compressão [53].



Poon [52] também analisou o teor elevado de finos, substituindo a parcela de finos por argila em peças de pavimentação. A partir do aumento dos teores de substituição de agregados reciclados, houve uma redução da densidade do concreto (cerca de 10%), redução da resistência a compressão (37%) e aumento da absorção de água (250%; 2,5 vezes). O controle de qualidade do agregado deve restringir o teor de argila, pois a argila aglomera, gerando vazios que reduzem sua resistência à compressão.

Energia de compactação pode ser aumentada por distribuições granulométricas que contêm gap (descontinuidades). Pode ocorrer quebra de agregados e aumentar a densidade compactada do concreto seco, melhorando a resistência.

Ao considerar a utilização dos agregados reciclados para confecção de blocos e peças de pavimentação, deve-se atentar à quebra do agregado (devido a porosidade interna dos agregados reciclados) pelas vibro-prensas, durante a fabricação dos produtos. Park [54] realizou ensaios de esmagamento (*single-particle crushing test*) (em 3 ciclos) nas partículas de agregados reciclados de resíduos de concreto e verificou redução no tamanho da partícula após peneiramento. A quantidade de agregado esmagado com um tamanho de grão de mais de 20 mm foi de cerca de 28% e a quantidade com um tamanho de grão na faixa de 10-20 mm foi de 72%. Após a compactação (3º ciclo de compressão), o tamanho da maior parte do agregado era

inferior a 20 mm podendo influenciar a eficiência de compactação e o atrito entre as partículas de agregados reciclados.

Em pavimentação, a energia de compactação intermediária provoca a quebra do material, alterando a sua distribuição granulométrica, aumentando finos passantes na peneira 0,075mm e a demanda de água para continuar o processo de compactação [55]. Affonso [56], utilizando prensas de laboratório, realizou ensaios de compressão dos agregados reciclados graúdos (acima de 35mm) simulando as cargas de 100 metros de coluna de lixo (1000KPa) para viabilizar sua utilização como material para camada de drenagem em aterros sanitários. Em seus ensaios cerca de 5% (em massa) das amostras sofreram quebra durante a compressão.

Controlando-se os teores de substituição ou a porosidade dos agregados de RCD pode ser possível o uso até no concreto estrutural (resistências características superiores a 25 MPa). Silva [26], através da separação de densidade do agregado reciclado e uso da fração mais densa, como agregado graúdo, e uso da fração mais leve, como agregado miúdo, obteve resultados de concretos secos (blocos de alvenaria estrutural) comparáveis aos dos agregados naturais em teores de substituição de 100%. Muitas aplicações usuais de engenharia não requerem o concreto estrutural, sendo possível chegar a substituição total dos agregados naturais por agregados de RCD, como em materiais cimentícios pré-fabricados (blocos, pavers), concretos magros, contrapisos, calçadas, etc [48].

3.1 Metodologia

Os materiais utilizados foram cimento CPV (Holcim), com densidade real de 3,1 g/cm³ (determinada por picnometria de gás Hélio) e área superficial específica de 1,31m²/g (determinado a partir do método BET por adsorção de N₂ em um equipamento Belsorp). Os agregados reciclados mistos (ARM) utilizados na elaboração das misturas dos concretos secos foram obtidos em usina de reciclagem da cidade de São Paulo. São compostos por aproximadamente 88% de material cimentício (argamassa e pasta de cimento endurecido), 8% de material cerâmico e 4% de impurezas, e apresentavam dimensões entre 6,30 e 0,15 mm. O material foi quarteado e peneirado nas frações de interesse, conforme ilustrado em **Erro! Fonte de referência não encontrada.** de modo a obter distribuições estreitas de tamanho de partículas, para facilitar o proporcionamento da composição do concreto.

A densidade real e absorção de água foram obtidas pelas normas de ensaio brasileiras vigentes [57,58] e estão apresentadas na Tabela 8. A porosidade foi determinada pela relação entre a densidade real e a aparente[30,59].

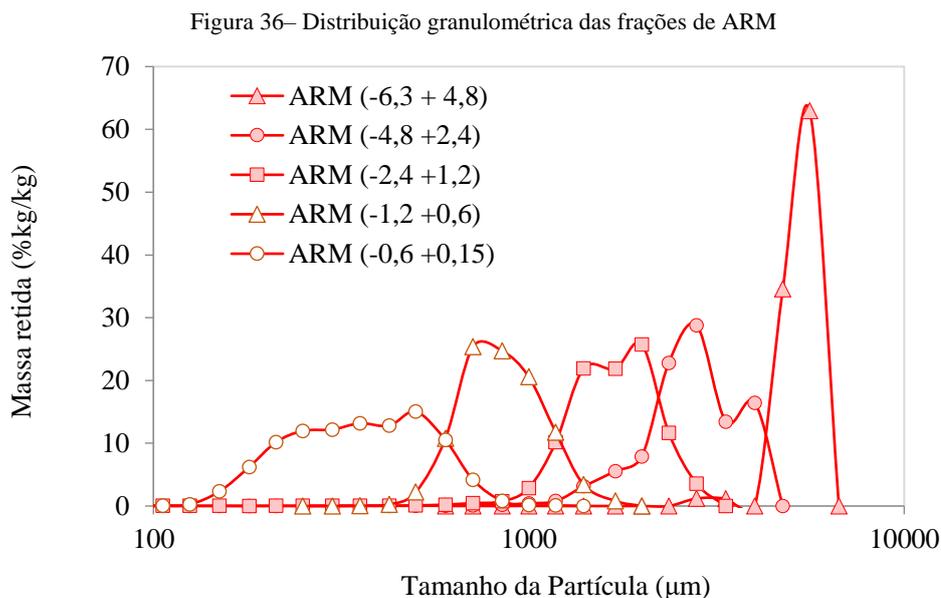
Tabela 8 - Absorção de água, densidade e porosidade dos agregados

| Tipo de Agregado | Absorção de Água (%) | Densidade Aparente (g/cm ³) | Densidade Real (g/cm ³) | Porosidade (%) |
|------------------|----------------------|---|-------------------------------------|----------------|
| ARM | 9,72 | 2,02 | 2,52 | 19,8 |

3.1.1 Distribuição granulométrica dos materiais

A distribuição granulométrica do cimento foi obtida através da técnica de difração de laser, no equipamento Helos da Sympatec e dos agregados reciclados foram determinadas por análise dinâmica de imagens (ADI) no equipamento QicPic, Sympatec. O método ADI consiste na captura de imagens por uma câmera à medida que as partículas passam por um funil em queda livre. As imagens são então processadas pelo software e tratadas com parâmetros pré-estabelecidos. O parâmetro adotado foi o “BR_Min” (diâmetro mínimo da partícula) por apresentar maior similaridade aos resultados obtidos pela granulometria por peneiras [45]

Os resultados são apresentados na Figura 36. Como os agregados foram separados por peneiramento, as frações foram identificadas como: -6,30+4,80; -4,80+2,40; -2,40+1,20; -1,20+0,60; -0,60 +0,15. A nomenclatura apresentada como “-” refere-se ao material passante pela peneira, bem como o “+” está associado à quantidade retida na peneira.



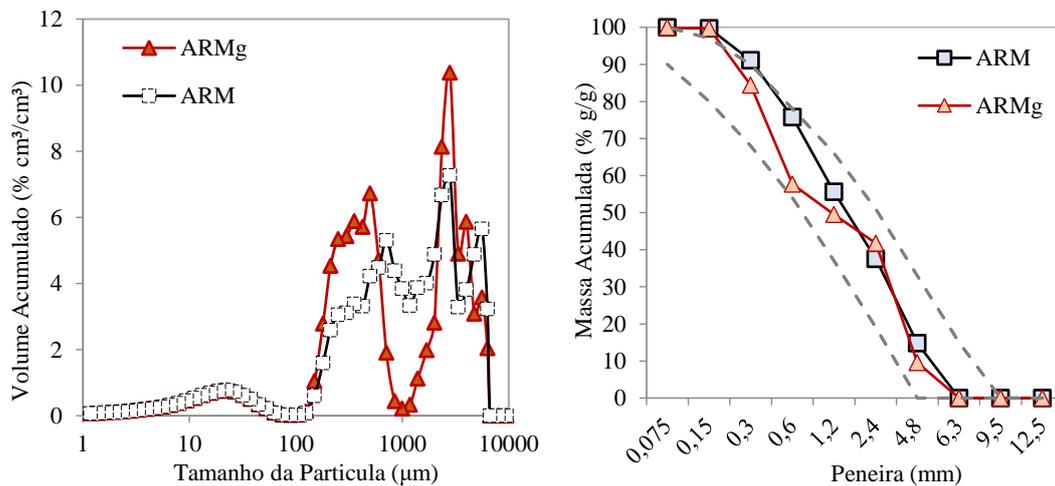
3.1.2 Composição avaliada

A mistura de concreto seco foi formulada considerando os limites especificados pela fábrica de blocos Columbia [19] e adaptados por Fernandes [14] aplicados em larga escala no cenário nacional. O teor de cimento foi fixado em 9%-volume e de agregados em 91%-volume. Para inserir a descontinuidade nas misturas de ARMg, e reduzir o efeito parede, foram retiradas frações de agregados no intervalo de 2,4 a 0,6mm, e obtendo o gap na ordem de $dl/ds > 10$, análogo ao que foi realizado na composição com agregados naturais. A Tabela 9 apresenta o consumo dos materiais enquanto a Figura 37 apresenta as curvas granulométricas discretas e acumulada e os limites mínimo e máximo especificados pela literatura para blocos de concreto. O teor ótimo de umidade ótima foi adotado de maneira experimental como apresentado adiante e desconsiderando o teor elevado de absorção do agregado RCD, uma vez que foi todos os materiais foram secos previamente antes de realizar os ensaios.

Tabela 9 – Formulação de concreto seco com ARM

| Materiais (Intervalos - mm) | ARM | | | ARM g | | |
|--------------------------------|--------------|---------------|---|--------------|---------------|---|
| | Massa (%) | Volume (%) | Consumo de Materiais (kg/m ³) | Massa (%) | Volume (%) | Consumo de Materiais (kg/m ³) |
| Cimento (-0,075) | 10,8 | 9,0 | 213 | 10,8 | 9,0 | 213 |
| ARM (-6,30+4,80) | 13,8 | 14,1 | 272 | 8,9 | 9,1 | 175 |
| ARM (-4,80+2,40) | 22,7 | 23,2 | 447 | 35,7 | 36,4 | 701 |
| ARM (-2,40+1,20) | 11,6 | 11,8 | 228 | - | - | - |
| ARM (-1,20+0,60) | 16,1 | 16,48 | 315 | - | - | - |
| ARM (-0,60+0,15) | 25,0 | 25,5 | 491 | 44,6 | 45,5 | 876 |
| Água | 12,0 | 12,0 | 236 | 12,0 | 12,0 | 236 |

Figura 37 – Distribuição discreta de tamanho da mistura de concreto seco com ARM (esq.) e limites especificados pela literatura para blocos de concreto (curva acumulada de agregados) (dir.)



3.1.3 Volume de referência

O volume de referência utilizado na metodologia foi definido fixando-se a altura de referência do corpo de prova (5cm) e o deslocamento máximo do pistão de 10cm durante a prensagem. No processo de fabricação, o deslocamento descendente do pistão no molde é fixo e a quantidade de material que enche o molde depende do tempo de alimentação, visando garantir o volume e a compactação da mistura. Quanto maior o tempo, maior quantidade de material preenche o molde, reduzindo os vazios e aumentando sua resistência final [4].

Os volumes adotados foram análogos aos apresentados no Capítulo 2, sendo: 90, 98, e >100% (em relação ao volume de referência; com 5 cm de altura de corpo de prova). Volumes abaixo da capacidade do molde (90 e 98%) apresentam menores cargas de compactação e evitam a

quebra dos agregados que implicariam em alterações no esqueleto granular. A outra condição (>100%) implica em cargas de compactação e densidade maiores dos corpos de prova.

3.1.4 Teor de umidade ótima

O teor de umidade ótima utilizado foi o que apresentou maior densidade após compactação e menor exsudação visível a olho nu logo após a compactação do corpo de prova. Os volumes de referência, o teor ótimo de umidade e a massa utilizada na moldagem são mostrados na Tabela 10 e apresentados no item 3.1 (gráfico da Figura 38c).

Tabela 10 - Volume teórico do molde, volume utilizado e massa dos cps usando ARM.

| Misturas | Volume de referência do molde (cm ³) | Teor de umidade ótima (%) | Volume final do corpo de prova | | Massa utilizada (g)* | Volume granular compactado (cm ³) |
|----------|--|---------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|---|
| | | | (%) | (cm ³) | | |
| ARM | 98,2 | 12,0 | 90 | 88,4 | 142 | 88,4 |
| | | | 98 | 96,2 | 156 | 96,2 |
| | | | >100 | 98,2 | 187 | 116,0 |
| ARMg | 98,2 | 12,0 | 90 | 88,4 | 131 | 88,4 |
| | | | 98 | 96,2 | 143 | 96,2 |
| | | | >100 | 98,2 | 167 | 111,0 |

* Massa de materiais sem água e determinada pelo volume compactado x densidade de empacotamento

3.1.5 Compactação

Para realizar a compactação das misturas foi utilizado a metodologia descrita em 2.1 onde 2000g de pó (agregados+cimento) e a quantidade proporcional de água foram misturas em argamassadeira de laboratório em velocidade baixa. A mistura seca é colocada em moldes bipartidos, realizado os ciclos de compactação descritos anteriormente, retirados dos moldes e levados para o processo de cura em câmara úmida.

3.1.6 Análise no Estado Endurecido

Analogamente ao item 2.1.2, as amostras de concreto seco produzidas com os agregados reciclados mistos foram desmoldadas após 24horas e curadas em câmara úmida (> 98% R.H.) por 27 dias, sendo realizada a ruptura de cinco corpos de prova de cada volume de compactação moldado. A densidade aparente também foi obtida a partir da massa e volume dos corpos de prova após os 28 dias de cura, bem como os valores obtidos no ensaio de resistência a compressão foram corrigidos através do coeficiente apresentado na NBR 5739:2007.

3.1.7 Avaliação da quebra dos agregados durante a compactação

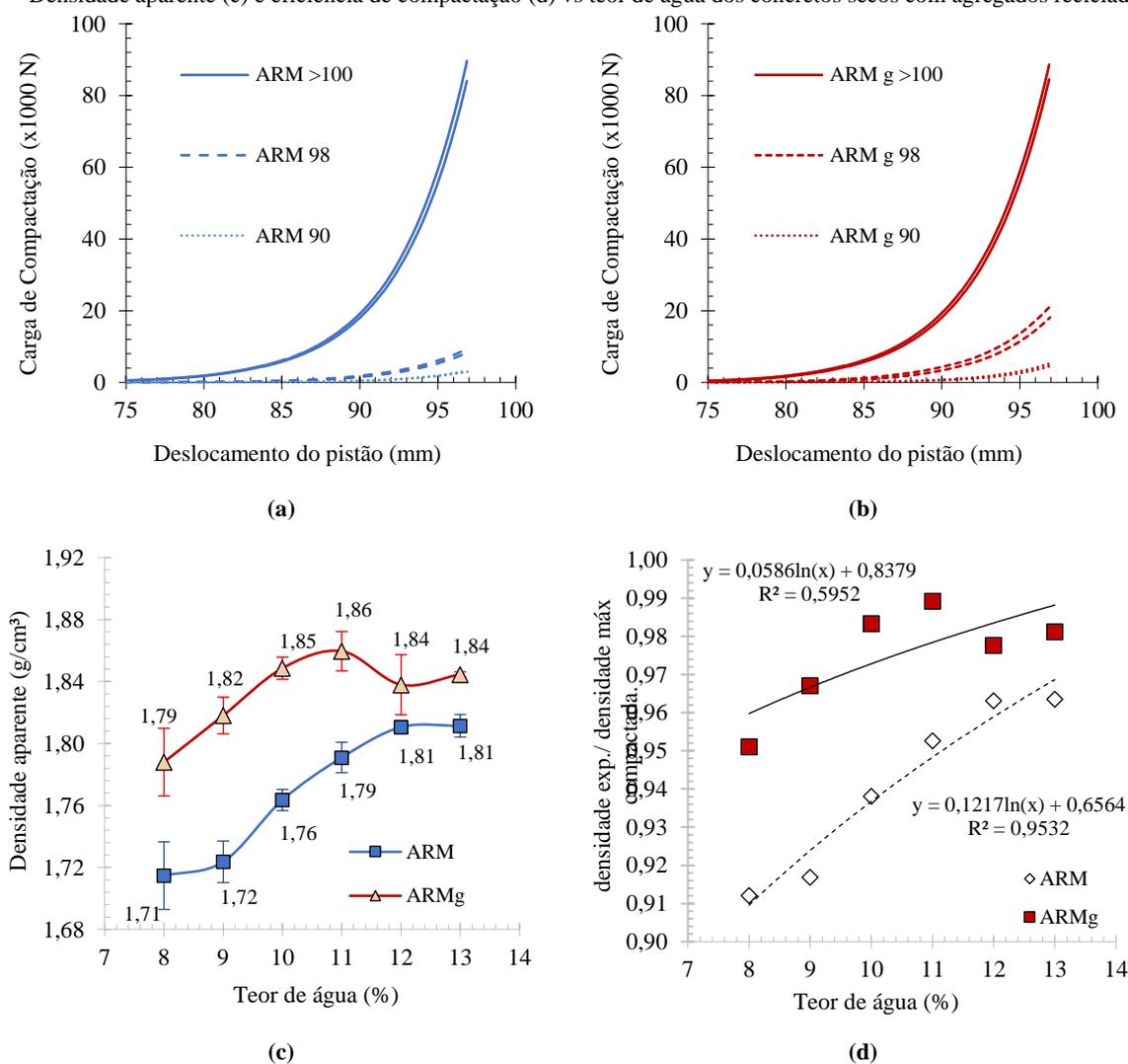
Após a moldagem do concreto seco, o corpo de prova foi lavado em água corrente dentro de peneira de diâmetro 0,15mm, retirando as partículas de cimento da mistura (e eventualmente finos gerados pela quebra). A amostra retida foi seca em estufa em temperatura de 100 ± 5 °C por 24 horas e submetida a técnica de Análise dinâmica de Imagem para verificar extensão granulométrica. Como se sabia a composição granulométrica inicial antes da aplicação da carga compressiva para compactação, a diferença entre ambas representa a quebra dos agregados.

3.2 Resultados e Discussões

3.2.1 Avaliação da carga de compactação durante a produção dos corpos de prova

A Figura 38 apresenta os valores de carga de compactação durante os ciclos de compactação apresentados na metodologia de reometria compressiva, bem como a carga de pico (carga máxima no primeiro ciclo de compactação) e os respectivos deslocamentos do pistão.

Figura 38 – Deslocamento máximo do pistão no primeiro ciclo de compactação agregados sem gap a) e com gap b) - Densidade aparente (c) e eficiência de compactação (d) vs teor de água dos concretos secos com agregados reciclados

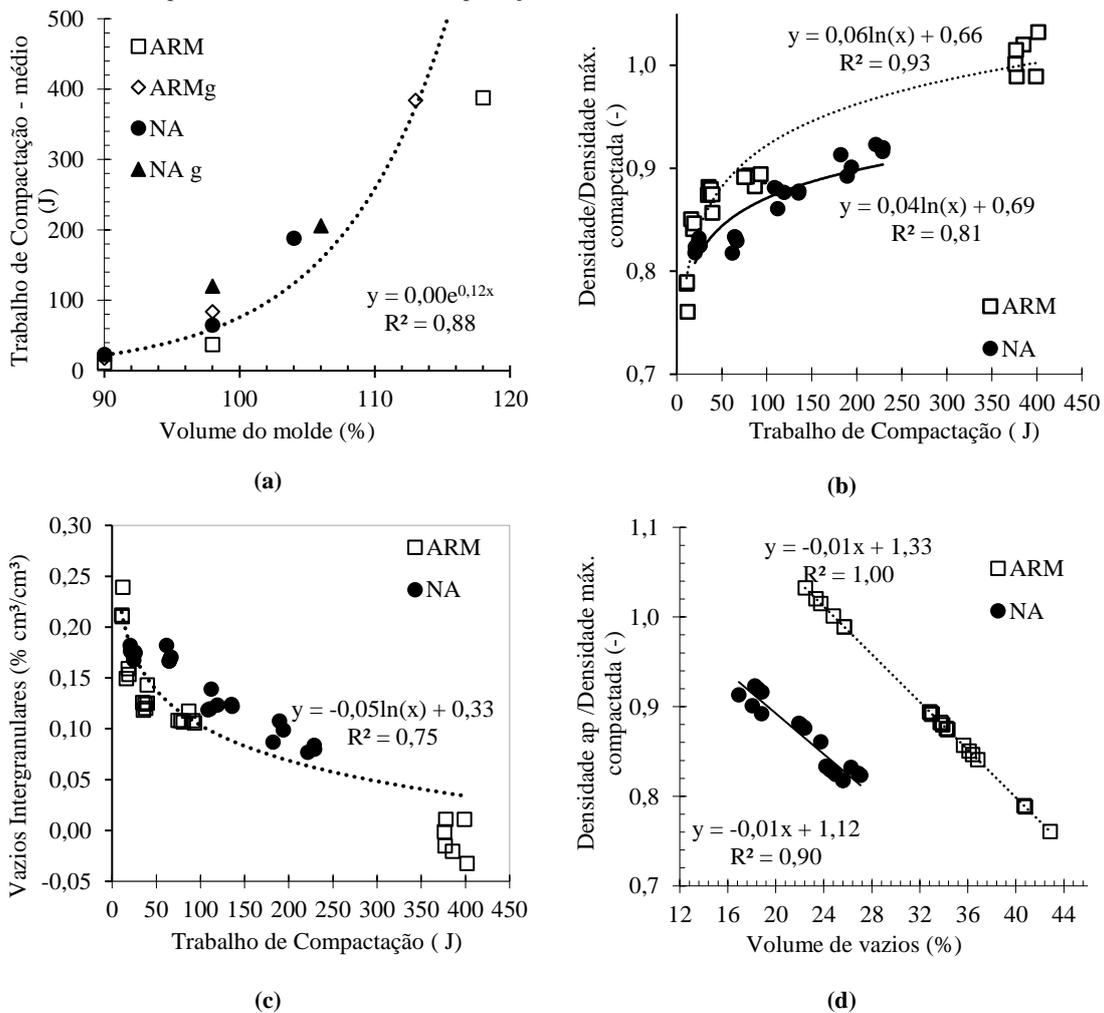


Pode-se observar que em todas as misturas de concreto seco, independentemente da utilização de gaps ou não, o volume granular compactado acima da referência do molde (>100%) apresenta o maior trabalho de compactação, seguido por 98% e 90% das condições do volume de referência do molde. O trabalho durante o primeiro ciclo de compactação é determinado pelo cálculo da área sob as curvas de carga de pico versus deslocamento.

Nota-se incremento de densidade as misturas com ARM g em relação às com ARM, para os diferentes teores de umidade, comportamento similar observado no capítulo anterior para as misturas com NAT. Embora na formulação ARMg tenha-se obtido uma maior densidade aparente com teor de água de 11%, optou-se por adotar o mesmo de teor que foi adotado para formulações sem gap (ARM – 12%), para se parametrizar as misturas e evitar variabilidades durante a análise comparativa. Porém, como observado nos agregados naturais, as misturas com gap em suas formulações, quando considerado uma densidade alvo, pode-se reduzir o teor de água e com isso obter melhores resistências mecânicas (Figura 38c).

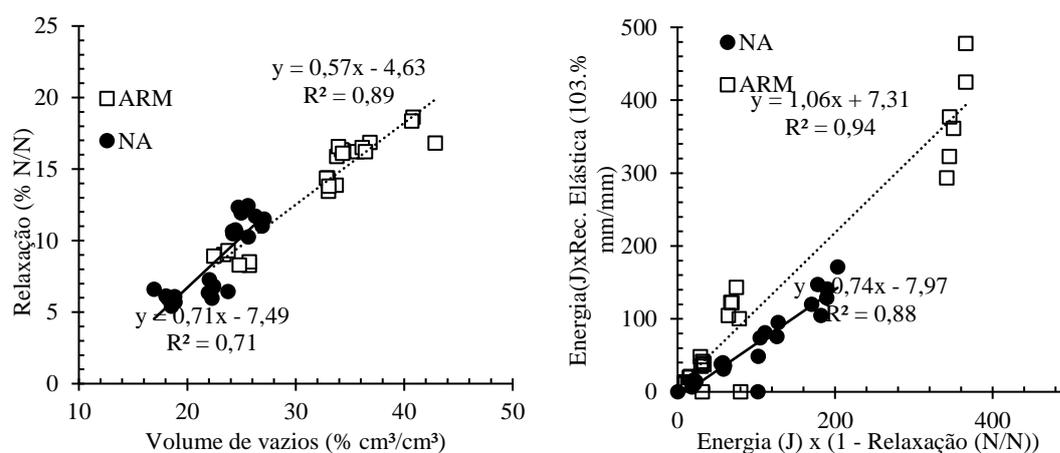
O trabalho durante a compactação e suas correlações com o estado fresco das formulações são apresentados abaixo.

Figura 39 –(a) Trabalho de compactação vs. Volume de referência do molde, (b) Densidade relativa (c) e Vazios entre partículas vs. Trabalho de compactação, e (d) Densidade relativa vs. Volume de vazios.



O trabalho de compactação é maior à medida que se aumenta o volume de referência (Figura 39a). É sistematicamente mais alto para os concretos seco com gaps na distribuição granulométrica devido ao aumento na densidade de compactação da mistura granular. A densidade relativa dos concretos aumenta com o trabalho de compactação (Figura 39b); assim, os vazios intergranulares - expressos numericamente como $[1 - (\text{densidade experimental} / \text{densidade máxima})]$ - diminuem (Figura 39c). Uma maior energia de compactação implica um concreto mais denso e menos poroso (Figura 39d). Para produzir um concreto seco de ARM com o mesmo volume de vazios de um NA, é necessária uma maior densidade relativa (ou eficiência de compactação). Nota-se um acréscimo significativo do trabalho de compactação do concreto seco com ARM (Figura 39b) e aumento da densidade relativa com consequente redução dos vazios intergranulares devido à quebra das partículas de agregado ARM (Figura 39d), que aumenta o volume de argamassa (cimento + areia) do concreto seco, solidificando a estrutura.

Figura 40 – (a) Relaxação vs. volume de vazios; (b) Relaxação vs. recuperação elástica em relação com a energia (trabalho de compactação).



Observa-se que um maior volume dos vazios leva a maiores relaxações (Figura 40a). Os ARMs são mais porosos que os NAs; assim, os concretos de ARM apresentam uma relaxação maior do que os concretos de NA. Os poros dissipam as tensões internas durante a compactação de um material. No entanto, a distribuição com gap reduz a relaxação do concreto seco. O aumento na densidade de empacotamento da mistura granular implica uma redução nos vazios (interpartículas).

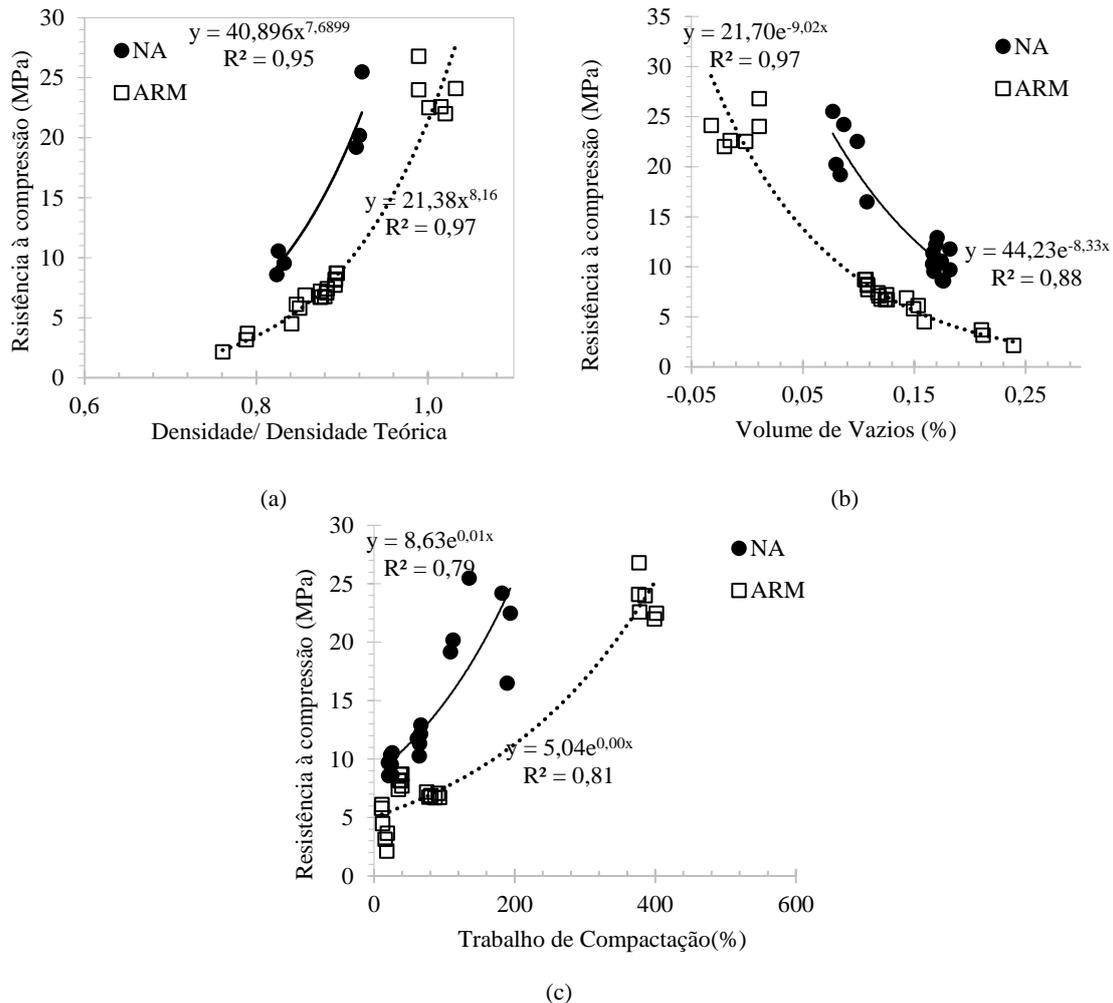
A recuperação elástica ocorre logo após a prensagem e representa a quantidade de energia não dissipada durante a relaxação devido a um contato com um corpo rígido e elástico (Figura 40b). Assim, esta deformação é recuperada como uma resposta elástica. As recuperações elásticas aumentam com o aumento da energia total (trabalho de compactação) para as misturas com gap

e ARMs. Os poros das ARMs reduzem seu módulo de elasticidade quando comparados com os agregados de NA, tornando os concretos secos mais deformáveis. Esta resposta elástica da compactação pode gerar novos vazios e microfissuras no concreto seco.

3.2.2 Resultados do estado endurecido

Os resultados no estado endurecido são apresentados nas figuras a seguir.

Figura 41 – (a) Resistência à compressão vs trabalho de compactação; (b) Resistência à compressão vs volume vazios interpartículas; (c) Resistência à compressão vs. densidade/densidade máxima dos concretos secos;



A resistência à compressão dos concretos secos aumenta com o aumento da sua densidade relativa e redução nos vazios intergranulares (Figura 41). Uma densidade relativa fixa (ou volume de vazios intergranulares) representa uma condição similar de compactação. Para condições similares de compactação, as resistências à compressão dos concretos NA são mais altas do que aquelas com ARMs. Essa diferença é devida à porosidade dos ARMs (~ 10%). Variando as condições de compactação e o volume de vazios intergranulares, as resistências à compressão dos concretos seco com NAs e ARMs podem se tornar semelhantes. Os concretos com agregados ARM apresentaram significativo ganho de densidade e resistência (2 vezes

mais) à medida que se aumentou a energia de compactação (7 vezes mais), maior que o observado com o agregado natural.

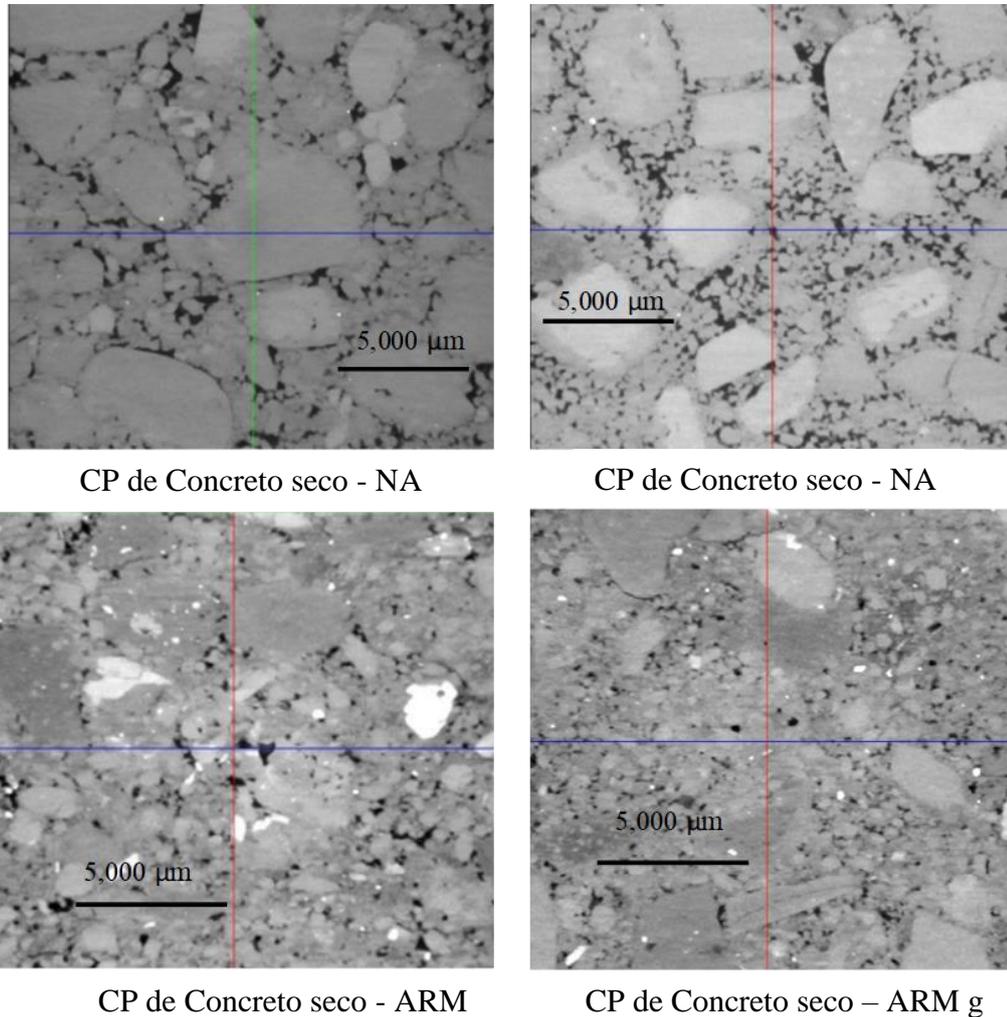
Essa característica pode estar relacionada ao fenômeno de quebra dos agregados reciclados, que resulta em maior acomodação plástica à medida que as cargas crescentes de compactação são aplicadas [35]. A acomodação das partículas preenche vazios intergranulares, reduzindo os vazios, aumentando sua densidade e resultando em resistências superiores à compressão.

As resistências à compressão dos concretos seco com gap são ligeiramente maiores, particularmente para volumes de referência de molde <100%. As diferenças estatísticas (APÊNDICES – Análises Estatísticas) confirmadas para 90 e 98% do volume de referência são devidas ao aumento da densidade de compactação das partículas da mistura seca [33]. Para volumes compactados acima de 100%, o Teste T não apresentou diferença estatística relevante considerando a resistência a compressão e trabalho de compactação. Ainda neste volume compactado e considerando as mesmas variáveis, a ANOVA apresentou semelhança entre estas as amostras.

Vazios intergranulares são macro-defeitos que prejudicam significativamente a resistência à compressão dos materiais cimentícios [47]. Para produzir concretos seco com resistência à compressão similar, os vazios intergranulares devem ser reduzidos, para compensar o aumento da porosidade dos ARMs.

As imagens (Figura 42) de microtomografia (μ CT) confirmam que os concretos de ARM (condições de volume de referência moldado > 100%) exibem tamanhos de defeitos sistematicamente menores do que os concretos NA (Figura 42). A compactação aumenta a densidade do concreto seco principalmente devido à redução dos vazios interpartículas. O trabalho de compactação é quase o dobro. Os principais tamanhos de defeito diminuem de 1,000 para 628 μ m. Uma redução no tamanho dos agregados ARMs também é observada, indicando sua quebra durante a compactação.

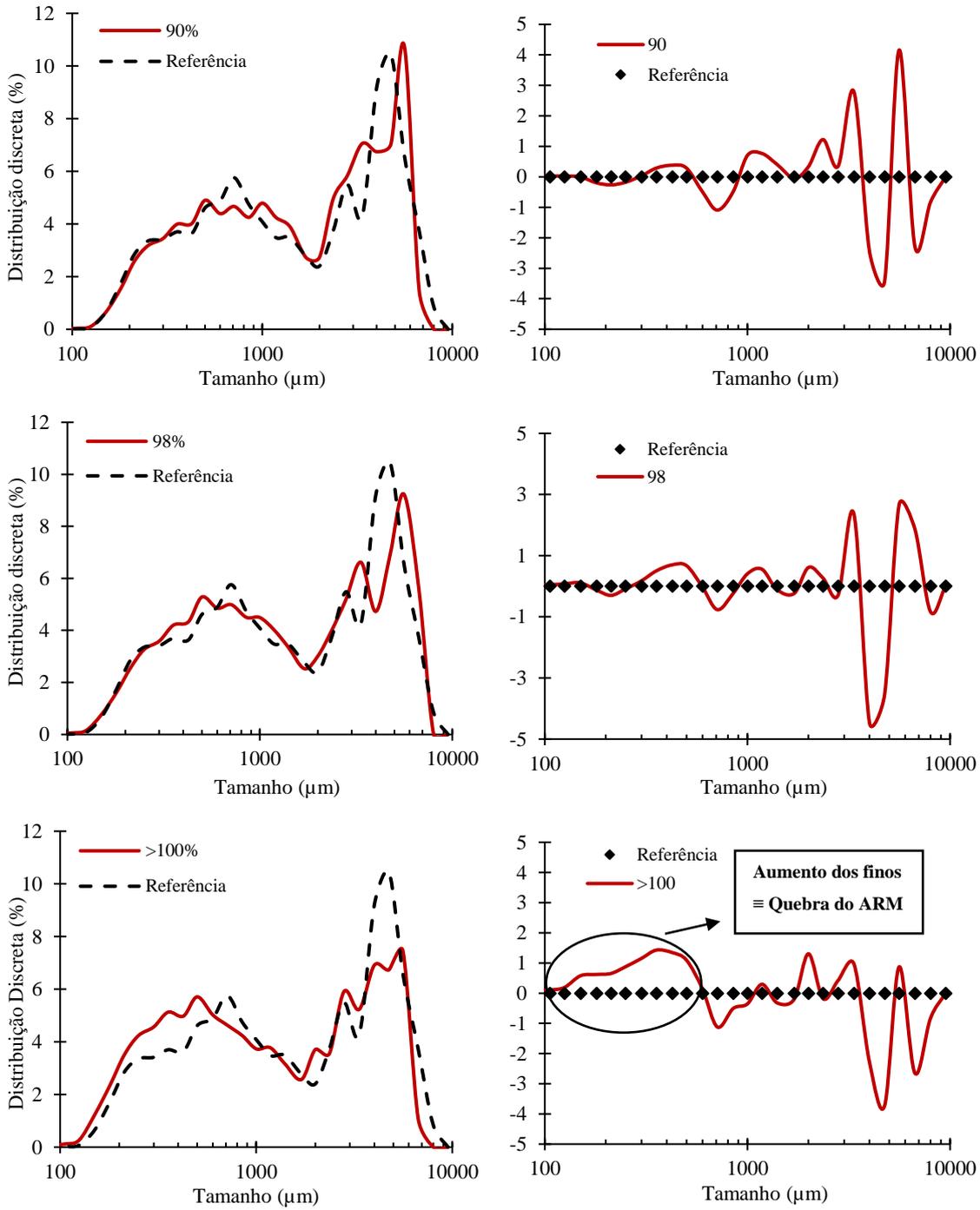
Figura 42 – - μ CT imagens da microestrutura dos concretos secos em volumes de compactação do molde >100%.



3.2.3 Quantificação da quebra dos agregados durante a compactação

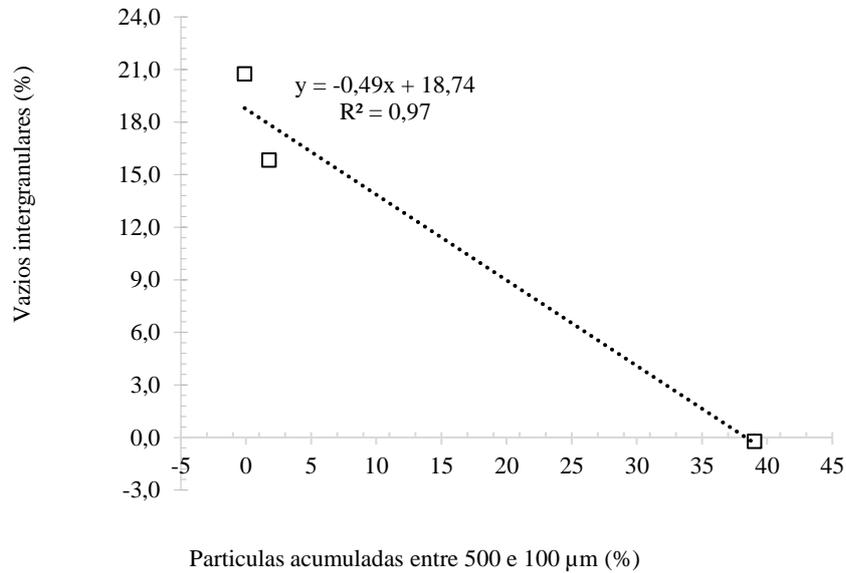
A Figura 43, à esquerda, ilustra o perfil das curvas granulométricas, inicial e após a aplicação da compactação. À direita é apresentada a diferença entre ambas: valores negativos indicam diminuição da quantidade de partículas na faixa de diâmetros e valores positivos, por outro lado, indicam aumento na quantidade de partículas na faixa. Nota-se que até o volume de controle de 98% não há considerável quebra das partículas de agregado reciclado, porém, quando o volume maior foi utilizado (>100%), notou-se que considerável quantidade de agregados foi quebrada, evidenciado pelo surgimento de maior quantidade de partículas na faixa de diâmetros entre 500 e 100 micra e diminuição entre 3000 e 8000 micra.

Figura 43 – Distribuição granulométrica das misturas após compactação em relação à referência (esq.). Parcela de materiais distribuídos ao longo da extensão granulométrica (dir.) – volume >100 % com acúmulo de finos



O acréscimo do trabalho de compactação nos maiores volumes provocou a quebra do ARM, favorecendo o empacotamento do sistema granular devido ao acúmulo de partículas finas, preenchendo os vazios do sistema granular, como apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Partículas acumuladas entre 500 e 100 micra (quebra do ARM) vs Vazios Intergranulares dos volumes de controle moldados



3.3 Conclusões do capítulo

A metodologia proposta foi capaz de observar e quantificar a quebra dos agregados reciclados mistos durante a compactação de concreto seco, oferecendo uma alternativa para o desenvolvimento de misturas e testes em escala de laboratório.

A alteração no volume de controle afetou diretamente no trabalho envolvido durante a compactação do concreto seco. Nota-se um acréscimo expressivo do trabalho de compactação dos agregados ARM em comparação aos concretos com NA, considerando o volume $>100\%$, sendo esse ganho atribuído à quebra das partículas de ARM. Considerando os gaps ao longo da extensão, os ganhos foram ligeiramente maiores nos volumes de controle menores (90 e 98%) do que nos volumes acima da referência ($>100\%$).

As relaxações foram maiores para os concretos produzidos com agregados reciclados mistos, pois a maior porosidade dos agregados reciclados dissipou as tensões residuais do processo de compactação e aumentou a acomodação plástica. No entanto, a porosidade do agregado reciclado reduziu o módulo elástico, implicando também um aumento na recuperação elástica dos concretos.

Considerando os resultados obtidos no estado endurecido, podemos atingir desempenhos físicos e mecânicos com os agregados ARM semelhantes aos concretos secos com agregados NA devido à quebra das partículas após cargas elevadas de compactação. Neste caso, a quebra dos ARM otimizou a qualidade do agregado, gerando o acúmulo de partículas finas que aumenta o volume de argamassa do concreto seco, densificando a estrutura e aumentando resistência à compressão dos concretos secos. Essas partículas preenchem os vazios intergranulares, reduzindo os vazios que afetam as propriedades físicas e mecânicas dos concretos secos.

Quanto maior o volume de material compactado, maior o trabalho obtido na compactação influenciando diretamente na quebra ocorrida na extensão granulométrica dos concretos secos, a partir de volumes de controle superior a 100% ($>100\%$). Após a compactação do corpo de prova, observou-se um acúmulo de partículas mais finas na faixa de tamanho entre 500 e 100 micra, confirmando a quebra dos agregados reciclados durante a compactação.

Levando em consideração que a inclusão dos gaps não influenciou tanto as propriedades dos concretos secos com agregados reciclados quanto a alteração do volume compactado, esta abordagem pode ser facilmente viabilizada na prática, porque depende apenas do controle do volume de material e energia da compactação, sem a necessidade de diversificar a oferta de frações granulométricas de agregados reciclados.

A quebra dos agregados reciclados e por consequência preenchimento dos vazios intergranulares pode compensar o uso de maior consumo de cimento em misturas para atender resistências mecânicas especificadas por normas técnicas.

4 CONCLUSÕES GERAIS DA PESQUISA

Considerando as limitações enfrentadas para se reproduzir formulações de concreto seco com os requisitos que são atingidos durante o processo industrial, a metodologia de reometria compressiva apresentada neste trabalho, oferece parâmetros que não são obtidos pelos métodos convencionais de fabricação ou por métodos de avaliação de propriedades dos concretos secos no estado fresco, bem como as formulações podem ser confeccionadas, de maneira mais rápida e com redução no consumo dos insumos usados nos testes industriais, sem a interrupção do ciclo produtivo da fábrica.

Com os parâmetros quantitativos como energia de compactação (trabalho), relaxação e recuperação elástica obtidos durante a realização da pesquisa, foi possível estabelecer correlações entre o trabalho de compactação (energia) durante o estado fresco e os parâmetros do estado endurecido (vazios, densidade e resistência à compressão), bem como entre relaxações e recuperações elásticas das misturas, comprovando a aplicabilidade do método.

A inclusão de gaps na distribuição granulométrica dos concretos secos, seja com agregados naturais ou agregados reciclados mistos, favoreceu o empacotamento das partículas e diminuição dos vazios intergranulares, sendo possível obter menores teores de água, para uma mesma densidade, favorecendo assim uma produção mais rápida e maiores resistências mecânicas dos produtos.

A alteração do volume compactado das misturas aumenta a energia e densidade de compactação, refletindo diretamente na resistência mecânica das misturas, pois reduz a porosidade. Volumes maiores de poros intergranulares (em volumes de compactação menores) geraram maiores relaxações, pois os poros dissiparam parte da energia da compactação. A parte da energia que não é dissipada foi convertida na recuperação elástica.

Os agregados contendo distribuições granulométricas descontínuas (gaps) não apresentaram ganho expressivo de energia de compactação. O maior ganho vem do controle dos volumes compactados, quando estes são superiores ao de controle (>100%).

Houve um acréscimo significativo do trabalho de compactação dos concretos com ARM, a partir da alteração do volume compactado, sem equivalente aos resultados obtidos no concreto seco com agregados NA. Este ganho se dá pela quebra do agregado reciclado durante a compactação. O acréscimo de carga de compactação na configuração de ensaio utilizada (compressão sob confinamento) aumenta os esforços nas partículas levando a quebra e

acomodação das partículas, aumentando o teor de argamassa (cimento+areia) do concreto seco. Esse acréscimo resulta na solidificação da micro estrutura, reduzindo os vazios intergranulares (macro defeitos) que melhoram as propriedades físicas e mecânicas do concreto seco com ARM, sendo uma alternativa ecoeficiente para produção de artefatos cimentícios pré-fabricados.

A metodologia adotada para quantificação da quebra dos agregados reciclados se mostrou adequada (de baixa complexibilidade).

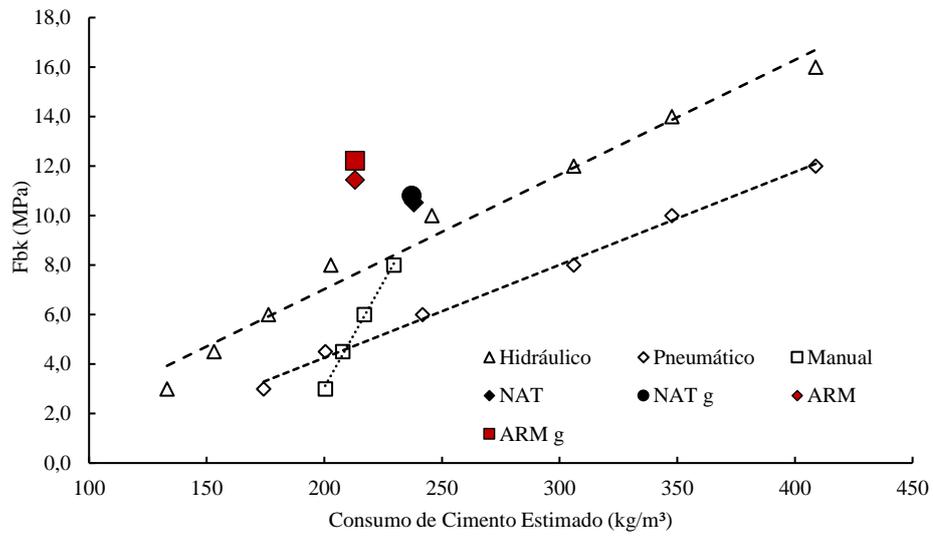
Do ponto de vista da indústria de blocos de concreto, a metodologia oferece alternativa para melhorias no desempenho mecânico e físico desses produtos cimentícios pré-fabricados. Pode inclusive permitir que fabricantes com menor expressão no mercado possam atender aos requisitos mínimos de aceitação das normas (ex. selo de certificação da ABCP), sem depender exclusivamente da aquisição de vibro-prensas mais eficientes.

A metodologia em escala de laboratório pode ser usada para otimizar o controle de qualidade de fábricas, que, ao invés de testar suas formulações durante a produção, podem realizar testes em escala laboratorial, avaliar mais tipos de agregados e insumos, otimizando o tempo e recursos. Os ensaios de compactação prévios em laboratório podem ser correlacionados com os parâmetros de fábrica dos blocos e seus produtos.

As cargas de compactação mínima e máxima obtidas no método, quando divididas pela área dos corpos de prova cilíndricos (diâmetro de 50 mm; área 19,63 cm²) resultam em tensões de compactação de 250 a 4500 kgf/cm², incluindo as diferentes condições representadas pelas prensas industriais (ver Tabela 1 – Introdução).

A resistência à compressão dos blocos de concretos é geralmente calculada usando a área bruta do bloco, sem considerar os seus vazios. Considerando que o bloco vazado tem uma área líquida equivalente à metade da área bruta, pode-se estimar que as resistências dessas misturas cimentícias medidas nos corpos de prova sejam aproximadamente a metade, quando estimadas nesses componentes. Os resultados obtidos na pesquisa indicam a possibilidade de se produzir famílias de blocos estruturais com resistências características próximas a 10 MPa, usando nestes experimentos, consumos de cimento por volta de 200 kg/m³, o que pode indicar ganhos em termos de ecoeficiência dos produtos, mesmo quando comparado os resultados obtidos com máquinas do tipo hidráulica, consideradas as melhores do mercado (Figura 45).

Figura 45 – Consumo de cimento das formulações de concreto seco considerando diferentes tipos de vibroprensas e o método de reometria compressiva.



4.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que complementam a atual pesquisa:

- Recomenda-se a moldagem com teor de água reduzido para a formulação de concreto seco com NAg a partir da densidade alvo, para verificar qual redução de consumo de cimento pode ser alcançada, suas características físicas e mecânicas;
- A verificação do volume granular e carga de compactação necessário para atingir a quebra dos agregados naturais;
- Associar os ciclos de compactação do método de reometria compressiva com os ciclos de compactação industrial, e formas de reduzir os tempos de ciclo;
- Realização de vibração prévia da amostra de concreto seco antes da compactação pelo método, para melhorar a acomodação das partículas e verificar se os ciclos de compactação adotados podem ser reduzidos.
- Realização de ensaios de absorção de água, permeabilidade e resistência à abrasão nos corpos de prova, para avaliar o comportamento dos componentes produzidos com misturas secas otimizadas com agregados reciclados;
- Análise do impacto da forma dos agregados no preenchimento dos vazios granulares, seu impacto na densificação das misturas, elevação das cargas de compactação, sejam estes agregados naturais ou de RCD;
- Definir correlações entre os valores de densidade verde, aparente, resultados de resistência a compressão obtidos pelo método de reometria compressiva com os blocos produzidos nas fábricas;

5 PUBLICAÇÕES

Abaixo são apresentadas as publicações realizadas durante o desenvolvimento da pesquisa. Até o momento, foram realizadas 3 publicações de artigos para congressos e 1 publicação submetida para revisão em periódico internacional (em revisão). Após o término da pesquisa será realizada mais uma publicação em periódico, apresentando as conclusões da utilização do agregado reciclado em concretos secos.

Artigos submetidos à congressos:

- **Influência da Granulometria dos Agregados de RCD na Compactação do Concreto Seco.** Artigo apresentado no IV Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil em agosto de 2015
- **Dry-cast concrete with recycled aggregates: volume control during compaction.** Artigo apresentado no IV International Conference Progresso for Recycling in the Built Environment, em outubro de 2018.
- **Análise da quebra de partículas de agregados reciclados durante a compactação do concreto seco.** Artigo apresentado no 63º Congresso Brasileiro de Cerâmica, em agosto de 2019.

Artigos submetidos à periódicos:

- **A Compressive Rheology Method For Dry-Cast Concretes.** Artigo submetido à revista Construction and Building Materials, em fevereiro de 2020, e está ainda sob revisão.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.S. Medeiros, F.H. Sabbatini, Alvenaria Estrutural Não Armada de Blocos de Concreto: Produção de Componentes e Parâmetros de Projeto, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 1993.
- [2] J. Marchand, H. Hornain, S. Diamond, M. Pigeon, H. Guiraud, The microstructure of dry concrete products, *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 427–438.
- [3] K. Kendall, A.J. Howard, J.D. Birchall, P.L. Pratt, B.A. Proctor, S.A. Jefferis, The relation between porosity, microstructure and strength, and the approach to advanced cement-based materials [and discussion], *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.* 310 (1983) 139–153.
- [4] A.L. de Oliveira, Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [5] P.H.M. Celestino, Produção De Blocos De Concreto Em Obra Com Utilização De Resíduo Cimentício Como Agregado, Universidade Federal de Goiás, 2013.
- [6] S. Popovics, A review of the concrete consolidation by vibration, *Mater. Struct.* 6 (1973) 453–463.
- [7] R. Riedel, I.-W. Chen, eds., *Ceramics science and technology*, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [8] J. SOUSA, E. BAUER, R. SPOSTO, Blocos de concreto produzidos com agregados provenientes da reciclagem de resíduos gerados pela construção civil, IX Encontro Nac. Tecnol. Ambiente Construído Paraná Bras. (2002).
http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002_1633_1642.pdf (accessed April 19, 2017).
- [9] M. Stasiak, J. Tomas, M. Molenda, R. Rusinek, P. Mueller, Uniaxial compaction behaviour and elasticity of cohesive powders, *Powder Technol.* 203 (2010) 482–488.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.06.010>.
- [10] R.A. Terpstra, P.P.A.C. Pex, A.H. de Vries, eds., *Ceramic Processing*, Springer Netherlands, Dordrecht, 1995. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0531-6>.
- [11] I. Odler, S. Abdul-Maula, Investigations on the relationship between porosity structure and strength of hydrated portland cement pastes III. Effect of clinker composition and gypsum addition, *Cem. Concr. Res.* 17 (1987) 22–30.
- [12] S.M. Albuquerque, Estudo Para Uso De Agregados De Resíduos De Construção E Demolição Em Blocos De Concreto Para Alvenaria, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2005.
- [13] J.A. Albero, A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte I: O preenchimento das cavidades do molde, *Cerâmica Ind.* 5 (2000) 23–28.
- [14] I. Fernandes, *Blocos e Pavers: Produção e controle de qualidade.*, 3ª, Editora Treino, São Paulo, 2012.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6136 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos - Rio de Janeiro, 2016.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4 : Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE, 2013.

- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais, 2013.
- [18] I. Fernandes, Os 10 mandamentos da produção de artefatos de concreto, in: Webinar ABCP onLine, 2020.
- [19] N. Jablonski, Mix designs for concrete block, (1996).
- [20] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks, *Constr. Build. Mater.* 16 (2002) 281–289.
- [21] A. Frasson Jr., A.L. de Oliveira, L.R. Prudêncio Jr, Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural - parte 2, *Rev. Prisma - Cad. Téc. Alvenaria Estrutural - CT 11.* (2010) 8.
- [22] A. dos S. Felipe, Contribuição para a otimização de traços de concreto utilizados na produção de blocos estruturais., Universidade Estadual Paulista, 2010.
- [23] P.J.M. Bartos, *Special Concretes - Workability and Mixing.*, Spon Press, London, 1993. <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=183052> (accessed March 25, 2019).
- [24] IS 1199:1959 - Methods of Sampling and Analysis of Concrete (Eleventh revision). Reaffirmed- Dec 2013., n.d.
- [25] M.L. Marchioni, Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2012.
- [26] R.B. da Silva, S.C. Angulo, R.G. Pileggi, C.O. Silva, Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade, *Ambiente Construído.* 15 (2015) 335–349. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000400054>.
- [27] I.R. de Oliveira, A.R. Studart, R.G. Pileggi, V.C. Pandolfelli, *Dispersão e Empacotamento de Partículas - Princípios e Aplicações em Processo Cerâmico*, 1st ed., Fazendo Arte Editorial, 2000.
- [28] F. de Larrard, Ultrafine particles for the making of very high strength concretes, *Cem. Concr. Res.* 19 (1989) 161–172.
- [29] W. Ai Qin, Z. Chengzhi, Z. Ningsheng, The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1721–1726. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00148-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00148-9).
- [30] B.L. Damineli, Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas., text, Universidade de São Paulo, 2013. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19092014-103459/> (accessed March 3, 2017).
- [31] E.C. Abdullah, D. Geldart, The use of bulk density measurements as flowability indicators, *Powder Technol.* 102 (1999) 151–165.
- [32] H.H. Wong, A.K. Kwan, Packing density: a key concept for mix design of high performance concrete, in: *Proc. Mater. Sci. Technol. Eng. Conf. HKIE Mater. Div. Hong Kong*, Citeseer, 2005: pp. 1–15. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.9205&rep=rep1&type=pdf> (accessed January 31, 2017).

- [33] H.H. Wong, A.K. Kwan, Packing density- a Key concept for mix design of high performance concrete, (1997).
- [34] F. de Larrard, Concrete mixture proportioning: a scientific approach, E & FN Spon, London ; New York, 1999.
- [35] J.G.G. Sousa, Contribuição Ao Estudo Da Relação Entre Propriedades E Proporcionamento De Blocos De Concreto–Aplicação Ao Uso De Entulho Como Agregado Reciclado, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2001. <http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M01-9B-Jos%C3%A9-de-Sousa.pdf> (accessed January 31, 2017).
- [36] A.M. Buttler, Uso de Agregados Reciclados de Concreto em Blocos de Alvenaria Estrutural, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2007.
- [37] A. de CASTRO, V.C. Pandolfelli, Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil, *Cerâmica*. 55 (2009) 18–32.
- [38] C. Pagliosa, others, Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico, (2004). <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87835> (accessed January 31, 2017).
- [39] M. Delalonde, G. Baylac, B. Bataille, M. Jacob, A. Puech, The rheology of wet powders: a measuring instrument, the compresso-rheometer, *Int. J. Pharm.* 130 (1996) 147–151.
- [40] M. Peleg, R. Moreyra, Effect of moisture on the stress relaxation pattern of compacted powders, *Powder Technol.* 23 (1979) 277–279.
- [41] D.G. Martins, Influência do tamanho e do tipo do corpo de prova na resistência à compressão do concreto., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, 2008.
- [42] D.F.A. Capraro, A.P.B. Capraro, M.A. Argenta, M.H.F. Medeiros, Experimental and numerical evaluation of mortar specimens shape and size influence on compression tests, *Rev. IBRACON Estrut. E Mater.* 12 (2019) 429–444. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000200013>.
- [43] S. Sanetra, Particle Characterisation in Geological Applications, (2011). http://www.sympatec.com/docs/ImageAnalysis/publications/IA_2011_GeologicalApplications.pdf (accessed March 4, 2017).
- [44] S. Lim, R. Buswell, T. Le, R. Wackrow, S. Austin, A. Gibb, T. Thorpe, Development of a Viable Concrete Printing Process, in: Seoul, Korea, 2011. <https://doi.org/10.22260/ISARC2011/0124>.
- [45] G. Hawlitschek, C. Ulsen, H. Kahn, E.A. Masini, M. Tocchini, Análise De Imagens Dinâmica - Caracterização Da Distribuição De Tamanho E Forma De Partículas, *HOLOS*. 3 (2015) 22. <https://doi.org/10.15628/holos.2015.1781>.
- [46] N. Jablonski, Mix designs for concrete block, (1996) 4.
- [47] C.S. Poon, C.S. Lam, The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.005>.
- [48] S.C. Angulo, A.D. Figueiredo, Concreto com agregados reciclados, in: *Concreto Ciênc. E Tecnol., Arte Interativa*, São Paulo, 2011: pp. 1731–1767.

- [49] C.S. Poon, D. Chan, Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 569–577.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044>.
- [50] R.C.C. Lintz, A. Jacintho, L.L. Pimentel, L.A. Gachet-Barbosa, Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture, *Rev. IBRACON Estrut. E Mater.* 5 (2012) 166–181.
- [51] C.-S. Poon, D. Chan, Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.031>.
- [52] S.C. Kou, C.S. Poon, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 622–627.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005>.
- [53] M.N. Soutsos, K. Tang, S.G. Millard, Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 726–735.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.014>.
- [54] S.-S. Park, S.-J. Kim, K. Chen, Y.-J. Lee, S.-B. Lee, Crushing characteristics of a recycled aggregate from waste concrete, *Constr. Build. Mater.* 160 (2018) 100–105.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.036>.
- [55] F. da C. Leite, Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Base e Sub-Base de Pavimentos, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2007.
- [56] F.J. de A. Affonso, Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ / COPPE, 2005.
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 52 - Agregado Miúdo - Determinação De Massa Específica E Massa Específica Aparente - Rio De Janeiro, 2009.
- [58] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água - Rio de Janeiro, 2001.
- [59] S.C. Angulo, B.S. Raphael, V.L. de Oliveira, C. Ulsen, Caracterização das propriedades físicas dos agregados gráudos de RCD reciclados por picnometria de pó e de gás, in: Maceió, 2012: p. 11.

APÊNDICES

Tabela 11 Requisitos da Norma de Desempenho (Adaptado da NBR 15575)

| Item verificado/ ensaio | | Critérios de desempenho | |
|---|--|--|---|
| Capacidade de suporte para peças suspensas | Carga de ensaio aplicada em cada ponto (KN) - 0,4 | Carga de ensaio aplicada em cada peça, considerando dois pontos (KN) - 0,8 | Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço Limitação dos deslocamentos horizontais: $dh \leq h/500$ (deslocamento horizontal instantâneo) e $dhr \leq h/2 500$ (deslocamento horizontal residual). |
| Resistência a impactos de corpo mole | Vedações verticais com função estrutural, para casas térreas | Energia do impacto (J) Impacto externo (acesso externo do público): 120 a 720 Impacto Interno: 120 a 480 | Não ocorrência de falhas (estado-limite de serviço – impactos mínimos) e não ocorrência de ruína (estado-limite último- impactos maiores) |
| | Vedações verticais sem função estrutural | Energia do impacto (J) Impacto externo (acesso externo do público): 120 a 480 Impacto Interno: 120 a 360 | Não ocorrência de falhas (estado-limite de serviço – impactos mínimos) e não ocorrência de ruína (estado-limite último- impactos maiores) |
| Resistência a impactos de corpo duro | Vedações externas – impacto exteno | Energia de impacto (J) - 3,75 | Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço |
| | | Energia de impacto (J) -20 | Não ocorrência de ruína, caracterizada por ruptura ou transpassamento (estado-limite último) |
| | Vedações externas – impacto inteno | Energia de impacto (J) - 2,5 | Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço |
| | | Energia de impacto (J) -10 | Não ocorrência de ruína, caracterizada por ruptura ou transpassamento (estado-limite último) |
| Vedações internas - | Energia de impacto (J) - 2,5 | Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço | |
| | Energia de impacto (J) -10 | Não ocorrência de ruína, caracterizada por ruptura ou transpassamento (estado-limite último) | |
| Exposição a ação de calor e choque térmico | Dez ciclos sucessivos de exposição ao calor e resfriamento por meio de jato de água | | não podem apresentar:deslocamento horizontal instantâneo, no plano perpendicular ao corpo de prova, superior a $h/300$, onde h é a altura do corpo de prova; — Ocorrência de falhas, como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos e outros danos que possam comprometer a utilização do SVVE |
| Estanqueidade à água | Edificação: Térrea (parede com ou sem função estrutural) Com mais de um pavimento | Tempo de ensaio (h) – 7 | Percentual máximo da soma das áreas das manchas de umidade na face oposta à incidência da água, em relação à área total do corpo de prova submetido à aspersão de água, ao final do ensaio – 10 5 |

Dados brutos dos ensaios

| NAT - Com gap | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|--------------|--------------------------------|---|-----------|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|----------------------|
| Volume | CP | Trabalho (J) | Resistência à compressão (MPa) | Densidade teorica CP (g/cm ³) | Dap/Dteor | Vazios intergranulares (%) | Densidade Ap. CP (g/cm ³) | Densidade Real (g/cm ³) | Volume de vazios. Concreto (%) | Carga. Comp. (N) | Relaxação (% N/N) - 1º ciclo | Recuperação (%mm/mm) |
| 90 | 1 | 26 | 10,6 | 2,4 | 0,83 | 0,17 | 1,971 | 2,696 | 26,9 | 12903 | 11,0 | 0,05 |
| 90 | 2 | 24 | 9,5 | 2,4 | 0,83 | 0,17 | 1,987 | 2,696 | 26,3 | 11936 | 11,7 | 0,04 |
| 90 | 3 | 21 | 8,6 | 2,4 | 0,82 | 0,18 | 1,966 | 2,696 | 27,1 | 9398 | 11,5 | 0,03 |
| 98 | 1 | 64 | 16,3 | 2,4 | 0,87 | 0,13 | 2,080 | 2,696 | 22,9 | 35329 | 8,0 | 0,06 |
| 98 | 2 | 71 | 14,5 | 2,4 | 0,86 | 0,14 | 2,048 | 2,696 | 24,0 | 38495 | 8,0 | 0,01 |
| 98 | 3 | 67 | 17,8 | 2,4 | 0,87 | 0,13 | 2,066 | 2,696 | 23,4 | 36184 | 7,5 | 0,08 |
| 98 | 4 | 62 | 12,8 | 2,4 | 0,87 | 0,13 | 2,073 | 2,696 | 23,1 | 34575 | 7,3 | 0,04 |
| 98 | 5 | 68 | 14,8 | 2,4 | 0,87 | 0,13 | 2,073 | 2,696 | 23,1 | 36887 | 7,9 | 0,05 |
| 98 | 6 | 73 | 17,1 | 2,4 | 0,86 | 0,14 | 2,047 | 2,696 | 24,0 | 38897 | 6,7 | 0,08 |
| > 100 | 1 | 202 | 25,5 | 2,4 | 0,92 | 0,08 | 2,204 | 2,696 | 18,2 | 86087 | 5,9 | 0,07 |
| > 100 | 2 | 201 | 19,2 | 2,4 | 0,92 | 0,08 | 2,187 | 2,696 | 18,9 | 86338 | 5,7 | 0,06 |
| > 100 | 3 | 215 | 20,2 | 2,4 | 0,92 | 0,08 | 2,196 | 2,696 | 18,5 | 88348 | 5,4 | 0,08 |

| NAT - Sem Gap | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|--------------|--------------------------------|---|-----------|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|----------------------|
| Volume | CP | Trabalho (J) | Resistência à compressão (MPa) | Densidade teorica CP (g/cm ³) | Dap/Dteor | Vazios intergranulares (%) | Densidade Ap. CP (g/cm ³) | Densidade Real (g/cm ³) | Volume de vazios. Concreto (%) | Carga. Comp. (N) | Relaxação (% N/N) - 1º ciclo | Recuperação (%mm/mm) |
| 90 | 1 | 25 | 8,7 | 2,4 | 0,82 | 0,18 | 1,969 | 2,624 | 25,0 | 9800 | 11,92 | 0,05 |
| 90 | 2 | 20 | 9,7 | 2,4 | 0,82 | 0,18 | 1,953 | 2,624 | 25,6 | 8192 | 12,42 | 0,06 |
| 90 | 3 | 24 | 10,4 | 2,4 | 0,83 | 0,17 | 1,976 | 2,624 | 24,7 | 9285 | 12,31 | 0,07 |
| 98 | 1 | 45 | 13,9 | 2,4 | 0,85 | 0,15 | 2,021 | 2,624 | 23,0 | 30052 | 10,14 | 0,08 |
| 98 | 2 | 46 | 16,0 | 2,4 | 0,85 | 0,15 | 2,035 | 2,624 | 22,4 | 34073 | 10,57 | 0,08 |
| 98 | 3 | 49 | 15,6 | 2,4 | 0,85 | 0,15 | 2,024 | 2,624 | 22,9 | 33420 | 10,21 | 0,08 |
| 98 | 4 | 49 | 16,9 | 2,4 | 0,86 | 0,14 | 2,059 | 2,624 | 21,5 | 35731 | 10,31 | 0,06 |
| 98 | 5 | 48 | 15,4 | 2,4 | 0,85 | 0,15 | 2,034 | 2,624 | 22,5 | 32867 | 10,24 | 0,06 |
| 98 | 6 | 56 | 11,2 | 2,4 | 0,85 | 0,15 | 2,026 | 2,624 | 22,8 | 23934 | 10,10 | 0,07 |
| > 100 | 6 | 182 | 24,2 | 2,4 | 0,913 | 0,087 | 2,180 | 2,624 | 16,9 | 69402 | 6,59 | 0,07 |
| > 100 | 7 | 194 | 22,5 | 2,4 | 0,901 | 0,099 | 2,151 | 2,624 | 18,0 | 71764 | 6,13 | 0,05 |
| > 100 | 8 | 189 | 16,5 | 2,4 | 0,892 | 0,108 | 2,130 | 2,624 | 18,8 | 70709 | 6,08 | 0,08 |

| ARM - Com gap | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|--------------|--------------------------------|---|-----------|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|----------------------|
| Volume | CP | Trabalho (J) | Resistência à compressão (MPa) | Densidade teorica CP (g/cm ³) | Dap/Dteor | Vazios intergranulares (%) | Densidade Ap. CP (g/cm ³) | Densidade Real (g/cm ³) | Volume de vazios. Concreto (%) | Carga. Comp. (N) | Relaxação (% N/N) - 1º ciclo | Recuperação (%mm/mm) |
| 90 | 1 | 18 | 4,5 | 1,9 | 0,84 | 0,16 | 1,579 | 2,500 | 36,8 | 5107 | 16,9 | 0,11 |
| 90 | 2 | 16 | 5,8 | 1,9 | 0,85 | 0,15 | 1,597 | 2,500 | 36,1 | 4608 | 16,5 | 0,06 |
| 90 | 3 | 19 | 6,1 | 1,9 | 0,85 | 0,15 | 1,590 | 2,500 | 36,4 | 5274 | 16,2 | 0,11 |
| 98 | 1 | 91 | 8,2 | 1,9 | 0,89 | 0,11 | 1,676 | 2,500 | 33,0 | 21283 | 14,2 | 0,11 |
| 98 | 2 | 80 | 8,7 | 1,9 | 0,89 | 0,11 | 1,678 | 2,500 | 32,9 | 19147 | 14,4 | 0,15 |
| 98 | 3 | 86 | 7,4 | 1,9 | 0,88 | 0,12 | 1,658 | 2,500 | 33,7 | 19574 | 13,9 | 0,17 |
| 98 | 4 | 93 | 8,7 | 1,9 | 0,89 | 0,11 | 1,680 | 2,500 | 32,8 | 20755 | 14,3 | |
| 98 | 5 | 78 | 8,1 | 1,9 | 0,89 | 0,11 | 1,675 | 2,500 | 33,0 | 18783 | 13,4 | 0,16 |
| 98 | 6 | 75 | 7,7 | 1,9 | 0,89 | 0,11 | 1,674 | 2,500 | 33,0 | 18117 | 13,8 | 0,14 |
| > 100 | 9 | 399 | 24,0 | 1,9 | 0,99 | 0,01 | 1,858 | 2,500 | 25,7 | 88600 | 8,3 | 0,12 |
| > 100 | 11 | 378 | 26,8 | 1,9 | 0,99 | 0,01 | 1,858 | 2,500 | 25,7 | 84529 | 8,5 | 0,10 |
| > 100 | 7 | 376 | 22,5 | 1,9 | 1,00 | 0,00 | 1,880 | 2,500 | 24,8 | 85785 | 8,3 | 0,09 |

| ARM - Sem Gap | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|--------------|--------------------------------|---|-----------|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|----------------------|
| Volume | CP | Trabalho (J) | Resistência à compressão (MPa) | Densidade teorica CP (g/cm ³) | Dap/Dteor | Vazios intergranulares (%) | Densidade Ap. CP (g/cm ³) | Densidade Real (g/cm ³) | Volume de vazios. Concreto (%) | Carga. Comp. (N) | Relaxação (% N/N) - 1º ciclo | Recuperação (%mm/mm) |
| 90 | 1 | 12 | 2,1 | 1,9 | 0,761 | 0,239 | 1,429 | 2,500 | 42,8 | 3175 | 16,8 | 0,11 |
| 90 | 2 | 11 | 3,2 | 1,9 | 0,788 | 0,212 | 1,480 | 2,500 | 40,8 | 3003 | 18,6 | 0,12 |
| 90 | 3 | 11 | 3,7 | 1,9 | 0,790 | 0,210 | 1,483 | 2,500 | 40,7 | 3066 | 18,3 | 0,10 |
| 98 | 1 | 35 | 7,1 | 1,9 | 0,882 | 0,118 | 1,656 | 2,500 | 33,8 | 8543 | 15,9 | 0,10 |
| 98 | 2 | 40 | 6,9 | 1,9 | 0,857 | 0,143 | 1,609 | 2,500 | 35,6 | 9222 | 16,2 | 0,10 |
| 98 | 3 | 34 | 6,7 | 1,9 | 0,874 | 0,126 | 1,642 | 2,500 | 34,3 | 8342 | 16,3 | 0,14 |
| 98 | 4 | 37 | 6,7 | 1,9 | 0,876 | 0,124 | 1,645 | 2,500 | 34,2 | 8694 | 16,3 | |
| 98 | 5 | 38 | 6,8 | 1,9 | 0,880 | 0,120 | 1,652 | 2,500 | 33,9 | 9335 | 16,6 | 0,11 |
| 98 | 6 | 40 | 7,2 | 1,9 | 0,875 | 0,125 | 1,643 | 2,500 | 34,3 | 9448 | 16,1 | 0,09 |
| > 100 | 1 | 385 | 22,0 | 1,9 | 1,020 | -0,020 | 1,916 | 2,500 | 23,4 | 85534 | 9,0 | 0,09 |
| > 100 | 2 | 377 | 22,6 | 1,9 | 1,015 | -0,015 | 1,906 | 2,500 | 23,7 | 84077 | 9,3 | 0,08 |
| > 100 | 3 | 402 | 24,1 | 1,9 | 1,032 | -0,032 | 1,939 | 2,500 | 22,4 | 89655 | 8,9 | 0,11 |

Análises Estatísticas

Tabela 12 - Teste T – Concretos secos com agregados Naturais

| Volume | Dado | Trabalho | | Resistência à compressão | | Densidade | | Volume de Vazios | |
|--------|--------------------------------|----------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| | | Com gap | Sem gap | Com gap | Sem gap | Com gap | Sem gap | Com gap | Sem gap |
| 90% | Média | 22,49 | 21,89 | 9,56 | 9,57 | 1,97 | 1,97 | 0,17 | 0,18 |
| | Variância | 6,98 | 6,13 | 0,98 | 0,74 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Observações | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| | Correlação de Pearson | -1,00 | | -0,99 | | -1,00 | | -1,00 | |
| | Hipótese da diferença de média | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | |
| | gl | 1,00 | | 2,00 | | 2,00 | | 2,00 | |
| | Stat t | 0,17 | | 0,00 | | 0,69 | | -0,69 | |
| | P(T<=t) uni-caudal | 0,45 | | 0,50 | | 0,28 | | 0,28 | |
| | t crítico uni-caudal | 6,31 | | 2,92 | | 2,92 | | 2,92 | |
| | P(T<=t) bi-caudal | 0,89 | | 1,00 | | 0,56 | | 0,56 | |
| | t crítico bi-caudal | 12,71 | | 4,30 | | 4,30 | | 4,30 | |
| | Análise | Não existe diferença | | Não existe diferença | | Não existe diferença | | Não existe diferença | |
| 98% | Média | 67,62 | 48,91 | 15,57 | 14,84 | 2,06 | 2,03 | 0,14 | 0,15 |
| | Variância | 15,51 | 15,71 | 3,43 | 4,15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Observações | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 |
| | Correlação de Pearson | 0,53 | | -0,63 | | 0,12 | | 0,12 | |
| | Hipótese da diferença de média | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | |
| | gl | 5,00 | | 5,00 | | 5,00 | | 5,00 | |
| | Stat t | 11,95 | | 0,51 | | 4,17 | | -4,17 | |
| | P(T<=t) uni-caudal | 0,00 | | 0,32 | | 0,00 | | 0,00 | |
| | t crítico uni-caudal | 2,02 | | 2,02 | | 2,02 | | 2,02 | |
| | P(T<=t) bi-caudal | 0,00 | | 0,63 | | 0,01 | | 0,01 | |
| | t crítico bi-caudal | 2,57 | | 2,57 | | 2,57 | | 2,57 | |
| | Análise | Existe diferença | | Não existe diferença | | Existe diferença | | Existe diferença | |
| >100% | Média | 205,78 | 188,33 | 21,63 | 21,07 | 2,20 | 2,15 | 0,08 | 0,10 |
| | Variância | 59,27 | 35,91 | 11,46 | 16,36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Observações | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| | Correlação de Pearson | 0,08 | | 0,55 | | 0,53 | | 0,53 | |
| | Hipótese da diferença de média | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | |
| | gl | 2,00 | | 2,00 | | 2,00 | | 2,00 | |
| | Stat t | 3,23 | | 0,28 | | 3,36 | | -3,36 | |
| | P(T<=t) uni-caudal | 0,04 | | 0,40 | | 0,04 | | 0,04 | |
| | t crítico uni-caudal | 2,92 | | 2,92 | | 2,92 | | 2,92 | |
| | P(T<=t) bi-caudal | 0,08 | | 0,81 | | 0,08 | | 0,08 | |
| | t crítico bi-caudal | 4,30 | | 4,30 | | 4,30 | | 4,30 | |
| | Análise | Não existe diferença | | Não existe diferença | | Não existe diferença | | Não existe diferença | |

Tabela 13 - Teste T – Concretos secos com agregados reciclados mistos

| Volume | Dado | Trabalho | | Resistência à compressão | | Densidade | | Volume de Vazios | |
|---------|--------------------------------|----------|----------------------|--------------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|---------|
| | | Com gap | Sem gap | Com gap | Sem gap | Com gap | Sem gap | Com gap | Sem gap |
| 90% | Média | 18 | 11 | 5,47 | 2,99 | 1,589 | 1,464 | 0,15 | 0,22 |
| | Variância | 3 | 0 | 0,75 | 0,61 | 0,000 | 0,001 | 0,00 | 0,00 |
| | Observações | 3 | 3 | 3,00 | 3,00 | 3,000 | 3,000 | 3,00 | 3,00 |
| | Correlação de Pearson | 0,51 | | 0,99 | | 0,886 | | 0,89 | |
| | Hipótese da diferença de média | 0,00 | | 0,00 | | 0,000 | | 0,00 | |
| | gl | 2,00 | | 2,00 | | 2,000 | | 2,00 | |
| | Stat t | 7,50 | | 27,74 | | 9,461 | | -9,46 | |
| | P(T<=t) uni-caudal | 0,01 | | 0,00 | | 0,005 | | 0,01 | |
| | t crítico uni-caudal | 2,92 | | 2,92 | | 2,920 | | 2,92 | |
| | P(T<=t) bi-caudal | 0,02 | | 0,00 | | 0,011 | | 0,01 | |
| | t crítico bi-caudal | 4,30 | | 4,30 | | 4,303 | | 4,30 | |
| Análise | Existe diferença | | Existe diferença | | Existe diferença | | Existe diferença | | |
| 98% | Média | 84 | 37 | 8,15 | 6,89 | 1,673 | 1,641 | 0,11 | 0,13 |
| | Variância | 55 | 5 | 0,27 | 0,04 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,00 |
| | Observações | 6 | 6 | 6,00 | 6,00 | 6,000 | 6,000 | 6,00 | 6,00 |
| | Correlação de Pearson | -0,70 | | -0,12 | | -0,104 | | -0,10 | |
| | Hipótese da diferença de média | 0,00 | | 0,00 | | 0,000 | | 0,00 | |
| | gl | 5,00 | | 5,00 | | 5,000 | | 5,00 | |
| | Stat t | 12,59 | | 5,23 | | 4,108 | | -4,10 | |
| | P(T<=t) uni-caudal | 0,00 | | 0,00 | | 0,005 | | 0,00 | |
| | t crítico uni-caudal | 2,02 | | 2,02 | | 2,015 | | 2,02 | |
| | P(T<=t) bi-caudal | 0,00 | | 0,00 | | 0,009 | | 0,01 | |
| | t crítico bi-caudal | 2,57 | | 2,57 | | 2,571 | | 2,57 | |
| Análise | Existe diferença | | Existe diferença | | Existe diferença | | Existe diferença | | |
| >100% | Média | 384 | 388 | 24,43 | 22,90 | 1,865 | 1,920 | 0,01 | -0,02 |
| | Variância | 162 | 160 | 4,76 | 1,17 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,00 |
| | Observações | 3 | 3 | 3,00 | 3,00 | 3,000 | 3,000 | 3,00 | 3,00 |
| | Correlação de Pearson | -0,23 | | -0,56 | | 0,956 | | 0,96 | |
| | Hipótese da diferença de média | 0,00 | | 0,00 | | 0,000 | | 0,00 | |
| | gl | 2,00 | | 2,00 | | 2,000 | | 2,00 | |
| | Stat t | -0,32 | | 0,91 | | -16,984 | | 16,99 | |
| | P(T<=t) uni-caudal | 0,39 | | 0,23 | | 0,002 | | 0,00 | |
| | t crítico uni-caudal | 2,92 | | 2,92 | | 2,920 | | 2,92 | |
| | P(T<=t) bi-caudal | 0,78 | | 0,46 | | 0,003 | | 0,00 | |
| | t crítico bi-caudal | 4,30 | | 4,30 | | 4,303 | | 4,30 | |
| Análise | Não existe diferença | | Não existe diferença | | Existe diferença | | Existe diferença | | |

Tabela 14 – Resumo da Análise de Variância

| Resumo ANOVA | | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Trabalho | | | |
| Volume | 90 | 98 | >100% |
| NAT Com Gap x Sem gap | Existe Semelhança | Não existe Semelhança | Não existe Semelhança |
| ARM - Com Gap x ARM Sem Gap | Não Existe | Não existe Semelhança | Existe Semelhança |
| NAT x ARM (*) | Não Existe Semelhança | Não Existe Semelhança | Não Existe Semelhança |
| Densidade | | | |
| Volume | 90 | 98 | >100% |
| NAT Com Gap x Sem gap | Existe Semelhança | Não existe Semelhança | Não existe Semelhança |
| ARM - Com Gap x ARM Sem Gap | Não Existe | Não existe Semelhança | Não existe Semelhança |
| NAT x ARM (*) | Não Existe Semelhança | Não Existe Semelhança | Não Existe Semelhança |
| Resistência à Compressão | | | |
| Volume | 90 | 98 | >100% |
| NAT Com Gap x Sem gap | Existe Semelhança | Existe Semelhança | Existe Semelhança |
| ARM - Com Gap x ARM Sem Gap | Não Existe | Não existe Semelhança | Existe Semelhança |
| NAT x ARM (*) | Não Existe Semelhança | Não Existe Semelhança | Existe Semelhança |
| Volume de Vazios | | | |
| Volume | 90 | 98 | >100% |
| NAT Com Gap x Sem gap | Existe Semelhança | Não Existe | Existe Semelhança |
| ARM - Com Gap x ARM Sem Gap | Não Existe | Não existe Semelhança | Não existe Semelhança |
| NAT x ARM (*) | Não Existe Semelhança | Não Existe Semelhança | Não Existe Semelhança |

(*) Considerado os resultados das formulações Com Gap e Sem Gap.

Tabela 15 – Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) - Trabalho

| Trabalho - 90% | | | | | | | Trabalho - 98% | | | | | | | Trabalho - >100% | | | | | | |
|------------------------------|----------|-------|-------|--------------|---------|-------------|------------------------------|----------|--------|---------|---------------|---------|-------------|------------------------------|-----------|---------|----------|---------------|---------|-------------|
| Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | |
| RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 70,89 | 23,63 | 7,36 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 405,74 | 67,62 | 15,51 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 617,33 | 205,78 | 59,27 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 69,01 | 23,00 | 6,81 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 293,44 | 48,91 | 15,71 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 564,99 | 188,33 | 35,91 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,59 | 1,00 | 0,59 | 0,08 | 0,79 | 7,71 | Entre grupos | 1050,92 | 1,00 | 1050,92 | 67,33 | 0,00 | 4,96 | Entre grupos | 456,51 | 1,00 | 456,51 | 9,59 | 0,04 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 28,34 | 4,00 | 7,09 | | | | Dentro dos grupos | 156,08 | 10,00 | 15,61 | | | | Dentro dos grupos | 190,34 | 4,00 | 47,59 | | | |
| Total | 28,93 | 5,00 | | | | | Total | 1207,00 | 11,00 | | | | | Total | 646,85 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 52,81 | 17,60 | 2,76 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 503,62 | 83,94 | 55,17 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 1152,49 | 384,16 | 161,94 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 33,75 | 11,25 | 0,28 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 223,52 | 37,25 | 4,74 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | 1163,40 | 387,80 | 159,80 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 60,52 | 1,00 | 60,52 | 39,81 | 0,00 | 7,71 | Entre grupos | 6538,31 | 1,00 | 6538,31 | 218,26 | 0,00 | 4,96 | Entre grupos | 19,81 | 1,00 | 19,81 | 0,12 | 0,74 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 6,08 | 4,00 | 1,52 | | | | Dentro dos grupos | 299,56 | 10,00 | 29,96 | | | | Dentro dos grupos | 643,49 | 4,00 | 160,87 | | | |
| Total | 66,60 | 5,00 | | | | | Total | 6837,88 | 11,00 | | | | | Total | 663,30 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 70,89 | 23,63 | 7,36 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 405,74 | 67,62 | 15,51 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 617,33 | 205,78 | 59,27 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 69,01 | 23,00 | 6,81 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 293,44 | 48,91 | 15,71 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 564,99 | 188,33 | 35,91 | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 52,81 | 17,60 | 2,76 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 503,62 | 83,94 | 55,17 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 1152,49 | 384,16 | 161,94 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 33,75 | 11,25 | 0,28 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 223,52 | 37,25 | 4,74 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | 1163,40 | 387,80 | 159,80 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 298,20 | 3,00 | 99,40 | 23,10 | 0,00 | 4,07 | Entre grupos | 7621,82 | 3,00 | 2540,61 | 111,52 | 0,00 | 3,10 | Entre grupos | 107557,99 | 3,00 | 35852,66 | 343,98 | 0,00 | 4,07 |
| Dentro dos grupos | 34,43 | 8,00 | 4,30 | | | | Dentro dos grupos | 455,64 | 20,00 | 22,78 | | | | Dentro dos grupos | 833,83 | 8,00 | 104,23 | | | |
| Total | 332,62 | 11,00 | | | | | Total | 8077,46 | 23,00 | | | | | Total | 108391,82 | 11,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |

Tabela 16 - Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) - Densidade

| Densidade - 90% | | | | | | | Densidade - 98% | | | | | | | Densidade - 98% | | | | | | |
|------------------------------|----------|-------|-------|---------------|---------|-------------|------------------------------|----------|-------|-------|----------------|---------|-------------|------------------------------|----------|-------|-------|---------------|---------|-------------|
| Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | |
| RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 5,92 | 1,97 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 12,39 | 2,06 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 6,59 | 2,20 | 0,00 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 5,90 | 1,97 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 12,20 | 2,03 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 6,46 | 2,15 | 0,00 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,95 | 0,38 | 7,71 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 15,35 | 0,00 | 4,96 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 7,71 | 0,05 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 10,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | |
| Total | 0,00 | 5,00 | | | | | Total | 0,00 | 11,00 | | | | | Total | 0,00 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 4,77 | 1,59 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 10,04 | 1,67 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 5,60 | 1,87 | 0,00 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 4,39 | 1,46 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 9,85 | 1,64 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | 5,76 | 1,92 | 0,00 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,02 | 1,00 | 0,02 | 46,46 | 0,00 | 7,71 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 18,25 | 0,00 | 4,96 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 20,31 | 0,01 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 10,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | |
| Total | 0,03 | 5,00 | | | | | Total | 0,00 | 11,00 | | | | | Total | 0,01 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 5,92 | 1,97 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 12,39 | 2,06 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 6,59 | 2,20 | 0,00 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 5,90 | 1,97 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 12,20 | 2,03 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 6,46 | 2,15 | 0,00 | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 4,77 | 1,59 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 10,04 | 1,67 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 5,60 | 1,87 | 0,00 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 4,39 | 1,46 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 9,85 | 1,64 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | 5,76 | 1,92 | 0,00 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,61 | 3,00 | 0,20 | 645,00 | 0,00 | 4,07 | Entre grupos | 0,93 | 3,00 | 0,31 | 1708,08 | 0,00 | 3,10 | Entre grupos | 0,25 | 3,00 | 0,08 | 287,42 | 0,00 | 4,07 |
| Dentro dos grupos | 0,00 | 8,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 20,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 8,00 | 0,00 | | | |
| Total | 0,62 | 11,00 | | | | | Total | 0,93 | 23,00 | | | | | Total | 0,25 | 11,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |

Tabela 17 - Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à compressão – 28 dias

| Resistência à compressão aos 28 dias - 90% | | | | | | | Resistência à compressão aos 28 dias - 98% | | | | | | | Resistência à compressão aos 28 dias - >100% | | | | | | |
|--|----------|-------|-------|--------------|---------|-------------|--|----------|-------|--------|--------------|---------|-------------|--|----------|-------|-------|-------------|---------|-------------|
| Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | |
| RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 28,69 | 9,56 | 0,98 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 93,41 | 15,57 | 3,43 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 64,90 | 21,63 | 11,46 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 28,70 | 9,57 | 0,74 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 89,04 | 14,84 | 4,15 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 63,20 | 21,07 | 16,36 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 7,71 | Entre grupos | 1,59 | 1,00 | 1,59 | 0,42 | 0,53 | 4,96 | Entre grupos | 0,48 | 1,00 | 0,48 | 0,03 | 0,86 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 3,44 | 4,00 | 0,86 | | | | Dentro dos grupos | 37,87 | 10,00 | 3,79 | | | | Dentro dos grupos | 55,65 | 4,00 | 13,91 | | | |
| Total | 3,44 | 5,00 | | | | | Total | 39,46 | 11,00 | | | | | Total | 56,14 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Existe Semelhança | | | | | | | Existe Semelhança | | | | | | | Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 16,42 | 5,47 | 0,75 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 48,87 | 8,15 | 0,27 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 73,30 | 24,43 | 4,76 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 8,98 | 2,99 | 0,61 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 41,36 | 6,89 | 0,04 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | 68,70 | 22,90 | 1,17 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 9,22 | 1,00 | 9,22 | 13,55 | 0,02 | 7,71 | Entre grupos | 4,70 | 1,00 | 4,70 | 29,68 | 0,00 | 4,96 | Entre grupos | 3,53 | 1,00 | 3,53 | 1,19 | 0,34 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 2,72 | 4,00 | 0,68 | | | | Dentro dos grupos | 1,58 | 10,00 | 0,16 | | | | Dentro dos grupos | 11,87 | 4,00 | 2,97 | | | |
| Total | 11,94 | 5,00 | | | | | Total | 6,28 | 11,00 | | | | | Total | 15,39 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 28,69 | 9,56 | 0,98 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 93,41 | 15,57 | 3,43 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 64,90 | 21,63 | 11,46 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 28,70 | 9,57 | 0,74 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 89,04 | 14,84 | 4,15 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 63,20 | 21,07 | 16,36 | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 16,42 | 5,47 | 0,75 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 48,87 | 8,15 | 0,27 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 73,30 | 24,43 | 4,76 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 8,98 | 2,99 | 0,61 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 41,36 | 6,89 | 0,04 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | 68,70 | 22,90 | 1,17 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 94,52 | 3,00 | 31,51 | 40,92 | 0,00 | 4,07 | Entre grupos | 360,66 | 3,00 | 120,22 | 60,94 | 0,00 | 3,10 | Entre grupos | 20,11 | 3,00 | 6,70 | 0,79 | 0,53 | 4,07 |
| Dentro dos grupos | 6,16 | 8,00 | 0,77 | | | | Dentro dos grupos | 39,46 | 20,00 | 1,97 | | | | Dentro dos grupos | 67,52 | 8,00 | 8,44 | | | |
| Total | 100,68 | 11,00 | | | | | Total | 400,11 | 23,00 | | | | | Total | 87,63 | 11,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Existe Semelhança | | | | | | |

Tabela 18 – Tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) – Volume de Vazios

| Volume de Vazios - 90% | | | | | | | Volume de Vazios - 98% | | | | | | | Volume de Vazios - >100% | | | | | | |
|------------------------|----------|-------|-------|--------------|---------|-------------|------------------------|----------|-------|-------|--------------|---------|-------------|--------------------------|----------|-------|-------|---------------|---------|-------------|
| Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | | Anova: fator único | | | | | | |
| RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | | RESUMO | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 0,52 | 0,17 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 0,81 | 0,14 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 0,24 | 0,08 | 0,00 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 0,53 | 0,18 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 0,89 | 0,15 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 0,29 | 0,10 | 0,00 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,95 | 0,38 | 7,71 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 15,35 | 0,00 | 4,96 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 7,71 | 0,05 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 10,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | |
| Total | 0,00 | 5,00 | | | | | Total | 0,00 | 11,00 | | | | | Total | 0,00 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 0,46 | 0,15 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 0,65 | 0,11 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 0,66 | 0,22 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 0,76 | 0,13 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | -0,07 | -0,02 | 0,00 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,01 | 1,00 | 0,01 | 46,44 | 0,00 | 7,71 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 18,22 | 0,00 | 4,96 | Entre grupos | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 20,33 | 0,01 | 7,71 |
| Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 10,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 4,00 | 0,00 | | | |
| Total | 0,01 | 5,00 | | | | | Total | 0,00 | 11,00 | | | | | Total | 0,00 | 5,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |
| Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | | Grupo | Contagem | Soma | Média | Variância | | |
| NAT Com Gap | 3,00 | 0,52 | 0,17 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 6,00 | 0,81 | 0,14 | 0,00 | | | NAT Com Gap | 3,00 | 0,24 | 0,08 | 0,00 | | |
| NAT - Sem Gap | 3,00 | 0,53 | 0,18 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 6,00 | 0,89 | 0,15 | 0,00 | | | NAT - Sem Gap | 3,00 | 0,29 | 0,10 | 0,00 | | |
| ARM Com Gap | 3,00 | 0,46 | 0,15 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 6,00 | 0,65 | 0,11 | 0,00 | | | ARM Com Gap | 3,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | | |
| ARM Sem Gap | 3,00 | 0,66 | 0,22 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 6,00 | 0,76 | 0,13 | 0,00 | | | ARM Sem Gap | 3,00 | -0,07 | -0,02 | 0,00 | | |
| ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | | ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 0,01 | 3,00 | 0,00 | 28,64 | 0,00 | 4,07 | Entre grupos | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 39,82 | 0,00 | 3,10 | Entre grupos | 0,03 | 3,00 | 0,01 | 160,42 | 0,00 | 4,07 |
| Dentro dos grupos | 0,00 | 8,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 20,00 | 0,00 | | | | Dentro dos grupos | 0,00 | 8,00 | 0,00 | | | |
| Total | 0,01 | 11,00 | | | | | Total | 0,01 | 23,00 | | | | | Total | 0,03 | 11,00 | | | | |
| Análise | | | | | | | Análise | | | | | | | Análise | | | | | | |
| Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | | Não Existe Semelhança | | | | | | |