

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

HERBERT MEDEIROS TORRES LOPES

**Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de  
dosagem de concretos de cimento Portland**

SÃO CARLOS

2019



HERBERT MEDEIROS TORRES LOPES

**Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de  
dosagem de concretos de cimento Portland**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (Estruturas).

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro

SÃO CARLOS

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

L864a            Lopes, Herbert Medeiros Torres  
                  Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland / Herbert Medeiros Torres Lopes; orientadora Alessandra Lorenzetti de Castro. São Carlos, 2019.

                  Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

                  1. Concreto. 2. Dosagem. 3. Empacotamento de partículas. 4. Otimização. 5. Sustentabilidade. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HERBERT MEDEIROS TORRES LOPES**.

Título da dissertação: "Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland".

Data da defesa: 26/04/2019.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Profa. Dra. **Alessandra Lorenzetti de Castro**  
**(Orientadora)**

Aprovado

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Dra. **Ana Paula da Luz**

APROVADO

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Profa. Dra. **Mônica Pinto Barbosa**

Aprovado

(Universidade Estadual Paulista " Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me proporcionar equilíbrio e perseverança ao longo desses dois anos, renovando minhas forças e permitindo a conclusão de mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais – Hercina e Henrique – pelo exemplo de vida, pelo imenso carinho e apoio incondicional durante todos os momentos da minha vida. A vocês, mais essa vitória, com muito amor.

À minha orientadora, Alessandra Lorenzetti de Castro, agradeço a excelente orientação e apoio, regados a um olhar crítico e construtivo, fundamentais para definir os rumos desta pesquisa. Agradeço, também, pelos conselhos (pessoais e profissionais), conversas descontraídas e com palavras tranquilizantes, sem contar a paciência e dedicação. Acima de tudo, obrigado pela confiança a mim dispensada, e saiba, com certeza, que és um exemplo para mim.

Aos amigos Raimundo, Flaviana e Daniel pelo acolhimento e apoio durante esses dois anos tornando-se parte da minha família.

Aos amigos de longa data – Célio, Rodrigo, Tales, Rafael, Mirabeau, Ruhan, Naédja, Caliane, Isadora, Cinthia, George, Plabito, Valtair – agradeço pela amizade sincera, por estarem sempre ao meu lado, ainda que distantes fisicamente; saibam que nossa amizade é para toda a vida.

Aos amigos do SET, os levarei para vida inteira, agradeço por proporcionarem momentos agradáveis e descontraídos, principalmente aos colegas da sala M7 – Alex, Henrique, Bernardo e Caio – que dividiram comigo momentos de estudos e me auxiliaram com seu companheirismo.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da EESC, nas pessoas de Luiz Vareda, Jorge, Fabiano, Amauri, Romeu e Mauri, sou grato pelo empenho na realização dos meus experimentos. Em especial, menciono os amigos Fernando, Thomas, Alex e Lucas, essenciais na conclusão de muitos ensaios desenvolvidos, além da amizade firmada.

Me recordo, também, dos funcionários do SET, os quais agradeço nas pessoas de Dorival, Marcela, Clayton, Dani, Nadir, Silvia, Melina e Francisco; sou grato pela assistência que me foi fornecida durante minha passagem acadêmica.

Não podia deixar de mencionar as pessoas de Túlio, Thomas, Jailto, Gregório, junto dos quais convivi harmoniosamente na república ao longo de todo o mestrado.

Às empresas GCP Applied Technologies, Grupo Bandeirantes e Elkem pelos materiais fornecidos que permitiram o desenvolvimento da presente pesquisa.

Por fim, meu mais sincero agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), responsável pelo financiamento da bolsa de pesquisa, momento marcante e divisor de águas na minha formação humana, pessoal e profissional, complemento os ensinamentos obtidos na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), instituição na qual me tornei Engenheiro Civil, e onde conheci professores e pessoas incríveis.

*À cada um, em particular, a minha mais verdadeira gratidão.*



“A persistência é o caminho do êxito”  
(*Charles Chaplin*)



## RESUMO

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland.** 2019. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O concreto é o material de construção mais utilizado e nos últimos anos, estudos têm sido desenvolvidos em busca de materiais com desempenho mecânico e durabilidade superiores, com redução do consumo de cimento. Nesse contexto, tem-se o estudo do empacotamento de partículas associado à dosagem de concretos, produzindo estruturas mais densas e compactas, com melhor consumo energético. Basicamente, o empacotamento de partículas consiste em otimizar composições empregando partículas de diferentes tamanhos, promovendo o refinamento dos poros e, eventualmente, reduzindo o volume de pasta necessário para envolver as partículas da mistura. O empacotamento de partículas permite uma evolução nas propriedades do concreto, além de promover um benefício ambiental por meio da utilização de resíduos e subprodutos industriais, redução de emissões poluentes e economia de energia, mediante a redução do consumo de cimento na mistura. Diante disto, o presente trabalho tem por objetivo aplicar o conceito de empacotamento de partículas na otimização de traços de concretos convencionais e de alta resistência. Para isso, realizou-se inicialmente um estudo de dosagem, sendo determinados traços de referência pela metodologia tradicional. Aplicando o modelo de empacotamento de Alfred, foi determinado o coeficiente de distribuição de cada mistura e, então, os traços foram otimizados mantendo-se o mesmo coeficiente, sendo comparadas as propriedades dos concretos otimizados com propriedades das misturas de referência. Verificou-se que nas misturas otimizadas não foi possível obter a trabalhabilidade desejada, sendo necessário ajustar o teor de aditivo a fim de manter a mesma consistência. No estado endurecido, os concretos otimizados apresentaram desempenho físico e mecânico superior aos concretos dosados pela metodologia tradicional. Os ensaios não destrutivos apenas permitiram verificar a evolução com o tempo do módulo de elasticidade dinâmico e da porosidade, visto que a mudança da composição das misturas influencia diretamente no módulo e na velocidade de propagação da onda no material. Por fim, foi possível verificar a sustentabilidade dos concretos otimizados, que apresentaram índice de intensidade de ligante mais eficiente que os concretos de referência, reforçando a importância desse trabalho.

**Palavras-chave:** Concreto. Dosagem. Empacotamento de Partículas. Otimização. Sustentabilidade.



## ABSTRACT

LOPES, H. M. T. **The application of particle packing concept in the optimization of Portland cement concretes mix design.** 2019. 172 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

Concrete is the most widely used construction material and in recent years, studies have been developed in search of materials with higher mechanical performance and durability, with reduced cement consumption. In this sense, the study of particle packing associated to the mix design of concrete, producing denser and more compact structures, with better energy consumption, is being studied. Basically, particle packing consists of optimizing compositions employing particles of different sizes, promoting pore refinement and possibly reducing the volume of cement paste required to involve the particles in the mix. The particle packing allows an evolution in concrete's properties, besides promoting an environmental benefit using industrial wastes and by-products, reduction of polluting emissions and energy saving, by reducing the consumption of cement in the mix. In this view, the present research aims to apply the concept of particle packing in the optimization of conventional and high strength concretes mix design. For this, a mix design study was carried out initially, being determined reference concretes mix design by the traditional methodology. Applying the Alfred's packing model, the distribution coefficient of each mix was determined and concretes mix design were optimized by keeping the same coefficient, and the properties of the optimized concretes were compared with the properties of the reference mixtures. It was verified that, in optimized mixtures, it was not possible to get the desired workability and it was required to fit the chemical admixture content in order to keep the same consistency. In the hardened state, the optimized concrete showed physical and mechanical performance higher than concretes designed by the traditional methodology. The non-destructive tests only allowed to verify the evolution of the dynamic elasticity modulus and the porosity with time, since the change of the composition of the mixtures directly influences the modulus and the wave propagation speed in the material. Finally, it was possible to verify the sustainability of the optimized concretes, which presented a binder intensity index more efficient than the reference concrete, reinforcing the importance of this research.

**Keywords:** Concrete. Mix Design. Particle Packing. Optimization. Sustainability.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	20
1.3 OBJETIVOS .....	22
<b>1.3.1 Objetivo geral.....</b>	<b>22</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>22</b>
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
2.1 CONCRETO.....	25
<b>2.1.1 História.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2 Materiais constituintes .....</b>	<b>26</b>
2.1.2.1 Cimento Portland .....	26
2.1.2.2 Agregados .....	27
2.1.2.3 Água de amassamento .....	28
2.1.2.4 Aditivos e adições.....	28
2.2 DOSAGEM DO CONCRETO .....	29
<b>2.2.1 Método de dosagem IPT/EPUSP.....</b>	<b>30</b>
2.2.1.1 Histórico do método .....	30
2.2.1.2 Formulação e parâmetros fundamentais empregados no método.....	32
2.2.1.3 Estudo experimental .....	34
<b>2.2.2 Método de dosagem ABCP .....</b>	<b>36</b>
2.2.2.1 Histórico do método .....	36
2.2.2.2 Descrição do método .....	37
2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS .....	39
<b>2.3.1 Modelos de empacotamentos de partículas .....</b>	<b>40</b>
2.3.1.1 Modelo de Furnas .....	41
2.3.1.2 Modelo de Andreasen.....	42
2.3.1.3 Modelo de Alfred .....	43
<b>2.3.2 Fatores que interferem no empacotamento de partículas .....</b>	<b>44</b>
2.3.2.1 Morfologia.....	44
2.3.2.2 Porosidade .....	45
2.3.2.3 Efeito parede.....	46

2.3.2.4 Técnica de compactação .....	46
2.3.2.5 Estado de dispersão das partículas .....	47
<b>2.3.4 Estudos pertinentes .....</b>	<b>48</b>
2.4 SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO .....	50
2.5 ÍNDICE DE INTENSIDADE DE LIGANTES .....	52
2.6 MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	54
<b>2.6.1 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) .....</b>	<b>55</b>
2.6.1.1 Teoria da propagação de ondas .....	55
2.6.1.2 Equipamentos utilizados .....	56
<b>2.6.2 Método de excitação por impulso ou ressonância acústica .....</b>	<b>59</b>
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>63</b>
3.1 MATERIAIS .....	64
<b>3.1.1. Cimento.....</b>	<b>64</b>
<b>3.1.2 Agregados.....</b>	<b>64</b>
3.1.2.1 Agregado miúdo.....	64
3.1.2.2 Agregado graúdo.....	65
<b>3.1.3 Sílica ativa.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.4 Aditivos químicos .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.5 Água de amassamento .....</b>	<b>65</b>
3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS .....	66
3.3 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA ÚMIDA DAS AMOSTRAS .....	69
3.4 MÉTODOS DE ENSAIO .....	70
3.5 CRITÉRIOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	73
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>75</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	75
4.2 TRAÇOS DE REFERÊNCIA .....	79
4.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISTRIBUIÇÃO.....	80
4.4 TRAÇOS OTIMIZADOS .....	83
4.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	89
4.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	91
<b>4.6.1 Resistência à compressão.....</b>	<b>91</b>
<b>4.6.2 Absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica .....</b>	<b>95</b>
<b>4.6.3 Absorção de água por capilaridade.....</b>	<b>99</b>
<b>4.6.4 Propriedades dinâmicas .....</b>	<b>100</b>



<b>4.6.5 Velocidade do pulso ultrassônico .....</b>	<b>107</b>
<b>4.7 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DOS CONCRETOS.....</b>	<b>117</b>
<b>5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>123</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>123</b>
<b>5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>125</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE A – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE B – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DO CONCRETO.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE C – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ÍNDICE DE VAZIOS DO CONCRETO.....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE D – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA DE CONCRETO .....</b>	<b>147</b>
<b>APÊNDICE E – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SATURADA DE CONCRETO.....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE F – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA REAL DE CONCRETO .....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE G – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO CONCRETO.....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE H – TESTES ESTATÍSTICOS PARA PROPRIEDADES DINÂMICAS DO DO CONCRETO.....</b>	<b>163</b>
<b>APÊNDICE I – TESTES ESTATÍSTICOS PARA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO DO CONCRETO.....</b>	<b>167</b>
<b>APÊNDICE J – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CONCRETO .....</b>	<b>169</b>



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O dinamismo e a constante evolução do setor da construção civil está diretamente relacionado ao crescimento socioeconômico, apresentando como principal insumo o concreto, usualmente composto por grandes proporções de cimento Portland. Essa atividade econômica é responsável por grande consumo de energia e extração de recursos naturais.

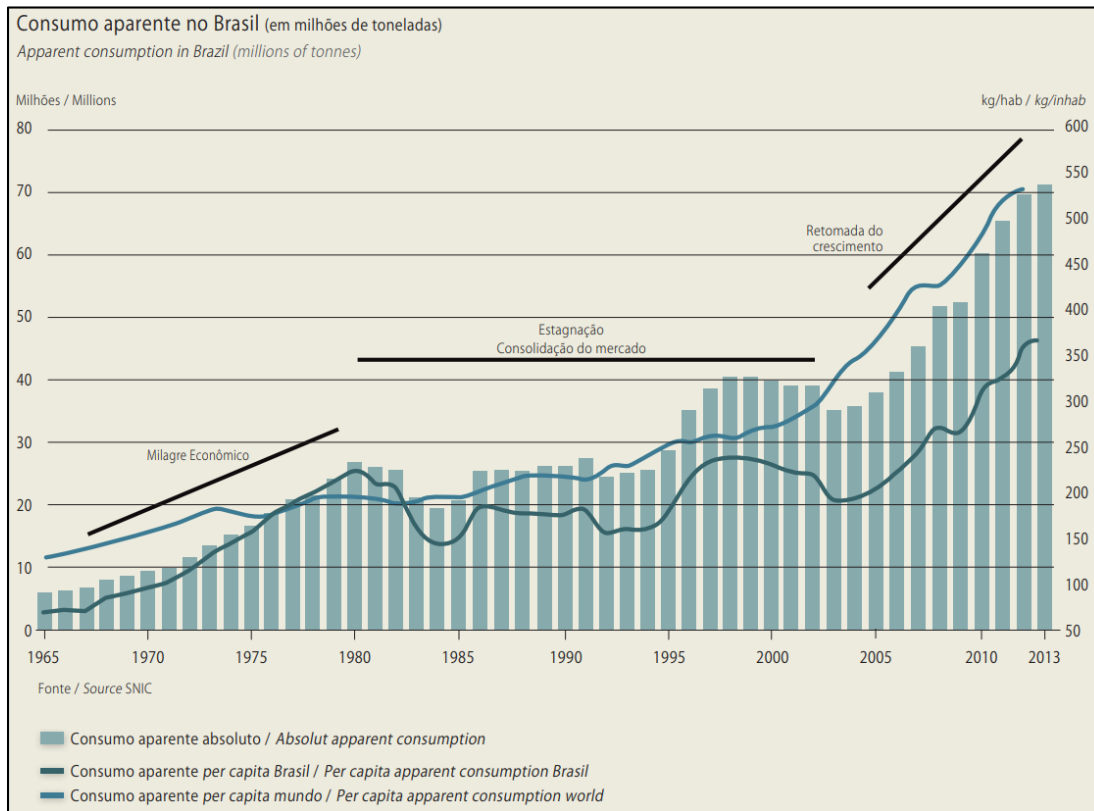
O material de construção mais largamente utilizado em obras de engenharia é o concreto de cimento Portland, sendo considerado o material de construção mais consumido em escala mundial. Em relação aos materiais de consumo, é visto como o segundo mais utilizado, ficando apenas atrás da água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). De acordo com Callister Jr e Rethwisch (2012), o concreto convencional é um material compósito, obtido pelo endurecimento de uma mistura entre um aglomerante hidráulico (cimento Portland), um agregado miúdo (areia), um agregado graúdo (brita) e água.

Nas reações de hidratação do cimento a pasta adere aos fragmentos do agregado, proporcionando uma mistura resistente e de fácil execução, conferindo ao conjunto impermeabilidade, durabilidade frente aos agentes agressivos e comportamento satisfatório quando submetido a esforços mecânicos. Assim, é possível observar sua aplicação nas mais diversas obras de engenharia, tais como: pontes, edificações, usinas hidrelétricas e nucleares, pavimentação, túneis, estruturas de contenção, dentre outras.

Usualmente, os agregados ocupam o maior volume na mistura de concreto. Entretanto, o cimento é responsável pelo desenvolvimento das principais propriedades do material (como a resistência mecânica, por exemplo), sendo o componente da mistura de maior impacto ambiental negativo em virtude da emissão de dióxido de carbono e do elevado consumo de energia dispendido durante seu processo de fabricação.

Segundo Cembureau (2015), a produção de cimento manteve-se expressiva nos últimos anos mesmo com a recessão de grandes economias mundiais. No Brasil, o consumo de cimento atingiu o seu ápice em 2014, chegando ao valor de 71,7 milhões de toneladas (SNIC, 2014). No entanto, com a crise econômica do país, que refletiu na construção civil, houve uma queda nesse consumo, chegando a 52,7 milhões de toneladas em 2018 (SNIC, 2018). A Figura 1 ilustra o consumo brasileiro de cimento nas últimas cinco décadas, bem como as questões macroeconômicas que explicam a evolução desse consumo.

Figura 1 – Produção de cimento no Brasil entre os anos de 1970 a 2013.



Fonte: Snic (2013).

A demanda de materiais à base de cimento, aliada ao aumento populacional, elevou substancialmente a produção desse material, apresentando uma curva crescente e, então, ocasionando um maior consumo de matéria-prima para sua fabricação. Diante da crescente preocupação referente ao desenvolvimento sustentável, o uso de concretos modernos que proporcionem um baixo consumo de cimento e um aprimoramento das propriedades mecânicas e de durabilidade é cada vez mais frequente. Isso é justificado por motivos ambientais e socioeconômicos, como menores consumos de matérias-primas e energia, gastos com logística e transporte do material, redução da pegada de carbono, além de razões técnicas, entre elas: menor calor de hidratação, retração e fissuração de estruturas de concreto (GHODDOUSI; JAVID; SOBHANI, 2013).

Com o avanço das pesquisas, buscando materiais com desempenho superior em termos de comportamento mecânico e durabilidade, surge uma variedade de concretos especiais em geral, à base de cimento Portland, que são aprimorados por meio da engenharia de microestrutura. Tais concretos podem conter, além dos componentes do concreto convencional, aditivos químicos e adições (minerais ou não) incorporados à mistura, resultando numa variedade de propriedades e características especiais ao material. Existe uma

série de concretos especiais, tais como: concreto autoadensável (CAA), concreto reforçado com fibras (CRF), concreto de alto desempenho (CAD), entre outros. Esse último foi empregado inicialmente no exterior na década de 1970 (AITCIN, 2000).

O concreto de alto desempenho (CAD) é produzido usando materiais cuidadosamente selecionados, com baixa relação água/aglomerante, elevado consumo de cimento e também um teor alto de aditivo químico (superplastificante). O CAD possui diversas características que devem ser atendidas concomitantemente, como trabalhabilidade adequada, permeabilidade reduzida, durabilidade elevada, alto módulo de elasticidade, fissuração reduzida e resistência à compressão elevada. Por ser um compósito constituído predominantemente por partículas com granulometria reduzida e possuir uma baixa relação água/aglomerante, esse tipo de concreto apresenta matriz densa obtida, em sua grande maioria, por meio da incorporação de adições minerais.

Desse modo, é necessária uma maior otimização do traço de concreto para minimizar o consumo de cimento, a fim de reduzir os impactos ecológico e econômico em concretos convencionais e de alta resistência sem comprometer suas propriedades mecânicas. Nesse contexto, uma técnica promissora para reduzir os efeitos negativos da produção de cimento é utilizar o estudo de empacotamento de partículas, que consiste em obter misturas com densidade de empacotamento elevada, reduzindo os vazios da microestrutura do concreto e minimizando o consumo de pasta, refletindo em melhor desempenho mecânico e durabilidade do material (REBMANN, 2016).

O empacotamento de partículas, assunto abordado pela engenharia de microestrutura de materiais, propicia um aumento considerável na densidade da matriz do material, conferindo uma boa resistência mecânica, trabalhabilidade adequada para aplicação (alcançada por meio da dispersão das partículas promovida pela incorporação de aditivos químicos à mistura) e, principalmente, a durabilidade das estruturas, a fim de reduzir custos com manutenção (CASTRO; FERREIRA, 2016). Misturas de concreto com densidade de empacotamento elevada (partículas muito bem acomodadas), possuem a tendência de reduzir o espaço necessário para preenchimento com os produtos de hidratação do cimento, indicando teoricamente uma resistência mecânica mais elevada.

A pasta possui a função de envolver e preencher os espaços entre as partículas do agregado de modo a reduzir os vazios no concreto, ou seja, o volume de pasta tem de ser maior que o volume de lacunas existente entre as partículas. A ideia de empacotamento de partículas é a tentativa de reconstrução de uma rocha sólida a partir da adequada seleção de elementos com granulometrias complementares, em que ao misturar proporções adequadas de

diferentes materiais, as partículas de menores tamanhos preenchem os vazios entre as partículas de maior dimensão e os vazios remanescentes serão preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente (CAMPOS; MARQUES FILHO; KLEIN, 2016).

Assim, este trabalho consiste na aplicação do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos convencionais e de alta resistência aplicados na construção civil, a fim de obter matrizes mais densas, com menor consumo de cimento, verificando as propriedades desses concretos no estado fresco e endurecido.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O setor da construção civil é o principal responsável pelo consumo global de recursos naturais, possuindo uma parcela significativa nos problemas relacionados ao meio ambiente. Conforme tem-se o crescimento econômico, a demanda por materiais de construção, principalmente à base de cimento (por exemplo, o concreto), eleva substancialmente. A indústria de cimento, matéria-prima fundamental do concreto, é responsável por cerca de 5% das emissões de CO<sub>2</sub> mundiais, valor que deverá ser aumentado para 30% até 2050, se nenhuma providência for tomada (DAMINELI, 2013).

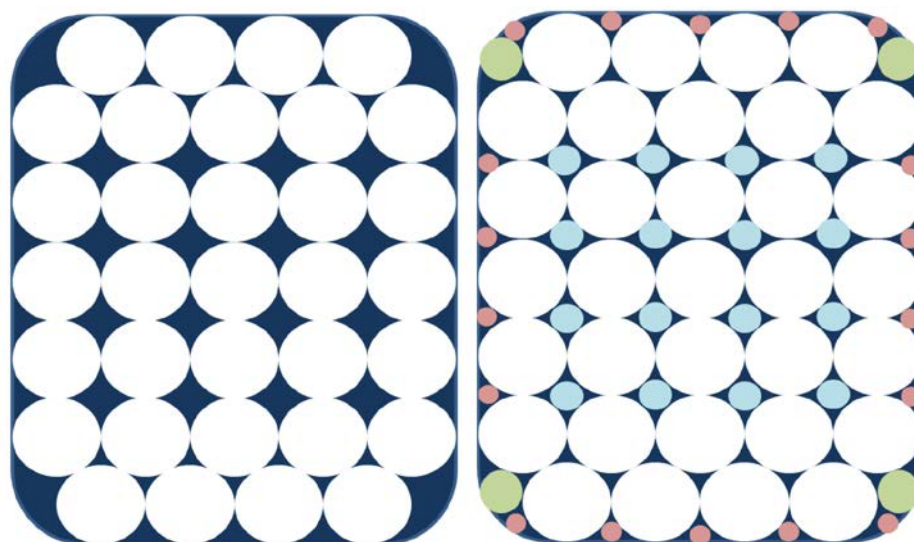
A cadeia produtiva do cimento é um processo oneroso e altamente energético que traz sérios problemas ambientais, em especial no processo de descarbonatação do calcário para produção do clínquer, onde ocorre emissão substancial de gases do efeito estufa. O avanço da infraestrutura de um país está normalmente associado a um aumento significativo da emissão atmosférica de CO<sub>2</sub>. Em vista desse impasse, algumas medidas mitigadoras já foram implementadas pela indústria cimenteira, como o aumento da eficiência dos fornos utilizados na queima do clínquer, uso de combustíveis alternativos (como a biomassa) em detrimento dos combustíveis fósseis, substituição de clínquer por adições minerais (produção de cimento composto) e sequestro de CO<sub>2</sub> (DAMINELI, 2013).

A demanda por esse material é crescente nos países em desenvolvimento econômico, em virtude do crescimento industrial. Entretanto, as estratégias implementadas para minimizar os efeitos maléficos dessa linha de produção são insuficientes, sendo necessário buscar por novas estratégias. Nesse contexto, a tecnologia do concreto, pressionada pela crescente exigência do mercado, vem se aperfeiçoando nas últimas décadas. Uma das vertentes desse avanço consiste na tentativa de reduzir o teor de cimento presente nas misturas de concretos, tarefa bastante importante e desafiadora para os pesquisadores em tecnologia do concreto.

A redução do consumo de cimento em concretos propicia algumas vantagens técnicas, como a redução do calor de hidratação, da retração e de fissuração. Para tanto, tem-se empregado materiais cimentícios suplementares, como fíler calcário, pozolanas e escória, possibilitando um melhor empacotamento da mistura, além de melhorar consideravelmente a microestrutura do concreto nas primeiras idades. Em relação a sustentabilidade do material, essa prática torna-se relevante, visto que possibilita a obtenção de concretos com menor teor de cimento incorporado sem prejuízos para suas propriedades.

A aplicação do empacotamento de partículas (Figura 2) para a otimização de materiais granulares é de suma importância, visto que, ao tornar a matriz do concreto mais densa e compacta, é possível obter produtos com baixo consumo de cimento sem comprometer o desempenho mecânico e a durabilidade do material, além de reduzir o impacto ambiental negativo da cadeia de produção do ligante, bem como a redução de custos. Assim, a modificação da formulação de dosagem de concretos é uma forma extremamente eficiente para auxiliar na produção de concretos com desempenho mecânico superior e menor consumo de cimento (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

Figura 2 – Otimização de uma mistura de concreto por meio da técnica de empacotamento de partículas.



Fonte: Campos, Marques Filho e Klein (2016).

As propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto são diretamente relacionados com a porosidade do material. Assim, a redução do índice de vazios do concreto reflete numa melhora substancial dessas propriedades, ou seja, a diminuição da porosidade do concreto

leva a uma maior resistência mecânica e durabilidade do concreto, diminuindo o risco de ataques por agentes agressivos, aumentando a vida útil do material (LENZ, 2016).

Em geral, as metodologias tradicionais de dosagem de concreto empregadas no Brasil buscam a distribuição granulométrica ideal para os agregados que forneça o melhor custo-benefício. Entretanto, sabe-se que o concreto é constituído por diversos outros materiais granulares, necessitando de um estudo mais amplo e aprofundado. Não basta ter um concreto com baixo consumo de cimento, a mistura tem que ser trabalhável, aplicável, durável e resistir a esforços mecânicos. Flatt, Roussel e Cheeseman (2012) concluíram que o futuro do concreto está no emprego da otimização de dosagem com o aumento da eficiência do índice de ligantes.

Nesse contexto, o conceito de empacotamento de partículas torna-se relevante para a otimização de misturas de concreto que atendam aos requisitos técnicos, mas que também sejam sustentáveis. Apesar de ser uma técnica difundida em diversas áreas da engenharia, é um conceito relativamente novo na prática da construção civil. Na literatura encontram-se principalmente estudos relacionados ao conceito de empacotamento de partículas aplicado em materiais cerâmicos e argamassas. No entanto, em relação ao concreto, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos, o que indica a necessidade de estudos mais aprofundados para expandir essa metodologia, integrando-a do meio acadêmico para a prática na construção civil.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa é otimizar misturas de concreto de cimento Portland convencionais e de alta resistência, obtidos por meio do método de dosagem tradicional IPT/EPUSP, com base no conceito de empacotamento de partículas.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar as características dos materiais constituintes do concreto, especialmente a distribuição granulométrica dos materiais;
- Produzir misturas de concretos convencional e de alta resistência por meio do método de dosagem tradicional IPT/EPUSP;



- Avaliar a eficiência do empacotamento de partículas dessas misturas de concreto de cimento Portland por meio do modelo de Alfred;
- Desenvolver um programa computacional de base de dados e processamento referente ao modelo de empacotamento de Alfred, a fim de otimizar os traços de concretos convencional e de alta resistência;
- Avaliar a influência da otimização desses concretos por meio da determinação de suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido, bem como o desempenho ambiental dos concretos.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 1 corresponde à introdução do trabalho no qual é apresentada uma breve contextualização do assunto abordado. Também se encontram neste capítulo a justificativa e os objetivos geral e específicos da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica pertinente ao tema. Neste capítulo são apresentados aspectos teóricos relacionados ao empacotamento de partículas, aos métodos de dosagem empregados no Brasil e aos parâmetros para avaliação da sustentabilidade do concreto. Além disso, nesta seção é apresentada a fundamentação teórica relacionado aos ensaios não-destrutivos empregados no programa experimental.

O capítulo 3 contempla o programa experimental, com detalhe para a caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos, bem como o estudo de dosagem inicial para determinação dos traços de referência. Neste capítulo inclui-se ainda a metodologia adotada para obter os traços otimizados e são apresentados os métodos de ensaio e a sequência dos experimentos.

O capítulo 4 contém os resultados obtidos e as respectivas análises e discussões. Os resultados abrangem propriedades do concreto no estado fresco, como consistência e massa específica; propriedades do concreto no estado endurecido, referente aos ensaios de índices físicos, absorção por capilaridade, resistência à compressão, ensaios não destrutivos; e, por último, avaliação da sustentabilidade ambiental dos concretos por meio do índice de intensidade de ligantes.

Na sequência, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões resultantes da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa. Em seguida, estão dispostos os apêndices, contendo tabelas e gráficos auxiliares para a análise e discussão dos resultados.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO

Por ser um material de fácil produção, que possibilita a moldagem em diversas formas e dimensões, apresentar boa resistência mecânica após endurecido (similar às rochas naturais), ser economicamente atrativo, entre outros motivos, o concreto é considerado o material mais importante da construção civil. Metha e Monteiro (2014) definem concreto como um material compósito que consiste, essencialmente, de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregados, ou seja, uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, e água, com ou sem a presença de adições e/ou aditivos químicos. O aglomerante (usualmente o cimento Portland) em presença da água, ao ser hidratado forma uma pasta que adere aos fragmentos de agregados, formando uma mistura de fácil modelagem, possuindo resistência à compressão e formando, quando endurecida, um bloco monolítico que se adequa às exigências estruturais necessárias (LIMA *et al.*, 2014).

#### 2.1.1 História

O concreto armado amplamente difundido no mercado atual é visto como um material novo. Segundo Carvalho (2008), até meados do século XIX os sistemas construtivos usuais eram as estruturas em madeira e em alvenaria. Então, surgiu o concreto com características de resistência à água (impermeabilidade), apresentando menores problemas de durabilidade e combustão quando comparado com a madeira e o aço, além da grande disponibilidade de seus materiais constituintes.

Atualmente, o concreto convencional (mistura de cimento, areia, pedra britada e água) ainda é amplamente utilizado em obras civis onde não há a necessidade de equipamentos sofisticados para o bombeamento do mesmo. Uma característica desse concreto é que, ao tentar obter misturas mais resistentes, a trabalhabilidade do mesmo é reduzida (caso não seja incorporado aditivo químico redutor de água à mistura), fazendo-se necessário o uso de equipamentos de vibração para um bom adensamento (LIMA *et al.*, 2014). Na prática, costuma-se utilizar ao menos um aditivo químico polifuncional que, embora de menor eficiência em relação ao superplastificante, pode conferir um desempenho mecânico superior ao concreto sem a necessidade de adição de água para se obter a consistência especificada.

O concreto de alto desempenho é produzido com os mesmos materiais constituintes do concreto convencional, porém com a incorporação de materiais cimentícios suplementares (adições minerais), tais como cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto forno, pozolana, entre outros (CASTRO, 2007). Já a trabalhabilidade adequada para aplicação é obtida por meio da dispersão das partículas promovida pela adição de aditivos químicos à mistura, fundamentais para a produção desses concretos. Dessa forma, a presença de tais materiais transforma o concreto convencional em um material com melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade, o que permite aos arquitetos e engenheiros projetistas usarem-no eficientemente em estruturas mais esbeltas.

Para conseguir concretos que reportem boas características e propriedades é necessária uma seleção minuciosa dos materiais constituintes e uma adequada proporcionalidade na sua produção. A proporcionalidade entre os seus componentes (dosagem) provoca diversas modificações nas características do concreto tanto no seu estado fresco como no endurecido (SILVA JUNIOR, 2014). Dessa forma, é importante conhecer e entender os constituintes do concreto.

## **2.1.2 Materiais constituintes**

### **2.1.2.1 Cimento Portland**

A NBR 16697:2018 define o cimento Portland comum como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (ABNT, 2018). Além disso, durante a moagem, é permitido incorporar materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos, resultando nos chamados cimentos compostos. Os cimentos usualmente empregados na construção civil nacional são o composto, de alto-forno, pozolânico, de alta resistência inicial e de baixo calor de hidratação.

O cimento Portland é um material finamente pulverizado, que por si só não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes em contato com a água. O material adquire propriedade adesiva em função das suas reações químicas de hidratação, resultando em uma pasta que, quando endurecida, confere rigidez à mistura, ou seja, pode conferir elevada resistência mecânica (SILVA JÚNIOR, 2014). Com relação à dosagem do concreto, a proporção mínima de cimento deve ser aquela capaz de assegurar o perfeito envolvimento de todas as partículas pertencentes a mistura. Vale lembrar que um maior consumo de cimento na

mistura de concreto ocasiona maior plasticidade e coesão, menor segregação e exsudação, no entanto contribui para um maior calor de hidratação e variação volumétrica do material.

#### 2.1.2.2 Agregados

Agregado é qualquer material granular natural ou sintético, sem forma ou volume definidos, que compõem as argamassas e os concretos. Os agregados de origem natural são encontrados de forma particulada na natureza (como areia, seixos e cascalho), enquanto que os artificiais são produzidos por algum processo industrial, tendo como exemplos a granalha de aço, vermiculita, escórias de alto-forno e argilas expandidas. A NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) classifica os agregados de acordo com a dimensão das partículas, o agregado é dito gráúdo se suas partículas são maiores que 4,75 mm e miúdo em caso contrário. Alguns exemplos de agregados empregados em obras civis são: areia, pedregulho, seixos, rocha britada, escória de alto forno, argila expandida e resíduos da construção civil.

A composição mineralógica dos agregados tem papel fundamental na resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade, porosidade, durabilidade e na presença de substâncias deletérias, influenciando diretamente na composição do concreto. Por muito tempo, esse material foi considerado inerte. Entretanto, percebeu-se que a mineralogia dos agregados poderiam conter substâncias deletérias, prejudiciais à durabilidade do concreto. Além disso, verifica-se que no estado fresco os agregados têm papel fundamental na determinação do custo, estabilidade dimensional (variações de volume) e da consistência das misturas de concreto, sendo indispensáveis na obtenção de propriedades físicas e mecânicas especiais, tais como resistência à abrasão, isolamento térmico e acústico (CASTRO, 2007).

Com relação as propriedades do concreto, a resistência do composto cresce com o aumento do módulo de finura do agregado, com o aumento da resistência do agregado e com o aumento da superfície de contato agregado/pasta (para uma mesma granulometria). A forma geométrica, a natureza do agregado e a sua composição granulométrica possuem grande influência na quantidade de água a ser adicionada ao concreto. Quanto maior a superfície específica do agregado, maior a quantidade de água necessária para uma determinada consistência do concreto, ou seja, o aumento no teor de agregado miúdo numa mistura de concreto aumenta o consumo de água de amassamento e de cimento, o que implica em maior plasticidade.

A forma do agregado gráúdo também possui influência sobre as propriedades do concreto: partículas mais arredondadas e lisas são responsáveis por misturas com maior

plasticidade e menor aderência, enquanto as partículas lamelares implicam em maior consumo de cimento, areia e água e menor resistência.

### 2.1.2.3 Água de amassamento

A água é um componente indispensável para o concreto tanto pela sua função química, que consiste em ativar as reações de hidratação, como física, estabelecendo determinadas características reológicas ao concreto, a fim de garantir a homogeneidade da mistura (CASTRO, 2007).

A água de amassamento pode conter certas impurezas sem inviabilizar sua utilização. Porém, quando em excesso, tais substâncias têm um efeito nocivo ao concreto, influenciando desfavoravelmente na resistência mecânica, no tempo de pega e na durabilidade (eflorescência e corrosão de armaduras) das argamassas e concretos (SILVA JÚNIOR, 2014). Assim, a água de amassamento deve respeitar os parâmetros recomendados pela NBR 15900-1:2009 (ABNT, 2009b).

### 2.1.2.4 Aditivos e adições

Adições minerais e aditivos químicos são adicionados durante o processo de mistura com a finalidade de melhorar ou conferir propriedades especiais ao concreto, seja no estado fresco ou no estado endurecido, tornando-se componentes indispensáveis na produção dos concretos modernos.

Os aditivos químicos plastificantes são produtos que possuem um efeito dispersante que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite uma redução de água de amassamento em torno de 5 a 10 %, conferindo uma maior consistência do material para uma mesma relação água/cimento (METHA; MONTEIRO, 2014). Segundo a NBR 11768:2011, os aditivos redutores de água de alta eficiência (superplastificantes) possuem um efeito dispersante sobre as partículas de cimento potencializado, o que permite uma elevada redução da água na mistura (redução mínima de 12%), reduzindo de três a quatro vezes a água de amassamento em uma determinada mistura de concreto comparado aos aditivos plastificantes (ABNT, 2011).

As adições minerais têm como finalidade melhorar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto. O seu emprego deve-se principalmente a fatores ambientais e econômicos, uma vez que geralmente resultam de resíduos e subprodutos industriais e,

quando incorporadas ao cimento, reduzem as emissões de gases poluidores, e o consumo de energia e de matérias-primas (CASTRO, 2007).

As adições minerais são materiais silicosos finamente moídos que são incorporadas ao concreto em adição ou em substituição ao cimento Portland em diferentes teores. Esse material interage química e/ou fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta de cimento hidratada e da zona de transição agregado/matriz, contribuindo para o desenvolvimento das propriedades do concreto (DAL MOLIN, 2011).

Conforme supracitado, as adições minerais podem produzir efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto. O efeito químico está associado à capacidade de reação com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formado durante a hidratação do cimento Portland, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas. Essa reação, chamada reação pozolânica, provoca redução da porosidade e aumento da resistência mecânica (DAL MOLIN, 2011). O efeito físico gerado pelas adições minerais no concreto está relacionado ao maior empacotamento de partículas (preenchimento dos vazios por partículas de menor dimensão), refinamento dos poros da estrutura (pontos de nucleação para produtos de hidratação) e à redução de água livre na zona na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, contribuindo para o aumento substancial da resistência mecânica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Normalmente, as adições minerais, de acordo com a sua ação físico-química, são classificadas em: material pozolânico, devido à necessidade de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio para produzir compostos com propriedades aglomerantes; material cimentante, pois possibilita a formação de produtos com propriedades aglomerantes sem a necessidade de consumir o hidróxido de cálcio; e fíler, que se trata de um material sem atividade química, contribuindo apenas pelo efeito físico (DAL MOLIN, 2011).

## 2.2 DOSAGEM DO CONCRETO

O concreto é um material de grande heterogeneidade e comportamento complexo, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, assim representando um desafio para os profissionais responsáveis por realizar sua dosagem. As primeiras técnicas de dosagem eram, em ampla maioria, empíricas e decorriam de conhecimentos tradicionais sobre proporcionamento de argamassas, tornando-se uma prática muitas vezes antieconômica (HELENE; TERZIAN, 1992).

As principais propriedades do concreto endurecido são definidas na fase de projeto pelo engenheiro estrutural, enquanto que as propriedades do concreto fresco são determinadas pelas técnicas de execução (transporte, lançamento e adensamento), bem como pelas características geométricas da estrutura a ser concretada.

No Brasil, não existe um texto consensual de determinação do estudo de dosagem. Essa ausência de regulamentação e normalização nacional específica para a dosagem do concreto torna possível a existência de vários métodos de dosagens com diferentes procedimentos e parâmetros. Tais métodos normalmente são desenvolvidos por institutos de pesquisas nacionais ou por adaptação de normas estrangeiras (RICCI; PEREIRA; AKASAKI, 2017).

O estudo de dosagem do concreto pode ser compreendido como os procedimentos necessários à obtenção do melhor proporcionamento entre os materiais constitutivos do concreto, tradicionalmente sendo o cimento, agregados miúdo e graúdo, água e, eventualmente, aditivos químicos e adições minerais (TUTIKIAN; HELENE, 2011). Tal combinação busca produzir uma mistura tecnicamente adequada (que atenda a certas especificações de projeto) e econômica, ou seja, fornecer uma mistura que consiga um bom equilíbrio entre as várias propriedades desejadas pelo menor custo possível (custo-benefício). A seguir são apresentados os principais métodos tradicionais de dosagem aplicados no Brasil.

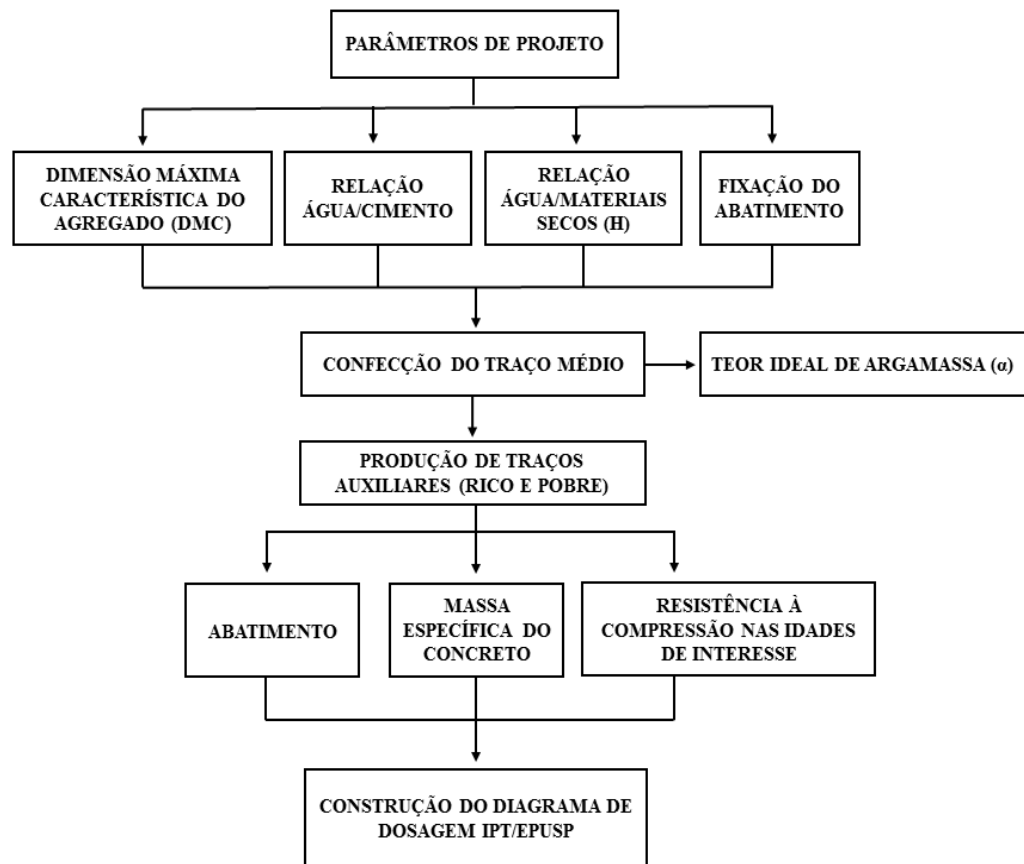
### **2.2.1 Método de dosagem IPT/EPUSP**

#### 2.2.1.1 Histórico do método

O método denominado IPT/EPUSP foi desenvolvido por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), possuindo grande aplicação em todo o país desde a década de 1970 (ALENCAR, 2008). Esse método considera como principal parâmetro do concreto a relação água/cimento, buscando a melhor proporção entre os agregados disponíveis com a finalidade de obter o menor consumo de água. As principais etapas do método de dosagem são apresentadas no fluxograma simplificado representado na Figura 3.



Figura 3 – Fluxograma simplificado do método de dosagem IPT/EPUSP.



Fonte: Autor (2019).

Os limites de aplicação do método de dosagem IPT/EPUSP, apresentados por Tutikian e Helene (2011) são:

- a) Resistência à compressão:  $5 \text{ MPa} \leq f_c \leq 150 \text{ MPa}$ ;
- b) Relação água/cimento (a/c):  $0,15 \leq a/c \leq 1,50$ ;
- c) Abatimento:  $0 \text{ mm} \leq \text{abatimento} \leq \text{autoadensável}$ ;
- d) Dimensão máxima do agregado:  $4,8 \text{ mm} \leq D_{\text{máx}} \leq 100 \text{ mm}$ ;
- e) Teor de argamassa seca:  $30\% \leq \alpha \leq 90\%$ ;
- f) Relação de água/materiais secos (H):  $5\% \leq H \leq 12\%$ ;
- g) Módulo de finura do agregado: qualquer;
- h) Distribuição granulométrica dos agregados: qualquer;
- i) Massa específica do concreto: maior que  $1500 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.2.1.2 Formulação e parâmetros fundamentais empregados no método

Dois parâmetros fundamentais para o início da experimentação são o teor de argamassa seca ( $\alpha$ ) e a relação de água/materiais secos (H), expostos respectivamente pelas Equações 1 e 2.

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

$$H = \frac{a/c}{1+m} \quad (2)$$

Onde:

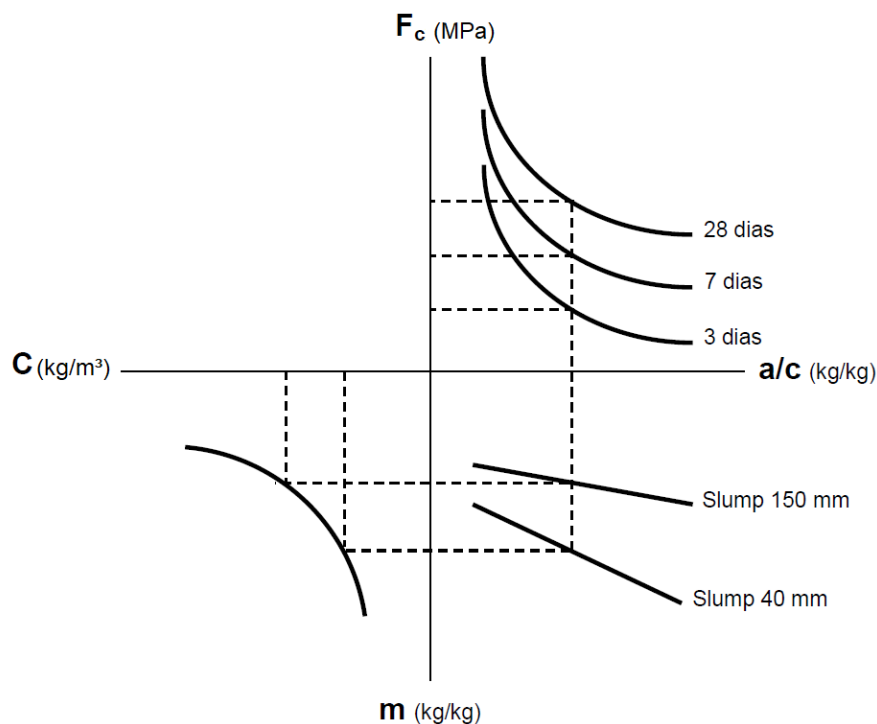
$a$  = relação agregado miúdo seco/cimento, em massa (kg/kg);

$m = a + p$  = relação agregados secos/cimento, em massa (kg/kg);

$p$  = relação agregado graúdo seco/cimento, em massa (kg/kg).

O método de dosagem IPT/EPUSP estabelece como resultado um diagrama de dosagem, dividido em quadrantes e composto por interações entre as diversas variáveis regidas pelas leis universais de comportamento do concreto: Lei de Abrams, Lei de Lyse e a Lei de Molinari, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama obtido a partir do método de dosagem tradicional IPT/EPUSP.



Fonte: Adaptado de Alencar (2008).

A Lei de Abrams (1918) relaciona a resistência média de dosagem à compressão ( $f_{cj}$ ) com a relação água/cimento ( $a/c$ ). Essa associação define que, dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência do concreto endurecido numa determinada idade varia na razão inversa da relação água/cimento, conforme a Equação 3.

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

Onde:

$k_1$  e  $k_2$  = constantes intrínsecas aos materiais empregados.

A Lei de Lyse (1932) estabelece que, fixados os materiais secos (cimento e agregados), a consistência do concreto fresco depende preponderantemente da quantidade de água por  $m^3$  de concreto, como expressa a Equação 4.

$$m = k_3 + k_4 \times a / c \quad (4)$$

Onde:

$k_3$  e  $k_4$  = constantes que dependem dos materiais utilizados.

A Lei de Molinari (1974) determina que o consumo de cimento necessário ( $C$ ) por  $m^3$  de concreto varia na proporção inversa da quantidade de agregados secos (Equação 5).

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

Onde:

$k_5$  e  $k_6$  = constantes determinadas pelos materiais em laboratório.

Segundo Helene e Terzian (1992), para iniciar o estudo de dosagem é necessário realizar um levantamento prévio da situação em que o concreto será submetido, a saber:

- a) Resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) apresentada no projeto;
- b) Determinação do espaçamento entre barras de aço;
- c) Escolha da dimensão máxima característica do agregado graúdo compatível com os espaços disponíveis entre armaduras e fôrmas;
- d) Definição dos elementos estruturais a serem concretados com este traço;
- e) Escolha da consistência do concreto em função do tipo do elemento estrutural e forma lançamento (para isso consultar a NBR 8953:2015);
- f) Definição da relação água/cimento ( $a/c$ ) para atender às condições de durabilidade (para isso, consultar a NBR 6118:2014 e/ou NBR 12655:2015);
- g) Considerar o uso de aditivo quando se necessitar de condições especiais;
- h) Estimativa de perda de argamassa do concreto no sistema de transporte e lançamento do concreto.

Geralmente a resistência à compressão simples é a propriedade mais relevante para os concretos convencionais. Contudo, os valores fornecidos pelo ensaio são mais ou menos dispersos e variáveis de uma obra para a outra, segundo o controle de qualidade de produção do concreto. Assim, surge o conceito de resistência média de dosagem, cujo valor considera não só a resistência característica como também a dispersão da série. De acordo com a NBR 12655:2015 (ABNT, 2015), a resistência média de dosagem ( $f_{cj}$ ) é determinada pela Equação 6, que considera a resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) especificada no projeto estrutural e o desvio-padrão de dosagem ( $S_d$ ). Essa equação relaciona a resistência potencial do concreto à compressão (obtida a partir das operações de ensaio e controle) e a resistência efetiva do concreto na estrutura, devendo ser asseguradas por meio do controle tecnológico dos serviços envolvidos.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (6)$$

O valor do desvio padrão é estabelecido de acordo com a condição de preparo do concreto, a qual deve ser mantida durante a obra. Sob hipótese alguma o valor do desvio-padrão pode ser menor que 2 MPa.

### 2.2.1.3 Estudo experimental

A fase experimental é desenvolvida visando a montagem de um diagrama de dosagem que correlaciona, esquematicamente, a resistência à compressão, a relação água/cimento, o teor de agregado total/cimento e o consumo de cimento/m<sup>3</sup> de concreto (Figura 4). Para tanto, são necessários no mínimo três pontos para montar o diagrama de dosagem, lembrando que qualquer modificação dos parâmetros selecionados inicialmente implica na necessidade de outro estudo de dosagem (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

#### *Determinação da composição granulométrica dos agregados*

Uma vez determinada a dimensão máxima característica do agregado, busca-se um agregado graúdo que seja econômico, disponível na região e apresente uma composição granulométrica que possibilite uma mistura com máxima massa unitária. No estudo de máxima massa unitária é definida a composição binária ideal entre os agregados com base no ensaio de massa unitária no estado compacto conforme a NBR 45:2006 (ABNT, 2006a). Para

a mistura de agregados miúdos são válidos os mesmos princípios aplicados para os agregados graúdos (BOGGIO, 2000).

#### *Determinação do teor de argamassa ideal no traço referência*

Esse método prevê um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, com base na busca do teor ideal de argamassa seca. Inicia-se o estudo de dosagem com a elaboração do traço referência médio (por exemplo, 1:5,00), determinando-se o teor ótimo de argamassa. Essa etapa é considerada a mais importante, visto que a falta de argamassa acarreta aumento da porosidade do concreto e falhas de concretagem. Por outro lado, o excesso de argamassa favorece a obtenção de concretos com boa aparência, porém aumenta seu custo por metro cúbico, além do maior risco de fissuração por origem térmica e por retração por secagem. Sendo assim, o teor de argamassa ideal deve ser o mínimo necessário para que não haja aumento da porosidade do concreto (RICCI; PEREIRA; AKASAKI, 2017).

Para produzir o traço referência em laboratório, deve-se variar o conteúdo de argamassa por meio de um processo iterativo, partindo de um valor baixo até encontrar o ponto ótimo por meio de observações visuais da mistura, manuseio do concreto com colher de pedreiro para verificar o aspecto de trabalhabilidade e acabamento, além da realização do ensaio de abatimento de tronco de cone para visualizar a coesão do concreto no estado fresco (ALENCAR, 2008).

Definido o teor de argamassa, executa-se uma nova mistura de concreto do traço referência (traço médio) para determinar alguns parâmetros, como a relação água/cimento necessária para a consistência desejada, o consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto, o consumo de água por m<sup>3</sup> de concreto e a massa específica do concreto fresco. Com esse concreto, moldam-se corpos de prova para posteriormente serem submetidos ao ensaio de compressão nas idades de interesse, para as quais serão construídas as curvas de resistência do diagrama de dosagem.

#### *Traços auxiliares*

Com os mesmos materiais constituintes e o mesmo teor de argamassa obtido no traço referência (traço médio), elaboram-se os traços auxiliares rico (por exemplo, 1:3,50) e pobre (por exemplo, 1:6,50), com base nas correções entre os traços feitas pelo método. Os dois

traços devem atender à mesma faixa de abatimento especificada para o traço médio. Para cada um dos traços produzidos, é novamente realizada a moldagem das amostras, as quais devem ser curadas adequadamente e, nas idades pré-estabelecidas, ter suas propriedades no estado endurecido determinadas. Com base nas leis comportamentais do concreto e com os dados obtidos no estudo experimental, deve-se construir as correlações existentes, dando origem ao diagrama de dosagem, composto pelas três curvas mencionadas anteriormente. A partir dele, obtém-se uma interação entre a resistência à compressão, o consumo de cimento, a consistência e a relação água/cimento (RICCI; PEREIRA; AKASAKI, 2017).

A quantidade mínima de três traços permite um ajuste das equações de correlação de dosagem, possibilitando a construção do diagrama de dosagem, no qual, por regressão linear, pode-se lograr qualquer resistência que se queira dentro do intervalo estudado para traços de uma mesma família.

## **2.2.2 Método de dosagem ABCP**

### 2.2.2.1 Histórico do método

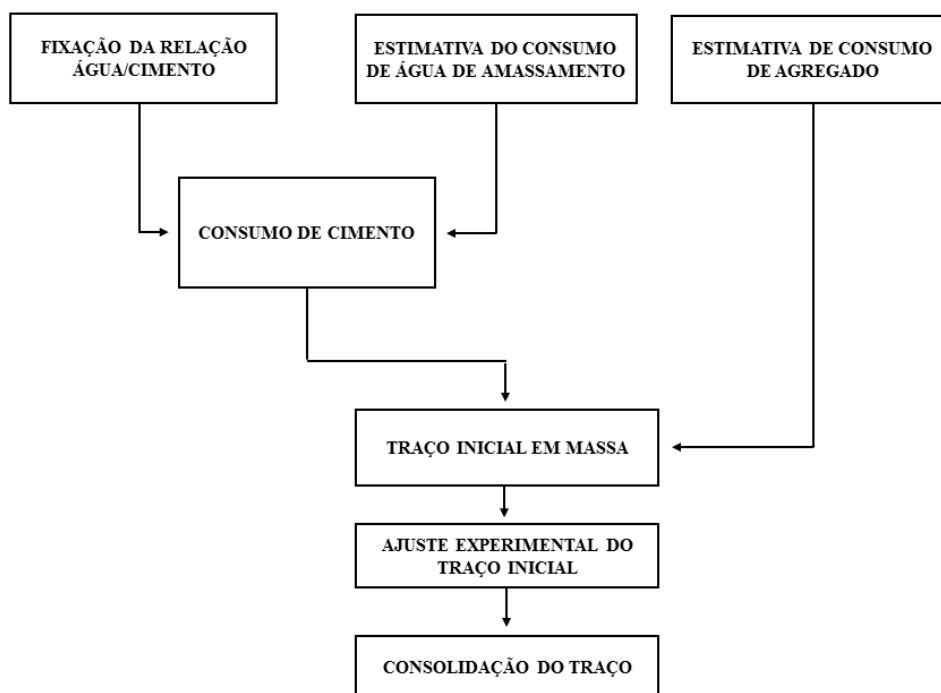
O método de dosagem da ABCP foi publicado em 1984 pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), por meio de um estudo técnico, sob o título “Parâmetros de Dosagem do Concreto”, da autoria do Engenheiro Públio Penna Firme Rodrigues (BOGGIO, 2000).

Este método é uma adaptação do método americano proposto pelo ACI 211.1-81 – *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Tal método de dosagem fundamenta-se em tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais, constituindo uma ferramenta para dosagem de concretos convencionais que permite a utilização dos agregados mais empregados em diferentes regiões do Brasil e que se enquadram nos limites propostos pela NBR 7211:2009 (ASSUNÇÃO, 2002). Esse método fornece uma aproximação das quantidades dos materiais constituintes, devendo-se, obrigatoriamente, ser executada uma mistura experimental para verificar se as propriedades desejadas foram atendidas (MALTA, 2012).

### 2.2.2.2 Descrição do método

O método de dosagem da ABCP aborda um conceito fundamental: para a obtenção de uma trabalhabilidade compatível com o menor volume de vazios possível, é necessário um proporcionamento entre os agregados graúdo e miúdo a fim de obter para a mistura o máximo do volume de agregado compactado seco por m<sup>3</sup> de concreto. O método abrange uma classe de resistência característica à compressão do concreto, aos 28 dias de idade, entre 15 MPa (C15) e 40 MPa (C40) e relações água/cimento de 0,39 a 0,79. As etapas do método são apresentadas no fluxograma simplificado representado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma simplificado do método de dosagem ABCP.



Fonte: Autor (2019).

A trabalhabilidade é controlada por diversos fatores, como os materiais constituintes, as condições de execução e adensamento, e as dimensões da peça estrutural. A consistência do concreto fresco para bons resultados do método deve ser de plástica a fluida. Esse procedimento de dosagem foi desenvolvido para misturas plásticas de maneira a fornecer baixo teor de areia, a fim de obter uma dosagem mais econômica. Caso haja necessidade de correção do traço, uma vez que a mistura esteja pouco argamassada, deve-se acrescentar mais areia à mistura, mantendo-se constante a relação água/cimento (BOGGIO, 2000).

Esse procedimento de dosagem pode ser apresentado numa sequência de etapas bem definidas, que incorporam um conjunto de tabelas, que facilitam a determinação dos parâmetros necessários para a obtenção do traço de partida. Entretanto, Tutikian e Helene (2011) afirmam que a desvantagem desse método é que os valores a partir dos quais é realizado o proporcionamento dos materiais são todos tabelados e essas tabelas não abrangem todos os tipos de materiais existentes.

Segundo Malta (2012), a aplicação do método exige definir as propriedades e caracterizar os materiais disponíveis para a mistura, determinando a dimensão máxima característica dos agregados, a massa unitária dos agregados graúdos, o módulo de finura do agregado miúdo e a massa específica real dos materiais (agregados miúdos e graúdos e o cimento). Além disso, define-se as características que o concreto deve adquirir nos estados fresco e endurecido.

O desenvolvimento do método, segundo Boggio (2000), Assunção (2002) e Malta (2012), obedece uma sequência de etapas que são apresentadas a seguir.

a) Fixação da relação água/cimento

A primeira etapa consiste na fixação de uma consistência adequada para o concreto fresco, a qual fica condicionada, no método, ao tipo de elemento estrutural a ser executado e aos procedimentos de lançamento empregados. Para tanto, é fixada uma relação água/cimento, tomando como referência os critérios de durabilidade (capacidade do concreto resistir a ações de deterioração com o tempo) e a resistência mecânica requerida pelo concreto nas idades de interesse. O valor da relação água/cimento pode ser estimada em função da curva de Abrams, construída em função do tipo de cimento e dos materiais a serem empregados. Portanto, uma baixa relação água/cimento associada a cimentos especiais permitem reduzir a porosidade e a permeabilidade da pasta e contribuem para a obtenção de melhores desempenhos, quanto à durabilidade.

b) Estimativa do consumo de água de amassamento em função da dimensão máxima do agregado e abatimento do concreto

A quantidade de água de amassamento necessária para que a mistura adquira uma consistência adequada, medida pelo abatimento do tronco de cone, depende basicamente da granulometria, da forma e textura dos grãos, mais especificamente, da área específica do agregado total da mistura.



### c) Estimativa do consumo de cimento

Feita a estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto e adotada a relação água/cimento, é realizada a estimativa do consumo de cimento, o qual depende diretamente do consumo de água e da relação água/cimento.

### d) Estimativa do consumo de agregados

Considerando o tipo, as dimensões das peças estruturais e em função da distância entre as barras da armadura, seleciona-se a dimensão máxima característica do agregado graúdo, compatível com as características dos materiais economicamente disponíveis. No caso de misturas que utilizem dois ou mais agregados graúdos, recomenda-se que adote um proporcionamento entre os agregados graúdos que permita o menor volume de vazios. Isso é obtido quando os agregados são compactados de tal forma que se obtenha a máxima massa unitária na condição compactada. A determinação do consumo de agregado miúdo é realizada aplicando o método do volume absoluto.

Por fim, é possível determinar as proporções de materiais para um m<sup>3</sup> de concreto, apresentando um traço unitário em massa de materiais secos. Uma vez determinado o traço teórico, procede-se à mistura experimental, que permite realizar os acertos necessários para obtenção de um concreto adequado aos requisitos de trabalhabilidade e desempenho exigidos.

Para a obtenção do traço final do concreto, sugere-se alguns cuidados e correções para o traço: na falta de argamassa, deve-se acrescentar areia, mantendo constante a relação água/cimento; no caso de excesso de argamassa, deve-se acrescentar agregado graúdo, mantendo constante a relação água/cimento; no caso da presença de agregados com alta absorção de água, deve-se fazer a correção do consumo de água levando em consideração a parcela absorvida pelo agregado.

## 2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Nos últimos anos, o interesse no estudo de empacotamento de partículas aumentou em diferentes áreas de engenharia. Este interesse pode ser explicado pelo fato de que uma grande parte dos materiais naturais ou industriais utilizados diariamente contêm partículas de diferentes formas e tamanhos (CASTRO; FERREIRA, 2016).

Em 1892, Féret publicou o primeiro tratado sobre o empacotamento de partículas em concreto, onde concluiu que a resistência à compressão máxima pode ser alcançada quando os vazios na mistura são mínimos, ou seja, uma seleção adequada dos agregados está intimamente associada à resistência à compressão e à porosidade do material no estado

endurecido, quando submetidos ao processo de cura úmida. A partir desse momento, diversos modelos de empacotamento têm sido sugeridos como ferramentas para calcular a densidade de empacotamento das partículas e, conseqüentemente, otimizar misturas granulares do concreto (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

A definição de empacotamento de partículas pode ser compreendida como o problema da adequada seleção da proporção e do tamanho de partículas, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores, e assim sucessivamente. O empacotamento denso de partículas é importante na obtenção de concretos, principalmente por melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido. Entretanto, empacotamento de baixa densidade é utilizado na produção de revestimentos isolantes térmicos, os quais apresentam alto índice de vazios e, conseqüentemente, uma porosidade associada (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A distribuição do tamanho de partículas do agregado no concreto tem grandes efeitos sobre o desempenho do mesmo na dosagem produzida. A fim de preencher todos os espaços entre as partículas do agregado, de modo a reduzir os vazios do concreto, o volume de pasta de cimento tem de ser maior do que o volume de lacunas dentro do esqueleto total. Uma mistura com apenas um tamanho de partículas (distribuição uniforme) geralmente leva a um maior consumo de pasta. Assim, a distribuição de tamanho de partículas influencia na densidade de empacotamento do agregado que, por sua vez, determinará o volume de vazios a serem preenchidos pela pasta (KWAN; NG; HUEN, 2014).

Com uma maior densidade de empacotamento, o volume de pasta necessário para preencher os vazios seria menor e o excesso de pasta (pasta em quantidade além do necessário para preencher os vazios do agregado) disponível para envolver as partículas de agregados seria maior, proporcionando uma maior trabalhabilidade (KWAN; NG; HUEN, 2014).

Isto permitiria que a relação água/cimento fosse reduzida para aumentar a resistência e a durabilidade do concreto, ou ainda que o volume de pasta de cimento seja reduzido para aumentar a estabilidade dimensional do concreto. Em suma, a densidade de empacotamento de todo o sistema de partículas deve ser um parâmetro fundamental que rege o desempenho do concreto (LI; KAWN, 2013).

### **2.3.1 Modelos de empacotamentos de partículas**

Desde o início do século XX, diversos pesquisadores estudaram o efeito da distribuição granulométrica dos agregados sobre o empacotamento de partículas, buscando

curvas granulométricas ideais por meio dos modelos de empacotamento para uso em concretos. Os pioneiros neste desafio foram Füller e Thompson, em 1907, que propuseram uma curva granulométrica de distribuição contínua (LONDERO *et al.*, 2017).

Na literatura, os estudos teóricos e experimentais relacionados ao empacotamento de partículas resultaram de duas abordagens básicas: uma discreta, que considera as partículas individualmente (modelo de Furnas); e outra contínua, proposta pelo estudioso Andreasen.

### 2.3.1.1 Modelo de Furnas

Furnas iniciou suas pesquisas com o empacotamento de partículas com distribuição discreta, posteriormente estendendo seu estudo para distribuições contínuas dos tamanhos de partículas. Em 1930, desenvolveu trabalhos voltados para o empacotamento de partículas com distribuição discreta. A hipótese inicial de Furnas era que a máxima densidade de empacotamento possível ocorreria quando apenas dois tamanhos de partículas estivessem presentes na mistura. Posteriormente, aperfeiçoou a sua teoria ao mostrar que os empacotamentos mais densos eram obtidos com três ou mais tamanhos de partículas discretas e que a densidade obtida era uma função dos tamanhos e quantidades de partículas presentes na mistura. Dessa forma, estendeu esta solução de multicomponentes de tamanho discreto para distribuições contínuas (FUNK; DINGER, 1994).

Furnas desenvolveu ferramentas para o cálculo do volume aparente de misturas binárias ou multicomponentes. Ele definiu que o empacotamento máximo de partículas ocorre quando as partículas finas preenchem completamente os espaços vazios entre partículas maiores.

Durante seus estudos, Furnas verificou que a máxima densidade de empacotamento obtida por diversas proporções de tamanhos de partículas partia de uma progressão geométrica. Dessa forma, difundiu-se a teoria para qualquer mistura polimodal, satisfazendo a Equação 7.

$$\text{CPFT} = \left( \frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \times 100 \quad (7)$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a  $D_p$ ,  $D_p$  é o diâmetro da partícula,  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula na distribuição,  $D_s$  é o diâmetro

da menor partícula na distribuição, e  $r$  é a razão entre os volumes de partículas em classes de tamanhos adjacentes.

### 2.3.1.2 Modelo de Andreasen

Em seu estudo, Andreasen defendeu que as distribuições contínuas são comumente encontradas na natureza. Assim, uma teoria para descrever o empacotamento de partículas em distribuições reais deveria basear-se em distribuições contínuas de partículas.

Segundo Oliveira *et al.* (2000), o empacotamento ótimo idealizado por Andreasen é aquele que, em torno de duas partículas específicas com dimensões bastante diferentes, há condições de similaridade. Tal similaridade deveria ser traduzida por uma lei de potência e, em alternativa ao modelo de Furnas, propôs a Equação 8:

$$\text{CPFT} = \left( \frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100 \quad (8)$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a  $D_p$ ,  $q$  é uma constante, designada por módulo de distribuição granulométrica,  $D_p$  é o diâmetro da partícula e  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula na distribuição. Andreasen, com base em seus procedimentos experimentais, chegou à conclusão de que, para se obter um empacotamento máximo, o módulo da distribuição granulométrica ( $q$ ) deveria estar compreendido entre 0,33 e 0,50 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A representação gráfica da Equação 7 em escala logarítmica é uma reta de inclinação  $q$ . Porém, verificou-se uma inconsistência nessa equação: não há um limite mínimo para o tamanho de partículas, de modo que se admite partículas infinitamente pequenas, o que não condiz com uma situação real. Entretanto, a representação gráfica em escala logarítmica se aproxima, mas nunca atinge, tamanho de partículas nulo ou CPFT igual a zero. Além disso, Andreasen sugeriu que um termo de correção fosse utilizado para ajustar o percentual de porosidade para a ausência dessas partículas infinitamente pequenas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Andreasen teve sua pesquisa criticada, sendo considerada desprovida de teoria porque necessitava de maior fundamentação matemática. A equação proposta por Andreasen não é empírica, mas é baseada na condição de similaridade (FUNK; DINGER, 1994).

### 2.3.1.3 Modelo de Alfred

Após uma extensa análise comparativa entre os modelos de Furnas e Andreasen, algumas considerações foram feitas, ficando comprovado que ambos os modelos convergiam matematicamente para uma mesma equação. No modelo generalizado de Furnas, a quantidade de partículas finas de diâmetros distintos adicionada para construir a distribuição forma uma progressão geométrica, enquanto que a distribuição idealizada por Andreasen gera uma reta linear quando representada graficamente em escala logarítmica, também indicando uma progressão geométrica. Normalmente conhecida como modelo de Alfred, esta equação (Equação 9) é um aperfeiçoamento dos modelos anteriores e mostra que, na realidade, os modelos de Furnas e de Andreasen podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar a mesma coisa (FUNK; DINGER, 1994).

$$\text{CPFT} = \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad (9)$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a  $D_p$ ,  $D_p$  é o diâmetro da partícula,  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula na distribuição,  $D_s$  é o diâmetro da menor partícula na distribuição, e  $q$  é uma constante, designada por módulo da distribuição granulométrica.

Nota-se que a Equação 9 introduz o conceito do tamanho mínimo da partícula finita à equação de Andreasen, além de apresentar uma revisão matemática da equação de distribuição do modelo de Furnas.

Por meio de simulações computacionais, foi verificado que o módulo de distribuição granulométrica ( $q$ ), ao assumir valores menores ou iguais a 0,37, pode favorecer o empacotamento máximo para distribuições infinitas, enquanto que para valores acima de 0,37 é sempre verificada uma porosidade residual. O efeito da redução do valor do coeficiente de distribuição se dá no aumento da quantidade de finos, que influencia a interação entre as partículas (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Existem diferenças significativas entre os modelos apresentados anteriormente. Estudos apontam que, pela comparação entre densidades obtidas experimentalmente, a sequência da eficiência de empacotamento resultante das diversas distribuições de máxima densidade estudadas é dada por ALFRED > ANDREASEN > FURNAS. Assim, o modelo de Furnas é o que gera resultados menos eficientes (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

### 2.3.2 Fatores que interferem no empacotamento de partículas

O estudo do empacotamento de partículas teve como propósito inicial determinar uma distribuição do tamanho de partículas que resultasse na maior densidade de empacotamento. Porém, com avanço nos estudos, observou-se que essa ideia não garante a eficiência máxima de empacotamento, pois outras propriedades além do tamanho de partículas influenciam no resultado. Tais propriedades são discutidas a seguir.

#### 2.3.2.1 Morfologia

As leis que determinam o empacotamento de partículas foram aplicadas para partículas de forma esférica. O empacotamento aleatório de monodispersões resulta sempre em um mesmo fator de empacotamento. Porém, a forma das partículas granulares que compõem as misturas de concreto está distante de uma esfera e, convencionalmente na tecnologia do concreto, deve-se admitir que a busca por uma distribuição granulométrica ótima dessas partículas para incorporação desse fator é muito pouco aplicada. Sabe-se, no entanto, que um dos fatores que pode alterar a condição de empacotamento de partículas é a sua morfologia.

Segundo Silva, Segadães e Devezas (2004), à medida que o formato das partículas se distancia de uma esfera, a eficiência de empacotamento é reduzida. Esse fenômeno ocorre devido à fricção interparticular que surge pelo contato das partículas irregulares. À medida que a concentração de partículas irregulares aumenta, a estrutura de empacotamento é destruída e ocorre a diminuição da densidade, resultando em maior índice de vazios e, conseqüentemente, em maior porosidade. Embora se conheça a importância da forma das partículas, a consideração desse princípio é difícil de ser implementada, não estando presente na fundamentação matemática dos modelos de empacotamento.

Os materiais incorporados a uma mistura de concreto podem ser classificados em três categorias morfológicas de acordo com sua forma: esférica, lamelar e irregular. Além dos aspectos relacionados ao empacotamento de partículas, o formato dos agregados está intimamente relacionado ao consumo de água de amassamento. Partículas esféricas propiciam um menor consumo de água em função da menor área específica, aferindo uma maior trabalhabilidade para um mesmo consumo de água. Já os agregados mais angulosos promovem menor fluidez, exigindo uma maior demanda de água de amassamento para manter a fluidez da mistura (REBMANN, 2016).

### 2.3.2.2 Porosidade

Em um concreto de cimento Portland, existem poros no interior dos agregados, na zona de transição pasta/agregado e na pasta de cimento hidratada. É por meio desses vazios conectados que os agentes agressivos se movem através da pasta de cimento endurecida. Assim, a porosidade funciona como uma ponte que liga a distribuição granulométrica e as propriedades do material (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

A porosidade interna das partículas é um fator que afeta a densidade do material. As partículas podem ser totalmente densas, com porosidade interna fechada ou aberta. Para adquirir uma máxima densidade de empacotamento para uma dada distribuição granulométrica, faz-se necessário utilizar partículas densas e não porosas. Porém, esse tipo de partículas é raramente encontrado na prática. Para efeitos de distribuição granulométrica, partículas com porosidade fechada são semelhantes às densas, resultando em misturas com densidade superior. Com relação às partículas com porosidade aberta, por possuírem formato irregular, apresentam maior capacidade de absorção de fases líquidas associada aos poros. Dessa maneira, demandam maior proporção de líquidos nas misturas, acarretando maior porosidade e, conseqüentemente, menor densidade de empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A dosagem de uma mistura depende da densidade de empacotamento: a menor porosidade é coincidente com a máxima densidade de empacotamento, onde o grau de hidratação é geralmente menor. Empacotamentos com menor porosidade podem ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos por partículas menores que os vazios existentes.

As partículas de materiais cimentícios geralmente possuem grande proporção de suas partículas com formato de uma esfera. Porém, com o início das reações de hidratação, ocorre a variação do formato das partículas para uma forma irregular. Assim, as primeiras horas da hidratação de suspensões à base de cimento são caracterizadas por variações no diâmetro efetivo e na distribuição granulométrica das partículas. Dessa forma, dois aspectos devem ser considerados simultaneamente e seus efeitos completos devem ser observados: quando o grau de hidratação é pequeno (primeiras idades), a influência da densidade de empacotamento é preponderante, enquanto o efeito do grau de hidratação é secundário. Quando o grau de hidratação é maior (idades mais avançadas), tanto a densidade de empacotamento quanto o grau de hidratação influenciam a porosidade simultaneamente: o sistema não possui apenas

uma maior densidade de empacotamento, mas também um maior grau de hidratação, resultando em uma menor porosidade (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

#### 2.3.2.3 Efeito parede

O efeito parede ocorre quando se tem uma mistura com diâmetros de partículas de duas classes tão diferentes que a relação entre os diâmetros efetivos das partículas é tal que a superfície de contato do grão mais grosso (maior) pode ser considerada como um plano ao contato com as partículas finas, fazendo com que a região próxima à superfície das partículas maiores apresente uma porosidade maior que no restante do volume (LONDERO *et al.*, 2017).

Para que se atinja um empacotamento ótimo, devem ser garantidas razões entre tamanhos de partículas na ordem de 100:1 para eliminar o volume de vazios extra devido ao efeito de parede. No entanto, na prática, procura-se trabalhar com razões de tamanhos entre 20:1 e 10:1 (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004).

#### 2.3.2.4 Técnica de compactação

Além dos fatores relacionados às características do sistema de partículas, como sua distribuição granulométrica, morfologia e porosidade, é necessário considerar a técnica de compactação das partículas, ou seja, como essas partículas são inseridas em suas devidas posições.

A influência da técnica de compactação é significativa, exercendo efeitos distintos dependendo da granulometria utilizada. Quando uma mistura é submetida à ação de forças de capilaridade, as partículas têm a facilidade para sedimentar sobre a superfície inferior do molde. À medida que as partículas maiores vão sedimentando, forma-se uma estrutura de poros grandes dentro da qual as partículas menores podem percolar sob ação dessa força de sucção. Se a proporção de partículas finas não for suficiente para preencher os vazios gerados pelas partículas maiores, ocorrerá o empacotamento em camadas distintas. Porém, se a distribuição possuir um maior teor de finos, esses preenchem os vazios entre as partículas de maior diâmetro, levando a uma estrutura homogênea. Dessa forma, observa-se que para obter um concreto com porosidade mínima é necessário verificar se a distribuição planejada é adequada à técnica de compactação utilizada (OLIVEIRA *et al.*, 2000).



Em se tratando de concretos, a técnica de compactação comumente utilizada é a aplicação de vibração (adensamento mecânico). Assim, deve-se tomar precauções para que a mistura não seja vibrada por período ou frequência inadequados, o que pode provocar desde baixas densidades de empacotamento (devido à falta de energia de compactação) até segregação por excesso de energia aplicada, comprometendo o desempenho do material (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

#### 2.3.2.5 Estado de dispersão das partículas

O estado de dispersão de partículas deve ser considerado quando se busca o empacotamento máximo. Partículas muito finas podem causar uma dificuldade adicional na obtenção de altas densidades de empacotamento por possuir uma maior tendência à aglomeração, prejudicando a tendência à maior densidade de empacotamento. Esse fenômeno surge em virtude do aumento das forças coesivas interparticulares (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

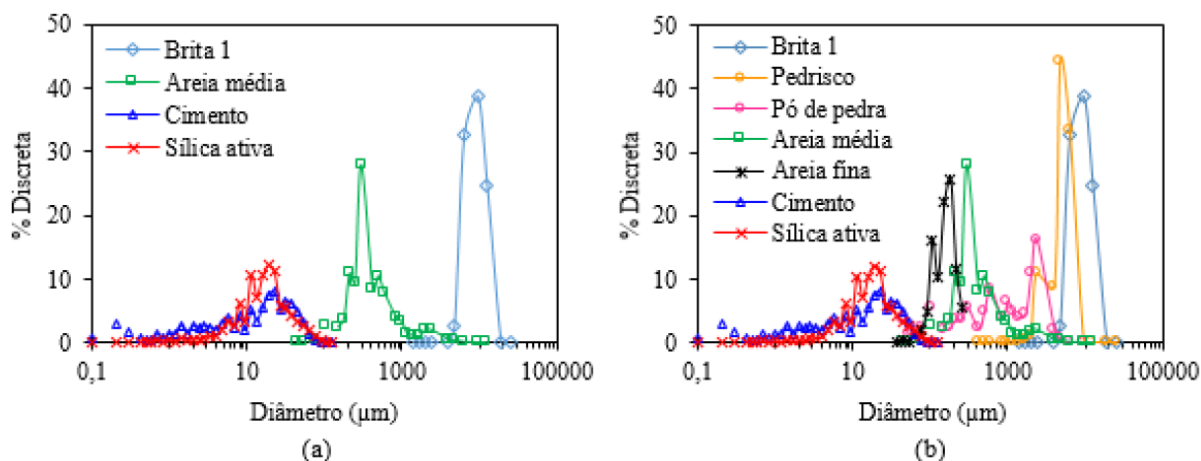
Segundo Castro e Ferreira (2016), uma dispersão de partículas inadequada (formação de aglomerados) pode alterar a curva de distribuição de tamanho de partículas originalmente fornecida, aumentando o diâmetro mínimo efetivo da composição e reduzindo, assim, a densidade de empacotamento. Além disso, os aglomerados formados são equivalentes a partículas vazias que originam poros na microestrutura, prejudicando o desempenho mecânico do material. A porosidade interna dos aglomerados é evidenciada pela quantidade maior de água necessária para mistura dos concretos cujas partículas finas não foram adequadamente dispersas.

Em geral, o teor de finos tem dois efeitos opostos. Primeiro, os finos preenchem os vazios entre partículas maiores para aumentar a densidade de empacotamento do agregado miúdo. Em segundo lugar, a elevada finura das partículas aumenta a área superficial do agregado miúdo. Embora o aumento da densidade de empacotamento para o mesmo volume de pasta aumente o volume de excesso de pasta para envolver os agregados maiores, o aumento da área superficial diminuiria a espessura da película de pasta em torno do agregado graúdo. Idealmente, o teor de finos deve ser tal que a densidade de empacotamento seja aumentada para um valor próximo do máximo, mas que a área superficial não seja aumentada excessivamente (KWAN; NG; HUEN, 2014).

### 2.3.4 Estudos pertinentes

No Brasil, Oliveira *et al.* (2018) realizaram um estudo de dosagem do CAD, aplicando o conceito de empacotamento de partículas com o propósito de se obter maior densidade de empacotamento, determinando a proporção ótima dos componentes particulados a partir do modelo de Alfred. Com a distribuição granulométrica discreta dos materiais utilizados no concreto de referência (Figura 6a), foi possível verificar a ausência de determinados tamanhos de partículas. Por esta razão, outros materiais disponíveis foram selecionados para a produção da nova composição de CAD a fim de melhorar o empacotamento das partículas (Figura 6b).

Figura 6 – Distribuição granulométrica discreta dos materiais: (a) CAD referência e (b) CAD empacotamento.



Fonte: Oliveira *et al.* (2018).

Com isso, avaliou-se a influência do empacotamento de partículas no desempenho mecânico do concreto e nas propriedades reológicas da pasta de cimento e argamassa constituintes do CAD. A mistura otimizada com base no conceito de empacotamento de partículas apresentou, nas primeiras idades, resistências à compressão inferiores que a mistura de referência. Porém, aos 28 dias, mostrou resistência à compressão superior ao CAD de referência. Este resultado pode ser associado à presença de uma melhor distribuição granulométrica que reduz a porosidade do concreto e aumenta seu desempenho mecânico.

Castro e Ferreira (2016) avaliaram o efeito do empacotamento de partículas na durabilidade de concretos de alto desempenho. A avaliação desse parâmetro foi realizada pela análise dos índices físicos. As propriedades do concreto otimizado com base neste conceito

são comparadas ao concreto de alto desempenho produzido a partir da metodologia tradicional de dosagem, indicando propriedades superiores em termos de durabilidade.

Sabendo da dificuldade de aplicar agregado reciclado em concretos, devido à maior absorção de água por esse material, acompanhada de menor trabalhabilidade e aumento do consumo de cimento para garantir um mesmo desempenho mecânico, Hermann (2016) aplicou a técnica de empacotamento de partículas em agregados reciclados de concreto. O intuito foi de avaliar a efetividade dessa ferramenta em traços de concreto utilizados para pavimentação. Para isso, foram utilizados dois modelos de empacotamento: de Alfred e De Larrard. Com relação à resistência à compressão aos 28 dias e à absorção de água, o modelo de empacotamento de Alfred mostrou-se mais vantajoso, além de possibilitar um maior desempenho mecânico com o mesmo consumo de cimento dos traços de referência.

Estudos relacionados à otimização de concretos que utilizam agregados reciclados, aplicando métodos de empacotamento, são uma maneira promissora de melhorar o desempenho e as propriedades desses compósitos. Os autores Pradhan, Kumar e Barai (2017) e Sunayana e Barai (2017) realizaram estudos comparativos na incorporação e/ou substituição de agregados naturais por agregados reciclados em misturas de concretos, observando a influência do empacotamento de partículas nas propriedades do concreto fresco e endurecido.

De um modo geral, como resultado desses estudos, pode-se verificar que o empacotamento de partículas influencia positivamente nas características do concreto. Propriedades como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade obtiveram valores muito próximos aos da amostra de referência, evidenciando a eficácia do método. Além disso, a utilização dos agregados reciclados na mistura de concreto, empregando o empacotamento de partículas, resultou em um consumo menor de cimento, sem perda relevante das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

O comportamento do concreto convencional associado aos métodos de empacotamento de partículas foi avaliado por Lima *et al.* (2016). Nesse estudo, foi verificada a influência do método de empacotamento do agregado miúdo no concreto convencional, a partir da comparação das propriedades nos estados fresco e endurecido de um concreto de referência. As propriedades avaliadas foram: consistência (avaliada no ensaio de abatimento em tronco de cone), massa específica aparente, resistência à compressão e resistência à tração.

Em sua pesquisa Lima *et al.* (2016) mantiveram constante a relação água/cimento em ambos os traços e verificaram que, no traço de concreto em que o conceito de empacotamento de partículas foi aplicado, obteve-se um abatimento 20% menor, devido a fluidez do concreto ser reduzida com o aumento do teor de partículas finas, sendo ainda verificado um aumento

da massa específica da mistura. A quantidade de ar aprisionado reduziu significativamente, indicando uma redução da porosidade. Em relação à resistência mecânica do concreto, não houve variações relevantes. Entretanto, os resultados obtidos apontam uma alternativa promissora para o aprimoramento de tais propriedades.

Londero *et al.* 2017 e Hermann *et al.* 2016 utilizaram o modelo analítico de empacotamento CPM (*compressible packing model*) buscando a otimização de misturas. No primeiro trabalho, buscou-se determinar a máxima densidade de empacotamento combinando agregados miúdos aplicando curvas de granulometria ideal. Com tais combinações aleatórias, observou-se um aumento de 5% na fração da areia grossa. No segundo, a otimização de misturas terciárias e quaternárias almejou a máxima densidade de empacotamento das composições, possibilitando um aumento na proporção de sílica de 18 a 20 %, reduzindo assim o consumo de cimento. Resultado semelhante foi observado por Londero (2016), com redução significativa do consumo de cimento, porém com grande aumento nas proporções de adições minerais.

Lenz (2016) avaliou a influência do empacotamento de partículas para agregados miúdo e graúdo no módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos convencionais. Para concretos com a mesma resistência à compressão, embora a técnica de empacotamento de partículas tenha permitido a redução do consumo de cimento, foi indicado um incremento de 6,6 a 10,5% no valor do módulo de elasticidade.

## 2.4 SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO

O concreto é um material empregado desde a antiguidade, sendo considerado atualmente um dos materiais mais consumidos no mundo. Esse sucesso provém da facilidade de preparo, grande disponibilidade e baixo custo das matérias-primas utilizadas na produção, facilidade de aplicação, liberdade de formatos dos elementos produzidos e a obtenção de um material capaz de suportar cargas com boa resistência e durabilidade (REBMANN, 2016). Do ponto de vista dos recursos naturais, da ecologia e da economia, é praticamente impossível imaginar a substituição do concreto por outros materiais estruturais quando se avalia o consumo de energia e emissão de dióxido de carbono por volume de material.

Entretanto, a escala em que é consumido, o concreto torna-se um dos principais atores no cenário de impactos ambientais. No Brasil, a produção de concreto por centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos, aumentando surpreendentemente a cada ano com o desenvolvimento urbano das cidades (LIMA *et al.*, 2014).

Muito dessa problemática deve-se ao cimento Portland, produzido normalmente pela mistura de calcário, argila e eventuais adições em um forno rotativo a uma temperatura de cerca de 1400° C. Segundo Sharp, Gartner e Macphee (2010), estima-se que, na produção do cimento Portland, para cada tonelada de clínquer moído é emitido cerca de 0,8 tonelada de dióxido de carbono, sendo essa atividade responsável por 5-8% das emissões CO<sub>2</sub> produzidas pelo homem, contribuindo em grande parte para o aumento do efeito estufa e deixando de ser considerada uma atividade sustentável. A produção mundial de cimento duplicou de 2005 para 2015, e atualmente supera 4,6 bilhões de toneladas anuais, com expectativa de atingir 6 bilhões nas próximas décadas (CEMBUREAU, 2015).

A emissão de dióxido de carbono oriunda da indústria do cimento é inerente ao processo de produção e ocorre, com maior evidência, durante o processo de descarbonatação do calcário, sendo proveniente de duas fontes nessa etapa: calcinação da rocha calcária (decomposição química da rocha) e a queima de combustíveis fósseis no forno de clínquer, representando, respectivamente, por 50% e 40% das emissões. Os 10% remanescentes são referentes às ações ligadas ao transporte da matéria prima e ao uso de eletricidade (DAMINELI, 2013).

As normas brasileiras relacionadas às estruturas de concreto em geral são bastante conservadoras privilegiando aumento do consumo de concreto e, conseqüentemente, do consumo de cimento. Tendo em vista toda essa problemática do cimento Metha (2008) sugeriu três condutas a serem implementadas na direção da sustentabilidade: redução do consumo de concreto nas estruturas, redução do consumo de cimento no concreto e redução do teor de clínquer no cimento.

O setor cimentício vem adotando medidas para melhorar o desempenho de seus processos produtivos em relação à emissão de gases de efeito estufa. As iniciativas da indústria brasileira e mundial para mitigação desses gases são o aumento da eficiência energética no processo de produção do cimento por meio do coprocessamento de resíduos e utilização de fornos para produção via seca, o uso de combustíveis alternativos (resíduos industriais) ou fontes renováveis (biomassa), e o uso de cimento com adições minerais, ou seja, substituição parcial do clínquer por adições minerais. Essas medidas possibilitam a conservação e racionalização de recursos minerais e energéticos, ao mesmo tempo em que minimiza o descarte de resíduos no ambiente (BATTAGIN, 2011).

De acordo com Rebmann (2016), além da problemática da crescente emissão de dióxido de carbono na produção do cimento, o consumo progressivo desse material apresenta outros desafios: a redução da longevidade das atuais jazidas de matérias-primas e a

necessidade de licenciamento de novas fontes; necessidade de novas instalações industriais; maiores consumos de energia, demandando investimento na geração; maiores custos de distribuição e impactos na logística de transporte.

Entretanto, não é possível a substituição de forma imediata do concreto por um outro material estrutural, tampouco reduzir o ritmo de construção necessário para atender às demandas sociais. Segundo Flatt, Roussel e Cheeseman (2012), são necessárias estratégias no próprio concreto, fazendo uso otimizado dos materiais para reduzir o teor de cimento sem comprometer as propriedades no estado fresco e endurecido. Nesse cenário, vislumbra-se uma redução do impacto ambiental por meio da redução do consumo de cimento, o constituinte responsável pela maior parcela de impacto ambiental.

Dentre essas estratégias destacam-se a substituição de parte do cimento por adições minerais e/ou finos inertes (fíler) e, assim, o desenvolvimento de ligantes com maior ecoeficiência, a dispersão de partículas empregando aditivos químicos (superplastificantes), aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização das misturas, e a especificação de materiais mais duráveis para o projeto de novas estruturas. Presumisse que o concreto do futuro esteja baseado não apenas em uma única solução, mas sim na combinação adequada de diversas técnicas e tais concretos passarão a ser mais sensíveis a variações na proporção e propriedades dos seus componentes.

## 2.5 ÍNDICE DE INTENSIDADE DE LIGANTES

A otimização do uso de ligantes constituintes do concreto é muito importante, visto que as frações ligantes possuem um efeito ambiental negativo e oferta globalmente limitada. Desse modo, efetuam-se estratégias a fim de melhor utilizar esses recursos limitados. Damineli (2013) afirma que estratégias convencionais utilizadas para mitigação do impacto ambiental gerado por esse material não serão suficientes e que a otimização do uso de ligantes em concretos é estratégia primordial para auxiliar o aumento da sustentabilidade desta cadeia.

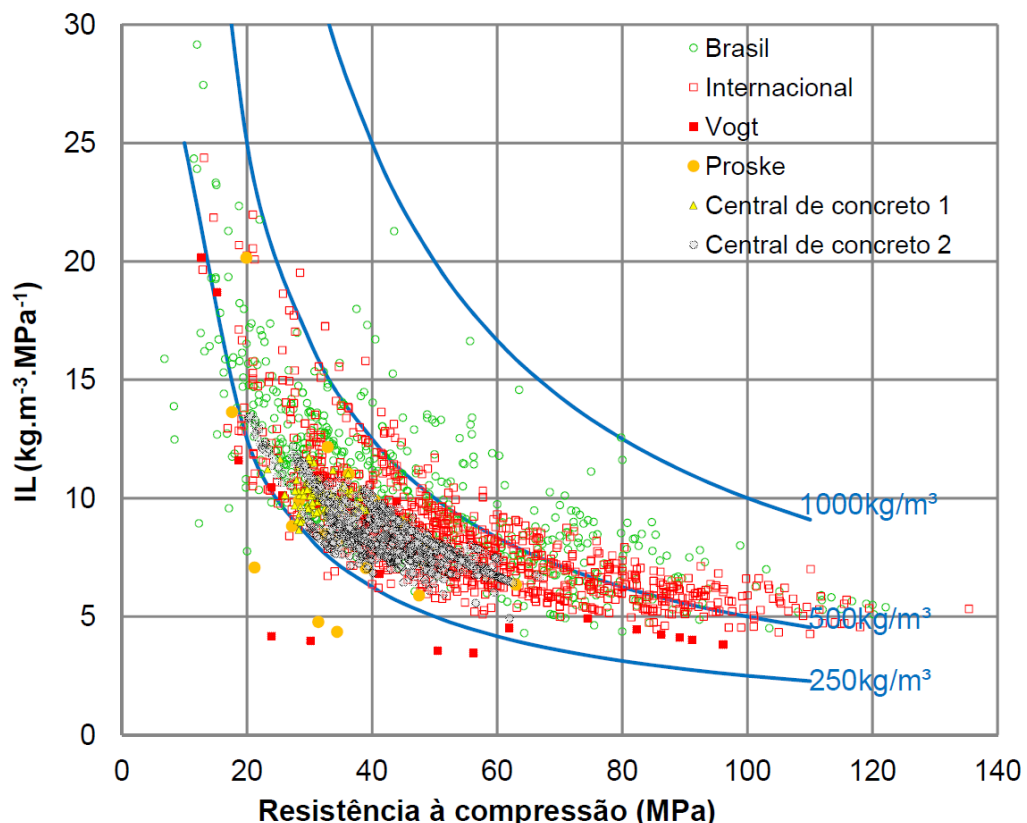
Um indicador que permite medir a eficiência do consumo de ligantes é o índice de intensidade de ligante ( $I_L$ ), definido como a quantidade de ligante por metro cúbico de concreto (C) necessária para fornecer 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias ( $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) (DAMINELI *et al*, 2010). Este indicador utiliza os parâmetros convencionais de dosagem, sendo seu cálculo rápido e fácil, facilitando a sua difusão no mercado. O índice de intensidade de ligante ( $I_L$ ) viabiliza uma comparação rápida e objetiva entre diferentes concretos, isto é: quanto maior o  $I_L$ , maior é a quantidade de ligantes necessária para o mesmo

desempenho mecânico, portanto, menos sustentável e eficiente é o concreto. O índice de intensidade de ligante pode ser calculado considerando-se a massa de cimento e eventuais pozolanas empregadas na mistura. Tal parâmetro é exposto na Equação 11.

$$I_L = \frac{C}{R_c} \quad (11)$$

Onde  $R_c$  pode assumir duas definições que influenciam o que o  $I_L$  determina: quando  $R_c$  é tomada como a resistência à compressão axial média,  $I_L$  mede a eficiência da formulação e a qualidade dos materiais; ao assumir  $R_c$  como o valor referente ao  $f_{ck}$ ,  $I_L$  mede simultaneamente a eficiência do produto e a variabilidade do processo (JOHN, 2011). Assim, esse parâmetro é bastante utilizado por empresas que produzem concreto usinado para avaliar a eficiência do seu produto. O  $I_L$  incorpora diversos fatores presentes na produção do concreto, como projeto granulométrico e a reatividade dos ligantes. Em seu trabalho Daminieli (2013) apresenta um gráfico de Intensidade de Ligantes calculada para os dados brasileiros e internacionais, conforme visto na Figura 7.

Figura 7 – Intensidade de ligantes *versus* resistência à compressão aos 28 dias para dados internacionais, brasileiros, de literatura e de mercado.



Fonte: Daminieli (2013).

Os dados acima não apresentam diferença significativa entre os dados brasileiros e os internacionais. O  $I_L$  mínimo observado encontra-se por volta dos  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , o que ocorre em concretos com resistência acima de 50 MPa, sendo que para concretos com valores de resistência inferiores esse índice aumenta. Segundo Daminieli (2013) valores abaixo de  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  são raros tanto na literatura brasileira quanto na internacional e estão ligados à melhoria do empacotamento de agregados, combinações baixas de relação a/c, e com altas taxas de substituição de clínquer por adições minerais. Concretos de altas resistências tendem a ser mais eficientes em termos de  $I_L$ , conforme dados da literatura encontrados em Habert e Rousel (2009), Daminieli (2013) e Rebmann (2016).

Para que não haja impacto negativo no desempenho mecânico e na durabilidade do concreto, a redução do volume de ligantes deve ser acompanhada por redução da água de amassamento. A redução no volume de pasta pode ser compensada utilizando o conceito de empacotamento de partículas, adicionando partículas granulares cada vez menores na mistura até que se tenha o empacotamento ideal do sistema. Nesse sentido, o emprego de aditivos químicos redutores de água (plastificantes e superplastificantes) é essencial para atender os limites reológicos para aplicação do concreto.

## 2.6 MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não destrutivos (ENDs) possuem diversas aplicações na construção civil, desde uma simples caracterização, até o controle de qualidade de elementos estruturais de concreto, por meio da identificação de variações estruturais ou falhas. A crescente utilização desses métodos dá-se, principalmente, por permitirem a análise dos parâmetros sem danificar a integridade da amostra em estudo, não comprometendo a funcionalidade futura (SANTOS, 2014). Além disso, tem-se a possibilidade de relacionar propriedades do concreto com outros parâmetros como: frequência de ressonância, propagação de ondas ultrassônicas, emissão de ondas eletromagnéticas e acústicas, dispersão de nêutrons e radiografia.

Segundo o ACI 228:2R:98, os ensaios não destrutivos são técnicas aplicadas para determinar as propriedades do concreto endurecido e para avaliar as condições de obras de estruturas de concreto (ACI, 1998). Tais métodos mostram-se eficientes na caracterização e avaliação da performance de obras estruturais de concreto em serviço, por tratar-se de uma opção prática e de baixo custo que não ocasiona danos significativos que venham a comprometer o desempenho dos elementos estruturais. Há diversos tipos de ENDs que podem ser aplicados às estruturas de concreto, tais como: Inspeção Visual, Métodos de Dureza



Superficial (esclerometria), Técnicas de Resistência à Penetração, Ensaio de Arrancamento, Ensaio *Break-off*, Método de Maturidade, Eco-impacto e Eco-pulso, Métodos Eletromagnéticos, Termografia Infra-vermelho, Ressonância Acústica e Método de Velocidade de Pulso Ultrassônico (GODIM, 2015).

### **2.6.1 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)**

O ensaio de VPU consiste em excitar a estrutura por meio de pulsos de ondas ultrassônicas, obtendo o tempo e a velocidade de propagação destes pulsos ao percorrerem uma distância conhecida, sem ocasionar dano significativo no elemento testado. Segundo o ACI 228:2R:98, a velocidade de propagação da onda permite, por meio de correlações, determinar de forma indireta as propriedades mecânicas do elemento, além de sua densidade e geometria (ACI, 1998). Tal método é aplicado na avaliação da durabilidade de estruturas, permitindo monitorar o grau de deterioração da peça do concreto.

Este é um dos métodos utilizado no presente trabalho para avaliar os efeitos da aplicação do conceito de empacotamento de partículas sobre a otimização dos traços de concreto convencional e de alta resistência. Com as velocidades medidas, é possível determinar propriedades do concreto, como o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E), o módulo de elasticidade transversal dinâmico (G) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Pode-se também detectar danos no interior da estrutura e estimar a sua resistência à compressão. Estas são as aplicações mais comuns deste método, entretanto, uma aplicação bastante interessante que ainda é pouco explorada na literatura é a avaliação do nível de tensão a qual um material está submetido (SCHIAVON, 2015).

#### **2.6.1.1 Teoria da propagação de ondas**

As ondas sonoras se caracterizam por serem ondas mecânicas, ou seja, que necessitam de um meio material para se propagar. Ao se perturbar a superfície de um meio, seja de forma dinâmica ou por carga de vibração, o sentido de oscilação das partículas em relação à direção de propagação da onda proporciona diferentes modos de propagação da onda no material. No ensaio que permite aferir a velocidade do pulso ultrassônico podem ser utilizados três modos de propagação da onda no material: ondas longitudinais, ondas transversais e ondas de Rayleigh.

As ondas longitudinais, também denominadas de ondas de compressão ou primárias (P), se propagam na mesma direção do movimento das partículas. Esse tipo de onda permite uma rápida propagação por meios sólidos, líquidos e gasosos. As ondas transversais, também conhecidas como ondas de cisalhamento ou secundárias (S), se propagam perpendicularmente à direção do movimento das partículas. Esse tipo de onda permite uma propagação apenas em meio sólido, de forma mais lenta que a onda longitudinal e mais rápida que a onda de superfície. As ondas de Rayleigh, também chamada de onda de superfície, por propagarem na superfície do elemento, são resultado da combinação de ondas primárias e secundárias. Esse tipo de onda é caracterizado pelo movimento elíptico gerado pelas partículas.

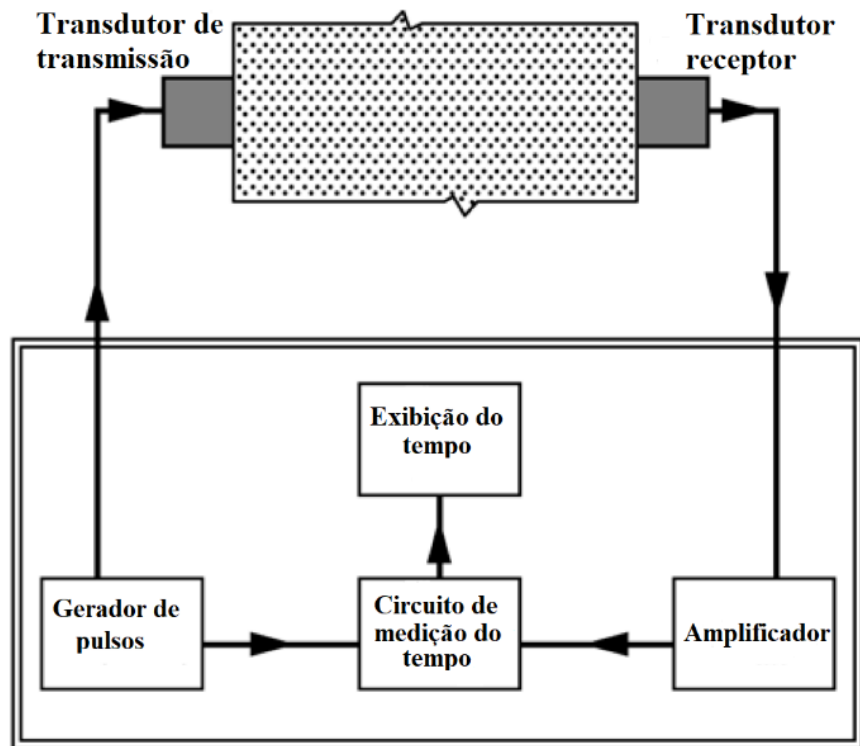
Na técnica de ensaio de VPU, um pulso de onda ultrassônica é criado em um ponto da superfície do elemento, sendo medido o tempo de propagação desse ponto até o outro ponto de leitura do equipamento. Como a distância entre os dois pontos é conhecida, a velocidade de propagação ( $V$ ) é determinada. Esse parâmetro é definido em termos da frequência ( $f$ ) e comprimento de onda ( $\lambda$ ), conforme é visto na equação 10. Além disso, considerando um mesmo meio, ao se reduzir o comprimento de onda tem-se o aumento imediato da frequência de propagação, ou seja, são grandezas inversamente proporcionais.

$$v = \lambda \cdot f \quad (10)$$

#### 2.6.1.2 Equipamentos utilizados

A instrumentação para execução do ensaio de VPU é bastante simples. De acordo com ASTM C 597:16 (ASTM, 2016) é necessário um aparelho de ultrassom, um par de transdutores (emissor e receptor), cabos coaxiais e um agente acoplante. O aparelho de ultrassom é constituído por um circuito gerador-receptor, aparelho de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica (com alta estabilidade e precisão de leitura de  $0,1 \mu s$ ), um circuito para medição do tempo, um amplificador e uma tela para exibir o resultado. O esquema do ensaio é exibido na Figura 8.

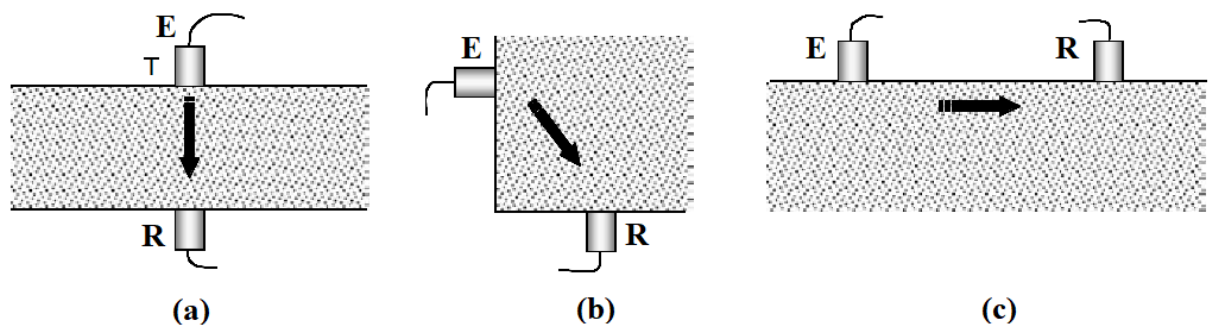
Figura 8 – Esquema de ensaio de velocidade de pulso ultrassônica.



Fonte: Adaptado da ASTM C 597:16 (ASTM, 2016).

O instrumento é composto por dois transdutores responsáveis por transmitir e receber o pulso ultrassônico. Há três formas de acoplar os transdutores no elemento de estudo: são os arranjos de transmissão direta, transmissão indireta ou transmissão semidireta, conforme apresentado no Figura 9. Transdutores com faixa de frequências entre 25 a 100 kHz são utilizados para o ensaio VPU em peças de concreto (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

Figura 9 – Posições relativas entre dois transdutores (E = emissor; R = receptor): (a) transmissão direta; (b) transmissão semidireta e (c) transmissão indireta.



Fonte: Adaptado de Naik, Malhotra e Popovics (2004).

Na forma de transmissão direta, aplicada na pesquisa, o arranjo dos transdutores permite uma menor perda de energia entre a transmissão e a recepção do sinal, além de facilitar a determinação da distância percorrida pela onda. A transmissão indireta é recomendada quando se tem acesso apenas a um lado do elemento a ser ensaio, esse arranjo é mais susceptível a erros porque a onda irá propagar nas camadas mais próximas à superfície do concreto (cobrimento). Por fim, a transmissão semidireta é aplicada geralmente quando se deseja evitar uma região com concentração de armaduras (GODIM, 2018).

Os transdutores tem a função de transmitir ou receber pulsos ultrassônicos, devendo estar em contato direto com a superfície do elemento. A presença de ar entre o transdutor e o material pode ocasionar dispersão da onda resultando em erros de ensaio. Para eliminar o ar entre as superfícies, deve ser utilizado um material acoplante adequado entre o transdutor e a amostra. (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

A NBR 8802:2019 faz as seguintes recomendações para uma boa execução do ensaio: a superfície da peça a ser ensaiada precisa ser plana, limpa e lisa; o aparelho de ultrassom deve estar devidamente calibrado; utilizar um agente acoplante compatível com o tipo de ensaio a ser realizado; posicionar adequadamente os transdutores para realizar a medida do ensaio (ABNT, 2019).

A compreensão do resultado exibido pelo método de VPU é de suma importância. O conhecimento dos fatores que podem interferir na precisão do ensaio é necessário, sendo os principais: temperatura, nível de tensões, distância entre as superfícies de contato dos transdutores, umidade e presença de armaduras. Além disso, outros fatores ligados às propriedades do concreto influenciam no resultado gerado pelo equipamento, como o tipo e a quantidade de agregado graúdo, idade de hidratação da mistura de concreto e o índice de vazios presente na mistura de concreto. Vale lembrar que a velocidade aferida no ensaio é uma função do módulo de compressibilidade, do módulo de cisalhamento e da densidade do material, e tais propriedades são afetadas, por exemplo, pela quantidade de fissuras e porosidade do concreto.

Misturas de concreto apresentam diferentes densidades, propriedade condicionada pela quantidade de ar incorporado e o teor de agregado miúdo e graúdo utilizado. Segundo Saint-Pierre *et al.* (2016), uma maior porosidade e maior densidade de fissuras resultam na redução da velocidade do pulso ultrassônico.

Em linhas gerais, o método de VPU é um ensaio não destrutivo que permite a aplicabilidade tanto em situações de laboratório como em obras *in loco*, independentemente do tamanho ou formato da amostra. Tratando-se do material concreto, algumas aplicações

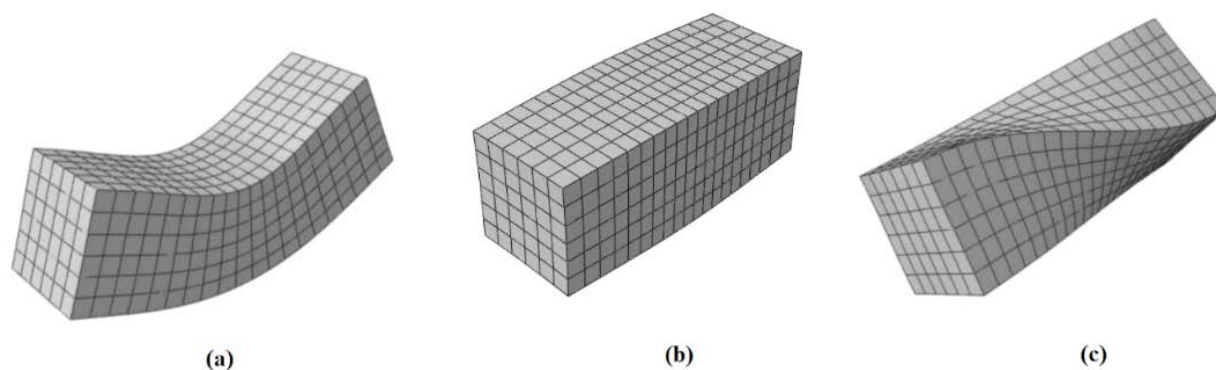
merecem destaque: avaliação da uniformidade e da qualidade do concreto, determinação da profundidade de fissuras e a determinação por correlação das propriedades do material. O ensaio de ultrassom é normatizado por diversas organizações e utiliza equipamentos de fácil operação e financeiramente acessíveis, facilitando a difusão dessa técnica para controle de qualidade do concreto. Entretanto, parâmetros como resistência à compressão e/ou à flexão requerem correlações para serem estimados com maior precisão.

### 2.6.2 Método de excitação por impulso ou ressonância acústica

Ao se excitar uma estrutura, pode-se estabelecer, por exemplo, alguma área fragilizada e obter algumas propriedades do material. A caracterização dinâmica das amostras de concreto foi realizada através do ensaio acústico, fazendo-se necessário a apresentação dessa técnica.

O método de ressonância acústica faz uso dos princípios do comportamento dinâmico para determinar algumas propriedades mecânicas do material. As frequências naturais (ou ressonantes) da estrutura estão associadas aos modos de vibração fundamentais (Figura 10), relacionando-se diretamente com as propriedades do material, condições de contorno e geometria (SANTOS, 2014). Dessa forma, a técnica permite estimar as propriedades elásticas do material, como o módulo de elasticidade dinâmico, a partir de relações matemáticas, desde que a amostra possua densidade conhecida, condições de contorno e uma geometria bem definidas.

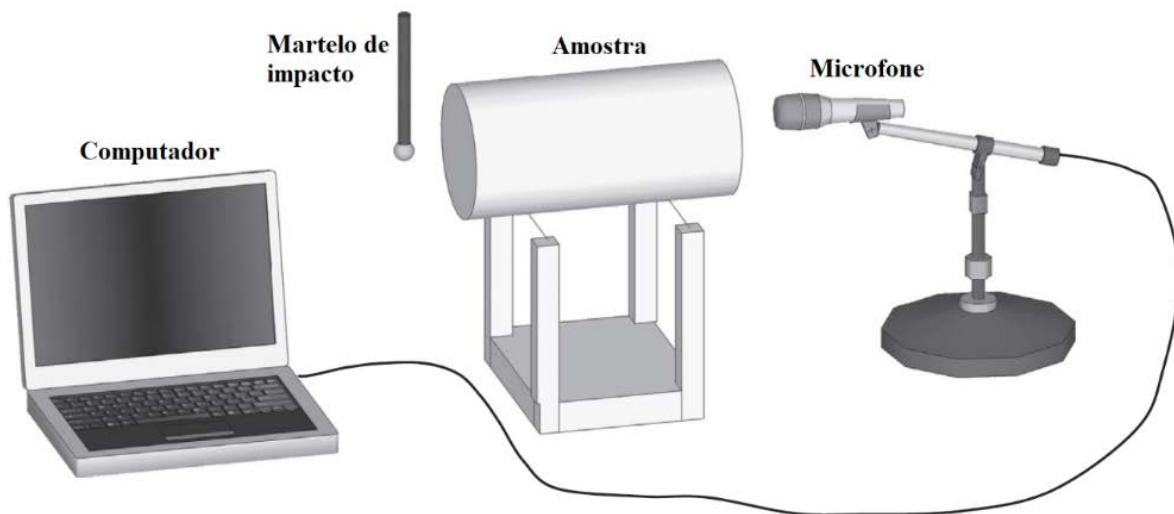
Figura 10 – Modos de vibração fundamentais de um corpo de prova prismático: (a) Flexional; (b) Longitudinal; (c) Torcional.



Fonte: Gidrão (2015).

De acordo com a ASTM E 1876:15 (ASTM, 2015) e ASTM C 215:14 (ASTM, 2014), a obtenção das propriedades dinâmicas de um material está intimamente relacionada como a caracterização da frequência natural de determinado elemento em estudo. No ensaio de ressonância acústica, aplica-se um impacto mecânico de curta duração numa região do elemento em estudo e o som propagado pela superfície da estrutura é capturado por um microfone, conforme ilustrado Figura 11.

Figura 11 – Esquema de ensaio acústico.



Fonte: Adaptado de Haach *et al.* (2013).

Em laboratório, os corpos de prova devem vibrar livremente, sem restrições ou impedimentos, configurando um comportamento mais próximo de um corpo livre. Quando não for possível tal configuração, as condições de contorno devem ser consideradas no equacionamento. O impacto mecânico deve ser fornecido por um instrumento dotado de uma geometria e material, que favoreça a maior concentração de massa no ponto de impacto, para induzir vibrações mecânicas na amostra sem danificá-la. Na prática, o tamanho e a geometria do excitador dependem da massa e do tamanho do elemento ensaiado, bem como da força necessária para produzir a vibração (JULIANI, 2014).

Assim, a excitação da estrutura por impacto e a aquisição do som são realizados em pontos estratégicos, maximizando a captação do sinal, obtendo o modo de vibração desejado. Com isso, as séries temporais de vibração medidas (dados discretos) encaminhados para o computador, são processados através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), convertendo o problema do domínio do tempo para o da frequência (GIDRÃO, 2015).

Após o processamento dos dados, identificam-se as frequências naturais, observando as amplitudes máximas. Em seguida, é feita a associação com as propriedades elásticas do material (HAACH *et al.*, 2013). Além disso, a medição de frequência de ressonância possibilita o controle de qualidade e aceitação de amostras, podendo também registrar o crescimento do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson com o aumento da maturidade da amostra (JULIANI, 2014).



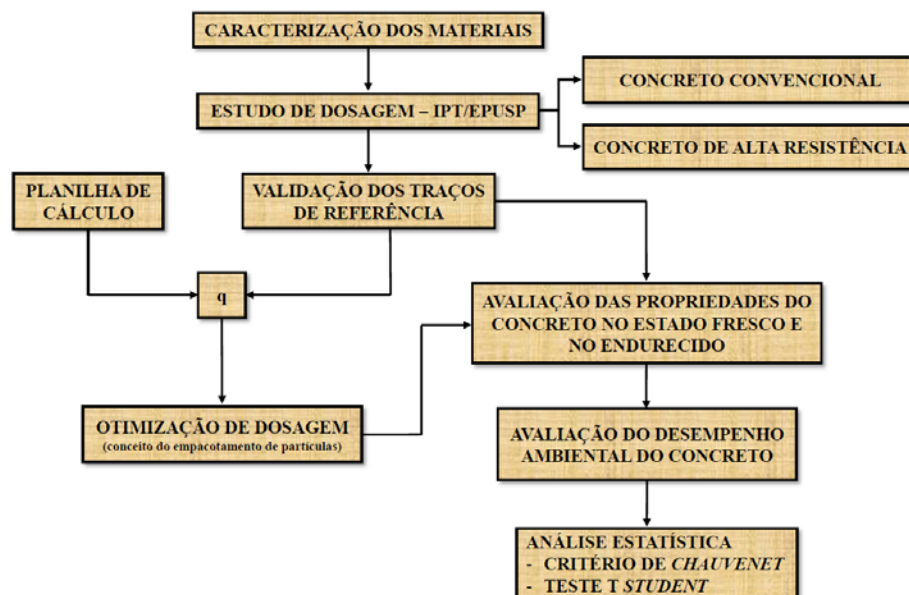


### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo descreve o programa experimental empregado, dividindo-o em três etapas principais com a finalidade de atingir os objetos propostos para a pesquisa. A primeira etapa compreende a escolha e caracterização dos materiais granulares utilizados na produção das misturas de concreto convencional (CC) e de alta resistência (CAR) aplicadas na pesquisa. São considerados materiais granulares todos os materiais secos constituintes das misturas de concreto, ou seja, cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e adições minerais. Além disso, realizou-se um estudo de dosagem utilizando o método de dosagem tradicional – IPT/EPUSP com o intuito de obter o diagrama de dosagem para cada classe de concreto convencional e concreto alta resistência.

A segunda etapa consiste: (i) na determinação e validação dos traços de referência para as resistências mecânicas requeridas de dois concretos convencionais (C25 e C40) e de dois concretos de alta resistência (C50 e C80); e (ii) desenvolvimento dos traços otimizados para cada coeficiente de distribuição fixado, aplicando o conceito de empacotamento de partículas de acordo com o modelo de Alfred. Por último, efetuou-se a produção, moldagem dos corpos de prova e a cura úmida dos concretos. Cada mistura foi submetida a ensaios físicos e mecânicos para caracterização das propriedades do concreto, nos estados fresco e endurecido, a fim de avaliar a eficiência da otimização de dosagem. A Figura 12 apresenta um fluxograma abordando as principais etapas do programa experimental.

Figura 12 – Fluxograma das principais atividades do programa experimental.



Fonte: Autor (2019).

### 3.1 MATERIAIS

Os insumos utilizados para produção dos concretos nesta pesquisa foram cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, água, sílica ativa, aditivos plastificante e superplastificante. A seguir são detalhados cada um destes materiais.

#### 3.1.1. Cimento

Utilizou-se o cimento Portland composto com pozolana, de classe de resistência de 32 MPa (CPII Z 32), comumente usado na produção de concreto dosado em central. A massa específica e a área superficial específica deste componente foram determinadas de acordo com a NBR 16605:2017 (ABNT, 2017a) e com a NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), respectivamente. Para a verificação do tamanho dos grãos do cimento foi realizado o ensaio de granulometria a laser conforme a norma ISO 13320:2009 (ISO, 2009).

#### 3.1.2 Agregados

##### 3.1.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado consiste em duas areais naturais, de origem quartzosa, originária da região de São Carlos-SP, classificadas como areia média e areia fina. Cada material foi caracterizado separadamente determinando-se as propriedades de massa específica e massa específica aparente de acordo com a NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009c), e a absorção de água segundo a NBR NM 30:2001 (ABNT, 2001). Os valores de massa unitária e volume de vazios foram determinados conforme a NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006a), enquanto a Dimensão Máxima Característica (DMC), o Módulo de Finura (MF) e a composição granulométrica foram obtidos seguindo a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). A composição ideal das areias foi estabelecida pelo método da máxima massa unitária no estado compactado, descrito por Helene e Terzian (1992), visto que tais agregados apresentavam granulometrias distintas.

### 3.1.2.2 Agregado graúdo

Os agregados graúdos selecionados, provenientes da região de São Carlos-SP, foram todos pedra brita de origem basáltica popularmente classificados como brita 1, brita 0 e pedrisco com DMC de 19 mm, 9,5 mm e 6,3 mm, respectivamente. As propriedades avaliadas foram massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo de acordo com a NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009d). No caso específico do pedrisco se fez necessário a compensação dessas propriedades, utilizando a NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009c), decorrente da grande proporção de finos na sua composição. Por fim, a composição granulométrica, assim como o DMC e o MF, foram definidos a partir da NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). Além disso, o índice de forma foi obtido para a brita 1 seguindo a NBR 7809:2006 (ABNT, 2006b).

### 3.1.3 Sílica ativa

A adição mineral utilizada nos concretos de alta resistência foi a sílica ativa derivada do processo de produção do silício metálico ou de ligas de ferro silício. A massa específica e a área superficial específica desta adição mineral foram definidas de acordo com a NBR 16605:2017 (ABNT, 2017a) e com a NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), respectivamente. Já a composição granulométrica foi obtida por meio da granulometria a laser seguindo a norma ISO 13320:2009 (ISO, 2009).

### 3.1.4 Aditivos químicos

A consistência desejada foi atingida empregando o aditivo superplastificante ADVA CAST 525 à base de policarboxilatos para os concretos de alta resistência e aditivo plastificante polifuncional redutor de água MIRA 94 para a produção dos concretos convencionais.

### 3.1.5 Água de amassamento

Nas concretagens foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local, sendo dispensável o controle de sua aceitação, conforme a NBR 15900-1:2009 (ABNT, 2009b).

### 3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Uma vez caracterizados os materiais granulares constituintes das misturas de concreto, o programa experimental divide-se em dois grupos: (i) concretos de referência e (ii) concretos otimizados. Para a dosagem das misturas de referência adotou-se o método tradicional IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), bastante simples, eficiente e amplamente aplicado na prática da construção civil brasileira para a produção de concretos convencionais e de alta resistência. No segundo grupo aplicou-se o conceito de empacotamento de partículas, por meio do modelo de Alfred, para otimização das misturas.

O trabalho desenvolvido engloba dois conjuntos de concretos estruturais (convencionais e de alta resistência). O estudo de dosagem inicial contemplou dois diagramas de dosagem para cada modalidade de resistência (CC e CAR), que posteriormente deram origem aos traços de referência e para os quais foram determinados os respectivos coeficientes de distribuição.

Na dosagem dos concretos convencionais de referência (sem adições minerais na sua formulação), fixaram-se alguns parâmetros como: (i) teor ideal de argamassa de 53% e (ii) teor de água/materiais secos (H) de 8,5%. Com estas considerações foram desenvolvidos os traços pobre (1:6,5), médio (1:5,0) e rico (1:3,5), com a proporção cimento: agregados totais secos em massa. Estes traços foram utilizados para elaboração do diagrama de dosagem convencional. Para a dosagem dos concretos de alta resistência (utilizando 10% de adição mineral em substituição volumétrica ao cimento), definiu-se um teor ideal de argamassa de 63%, teor de água/materiais secos de 6,7%, permitindo a produção dos traços auxiliares pobre (1:5,0), médio (1:3,5) e rico (1:2,0), resultando assim no diagrama de dosagem de alta resistência.

Os dados de teor ideal de argamassa e teor de água/materiais secos foram fornecidos por uma central de concreto da região a fim de auxiliar na produção dos traços de referência. Em ambos conjuntos de concretos fixou-se o abatimento do tronco de cone (*slump test*) em  $(120 \pm 20)$  mm, referente à aplicação de concreto bombeado. Como as relações água/cimento e água/aglomerante foram mantidas constantes, o ajuste para obtenção da consistência desejada foi feito pelo aditivo químico: plastificante e superplastificante nas misturas de concreto convencional e de alta resistência, respectivamente.

Durante a análise da caracterização dos agregados constatou-se, no item de distribuição granulométrica, que a areia fina apresentava uma distribuição que não pertencia a zona utilizável sugerida para o concreto segundo a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).

Entretanto, este não foi um aspecto limitante para a sua utilização uma vez que o método de dosagem IPT/EPUSP prevê a possibilidade de composição entre agregados miúdos e/ou graúdos a fim viabilizar economicamente uma mistura de concreto.

No estudo, a composição ideal foi definida apenas por uma combinação binária entre os agregados miúdos (areias média e fina) com base no ensaio de massa unitária no estado compactado estabelecido na NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006a), que apresentou um valor máximo quando a proporção areia média/areia fina foi de 60/40. Esta proporção foi utilizada na produção dos concretos de maneira complementar ao método de dosagem IPT/EPUSP. A finalidade dessa técnica é a obtenção de uma matriz granular compacta que resulte em baixo índice de vazios.

Com esses parâmetros definidos confeccionou-se um diagrama de dosagem para cada família de concreto (CC e CAR) selecionando os traços de referência utilizados na pesquisa. Para o conjunto de concretos convencionais (CC), definiram-se inicialmente dois traços com resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) iguais a 25 MPa (C25) e 40 MPa (C40). Para os concretos de alta resistência selecionaram-se outras duas misturas de concreto com  $f_{ck}$  de 50 MPa (C50) e 80 MPa (C80). Em seguida, para finalizar o planejamento experimental de dosagem, os traços pré-definidos a partir do diagrama de dosagem obtido pelo método IPT/ESPUSP foram validados experimentalmente, confirmando os traços de referência.

Todos os materiais granulares – cimento, sílica ativa, areia média e fina, e brita – considerados na produção dos concretos de referência, foram caracterizados quanto à sua distribuição granulométrica. Nesta determinação, foram considerados diferentes fatores entre o tamanho das partículas ( $2, \sqrt{2}$  e  $\sqrt[4]{2}$ ), a fim de verificar o que melhor retratasse aquele obtido por meio do método de dosagem tradicional IPT/EPUSP. Avaliando a distribuição granulométrica dos materiais e respeitando as diversas razões entre as sucessivas peneiras, verificou-se que, dados mais detalhados são fornecidos quando considerados fatores menores entre os tamanhos das partículas.

A redução do intervalo de malha entre peneiras proporcionou uma melhor interpretação dos dados e representação da microestrutura do concreto, tornando possível a determinação de materiais que fornecessem a máxima eficiência de empacotamento. Por esse motivo, selecionou-se a razão  $\sqrt[4]{2}$  para a distribuição dos materiais aplicados no estudo. Na prática da construção civil, o fator 2 é amplamente utilizado, enquanto que em outras áreas que utilizam amplamente o conceito de empacotamento de partículas na formulação das misturas fatores  $\sqrt{2}$  e  $\sqrt[4]{2}$  são frequentemente aplicados.

Para cada mistura de concreto de referência produzida, considerando as proporções dos materiais empregados, definiu-se o coeficiente de distribuição de partículas de acordo com o modelo de empacotamento de Alfred. Julgou-se mais adequado aplicar o modelo de Alfred em detrimento a outros métodos exposto na literatura, pelo fato de este método considerar os limites para os tamanhos mínimo e máximo de partículas, possibilitando uma maior eficiência para os concretos considerados no estudo. Além disso, a escolha se baseou também no grande número de estudos que aplicaram o modelo de Alfred ao longo do tempo, especialmente na indústria cerâmica, pois tal método possibilita a obtenção de misturas com maior densidade de empacotamento e menor porosidade (GRAZIA *et al.*, 2019).

As curvas de distribuição granulométrica discreta (curvas experimentais de porcentagem retida com relação a uma determinada abertura de peneira) dos materiais foram introduzidas no programa de cálculo (planilha Excel), desenvolvido para aplicação de misturas de concreto em geral, permitindo traçar uma curva experimental. De forma simultânea, o programa delinea uma curva teórica em decorrência da implementação do modelo matemático de Alfred e, por meio de processo iterativo de otimização, é possível determinar o coeficiente de distribuição, de modo a maximizar o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) do ajuste entre a distribuição experimental e a teórica proposta pelo modelo de Alfred. O programa permite a comparação gráfica entre a curva experimental e a teórica do modelo utilizado.

As misturas de concreto se diferenciam pelo valor do coeficiente de distribuição, de maneira que quanto menor esse valor, maior o teor de finos na mistura. Os mesmos coeficientes de distribuição obtidos nos traços de referência foram mantidos na etapa de otimização de dosagem. A família de concretos otimizados foi produzida com os mesmos agregados das misturas de referência, adicionando-se a brita 0 e o pedrisco, variando-se as possíveis combinações obtidas, a fim favorecer a otimização da dosagem das misturas de concreto. Neste trabalho não propõem que seja realizado a separação dos agregados em faixas granulométricas, pois isto tornaria o processo de eventual produção industrial inviável técnico e economicamente, uma vez que os materiais não são comercializados separadamente por faixa granulométricas.

Analogamente, o programa (planilha de cálculo) desenvolvido permite a obtenção das proporções em massa de cada componente da mistura. O usuário insere a distribuição granulométrica discreta dos novos materiais constituintes do concreto e, uma vez definido o coeficiente de distribuição da mistura, realiza-se a combinação das diferentes granulometrias a fim de obter o empacotamento mais próximo do teórico. Como resultado o programa

fornece as porcentagens dos materiais em massa (totalizando 100%) que propicie o máximo coeficiente de correlação entre a distribuição teórica (modelo de Alfred) e a curva de distribuição experimental idealizada para o traço de concreto.

Ao realizar a otimização das misturas, o método de dosagem proposto manteve constante o teor de água/materiais secos (H), possibilitando a determinação da relação água/cimento (a/c), visto que a técnica modifica completamente a composição da mistura. O abatimento do tronco de cone, ou *slump test*, também foi mantido o mesmo das misturas de referência, embora a mobilidade tenha sido reduzida tragicamente, aumentando o consumo de aditivo em todas as misturas otimizadas produzidas.

### 3.3 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA ÚMIDA DAS AMOSTRAS

A produção das misturas de concreto de cimento Portland foi executada no Laboratório de Estruturas do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), utilizando materiais secos, em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 200 litros. O procedimento de mistura obedeceu a seguinte ordem: mistura-se inicialmente 70% da água com os agregados graúdo e miúdo por 1 minuto; em seguida, acrescenta-se o cimento (e a sílica ativa, no caso do concreto de alta resistência) e o restante da água e homogeneiza a mistura por aproximadamente 5 minutos. Por fim, o aditivo químico plastificante ou superplastificante é então incorporado à mistura, que prossegue por mais 5-7 minutos, garantindo a completa homogeneização. Como as relações água/cimento e água/aglomerante foram mantidas constantes, o teor de aditivo foi ajustado durante o procedimento de mistura do concreto, realizando-se sucessivas adições até que a mistura se apresentasse dentro do intervalo de abatimento proposto.

Os corpos de prova foram moldados em forma metálica com aplicação de desmoldante e vibrados com auxílio de uma mesa vibratória e, em seguida, protegidos para evitar a perda de umidade do concreto para o meio ambiente. Depois de 24 horas os modelos foram desmoldados e submetidos a um regime contínuo de cura úmida até as idades de interesse, quando eram retirados para os respectivos ensaios. A quantidade de corpos de prova foi determinada para os ensaios mecânicos e de durabilidade, visando atender uma quantidade de amostras que permita realizar uma análise estatística, a fim de obter um maior nível de confiabilidade da amostra.

Para cada traço de concreto definido foram moldados 27 (vinte e sete) corpos de prova cilíndricos, todos com dimensões de 100 mm x 200 mm, sendo 15 corpos de prova para o

ensaio de resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias (sendo 5 corpos de prova por idade); 6 corpos de prova para os ensaios de determinação dos índices físicos (massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios) e outros 6 corpos de prova para a determinação da absorção de água por capilaridade, ambos realizados nas idades de 28 e 91 dias (sendo 3 corpos de prova por idade); e três corpos de prova prismáticos com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm para os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e de ultrassom, com leituras realizadas nas idades de 1, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 e 91 dias. Por se tratar de ensaios não destrutivos foram utilizados os mesmos corpos de prova para ambos os ensaios nas diferentes idades. Ao fim dos ensaios não destrutivos, aos 91 dias de idade, os corpos de prova prismáticos foram utilizados para o ensaio de tração na flexão, caracterizando tal propriedade para cada traço. A Tabela 1 contém o tipo, a quantidade total e as dimensões dos corpos de prova moldados em cada ensaio.

Tabela 1 – Propriedades do concreto a serem avaliadas no estado endurecido.

Propriedade	Corpos de prova		
	Tipo	Dimensões (mm)	Quantidade
Resistência à compressão	Cilíndrico	100 x 200	15
Massa específica, absorção e índice de vazios	Cilíndrico	100 x 200	6
Absorção por capilaridade	Cilíndrico	100 x 200	6
Módulo de elasticidade dinâmico	Prismático	150 x 150 x 500	3
Velocidade de pulso ultrassônico	Prismático	150 x 150 x 500	3
Resistência à tração na flexão	Prismático	150 x 150 x 500	3

Fonte: Autor (2019).

### 3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

Determinados os traços de concretos de referência e os traços otimizados, as propriedades foram avaliadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, realizando um estudo comparativo para análise da influência da otimização sobre o comportamento dos concretos.

No estado fresco, foram determinadas a consistência e a massa específica de cada mistura de concreto. A consistência foi avaliada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, prescrito pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998). Para obter a massa específica do concreto fresco foi utilizado o procedimento da NBR 9833:2008 (ABNT, 2008).



Para realização do ensaio de determinação da absorção de água por imersão, do índice de vazios e da massa específica de cada concreto no estado endurecido seguiu-se as orientações da NBR 9778:2005 (ABNT, 2005). A determinação da absorção de água por capilaridade foi a partir do procedimento descrito na NBR 9779:2012 (ABNT, 2012).

Ainda no estado endurecido realizou-se ensaios de resistência à compressão executados conforme estabelecido pela NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), utilizando uma máquina de ensaio hidráulica, da marca ELE, modelo AUTOTEST 2000, com capacidade de 2000 kN e velocidade de aplicação de carga de 2,4 kN/s.

No Brasil, ainda não existe uma norma regulamentadora para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Diante das opções preferiu utilizar o ensaio acústico para a caracterização do módulo de elasticidade dinâmico (E) do concreto. Segundo a ASTM E 1876:15 (ASTM, 2015) tal parâmetro é determinado a partir da frequência de ressonância nos modos de vibração flexional ou longitudinal, e o módulo de cisalhamento dinâmico (G) é definido pelo modo de vibração ressonante torcional. O coeficiente de Poisson é determinado a partir da relação entre os módulos dinâmicos de elasticidade e de cisalhamento.

Os materiais e instrumentos necessários para o ensaio são: sistema Sonelastic fornecido pelo fabricante ATCP ENGENHARIA FÍSICA, que se encontra disponível no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE EESC-USP); pórtico de apoio; martelo de impacto excitador com cabeça metálica; e balança, conforme é visto na Figura 13.

Figura 13 – Sistema de obtenção dos parâmetros dinâmicos.



Fonte: Autor (2019).

O procedimento experimental consiste na pesagem de todos os corpos de prova à serem ensaiados. A montagem do Sonelastic é muito simples, pois não demanda softwares adicionais, e consiste em um captador acústico ligado ao computador por um cabo comum, devendo a geometria e a massa dos corpos de prova serem inseridas no programa. Posteriormente, se posicionam as amostras a serem ensaiadas no pórtilo, aciona-se a captura de sinal do microfone e excita-se o corpo de prova. O *software* processa a resposta acústica e calcula os módulos elásticos e o amortecimento de acordo com a norma ASTM E 1876:15 (ASTM, 2015).

O ensaio de ultrassom foi realizado nos corpos de prova prismáticos. Para a determinação da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, utilizou-se o equipamento Pundit Lab da Proceq, ilustrado na Figura 14. O equipamento tem medida de resolução de 0,1  $\mu$ s e pode ser usado com transdutores de frequência nominal de 24 kHz a 500 kHz. A visualização e análise das ondas foram realizadas por meio do software Pundit Link, desenvolvido pela mesma empresa.

Figura 14 – Esquema de ensaio de velocidade ultrassônica: (a) medida transversal; (b) medida longitudinal.



Fonte: Autor (2019).

A determinação da velocidade de pulso ultrassônico através dos corpos de prova foi realizada por transmissão direta através do posicionamento dos transdutores, com frequência nominal de 54 kHz, em faces opostas dos corpos de prova, com a utilização do gel de ultrassonografia à base de água, a fim de permitir o contato contínuo entre as superfícies.

Em cada ponto de leitura foram emitidos 10 pulsos ultrassônicos registrando o tempo de chegada de cada onda no interior do prisma, a fim de determinar a velocidade de

propagação no material. Embora o programa Pundit Link forneça o tempo de chegada da onda, este nem sempre é preciso, podendo ocorrer alguma instabilidade no sinal. Para evitar esse problema, utilizou-se o programa desenvolvido por Schiavon (2015) para determinação do tempo correto. Por fim, é realizada uma média aritmética das velocidades, possibilitando determinar a uniformidade e a qualidade relativa do concreto com base na velocidade de propagação.

Por fim, para avaliar a viabilidade do concreto otimizado realizou-se uma estimativa do desempenho ambiental das misturas de concreto, por meio da determinação do índice de ligantes, que é um indicador relativo ao consumo de cimento por 1 MPa de resistência, conforme exposto em John (2011). Ao modificar as proporções dos componentes do concreto não teria como mensurar se o ganho de resistência mecânica é significativo ou não. Dessa forma, esse parâmetro possibilita a comparação entre os concretos verificando se a redução do consumo de cimento reflete em uma maior sustentabilidade para o concreto.

### 3.5 CRITÉRIOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na análise dos resultados experimentais iniciais foi aplicado o critério de *Chauvenet* para decisão de descarte de valores espúrios e para verificação da homogeneidade dos dados. Sabe-se que os resultados experimentais são aleatoriamente distribuídos próximo de um valor médio. O critério de *Chauvenet* estabelece que, em uma sequência de  $n$  medições, caso a probabilidade de se obter um valor  $x$  seja menor do que  $1/2n$ , o referido valor deve ser excluído.

Na análise das propriedades das misturas de concreto, foi realizada uma análise estatística dos resultados para avaliar se efeito do empacotamento de partículas na otimização da dosagem é significativo em comparação com a dosagem tradicional. Os dados foram analisados do ponto de vista estatístico, por meio do teste  $t$  de *Student*. Todos os testes estatísticos foram realizados considerando um nível de confiança de 95%.

A quantidade de corpos de prova definida para a realização dos ensaios mecânicos, visou atender uma quantidade de amostras que permitisse análises estatísticas confiáveis a fim de obter resultados com baixo desvio padrão.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa e as respectivas análises e discussões. Inicialmente são apresentados: (i) as propriedades dos materiais granulares empregados nas misturas de concreto, (ii) estudo de dosagem para obtenção dos traços de referência, (iii) determinação do coeficiente de distribuição dos concretos de referência e (iv) otimização de dosagem.

As propriedades do concreto são analisadas no estado fresco (consistência e massa específica) e, em seguida, no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, índices físicos, absorção por capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico, velocidade de pulso ultrassônico). Por fim, é estabelecido o índice de intensidade de ligantes para avaliar o desempenho ambiental de cada concreto produzido.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os resultados dos ensaios físicos dos agregados (miúdo e graúdo), bem como a caracterização do cimento CII Z 32 e da sílica ativa empregados nas misturas experimentais, estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedade físicas dos materiais granulares

Propriedade	Cimento	Sílica ativa	Areia fina	Areia média	Pedrisco	Brita 0	Brita 1
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,05	2,21	2,58	2,57	2,84	2,99	2,96
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	-	-	1,56	1,50	1,68	1,51	1,50
Área superficial específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3960	17900	-	-	-	-	-
Dimensão máxima característica (mm)	-	-	0,60	2,36	6,30	9,50	19,00
Absorção	-	-	0,15	0,63	2,11	-	1,64
Módulo de finura	-	-	1,20	2,40	3,40	5,90	6,60
Índice de forma	-	-	-	-	-	-	2,60

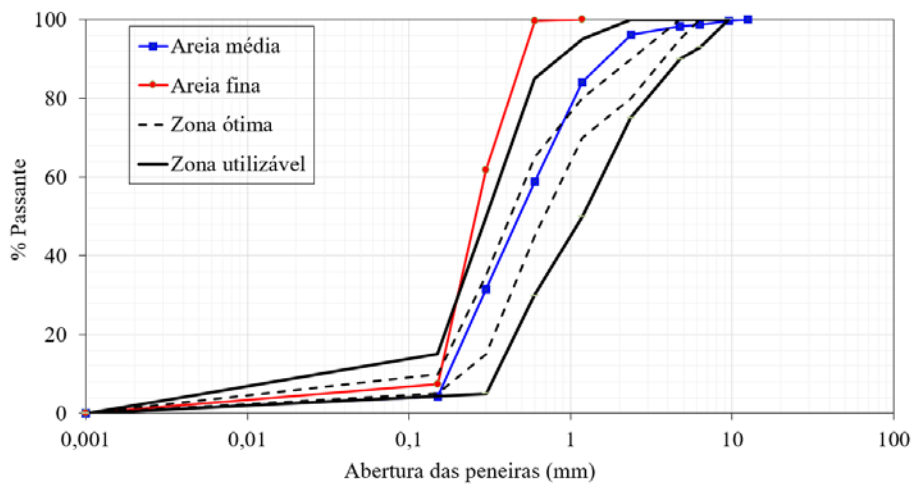
Fonte: Autor (2019).

Os valores de área superficial dos materiais finos (cimento e sílica) indicam que as partículas de sílica possuem maior área superficial e, conseqüentemente, tendem a ser menores em relação ao cimento. Dessa maneira, quanto menor as partículas de sílica e/ou cimento maior será a sua capacidade de absorver água (ORDEÑEZ, 2015). Com relação aos agregados observa-se que a absorção de água é inferior nos agregados miúdos, no caso, as

areias nas suas frações média e fina. A massa específica e unitária variou em função do tipo de matéria-prima, ficando em torno de 1,50-1,68 g/cm<sup>3</sup> e 2,58-2,96 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

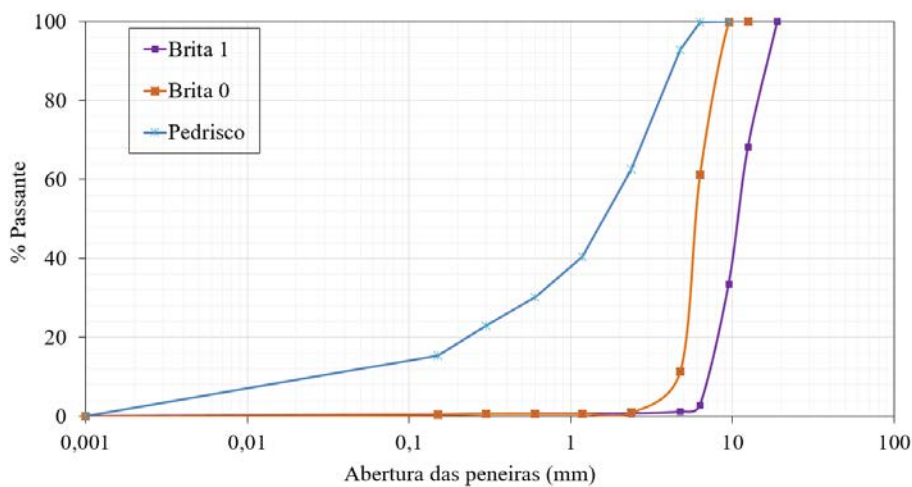
A distribuição granulométrica dos materiais granulares é um ensaio indispensável para a otimização de dosagem de misturas de concretos utilizando o conceito de empacotamento de partículas. As curvas granulométricas dos materiais granulares (Figuras 15, 16 e 17) possibilita a obtenção da fração percentual de cada material em determinada faixa granulométrica podendo ser transformada em porcentagem discreta permitindo determinar o coeficiente de distribuição para cada tipo de concreto confeccionado, tornando viável uma posterior otimização da mistura de concreto.

Figura 15 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados miúdo.



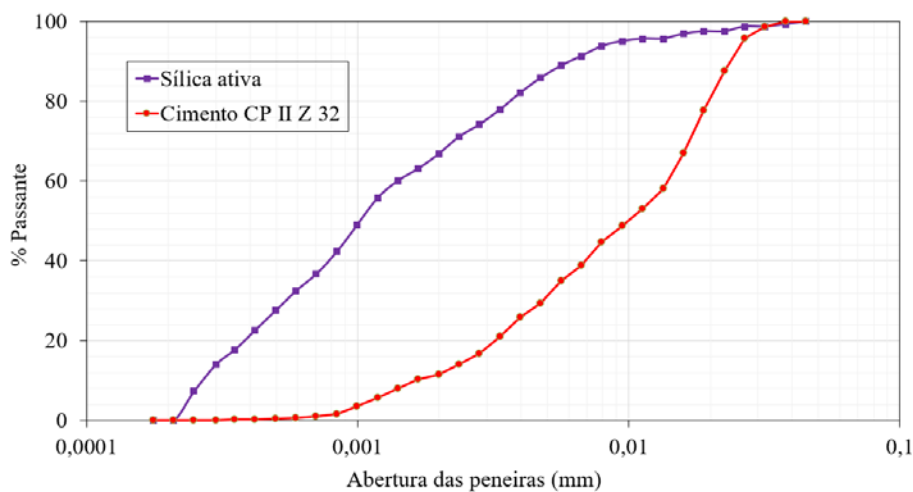
Fonte: Autor (2019).

Figura 16 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados graúdo.



Fonte: Autor (2019).

Figura 17 – Curvas de distribuição granulométrica a laser do cimento e sílica ativa.

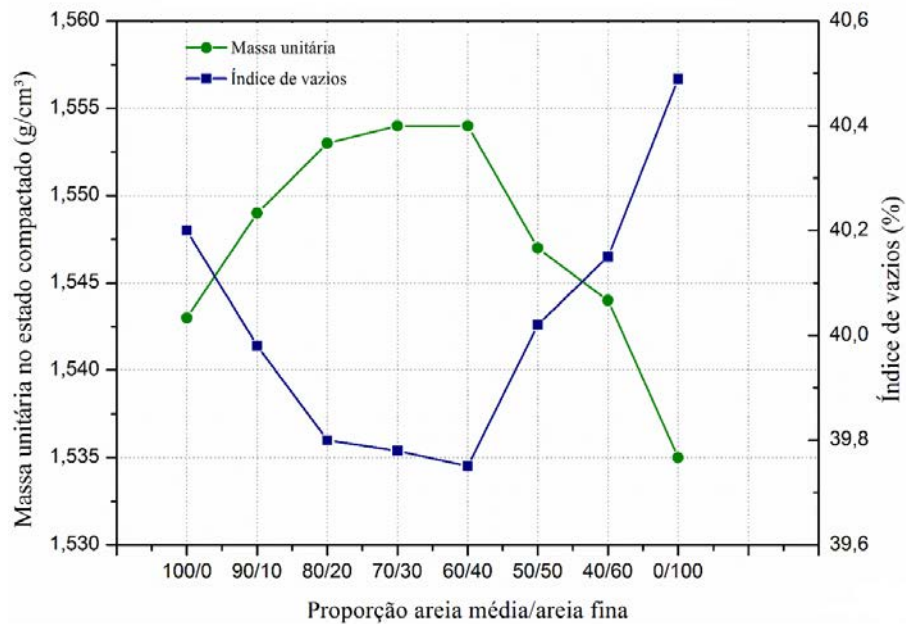


Fonte: Autor (2019).

Nota-se que a curva granulométrica da areia fina (Figura 15) se encontra fora dos limites de utilização (zona ótima e zona utilizável) propostos pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a), diferentemente da areia média que está inserida dentro desses limites. O fato da amostra de areia fina não se encontrar pelo menos na zona utilizável prevista pela norma é justificado pela grande quantidade de partículas com dimensão entre 0,1 mm a 1 mm, situação semelhante verificada em Hermann (2016). Com relação aos agregados graúdos, a referida não apresenta limites de uma zona ótima ou utilizável.

A metodologia tradicional de dosagem (IPT/EPUSP) prevê a composição entre agregados miúdos e/ou graúdos a fim de viabilizar economicamente a mistura de concreto. A composição ideal foi definida para o agregado miúdo (areias média e fina), visto que a fração mais fina ficou fora da zona recomendável para aplicação em concretos. Esta etapa objetivou definir a composição com menor índice de vazios por meio da técnica de ensaio da máxima massa unitária no estado compactado (Figura 18), conforme previsto por Helene e Terzian (1992), e realizada de acordo com as especificações da NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006a).

Figura 18 – Resultados do ensaio para composição ideal das areias.



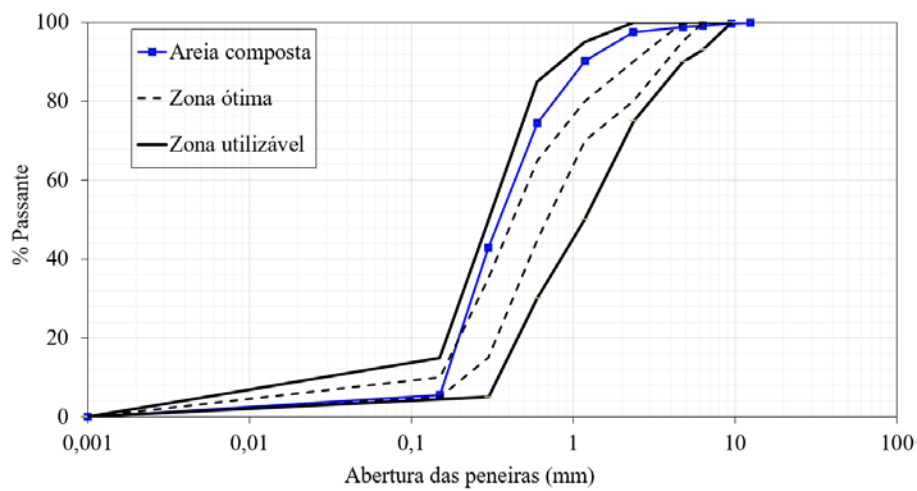
Fonte: Autor (2019).

Nota-se que à medida que a porcentagem de areia média decresce, os acréscimos de areia fina são cada vez maiores. Em cada acréscimo de material (areia fina), homogeneizava-se a mistura de forma manual, realizava-se as medições, determinando a massa unitária compactada seca e o índice de vazios do conjunto (combinação das areias média e fina).

Os valores referentes ao menor índice de vazios e máxima massa unitária no estado compactado ocorreram para a composição com 60% de areia média e 40% de areia fina, sendo esta a proporção utilizada na produção dos concretos, complementando o método de dosagem IPT/EPUSP. A fração de agregado graúdo não foi modificada devido ao fato de que na prática das concreteiras não é usual a composição de dois tipos desse componente. Por fim, é apresentada a curva de distribuição granulométrica da areia composta (Figura 19), a qual se encontra dentro dos limites de utilização propostos pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).



Figura 19 – Curva de distribuição granulométrica da areia composta (fração média e fina).



Fonte: Autor (2019).

#### 4.2 TRAÇOS DE REFERÊNCIA

Para análise dos resultados, será realizado um estudo comparativo entre concretos de referência dosados a partir de metodologia tradicional de dosagem (método IPT/EPUSP) e uma família de concretos produzidos a partir da otimização com base no conceito de empacotamento de partículas. Inicialmente, foi realizado um estudo de dosagem aplicando-se o método IPT/EPUSP, a fim de obter os traços de referência, semelhante ao proposto por Levy (2001).

Dois conjuntos de concretos, convencionais e de alta resistência, foram necessários para obtenção dos concretos de referência, fixando-se um teor ideal de argamassa de 53% e 63%, teor de água/materiais secos de 8,5% e 6,7%, respectivamente, e um abatimento de  $(120 \pm 20)$  mm para ambos, referente à aplicação de concreto bombeável. A relação água/cimento foi mantida constante e o ajuste necessário para atingir o abatimento especificado foi realizado por meio da incorporação de aditivo químico.

Com esses parâmetros definidos produziu-se um diagrama de dosagem para cada modalidade de resistência (convencional e de alta resistência). Ao término desse estudo preliminar definiram-se os traços referentes a cada classe de resistência e, posteriormente, realizou-se a validação experimental dessas misturas de concreto com resistência característica à compressão de 25 MPa (C25-R), 40 MPa (C40-R), 50 MPa (C50-R) e 80 MPa (C80-R), aos 28 dias de idade. Essas classes de resistência foram escolhidas por serem utilizadas em concretos aplicados em obras executadas no território nacional. A composição dos concretos de referência produzidos é apresentada resumidamente na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição dos concretos de referência.

Identificação	C25-R	C40-R	C50-R	C80-R
Traço em massa	1: 2,60 : 3,20 : 0,58	1: 1,65 : 2,35 : 0,43	1: 2,53 : 2,07 : 0,42*	1: 1,21 : 1,30 : 0,26*
<b>Consumo de materiais (kg/m<sup>3</sup> de concreto)</b>				
Cimento	332,16	453,77	375,06	607,35
Sílica ativa	-	-	30,97	50,16
Brita 1	1062,91	1066,35	862,64	877,29
Areia fina	345,45	299,49	421,74	326,62
Areia Média	518,17	449,23	632,61	489,93
Água	192,65	195,12	157,53	157,91
Aditivo Plastificante	0,80	1,23	-	-
Aditivo Superplastificante	-	-	4,43	4,98

Nota: (\*) Sílica incorporada em substituição volumétrica ao cimento no teor de 10%.

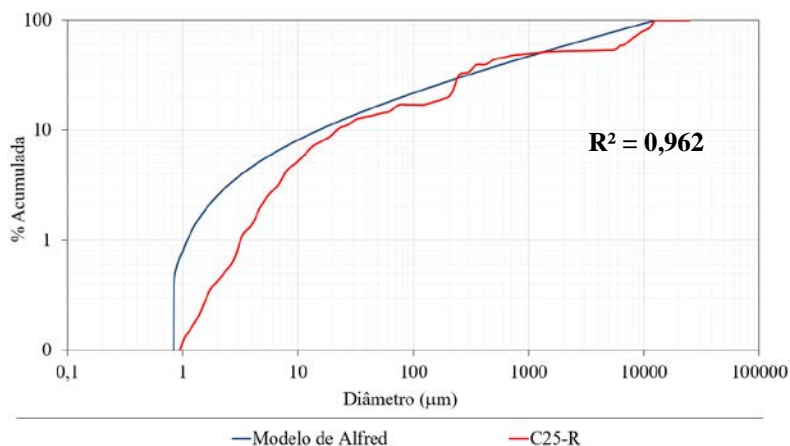
Fonte: Autor (2019).

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISTRIBUIÇÃO

Com a finalidade de realizar uma avaliação da eficiência e determinação do coeficiente de empacotamento das misturas de concreto, utilizou-se o modelo de empacotamento de Alfred. Para isso, fez-se a caracterização granulométrica dos componentes utilizando a razão  $\sqrt[4]{2}$  a fim de reduzir o intervalo entre as aberturas de malha de peneira, além de fornecer uma representação mais próxima da microestrutura do concreto.

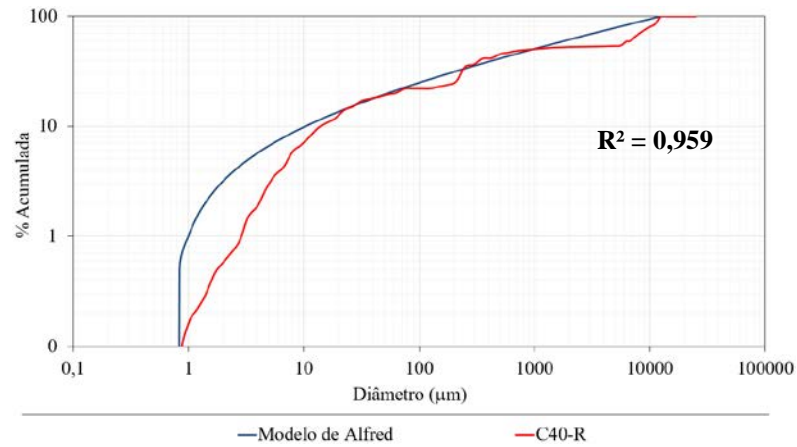
Considerando a distribuição discreta de seus materiais constituintes foi obtida a curva de distribuição granulométrica para cada mistura de concreto de referência, obtida a partir das porcentagens acumuladas dos materiais, e aplicou-se a técnica de empacotamento (modelo de Alfred) resultando na curva teórica, a fim de determinar o coeficiente de distribuição, conforme apresentado nas Figuras 20 a 23.

Figura 20 – Curva de distribuição granulométrica do C25-R.



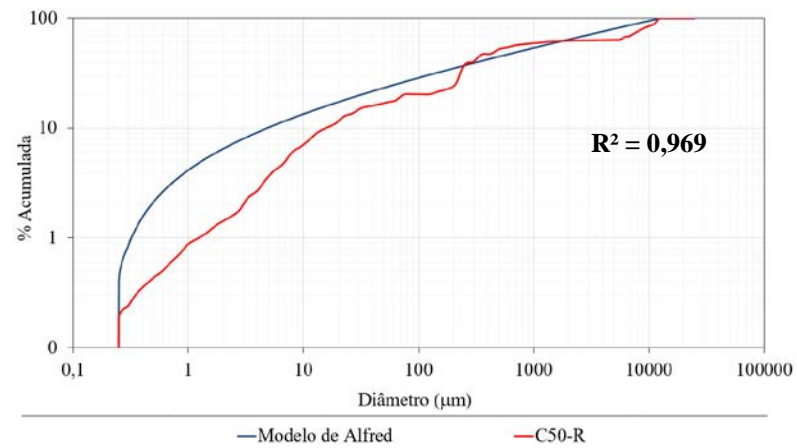
Fonte: Autor (2019).

Figura 21 – Curva de distribuição granulométrica do C40-R



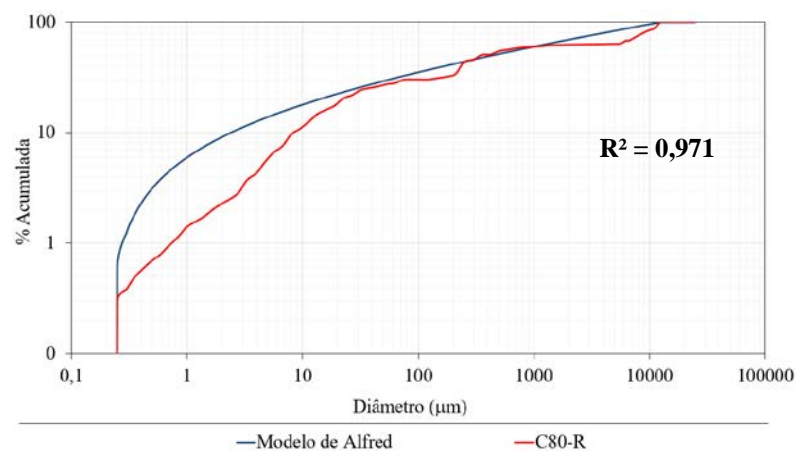
Fonte: Autor (2019).

Figura 22 – Curva de distribuição granulométrica do C50-R.



Fonte: Autor (2019).

Figura 23 – Curva de distribuição granulométrica do C80-R.



Fonte: Autor (2019).

A curva de distribuição teórica do modelo de Alfred foi obtida pela otimização computacional (ferramenta Solver presente no *software* Microsoft Excel). Nesta fase foi utilizado um processo iterativo para ajustar a curva teórica (modelo de Alfred) à curva experimental de referência afim de obter o máximo coeficiente de correlação. Os coeficientes de distribuição, juntamente com os índices de correlação referentes a cada mistura de concreto (C25-R, C40-R, C50-R e C80-R) definidos pelo método de dosagem tradicional IPT/EPUSP são 0,27 ( $R^2=0,962$ ), 0,23 ( $R^2=0,959$ ), 0,22 ( $R^2=0,969$ ) e 0,16 ( $R^2=0,971$ ), respectivamente. Observa-se que, os coeficientes de correlação não atingiram seu valor máximo ( $R^2=1$ ) devido à pequena quantidade de materiais empregados na mistura e, principalmente, à falta de materiais na fração mais fina, intervalo de 1 a 10  $\mu\text{m}$ , como observado nas Figuras 20 a 23.

Os concretos convencionais e de alta resistência foram adensados por vibração mecânica, obtendo valores para um abatimento dentro da faixa estabelecida, isto é, na faixa de (120  $\pm$  20 mm). No entanto, a grande maioria dos valores dos coeficiente de distribuição obtidos estão em discordância com a classificação preconizada por Vanderlei (2004), que classifica tais valores como de misturas autoadensáveis ( $q \leq 0,25$ ). A classificação proposta não condiz com o que foi observado nas misturas de referência, sendo apenas um indicativo da proporção de material fino na mistura, não podendo ser utilizado exclusivamente este critério como indicador de consistência do concreto.

Valores de coeficiente de distribuição inferiores a 0,37 se distanciam do empacotamento máximo teoricamente possível, o que teoricamente conduziria a um menor índice de vazios (VANDERLEI, 2004). Valores de coeficiente de distribuição inferiores a 0,37, em decorrência da elevada proporção de partículas finas presente na mistura, também foram verificados por Ordeñez (2015).

O valor do coeficiente de distribuição obtido para um dos concretos de alta resistência desenvolvidos nesta pesquisa (C80-R em que  $q = 0,16$ ) é relativamente baixo comparado à literatura. Na pesquisa de Oliveira *et al.* (2018), por exemplo, o concreto apresentava resistência média à compressão de (64  $\pm$  3) MPa, correspondendo a um coeficiente de distribuição  $q = 0,29$ , valor acima do determinado nesta pesquisa.

O modelo de empacotamento adotado considera na sua formulação partículas perfeitamente esféricas, desconsiderando a influência da morfologia das mesmas. Ou seja, não considera a forma dos materiais granulares (angular, lamelar, etc). Esta é uma das limitações do modelo teórico aplicado para obter distribuições de partículas reais. De maneira geral, no caso de partículas esféricas o empacotamento aleatório de monodispersões resulta sempre em um mesmo fator de empacotamento. Os resultados do coeficiente de distribuição calculados a

partir deste modelo representam valores idealizados que consideram as partículas esféricas, e por tanto não incluem o efeito da morfologia das partículas e a presença de aglomerados (ORDOÑEZ, 2015).

As partículas que compõem as misturas de concreto estão distantes de uma forma esférica e deve-se admitir que, tradicionalmente na tecnologia dos concretos, pouca atenção é dada à busca por uma distribuição granulométrica ótima desses materiais granulares. Além disso, ao estudar o comportamento dos concretos depara-se com um problema relacionado com a garantia de se reproduzir materiais com uma distribuição granulométrica precisa, isto é, as matérias-primas nem sempre apresentam uma distribuição granulométrica contínua e reprodutível ao longo do tempo (CASTRO; PONDOLFELLI, 2009).

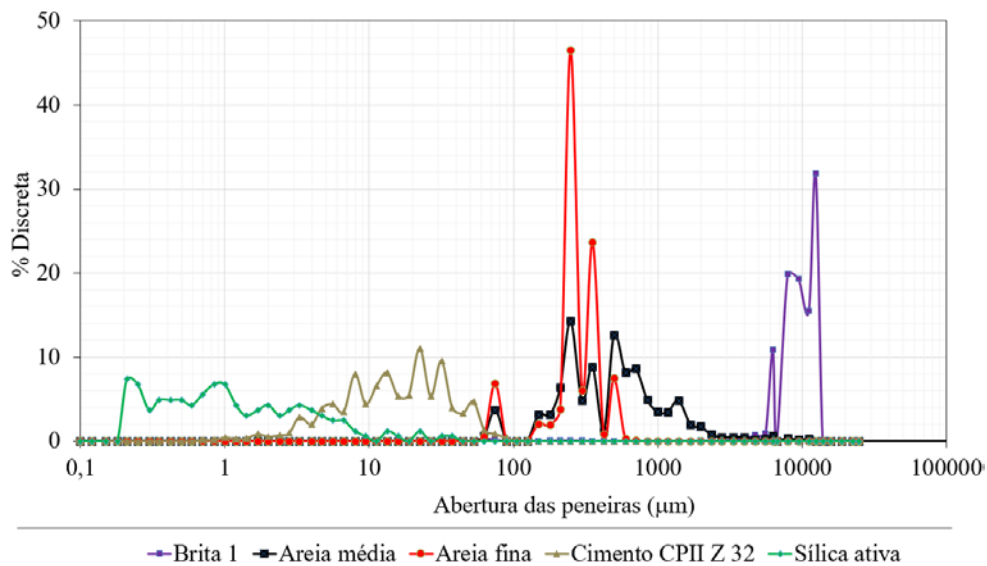
#### 4.4 TRAÇOS OTIMIZADOS

A dosagem de concretos pelas metodologias clássicas visa componentes com granulometria contínua individualmente, porém o concreto é composto por vários materiais e quando engloba todos eles, não se utiliza a mesma orientação de continuidade. Uma forma de tratar essa continuidade na mistura é por meio de métodos de empacotamento de partículas, os quais consideram efeitos geométricos e de interação entre os grãos.

Conforme mencionado anteriormente, a granulometria de cada material foi caracterizada individualmente seguindo intervalo entre peneiras aplicando a razão  $\sqrt[4]{2}$ . Segundo Daminieli (2013) quanto maior o número de peneiras utilizadas para a elaboração de uma curva discreta, maior a precisão. Dessa forma, a inserção gradativa do número de peneiras divide as quantidades de partículas em cada intervalo, diminuindo a porcentagem de material retido e reduzindo o erro da amostra.

Diante do exposto, na primeira etapa de otimização da dosagem realizou-se uma análise conjunta da granulometria discreta dos materiais aplicados nas misturas de concretos de referência, conforme observado na Figura 24. Observando o comportamento do gráfico para as misturas de concreto de referência verificou-se a ausência de determinadas faixas granulométricas entre: (i) Areia média e Brita 1, (ii) Cimento CII Z 32 e Areia fina, além de sobreposição granulométrica das frações de areia média e fina, problemática semelhante verificada em Oliveira *et al.* (2018).

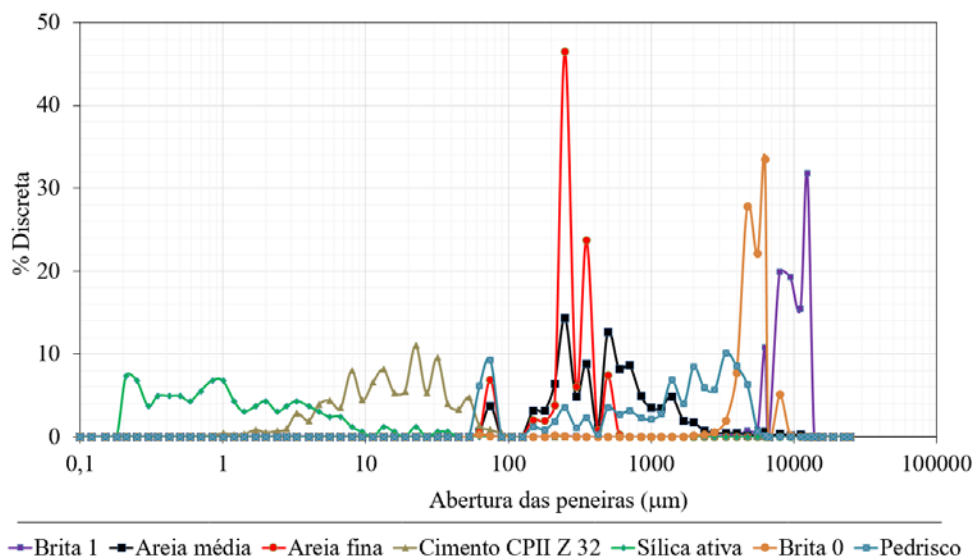
Figura 24 – Distribuição discretas dos materiais constituintes dos concretos de referências.



Fonte: Autor (2019).

A ausência de determinados intervalos de diâmetros de partículas dificulta a otimização de dosagem a partir do conceito de empacotamento de partículas, sendo necessária a aquisição/incorporação de novos componentes granulares para suprir essa deficiência. Partindo desse pressuposto, uma nova composição foi elaborada com o propósito de aumentar a densidade de empacotamento de partículas, conforme visto na Figura 25. Uma mistura que dispõe de um maior número de componentes pode apresentar um melhor preenchimento dos vazios, um vez que há mais variedade de tamanho de grãos, conforme apontado por Silva, Segadães e Devezas (2003) e Lenz (2016).

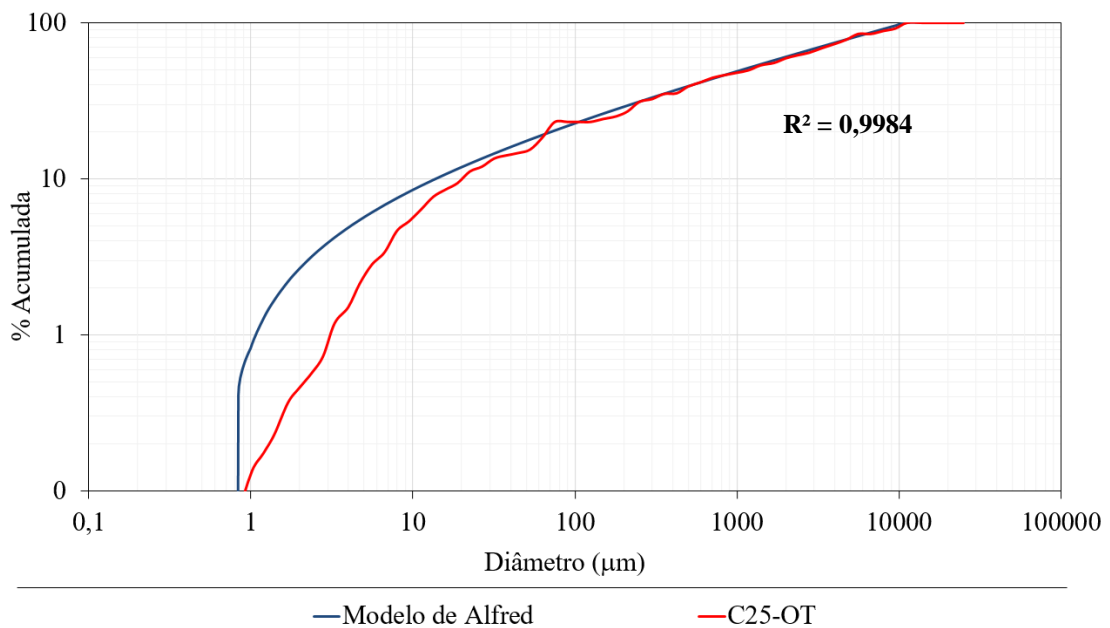
Figura 25 – Distribuição discreta dos materiais constituintes dos concretos otimizados.



Fonte: Autor (2019).

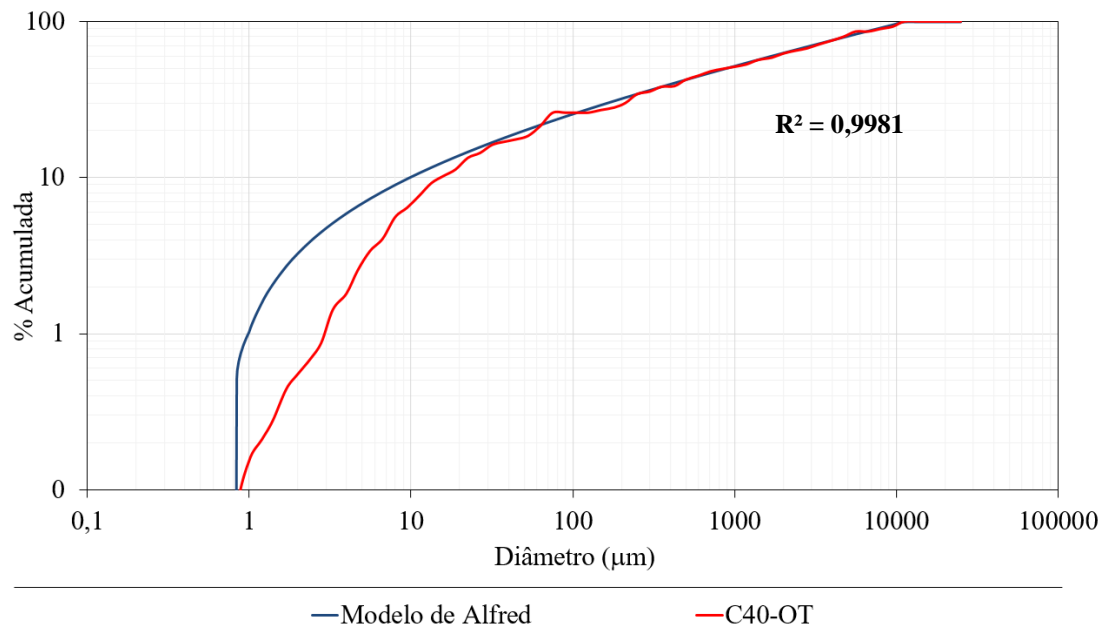
A determinação das novas proporções dos materiais particulados consistiu em um processo de otimização matemática (ferramenta Solver presente no *software* Microsoft Excel), que utilizava como dados de entrada a distribuição granulométrica discreta dos componentes da mistura e o coeficiente de distribuição almejado ( $q$ ). O programa iterativamente calcula o diâmetro da maior e menor partícula da mistura fornecendo a curva granulométrica resultante do modelo teórico de Alfred. Simultaneamente, o teor de cada material é ajustado afim de obter o máximo coeficiente de correlação entre as curvas experimentais e teóricas, técnica utilizada em Rebmann (2016). As Figuras 26 a 29 apresentam a distribuição granulométrica dos concretos otimizados com base no conceito de empacotamento de partículas, mantendo-se os coeficientes de distribuição determinados anteriormente para cada mistura de concreto. Vale salientar que nesta pesquisa não foi realizada a separação de cada material por fração granulométrica, pois tal procedimento tornaria inviável do ponto de vista técnico e econômico, distanciando da prática das empresas.

Figura 26 – Curva de distribuição granulométrica otimizada para o concreto C25-OT.



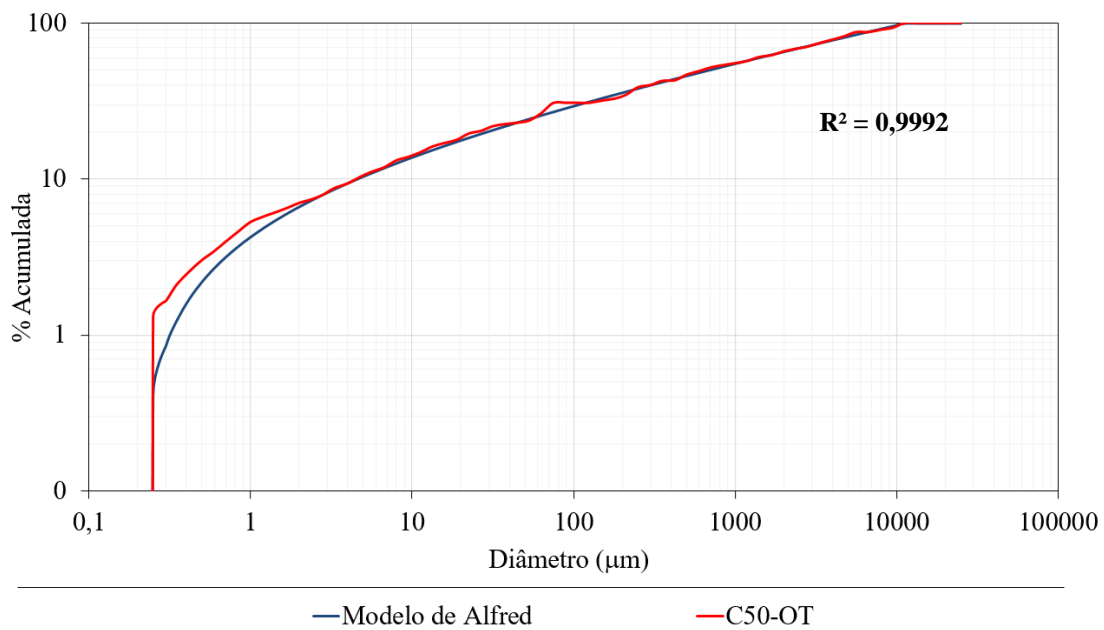
Fonte: Autor (2019).

Figura 27 – Curva de distribuição granulométrica otimizada para o concreto C40-OT.



Fonte: Autor (2019).

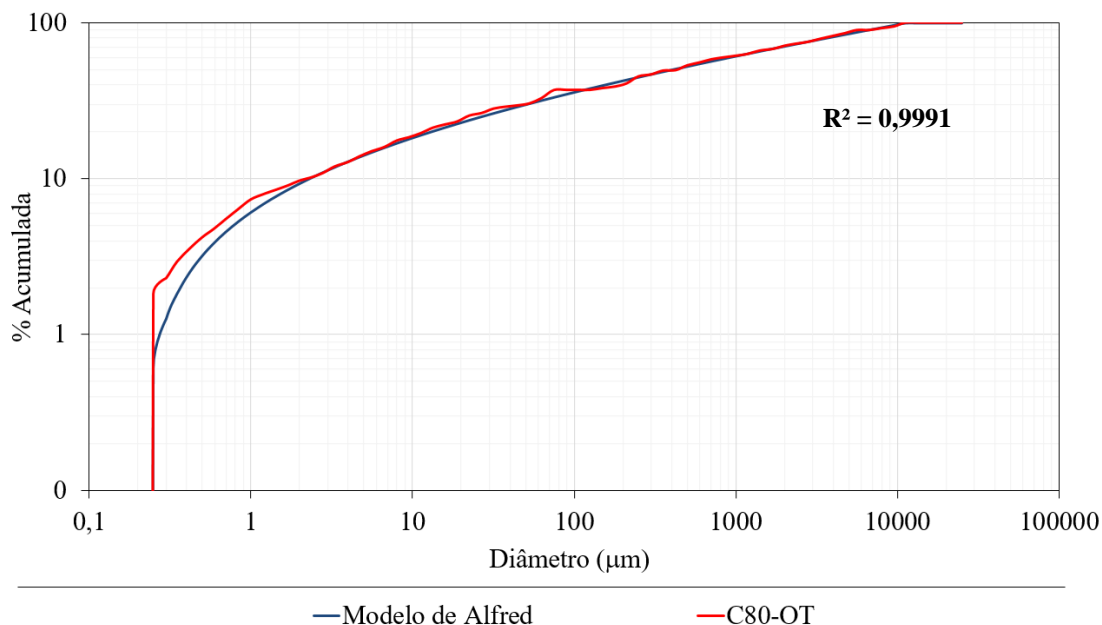
Figura 28 – Curva de distribuição granulométrica otimizada para o concreto C50-OT.



Fonte: Autor (2019).



Figura 29 – Curva de distribuição granulométrica otimizada para o concreto C80-OT.



Fonte: Autor (2019).

Nos gráficos é natural uma pequena dispersão entre as curvas experimental e teórica já que os modelos tradicionais de empacotamento de partículas são elaborados a partir de simplificações e de dados experimentais de um determinado conjunto de materiais. Londero (2016) afirma que tais modelos não levam em consideração a forma das partículas e considera que cada partícula é posicionada uma a uma na mistura.

A partir das Figuras 26 a 29 é possível verificar a boa homogeneidade da otimização de dosagem apresentando elevados coeficientes de correlação para todas categorias de concreto: (i) C25-OT ( $R^2=0,9984$ ), (ii) C40-OT ( $R^2=0,9981$ ), (iii) C50-OT ( $R^2=0,9992$ ) e (iv) C80-OT ( $R^2=0,9991$ ). Os concretos convencionais (C25-OT e C40-OT) possuem maior dispersão de resultados no intervalo de 1 a 10  $\mu\text{m}$  em virtude da falta de materiais comerciais nessa fração, fazendo com que a curva experimental se afasta da curva teórica de Alfred. Isso é justificado pela falta de materiais na fração mais fina. A utilização de materiais com essa granulometria distanciaria o trabalho da prática da construção civil para concretos convencionais, tornando-o inviável do ponto de vista econômico. Dessa forma, não foram considerados outros materiais finos além do cimento para a otimização dos traços de concreto convencional.

Por fim, o programa fornece como resultado a porcentagem em massa de cada material para nova mistura de concreto (Tabela 4). Observa-se que na otimização da dosagem dos traços de concreto foi necessária uma maior quantidade de partículas finas para ajustar ao máximo a curva de distribuição experimental à curva de distribuição granulométrica teórica do modelo de Alfred, uma vez que os coeficientes de distribuição considerados foram baixos (mesmos coeficientes obtidos a partir dos traços de referência).

Tabela 4 – Proporções dos materiais particulados dos concretos otimizados.

Identificação	C25-OT		C40-OT		C50-OT		C80-OT	
	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	% em massa de material seco	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	% em massa de material seco	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	% em massa de material seco	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	% em massa de material seco
<b>Cimento</b>	364,74	15,84	439,75	19,01	349,89	14,82	420,82	17,95
<b>Sílica ativa</b>	-	-	-	-	216,93	9,24	302,99	12,87
<b>Brita 1</b>	386,63	16,84	351,80	15,30	328,90	13,96	269,32	11,56
<b>Brita 0</b>	178,72	7,73	162,71	6,95	129,46	5,52	92,58	3,99
<b>Areia fina</b>	-	-	-	-	-	-	29,46	1,18
<b>Areia Média</b>	412,16	17,85	444,14	19,24	444,36	18,88	429,23	18,39
<b>Pedrisco</b>	959,28	41,73	914,67	39,50	888,72	37,58	799,55	34,05
<b>Água</b>	196,96	-	197,89	-	157,45	-	155,70	-
<b>Aditivo Plastificante</b>	4,38	-	5,28	-	-	-	-	-
<b>Aditivo Superplastificante</b>	-	-	-	-	9,80	-	13,05	-

Fonte: Autor (2019).

Definida a proporção ótima dos materiais particulados para cada nova composição de concreto foi mantido constante apenas o teor de água/materiais secos dos parâmetros iniciais, possibilitando determinar a relação água/cimento de cada traço. Lenz (2016) observou que em concretos com esqueleto granular modificado, que passaram por um processo de empacotamento de partículas, demandam maiores quantidades de agregados em relação ao concreto de referência, tendência que segue para os concretos convencionais produzidos nesta pesquisa.

Mencionado anteriormente, havia um indicativo que uma das frações de areia poderia ser reduzida ou eliminada, fato corroborado após a otimização da dosagem. A inserção de novos materiais (brita 0 e pedrisco) associados com a areia média proporcionou um melhor empacotamento da mistura. A redução drástica da proporção de areia fina é justificada por dois motivos principais: (i) esta apresentava alta proporção de partículas com diâmetro entre 100 a 1000  $\mu\text{m}$  e (ii) a distribuição granulométrica da areia média combinada ao pedrisco indicava a dispensabilidade da fração de areia fina na composição final.

O emprego do conceito de empacotamento de partículas permitiu formular novas composição de concretos, em geral, com menor consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Entretanto, nos traços otimizados de alta resistência verificou-se o aumento do consumo de sílica, especialmente para as misturas com menor “q”, devido ao ajuste da fração mais fina da curva ser realizada em grande parte por essa adição mineral. Como visto, o consumo de materiais não é um parâmetro suficiente para verificar a sustentabilidade ambiental dos concretos tendo em vista que a dosagem modificou a composição de diversos parâmetros fixados inicialmente, inviabilizando a comparação entre as amostras.

#### 4.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As propriedades analisadas para o concreto no estado fresco foram (i) consistência pelo ensaio de abatimento do tronco de cone e (ii) a massa específica. Os resultados estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de massa específica e abatimento do concreto no estado fresco.

<b>Tipo de concreto</b>	<b>m</b>	<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>a/c</b>	<b>Teor de aditivo (%)</b>	<b>Abatimento (cm)</b>
C25 - R	5,80	2420,55	0,58	0,24	12,80
C25 - OT	5,31	2498,50	0,54	1,20	2,50
C40 - R	4,00	2445,25	0,43	0,27	12,30
C40 - OT	4,26	2510,95	0,45	1,20	2,00
C50 - R	4,60	2507,35	0,42	1,18	6,70
C50 - OT	5,75	2515,70	0,45	2,80	21,80
C80 -R	2,51	2531,55	0,26	0,82	11,70
C80 - OT	4,57	2499,65	0,37	3,10	21,30

Fonte: Autor (2019).

No estado fresco verificou-se perda sistemática da trabalhabilidade das misturas otimizadas em relação às misturas de referência, sendo necessário o aumento do consumo de aditivo a fim de dispersar as partículas de cimento da mistura e atingir a consistência previamente estabelecida. Este comportamento também foi verificado na pesquisa de Londero (2016). Já os concretos de referência produzidos pela metodologia de dosagem tradicional apresentaram abatimento dentro do intervalo preestabelecido.

À medida que reduz o coeficiente de distribuição, o teor de finos é aumentado. Para um mesmo volume, a quantidade de agregados tem que diminuir, como acontece com o C80-OT. O efeito da perda da trabalhabilidade deve-se principalmente ao aumento da quantidade de finos na mistura que no caso dos convencionais, foi pela quantidade de finos presente no pedrisco. Daí a dificuldade de se obter o abatimento, associado ao fato do aditivo plastificante não ter tido eficiência suficiente para conferir plasticidade à mistura, mantendo-se o mesmo teor de água/materiais secos.

Em algumas misturas de concreto (C50-R, C25-OT e C40-OT) não foi possível atingir o abatimento desejado, mesmo com alto teor de aditivo químico redutor de água. Uma análise visual desses concretos fez-se necessária em relação ao fenômeno de segregação e exsudação, sendo limitado a adição de plastificante em 1,2 % para concretos convencionais otimizados e superplastificante em 1,18% para a mistura C50-R. O adensamento das misturas foi realizado na mesa vibratória, não havendo prejuízo da compactação. Vale salientar que o alto teor de aditivo plastificante retardou o tempo de pega dos concretos convencionais otimizados em dois dias, não sendo recomendado para aplicação neste tipo de dosagem.

As misturas otimizadas (C50-OT e C80-OT) apresentaram um decréscimo do consumo de agregados e aumento do consumo de adições minerais. Na produção dos modelos foi observado o início da ocorrência de exsudação e segregação do concreto, indicando a inviabilidade de se acrescentar uma maior quantidade de aditivo. A proporção de agregado/adições minerais nestes casos reduziu e o teor ótimo do aditivo foi maior, no entanto, sem atingir a consistência desejada. A alta consistência das misturas otimizadas estão relacionadas com o baixo valor de  $q$ , normalmente indicado para concretos autoadensáveis. Entretanto os concretos produzidos apresentaram uma viscosidade elevada, não atendendo aos critérios da NBR 15823-1:2017 (ABNT, 2017b).

A sílica ativa, como indicado nos ensaios de caracterização, possui uma área superficial específica maior que o cimento. Com isso, o efeito do aditivo nesses materiais particulados pode influenciar negativamente, já que o mesmo pode não ter sido suficiente para envolver todas as partículas de sílica ativa (com área maior). Essa situação favorece a formação de aglomerados de sílica no compósito, provocando o efeito de afastamento das partículas ao invés do efeito fíler (HERMANN *et al.*, 2016).

A elevação da concentração de sólidos amplia o contato entre as partículas. Nestas condições são necessárias tensões maiores para manter o fluxo do concreto, com um aumento na viscosidade, não permitindo a dispersão do material apenas com uso de aditivo plastificante/superplastificante (REBMANN, 2016). Conforme constatado nesta pesquisa nem

sempre é possível atingir uma determinada trabalhabilidade adicionando aditivo químico. Para concretos otimizados pela técnica de empacotamento de partículas, algumas vezes é necessário alterar o teor de argamassa do concreto, ou ainda aumentar o teor de água/matérias secas a fim de conferir maior mobilidade à mistura, desde que não tenha efeito negativo sobre a resistência mecânica do material.

Os resultados apresentados demonstraram que as massas específicas dos concretos se situaram entre 2420 e 2531 kg/m<sup>3</sup>, conforme se espera para esses tipos concretos. As misturas com a estrutura granular modificada pelo empacotamento de partículas apresentaram massa específica superior à dos concretos de referência, com exceção do C80-OT que apresentou menor massa específica que a mistura C80-R.

Por fim, é importante salientar que características inadequadas especialmente no estado fresco podem contribuir para uma execução deficiente do concreto, ou seja, decisões equivocadas nesta fase de projeto de dosagem podem comprometer o desempenho final do concreto.

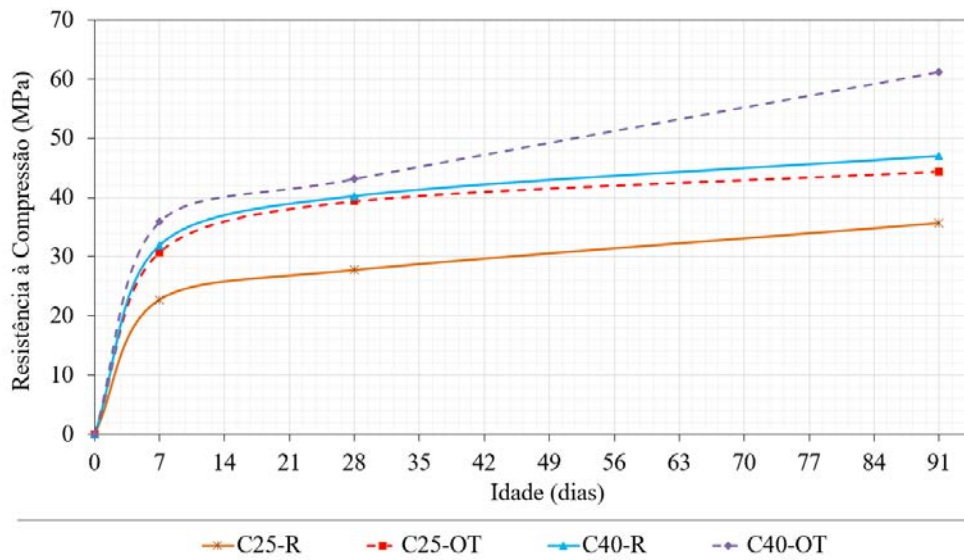
#### 4.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item serão apresentados os resultados e análises referentes à caracterização das misturas de concreto quanto às propriedades mecânicas e durabilidade no estado endurecido. As propriedades analisadas são (i) resistência à compressão, (ii) absorção de água por imersão, (iii) índice de vazios, (iv) massa específica, (v) absorção de água por capilaridade, (vi) módulo de elasticidade dinâmico e (vii) velocidade de pulso ultrassônico.

##### **4.6.1 Resistência à compressão**

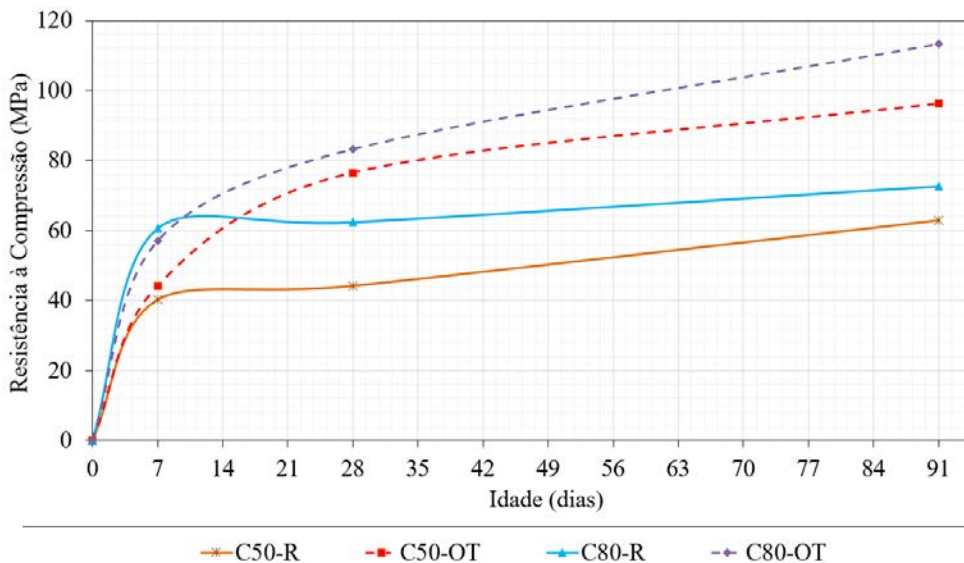
Os resultados dos ensaios de resistência média à compressão, aos 7, 28 e 91 dias, para os concretos de referência e otimizados são apresentados a seguir. As Figuras 30 e 31 mostram a tendência de evolução da resistência média à compressão ao longo do tempo das misturas de concreto produzidas.

Figura 30 – Evolução da resistência média à compressão dos concretos convencionais.



Fonte: Autor (2019).

Figura 31 – Evolução da resistência média à compressão dos concretos de alta resistência.



Fonte: Autor (2019).

Em relação ao crescimento da resistência média à compressão dos 28 aos 91 dias de idade, dos conjuntos de concretos C25-R, C40-R, C50-R e C80-R, observaram-se percentuais de ganho de resistência de 128,57%, 116,82%, 142,32%, 116,53%, respectivamente. Tal evolução da resistência mecânica do concreto depende significativamente do tipo do cimento utilizado. Para o cimento CP II Z 32 aplicado nesta pesquisa, o percentual de resistência à compressão, aos 7 e 91 dias, deveria atingir cerca de 80% e 112%, respectivamente, da resistência aos 28 dias (BATTAGIN, 2011).

Ao analisar o percentual de resistência de cada conjunto vê-se uma discordância nesse critério, principalmente, em relação ao percentual de resistência à compressão da mistura de concreto C50-R e C80-R, aos 7 dias, que aferiu 90,98% e 97,15% da sua resistência aos 28 dias, respectivamente. Acredita-se que em virtude da baixa quantidade de água neste tipo de concreto, a hidratação ocorreu de forma não homogênea, refletindo no comportamento imprevisto observado no gráfico da Figura 31, com a estabilização prematura da resistência média à compressão nas primeiras idades. Vanderlei (2004) aplicou cura térmica em concretos percebendo a aceleração do crescimento da resistência nas primeiras idades, diferentemente do tipo de cura (úmida) empregada no trabalho, quando o ganho de resistência é gradualmente crescente ao longo do tempo.

O lote do cimento CP II Z 32 adquirido foi devidamente ensacado e armazenado até sua utilização. Uma parcela foi utilizada para o estudo de dosagem e validação dos traços de concreto de referência. Até então o crescimento da resistência do concreto seguia a proporção indicada por Battagin (2011), atingindo os valores de resistência esperados para o estudo de dosagem, que foram estimados a partir da resistência característica à compressão e do desvio-padrão para um adequado controle de qualidade da obra, conforme estabelecido na NBR 12655:2015 (ABNT, 2015), sendo utilizado o restante do lote de cimento para a conclusão da pesquisa. Entretanto, o suposto controle de qualidade da linha de produção não refletiu no produto final, apresentando resistência insuficientes em relação ao estudo de dosagem inicial e validação dos traços. Como o tempo disponível para conclusão da pesquisa inviabilizava um novo estudo de dosagem utilizando outra marca de cimento, optou-se por seguir com o estudo comparativo contemplado os valores de resistência média obtidos a partir dos ensaios mecânicos e não mais com a finalidade de obter a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ). Como todos os demais traços estudados (traços otimizados) foram produzidos com cimento do mesmo lote dos traços de referência, considerou não haver prejuízo na análise de resultados.

Sendo assim, os valores da resistência média à compressão, aos 7, 28 e 91 dias de idade, referentes a cada mistura de concreto produzida, são apresentados na Tabela 6. Os valores apresentados correspondem à média de cinco resultados individuais (Apêndice A) obtidos em cada ensaio.

Tabela 6 – Resistência média à compressão dos concretos ao longo do tempo.

Tipo de concreto	m	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{cm}$ 7 dias			$f_{cm}$ 28 dias			$f_{cm}$ 91 dias		
			Média (MPa)	DP	CV	Média (MPa)	DP	CV	Média (MPa)	DP	CV
C25 - R	5,80	327,99	22,78	2,21	9,70	27,75	1,94	7,01	35,68	1,85	5,18
C25 - OT	5,31	364,74	30,77	3,12	10,15	39,35	1,34	3,41	44,39	6,13	13,80
C40 - R	4,00	450,32	31,94	2,32	7,27	40,23	1,66	4,12	47,00	0,22	0,46
C40 - OT	4,26	439,75	35,88	2,25	6,26	43,14	3,17	7,35	61,24	3,08	5,03
C50 - R	4,60	409,70	40,22	3,68	9,14	44,21	2,00	4,53	62,91	4,05	6,43
C50 - OT	5,75	349,89	44,14	2,10	4,76	76,54	4,29	5,60	96,33	5,98	6,21
C80 -R	2,51	654,15	60,59	3,35	5,54	62,37	1,62	2,60	72,68	7,58	10,44
C80 - OT	4,57	420,82	56,99	1,92	3,37	83,25	3,99	4,80	113,34	2,89	2,55

DP = Desvio-padrão (MPa)  
CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

A técnica de empacotamento de partículas nos concretos otimizados permitiu o aumento de resistência mecânica em todas idades avaliadas, com exceção do C80-OT aos 7 dias. Nas primeiras idades, é evidenciado um acréscimo de resistência menor em relação às idades posteriores. Isso é atribuído à menor quantidade de agregado graúdo utilizada nessa composição, quando comparada a de referência. Esse material favorece o desempenho mecânico nas primeiras idades, enquanto nas idades mais avançadas há contribuição do empacotamento de partículas dos materiais granulares e da matriz da pasta de cimento hidratada.

O maior acréscimo de resistência foi de 73,14% registrado para C50-OT aos 28 dias de idade, em relação ao C50-R. Uma análise importante, para as idades analisadas, é que a resistência média à compressão do conjunto de concretos otimizados (C40-OT, C50-OT e C80-OT) não apresentam tendência de estabilização, indicando um comportamento de ganho de resistência após os 91 dias.

Os concretos de alta resistência otimizados (C50-OT e C80-OT) apresentaram crescimento na resistência até os 28 dias de idade, permanecendo crescente a partir desta data. Este comportamento é explicado pelo alto teor de adições minerais, responsáveis pelo fortalecimento da zona de transição na interface pasta/agregado, contribuindo com o aumento da resistência à compressão nas idades posteriores. É preconizado que para produção de CAD é necessária uma baixa relação água/cimento, mesmo que o esqueleto granular da mistura esteja otimizado (SILVA, 2004).



A otimização de dosagem aplicando o empacotamento de partículas para concretos de alta resistência (C50-OT e C80-OT) mostrou uma variação significativa no valor de resistência média à compressão, aos 28 e 91 dias de idade, em relação aos concretos de referência (C50-R e C80-R), com nível de confiança de 95%. Lembrando que a análise estatística é realizada entre o conjunto de concretos de referência e otimizado de mesma “classe” que apresentam o mesmo coeficiente de distribuição ( $q$ ).

A maior variação de resistência média à compressão para concretos convencionais foi registrada no concreto C25-OT aos 28 dias, que apresentou um valor de resistência 41,83% superior ao C25-R, enquanto que a menor alteração ocorreu no concreto C40-OT aos 28 dias, cuja resistência foi apenas 7,23% superior em relação ao C40-R. De acordo com o teste *t Student*, observa-se que existe diferença significativa entre a resistência média à compressão dos concretos convencionais de classe C25 e C40 para as idades de 28 e 91 dias. Detalhes dos testes estatísticos para a resistência à compressão estão dispostos no Apêndice A.

No geral houve pequena variação dos resultados. Em casos isolados foram obtidos CV de 13,80% nos concretos convencionais e 10,44 % nos concretos de alta resistência. Mesmo assim, os resultados apresentaram uma boa homogeneidade das misturas de acordo com o critério de *Chauvenet*.

#### **4.6.2 Absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica**

A durabilidade em misturas de concreto está intimamente relacionada ao processo em que a água, através da estrutura de poros do material, penetra, difunde ou percola agentes agressivos do meio ambiente, sendo considerada como o fator primordial para maioria dos problemas de durabilidade do concreto (BATTAGIN, 2011 e MEHTA; MONTEIRO, 2014). A grande maioria das especificações que permitem prever a durabilidade das misturas de concreto está atrelada às propriedades físicas do material (massa específica, índice de vazios e absorção de água).

Esta linha de raciocínio é tradicional e bem aceita na literatura técnica. Helene (1983) define que para uma boa durabilidade do concreto a absorção de água por imersão deve ser no máximo 4,2%, enquanto uma absorção entre 4,2% a 6,3% é especificada para um concreto normal, e acima de 6,3% o composto é considerado deficiente em termos de durabilidade. No caso de índice de vazios, os limites estabelecidos para um concreto ser considerado durável ou normal são entre 10% e 15%, sendo que acima de 15% o concreto é considerado deficiente.

A *Internacional Tunnelling Association* (1993) classifica como excelente a qualidade dos concretos com absorção de água inferior a 6%, boa entre 6% e 8%, tolerável entre 8% e 9%, e ruim acima de 9%. Para índice de vazios, a mesma referência considera de excelente qualidade os concretos com índices de vazios permeáveis inferiores a 14%, boa entre 14% e 17%, razoável entre 17% e 19%, e ruim quando o índice de vazios é superior a 19%.

A durabilidade do concreto é inversamente proporcional ao índice de vazios e à absorção de água no corpo de prova, pois quanto maior esses parâmetros, maior será a possibilidade de ataques por agentes agressivos presentes na água, uma vez que as determinações consideram os poros permeáveis do material. Helene (1983) e Metha e Monteiro (2014) são enfáticos ao afirmar que a durabilidade do concreto está relacionada com a permeabilidade, ou seja, depende da conectividade entre os poros presentes no material.

As propriedades físicas, absorção de água por imersão e índice de vazios, para cada tipo de concreto, aos 28 e 91 dias, estão dispostas nas Tabelas 7 e 8. Os valores apresentados correspondem à média de três resultados individuais obtidos em cada ensaio, sendo estes resultados individuais, bem como a análise estatística, são apresentados nos Apêndices B e C deste trabalho, respectivamente.

Tabela 7 – Valores de absorção de água por imersão de cada concreto.

Tipo de concreto	Absorção 28 dias			Absorção 91 dias		
	Média (%)	DP	CV	Média (%)	DP	CV
C25-R	4,42	0,22	4,87	3,58	0,17	4,87
C25-OT	3,99	0,06	1,40	3,38	0,30	8,94
C40-R	3,62	0,25	6,96	2,04	0,07	3,45
C40-OT	3,68	0,11	2,96	2,99	0,25	8,40
C50-R	1,58	0,04	2,66	1,42	0,05	3,42
C50-OT	1,55	0,07	4,27	1,33	0,05	3,83
C80-R	1,39	0,05	3,26	1,19	0,04	3,42
C80-OT	1,33	0,05	3,94	1,13	0,04	3,66

DP = Desvio-padrão (%)  
CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 8 – Valores de índice de vazios de cada concreto.

Tipo de concreto	Índice de vazios <sup>28 dias</sup>			Índice de vazios <sup>91 dias</sup>		
	Média (%)	DP	CV	Média (%)	DP	CV
C25-R	10,22	0,35	3,40	8,49	0,39	4,60
C25-OT	9,56	0,11	1,19	8,16	0,63	7,75
C40-R	8,49	0,58	6,79	4,87	0,18	3,67
C40-OT	8,81	0,27	3,02	7,24	0,60	8,30
C50-R	3,83	0,10	2,70	3,46	0,14	3,97
C50-OT	3,79	0,16	4,20	3,26	0,12	3,80
C80-R	3,42	0,10	2,97	2,96	0,10	3,42
C80-OT	3,21	0,12	3,76	2,74	0,10	3,60

DP = Desvio-padrão (%)  
CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Com relação aos ensaios balizadores de durabilidade, absorção de água por imersão e índices de vazios, estes apresentaram boa homogeneidade de resultados indicando que os concretos podem ser considerados duráveis com base nos limites especificados por Helene (1983), *Internacional Tunneling Association* (1993), Levy (2001), Londero (2016) e Lenz (2016). Uma ressalva apenas para o concreto C25-R, que é classificado como normal aos 28 dias de idade, pois ficou um pouco acima do intervalo de excelência, mas adequando-se aos critérios aos 91 dias. Assim, todos os concretos produzidos com relação ao critério de durabilidade podem ser utilizados nas obras correntes de construção civil.

Tais resultados, referentes aos tipos de concreto, apresentam decréscimo com o prolongamento da idade e com a densificação da matriz cimentícia (empacotamento de partículas) do concreto em decorrência das reações de hidratação do cimento ao longo do tempo. O sistema de poros com maior tortuosidade, resultante de um esqueleto granular mais bem empacotado e de microestrutura hidratada refinada, possibilitam mecanismos alternativos que favorecem a durabilidade (REBMANN, 2016).

Vale destacar que o concreto C40-OT apresentou absorção de água e índice de vazios superiores ao concreto de C40-R, aos 28 e 91 dias, o que pode estar relacionado à baixa trabalhabilidade da mistura que acabou prejudicando o adensamento do material. No geral, houve pequena variação dos resultados, com CV inferior a 8,94% nos concretos convencionais, e inferior a 3,97% nos concretos de alta resistência, indicando uma boa homogeneidade das misturas de acordo com o critério de *Chauvenet*, conforme apresentado nos Apêndices B e C do presente trabalho.

De acordo com o teste *t* realizado para comparação entre pares de concreto (referência e otimizado) de mesma classe de resistência, os valores de absorção de água por imersão e de índice de vazios apresentam diferença significativa para o concreto de classe C25 aos 28 dias de idade, enquanto que para os de classe C40 isso é observado aos 91 dias. No caso dos demais concretos, a diferença resultante do teste *t* não é significativa.

As massas específicas das amostras seca, saturada e real estão dispostas na Tabelas 9, 10, 11, respectivamente. Os valores apresentados correspondem à média de três resultados individuais obtidos em cada ensaio, sendo estes resultados individuais, bem como a análise estatística, são apresentados nos Apêndices D, E e F do presente trabalho, respectivamente.

Tabela 9 – Valores de massa específica da amostra seca para cada concreto.

Tipo de concreto	Massa específica da amostra seca <sup>28 dias</sup>			Massa específica da amostra seca <sup>91 dias</sup>		
	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV
C25-R	2,31	0,04	1,52	2,38	0,02	0,78
C25-OT	2,40	0,02	0,63	2,42	0,03	1,22
C40-R	2,34	0,01	0,27	2,39	0,02	0,69
C40-OT	2,40	0,01	0,33	2,42	0,00	0,15
C50-R	2,42	0,02	0,85	2,44	0,02	0,73
C50-OT	2,44	0,00	0,07	2,45	0,00	0,04
C80-R	2,47	0,01	0,29	2,48	0,00	0,06
C80-OT	2,42	0,01	0,22	2,42	0,00	0,10

DP = Desvio-padrão (%)  
CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 10 – Valores de massa específica da amostra saturada para cada concreto.

Tipo de concreto	Massa específica da amostra saturada <sup>28 dias</sup>			Massa específica da amostra saturada <sup>91 dias</sup>		
	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV
C25-R	2,42	0,03	1,31	2,46	0,02	0,73
C25-OT	2,49	0,02	0,61	2,50	0,02	0,94
C40-R	2,43	0,01	0,21	2,44	0,02	0,71
C40-OT	2,48	0,01	0,36	2,49	0,00	0,18
C50-R	2,46	0,02	0,85	2,47	0,02	0,77
C50-OT	2,47	0,00	0,00	2,45	0,00	0,08
C80-R	2,50	0,01	0,25	2,51	0,00	0,07
C80-OT	2,45	0,00	0,17	2,45	0,00	0,08

DP = Desvio-padrão (%)  
CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 11 – Valores de massa específica da amostra real para cada concreto.

Tipo de concreto	Massa específica da amostra real <sup>28 dias</sup>			Massa específica da amostra real <sup>91 dias</sup>		
	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV
C25-R	2,58	0,03	1,13	2,60	0,02	0,78
C25-OT	2,65	0,02	0,64	2,63	0,02	0,59
C40-R	2,56	0,01	0,50	2,52	0,02	0,78
C40-OT	2,63	0,01	0,48	2,61	0,01	0,56
C50-R	2,51	0,02	0,88	2,52	0,02	0,85
C50-OT	2,53	0,00	0,10	2,53	0,00	0,09
C80-R	2,55	0,00	0,19	2,55	0,00	0,12
C80-OT	2,50	0,00	0,13	2,49	0,00	0,09

DP = Desvio-padrão (%)  
CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Os resultados de massa específica no estado endurecido demonstraram as misturas com a estrutura granular modificada pelo conceito de empacotamento de partículas apresentaram massa específica superior à dos concretos de referência, com exceção da classe de concreto C80.

Tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência foi aplicado o test *t*, observando uma variação significativa nos valores das massa real para os concretos de classe C25 aos 28 dias de idade, enquanto que para os concretos de classe C40 e C80, isso é verificado aos 28 e 91 dias. Já o concreto de classe C50 não apresentou variação significativa para a propriedade analisada.

#### 4.6.3 Absorção de água por capilaridade

Os valores de absorção de água por capilaridade, aos 28 e 91 dias de idade, para cada tipo de concreto estão contidos na Tabela 12. Os valores apresentados correspondem à média de três resultados individuais obtidos em cada ensaio feito para o tempo de 72h após início do procedimento. Optou-se por escolher a última leitura (72h) pelo fato de esta ser a mais crítica e o valor de absorção observada apresentar uma tendência de estabilização.

Tabela 12 – Valores de absorção de água por capilaridade para cada tipo de concreto.

Tipo de concreto	Absorção <sup>28 dias</sup>			Absorção <sup>91 dias</sup>				
	h	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV	h	Média (g/cm <sup>3</sup> )	DP	CV
<b>C25 -R</b>	7,06	0,68	0,049	7,19	5,83	0,57	0,095	16,69
<b>C25-OT</b>	5,85	0,77	0,048	6,15	5,67	0,58	0,062	10,74
<b>C40-R</b>	4,69	0,70	0,095	13,53	4,62	0,39	0,040	10,16
<b>C40-OT</b>	5,57	0,58	0,055	9,55	5,12	0,43	0,020	4,65
<b>C50-R</b>	19,82	0,06	0,006	10,27	20,00	0,06	0,005	8,81
<b>C50-OT</b>	20,00	0,04	0,002	4,10	20,00	0,06	0,003	4,30
<b>C80-R</b>	20,00	0,04	0,001	2,06	20,00	0,05	0,009	17,70
<b>C80-OT</b>	20,00	0,04	0,001	3,41	20,00	0,06	0,001	2,06

h = Altura da ascensão capilar (cm)  
DP = Desvio-padrão (g/cm<sup>3</sup>)  
CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

O concreto de alta resistência, por possuir uma matriz mais densa e menos porosa, apresentou valores de absorção por capilaridade menores que os concretos convencionais. Durante os ensaios verificou-se que os concretos de alta resistência (menor o diâmetro dos poros capilares) apresentavam maiores pressões capilares e conseqüentemente, maiores alturas de ascensão da água, porém a quantidade de água absorvida por unidade de área é menor. Observa-se que o valor de absorção de água por capilaridade e altura da ascensão capilar são inversamente proporcionais, entretanto, ambos possuem a tendência de diminuir ao longo do tempo, comportamento verificado de forma mais clara para os concretos convencionais.

Vale destacar que tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência foi aplicado o teste *t*, observando uma variação significativa nos valores de absorção por capilaridade para os concretos de classe C50 aos 28 dias de idade. No caso dos demais concretos, a diferença resultante do teste *t* não é significativa para as idades consideradas, conforme apresentado no Apêndice G do presente trabalho.

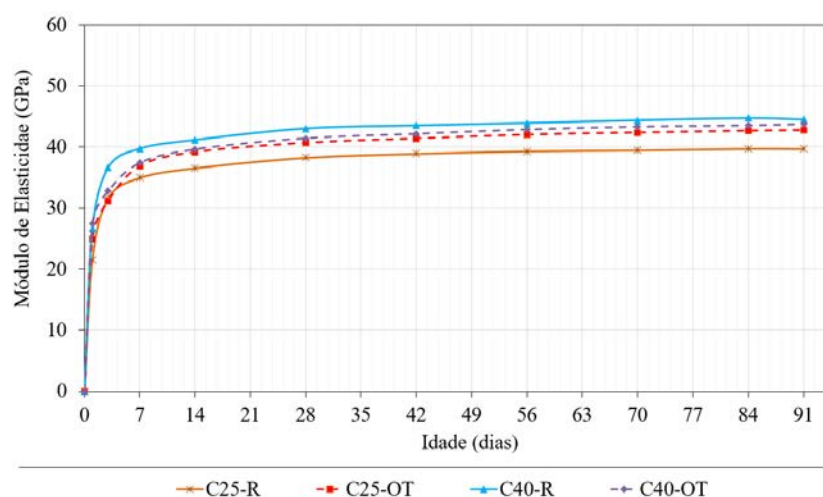
#### 4.6.4 Propriedades dinâmicas

Na literatura são apresentadas diversas equações simplificadoras, como a de Otani e Pereira (2017), para previsão de módulo de elasticidade estático em função do dinâmico. Haach, Juliani e Da Roz (2015) afirmam que a diferença entre o módulo de elasticidade

estático e dinâmico do concreto é de 40% em média, isso para os concretos usuais. Em estudos relacionados à empacotamento de partículas Londero (2016) verificou uma diferença de 52% para esses tipos de concreto.

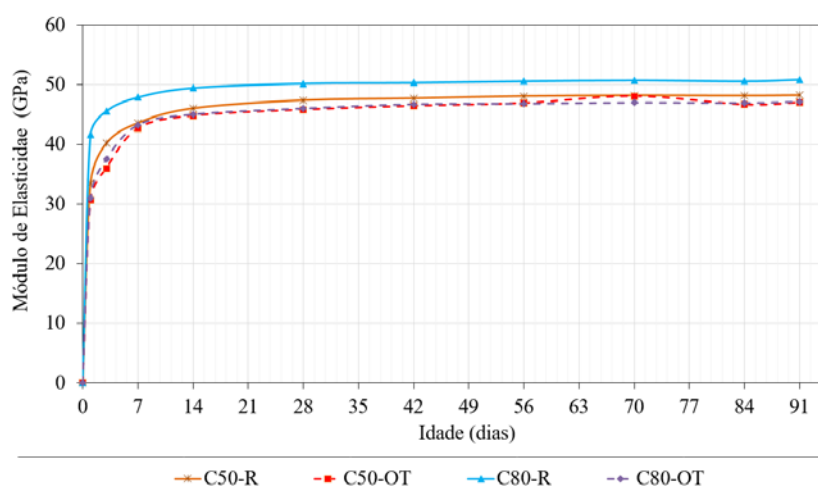
Metha e Monteito (2014) indicam valores de módulo de elasticidade dinâmico cerca de 20%, 30% e 40% superiores ao módulo de elasticidade estático para concretos de alta, média e baixa resistência à compressão, respectivamente. Os concretos desenvolvidos na pesquisa podem ser classificados como de média e alta resistência, dispondo de um módulo de elasticidade dinâmico da ordem de 20% a 30% superior ao módulo de elasticidade estático seguindo essa especificação. Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo para concretos convencionais e de alta resistência estão dispostos nas Figuras 32 e 33, respectivamente.

Figura 32 – Evolução do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos convencionais.



Fonte: Autor (2019).

Figura 33 – Evolução do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos de alta resistência.



Fonte: Autor (2019).

A avaliação do módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo permitiu verificar que a inclinação das curvas para concretos de mesma classe possuem pouca variação entre si apresentando uma sobreposição de curvas, com exceção do C25-R e C80-R que não apresentaram o mesmo comportamento dos demais concretos. A tendência de estabilização da propriedade dinâmica é verificada aos 28 dias de idade, indicando ser possível dispensar a repetição do ensaio nas demais idades posteriores. Com relação aos concretos de alta resistência, em ambas as classes, os concretos dosados com a metodologia tradicional apresentaram módulo de elasticidade dinâmico superior aos traços otimizados.

De acordo com Cavaliere *et al.* (2018) o módulo de elasticidade do concreto está intimamente relacionado ao módulo de elasticidade dos agregados utilizados, principalmente nas primeiras idades que a pasta de cimento apresenta rigidez inferior aos agregados naturais. Os concretos dosados pela metodologia tradicional IPT/EPUSP, em geral, apresentaram maior consumo de agregado graúdo com a finalidade de reduzir o custo final produto, e esse componente é o responsável primordial pela estabilidade dimensional do concreto, apresentando maior módulo de elasticidade dinâmico. Nesse contexto, é justificado o motivo pelo qual os traços otimizados apresentaram módulo de elasticidade dinâmico inferiores as misturas de concreto de referência.

Os parâmetros dinâmicos para cada mistura de concreto estudado são apresentados nas Tabelas 13 a 20. Vale destacar que o módulo de elasticidade flexional ( $E_F$ ) apresentado é referente à média dos valores obtidos nos três modos de vibração (flexional, longitudinal e torcional), e o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_L$ ) é a média relativa aos valores indicados no módulo de vibração longitudinal. Segundo Otani e Pereira (2017) sugere utilizar o módulo de elasticidade longitudinal devido à maior proximidade com o ensaio de compressão, mesma hipótese é aplicada para as análises realizadas posteriormente



Tabela 13 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C25-R.

Parâmetros		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	21,57	31,63	34,96	36,55	38,25	38,90	39,32	39,49	39,71	39,70
	DP	0,72	0,12	0,24	0,09	0,11	0,10	0,20	0,13	0,07	0,13
	CV	3,32	0,38	0,70	0,25	0,29	0,25	0,50	0,34	0,17	0,33
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	21,53	32,17	35,78	37,22	39,61	39,83	40,19	41,14	40,83	40,99
	DP	0,58	0,29	0,61	0,27	0,82	0,49	0,52	0,81	0,30	0,62
	CV	2,70	0,91	1,71	0,74	2,06	1,22	1,30	1,97	0,74	1,52
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	9,03	13,35	14,78	15,51	16,16	16,41	16,56	16,68	16,79	16,80
	DP	0,30	0,17	0,08	0,08	0,13	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06
	CV	3,32	1,24	0,51	0,54	0,78	0,36	0,30	0,30	0,27	0,36
<b>v</b>	Média	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,22
	DP*	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
	CV	0,00	7,77	2,84	5,00	4,76	2,79	2,66	4,76	0,00	2,66

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 14 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C25-OT.

Parâmetros		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	24,97	31,16	36,88	39,16	40,66	41,37	42,02	42,35	42,64	42,74
	DP	1,31	0,20	0,31	0,16	0,10	0,05	0,02	0,04	0,07	0,03
	CV	5,25	0,63	0,83	0,41	0,23	0,11	0,05	0,08	0,15	0,06
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	25,97	33,59	39,21	42,20	43,69	44,55	44,98	45,38	45,74	45,90
	DP	0,33	0,35	0,51	1,06	0,46	0,42	0,33	0,34	0,44	0,63
	CV	1,28	1,05	1,30	2,51	1,05	0,95	0,72	0,76	0,97	1,38
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	10,26	13,19	15,38	16,29	17,06	17,35	17,67	17,78	17,89	17,88
	DP	0,07	0,05	0,02	0,05	0,03	0,00	0,08	0,04	0,03	0,01
	CV	0,65	0,35	0,15	0,29	0,15	0,00	0,46	0,20	0,15	0,06
<b>v</b>	Média	0,28	0,28	0,29	0,30	0,30	0,30	0,27	0,28	0,29	0,30
	DP*	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02
	CV	5,52	7,52	3,45	3,89	3,89	3,89	5,59	2,04	4,03	7,02

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 15 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C40-R.

Parâmetros	Idade (dias)										
	1	3	7	14	28	42	56	70	84	91	
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	26,72	36,65	39,74	41,15	43,03	43,52	43,92	44,37	44,71	44,49
	DP	0,67	0,30	0,54	0,69	0,78	0,36	0,42	0,59	0,67	0,61
	CV	2,50	0,81	1,35	1,68	1,81	0,83	0,97	1,33	1,50	1,36
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	26,46	37,19	40,67	41,87	44,38	45,02	45,52	46,17	46,23	46,67
	DP	0,30	0,79	0,69	0,68	0,86	0,79	0,61	0,94	1,31	1,09
	CV	1,13	2,13	1,69	1,63	1,93	1,76	1,34	2,03	2,83	2,34
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	10,95	15,44	16,79	17,42	18,19	18,41	18,66	18,72	18,88	18,87
	DP	0,02	0,29	0,36	0,36	0,29	0,33	0,35	0,32	0,25	0,24
	CV	0,14	1,85	2,14	2,09	1,58	1,80	1,89	1,72	1,35	1,29
<b>v</b>	Média	0,21	0,20	0,21	0,20	0,21	0,22	0,21	0,22	0,21	0,22
	DP*	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
	CV	2,79	10,58	2,79	2,84	2,79	2,66	2,71	0,00	2,71	4,55

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 16 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C40-OT.

Parâmetros	Idade (dias)										
	1	3	7	14	28	42	56	70	84	91	
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	27,43	32,80	37,38	39,61	41,41	42,14	42,85	43,30	43,51	43,73
	DP	0,23	0,05	0,07	0,18	0,08	0,09	0,19	0,08	0,09	0,09
	CV	0,84	0,14	0,17	0,45	0,20	0,21	0,45	0,18	0,21	0,20
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	28,96	35,09	40,05	42,24	44,34	44,96	45,91	46,03	46,29	46,55
	DP	0,34	0,63	0,44	0,43	0,41	0,59	0,58	0,45	0,44	0,30
	CV	1,18	1,78	1,10	1,01	0,93	1,32	1,27	0,98	0,94	0,63
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	11,70	13,97	16,02	16,82	17,54	17,91	18,40	18,39	18,47	18,52
	DP	0,05	0,04	0,06	0,00	0,06	0,04	0,39	0,01	0,02	0,06
	CV	0,39	0,29	0,38	0,00	0,34	0,24	2,10	0,06	0,11	0,35
<b>v</b>	Média	0,23	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26
	DP*	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02
	CV	9,90	11,70	8,44	6,66	9,56	9,44	8,11	3,85	4,33	6,66

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 17 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C50-R.

Parâmetros		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	33,47	40,13	43,55	46,00	47,36	47,70	48,06	48,18	48,14	48,21
	DP	0,61	0,55	0,71	0,77	0,80	0,94	0,90	0,80	0,88	0,83
	CV	1,83	1,38	1,63	1,67	1,70	1,97	1,88	1,66	1,82	1,73
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	34,42	41,59	45,50	48,14	49,22	50,30	50,88	50,68	50,44	51,11
	DP	1,08	1,61	1,37	0,94	0,96	1,22	1,18	1,42	1,32	1,35
	CV	3,13	3,87	3,02	1,96	1,95	2,43	2,31	2,80	2,62	2,64
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	14,31	17,22	18,80	19,92	20,47	20,72	20,87	20,90	20,85	20,97
	DP	0,28	0,25	0,37	0,37	0,39	0,46	0,42	0,42	0,43	0,40
	CV	1,93	1,43	1,95	1,88	1,89	2,23	2,03	2,02	2,04	1,89
<b>v</b>	Média	0,19	0,22	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20
	DP*	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
	CV	6,19	23,62	5,00	2,94	2,94	5,87	5,00	2,84	2,79	0,00

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 18 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C50-OT.

Parâmetros		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	30,64	35,96	42,66	44,78	45,80	46,43	46,90	48,07	46,65	47,00
	DP	1,91	0,23	0,41	0,10	0,34	0,22	0,36	2,28	0,30	0,21
	CV	6,25	0,63	0,97	0,21	0,75	0,48	0,77	4,75	0,64	0,45
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	30,87	37,76	45,01	47,50	49,53	49,95	50,33	51,03	50,51	50,38
	DP	0,46	0,14	0,34	0,57	1,04	1,00	1,01	1,51	0,79	0,54
	CV	1,50	0,37	0,75	1,21	2,10	2,01	2,00	2,96	1,57	1,07
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	12,37	15,21	18,17	19,05	19,61	19,91	20,15	19,10	20,13	20,19
	DP	0,05	0,04	0,21	0,14	0,06	0,08	0,12	1,63	0,07	0,06
	CV	0,43	0,27	1,15	0,73	0,32	0,38	0,60	8,55	0,33	0,29
<b>v</b>	Média	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24	0,23	0,28	0,25	0,24
	DP*	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01
	CV	2,44	4,17	4,17	4,00	2,44	2,37	6,55	15,57	4,68	2,37

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 19 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C80-R.

Parâmetros		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	41,59	45,55	47,87	49,44	50,20	50,33	50,58	50,73	50,57	50,84
	DP	0,63	0,57	0,58	0,56	0,49	0,57	0,48	0,48	0,52	0,51
	CV	1,52	1,25	1,22	1,13	0,97	1,13	0,95	0,95	1,04	1,00
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	42,47	46,70	49,48	50,60	52,08	51,87	52,49	52,85	52,49	52,96
	DP	1,15	1,09	1,47	1,07	1,72	0,93	1,02	1,37	1,15	1,22
	CV	2,70	2,33	2,97	2,12	3,30	1,79	1,95	2,59	2,20	2,30
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	17,66	19,37	20,37	21,08	21,50	21,59	21,68	21,67	21,62	21,78
	DP	0,31	0,26	0,32	0,27	0,23	0,24	0,28	0,28	0,34	0,22
	CV	1,77	1,33	1,59	1,27	1,08	1,12	1,28	1,27	1,57	1,02
<b>v</b>	Média	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	DP*	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	CV	5,26	2,99	2,94	7,51	5,00	5,00	2,94	5,87	5,00	5,00

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 20 – Resultados dos parâmetros dinâmicos para o concreto C80-OT.

Parâmetros		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
<b>E<sub>L</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	31,03	37,48	43,23	45,00	46,00	46,71	46,81	46,97	46,92	47,13
	DP	0,30	0,19	0,12	0,25	0,12	0,16	0,08	0,37	0,26	0,20
	CV	0,96	0,50	0,28	0,55	0,26	0,33	0,17	0,78	0,54	0,43
<b>E<sub>F</sub></b> <b>(GPa)</b>	Média	32,45	39,33	45,99	48,26	49,21	49,74	50,28	50,23	50,30	50,42
	DP	0,22	0,36	0,45	0,59	0,78	0,59	0,42	0,26	0,37	0,42
	CV	0,68	0,92	0,97	1,23	1,59	1,19	0,84	0,51	0,74	0,84
<b>G</b> <b>(GPa)</b>	Média	13,02	15,83	18,45	19,15	19,63	19,92	20,05	20,11	20,20	20,23
	DP	0,06	0,10	0,06	0,10	0,10	0,11	0,13	0,11	0,16	0,15
	CV	0,47	0,61	0,30	0,50	0,53	0,53	0,62	0,55	0,77	0,72
<b>v</b>	Média	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	DP*	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	CV	2,37	2,37	4,75	2,28	4,17	2,34	4,00	2,34	2,34	2,34

DP = Desvio-padrão (GPa)

DP\* = Desvio-padrão (adimensional)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Callister (2012) define o coeficiente de Poisson como a razão entre as deformações transversal e longitudinal quando um determinado corpo de prova é submetido a uma carga

axial. Metha e Monteiro (2014) estabelecem um intervalo entre 0,15 e 0,20 para o valor de coeficiente de Poisson dos concretos, enquanto a NBR 6118:2014 indica um valor igual a 0,20 para tensões de compressão menores que 50% da resistência à compressão para utilização em projetos (ABNT, 2014).

Os valores obtidos para os coeficientes de Poisson para os concretos de referência enquadram-se em todas as idades no intervalo proposto NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) e Metha e Monteiro (2014), diferentemente dos concretos otimizados que apresentaram valores superiores, indicando a tendência de serem mais deformáveis. É importante lembrar que o programa Sonelastic faz a análise desse parâmetro no campo das pequenas deformações considerando o concreto como um material homogêneo e isotrópico.

Sabendo-se de todas as peculiaridades relacionadas às alterações da composição das misturas quando da otimização com base no conceito de empacotamento de partículas, era prevista a redução do módulo de elasticidade dos concretos otimizados em relação ao concreto de referência, com exceção da classe de concreto C25 que o fortalecimento da matriz cimentícia favoreceu um ganho de rigidez. Lenz (2016) produziu concretos convencionais, com modificação do esqueleto granular, com classe de resistência C25 e C40, apresentando módulos de elasticidade dinâmico de 46,8 GPa e 47,6 GPa aos 28 dias, respectivamente, apresentando maior rigidez que os concretos convencionais elaborados no trabalho.

Os parâmetros dinâmicos determinados foram avaliados estatisticamente aos 28 e 91 dias de idade. De acordo com teste *t*, os valores de módulo de elasticidade dinâmico apresentam diferença significativa para todas as classes de concreto avaliadas entre si aos 28 dias, e também para as classes C25 e C80 aos 91 dias. Já o módulo de cisalhamento dinâmico e coeficiente de Poisson apresentaram diferença significativa em todas as classes de concretos, com exceção para o módulo de cisalhamento aos 91 dias de idade para a classe C40. De forma geral, a técnica de empacotamento de partículas não apresentou incremento das propriedades dinâmicas (módulo de elasticidade e de cisalhamento dinâmicos). Os resultados estatísticos dos parâmetros dinâmicos encontram-se dispostos no Apêndice I.

#### **4.6.5 Velocidade do pulso ultrassônico**

O ensaio de velocidade de propagação de pulso ultrassônico foi realizado em diversas idades para o período de 1 a 91 dias, e os resultados da média das velocidades obtidas nas direções longitudinais e transversais, para os 3 corpos de prova, para cada tipo de concreto

encontram-se nas Tabelas de 21 a 28. Todas as leituras foram realizadas com os corpos de prova na condição saturada superfície seca.

Tabela 21 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C25-R ao longo do tempo.

		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
Direção		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	3688,37	4190,84	4391,42	4442,10	4551,10	4526,00	4546,29	4605,92	4595,17	4656,09
	DP	28,41	22,15	35,11	11,60	29,53	11,84	5,72	34,32	6,23	56,18
	CV	0,77	0,53	0,80	0,26	0,65	0,26	0,13	0,75	0,14	1,21
Transversal	Média	3851,79	4373,98	4557,85	4636,68	4656,21	4715,65	4701,44	4813,39	4681,74	4727,73
	DP	77,39	72,25	77,68	76,56	40,53	32,63	39,99	63,35	24,87	49,17
	CV	2,01	1,65	1,70	1,65	0,87	0,69	0,85	1,32	0,53	1,04

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 22 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C25-OT ao longo do tempo.

		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
Direção		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	3656,85	4096,52	4399,19	4466,23	4596,79	4648,30	4682,24	4690,21	4682,26	4661,29
	DP	7,65	41,97	26,31	23,20	23,01	12,46	4,30	22,41	15,12	10,01
	CV	0,21	1,02	0,60	0,52	0,50	0,27	0,09	0,48	0,32	0,21
Transversal	Média	3823,42	4280,75	4505,64	4629,20	4699,92	4732,03	4750,45	4752,92	4746,04	4779,25
	DP	28,25	46,78	40,07	17,48	35,80	35,09	27,89	22,22	38,09	32,66
	CV	0,74	1,09	0,89	0,38	0,76	0,74	0,59	0,47	0,80	0,68

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 23 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C40-R ao longo do tempo.

		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
Direção		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	4019,34	4490,78	4610,35	4672,79	4740,35	4773,24	4759,40	4824,10	4809,85	4867,33
	DP	16,16	15,40	21,65	36,12	28,01	43,97	39,42	10,20	4,27	17,87
	CV	0,40	0,34	0,47	0,77	0,59	0,92	0,83	0,21	0,09	0,37
Transversal	Média	4242,97	4682,16	4808,90	4858,13	4881,94	4974,23	4938,03	5030,46	4962,82	5044,43
	DP	23,36	13,52	70,59	25,51	37,35	38,80	15,81	45,56	48,45	33,93
	CV	0,55	0,29	1,47	0,53	0,77	0,78	0,32	0,91	0,98	0,67

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 24 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C40-OT ao longo do tempo.

Direção		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	3884,11	4205,49	4473,20	4571,11	4673,75	4731,55	4762,63	4759,67	4767,42	4752,69
	DP	8,64	15,14	28,77	14,85	29,15	31,58	29,12	15,22	39,43	32,13
	CV	0,22	0,36	0,64	0,32	0,62	0,67	0,61	0,32	0,83	0,68
Transversal	Média	4037,08	4349,64	4531,74	4661,00	4735,52	4788,40	4794,68	4787,34	4817,68	4834,60
	DP	54,25	29,65	57,08	37,22	35,39	32,17	47,14	27,95	38,80	18,80
	CV	1,34	0,68	1,26	0,80	0,75	0,67	0,98	0,58	0,81	0,39

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 25 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C50-R ao longo do tempo.

Direção		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	4232,02	4567,09	4718,09	4769,80	4811,62	4847,35	4880,42	4891,63	4869,21	4906,74
	DP	26,86	18,42	22,52	10,87	52,43	16,79	32,89	21,42	14,81	46,26
	CV	0,63	0,40	0,48	0,23	1,09	0,35	0,67	0,44	0,30	0,94
Transversal	Média	4422,47	4744,06	4889,50	4902,22	4971,03	4983,67	4977,59	5044,07	5103,16	5024,54
	DP	44,35	40,23	48,09	43,41	47,56	45,77	44,62	51,69	64,81	63,28
	CV	1,00	0,85	0,98	0,89	0,96	0,92	0,90	1,02	1,27	1,26

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 26 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C50-OT ao longo do tempo.

Direção		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	4006,36	4319,14	4620,15	4683,74	4739,73	4777,48	4774,93	4793,39	4813,53	4804,94
	DP	47,49	26,03	49,95	36,41	26,09	27,78	31,47	31,57	30,51	35,35
	CV	1,19	0,60	1,08	0,78	0,55	0,58	0,66	0,66	0,63	0,74
Transversal	Média	4140,87	4360,13	4604,97	4685,01	4788,45	4793,46	4823,67	4824,24	4856,62	4835,63
	DP	40,95	24,31	55,75	55,60	37,98	28,40	6,27	19,12	33,72	16,47
	CV	0,99	0,56	1,21	1,19	0,79	0,59	0,13	0,40	0,69	0,34

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 27 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C80-R ao longo do tempo.

Direção		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	4646,12	4820,38	4899,57	4909,17	4925,63	4965,27	4987,21	5015,08	5002,67	5012,20
	DP	4,24	12,12	8,02	33,34	9,23	13,87	6,57	16,79	2,08	6,63
	CV	0,09	0,25	0,16	0,68	0,19	0,28	0,13	0,33	0,04	0,13
Transversal	Média	4826,58	5033,20	5080,24	5038,69	5096,84	5130,08	5140,74	5198,75	5194,70	5167,75
	DP	48,14	39,12	25,49	22,00	5,20	30,28	42,62	19,47	38,78	26,38
	CV	1,00	0,78	0,50	0,44	0,10	0,59	0,83	0,37	0,75	0,51

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Tabela 28 – Velocidade de pulso ultrassônico no concreto C80-OT ao longo do tempo.

Direção		Velocidade de Pulso Ultrassônico (m/s)									
		Idade (dias)									
		1	3	7	14	28	42	56	70	84	91
Longitudinal	Média	4106,78	4403,42	4677,68	4710,48	4750,39	4803,78	4813,57	4816,34	4849,51	4847,63
	DP	27,18	22,59	28,37	11,10	26,75	25,12	9,37	6,97	5,67	7,06
	CV	0,66	0,51	0,61	0,24	0,56	0,52	0,19	0,14	0,12	0,15
Transversal	Média	4207,24	4431,86	4659,06	4700,46	4812,63	4859,11	4851,23	4864,39	4881,34	4893,61
	DP	19,95	27,00	37,06	40,50	46,86	13,65	2,72	20,08	28,89	36,34
	CV	0,47	0,61	0,80	0,86	0,97	0,28	0,06	0,41	0,59	0,74

DP = Desvio-padrão (m/s)

CV = Coeficiente de variação (%)

Fonte: Autor (2019).

Analisando os valores de velocidade de pulso ultrassônico em cada tipo de concreto é verificada a tendência dos valores de velocidades transversais serem superiores as velocidades longitudinais, sendo os valores estatisticamente diferentes em todas as idades de acordo com o teste *t*. Entende-se que esse comportamento é explicado pela maior heterogeneidade em decorrência do maior percurso na leitura dos parâmetros na amostra considerando a análise da direção longitudinal, de forma que a ocorrência de falhas nessa direção tende a ser maior.

Vale destacar, que as velocidades observadas tendem a ser maiores nas medições de menor comprimento. Entretanto, como foi verificada a diferença significativa entre as velocidades das leituras longitudinais e transversais, optou-se por utilizar a velocidade longitudinal para os estudos comparativos, visto que é mais representativa por ser realizada em uma faixa maior do material.



Hernández *et al.* (2000) afirmam que quanto menor o volume de vazios no interior do concreto, maior é a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, pois a velocidade de propagação no ar é menor do que no sólido. Inicialmente, esperava-se que os concretos com estrutura granular modificada pelo empacotamento de partículas, por possuírem partículas mais bem acomodadas, apresentariam uma maior velocidade de propagação em relação aos traços de referência. Entretanto, a classe de concreto C25 foi a única que atendeu essa hipótese inicial, enquanto as demais classes obtiveram velocidades de propagação no concreto otimizado iguais ou inferiores aos concretos de referência em todas as idades de análise.

Segundo Chung e Law (1985) os agregados graúdos e miúdos tem módulo de elasticidade maior, e por consequência, maior velocidade de propagação da onda de ultrassom do que a pasta de cimento. Sabendo-se que os concretos de referência possuem um maior teor de agregado graúdo em relação aos traços otimizado. Dessa forma, acredita-se que o pulso ultrassônico, ao invés de contornar o agregado na mistura de concreto, passou pelo mesmo aumentando a velocidade de propagação, invalidando a hipótese inicial que os concretos otimizado apresentariam uma maior velocidade de propagação.

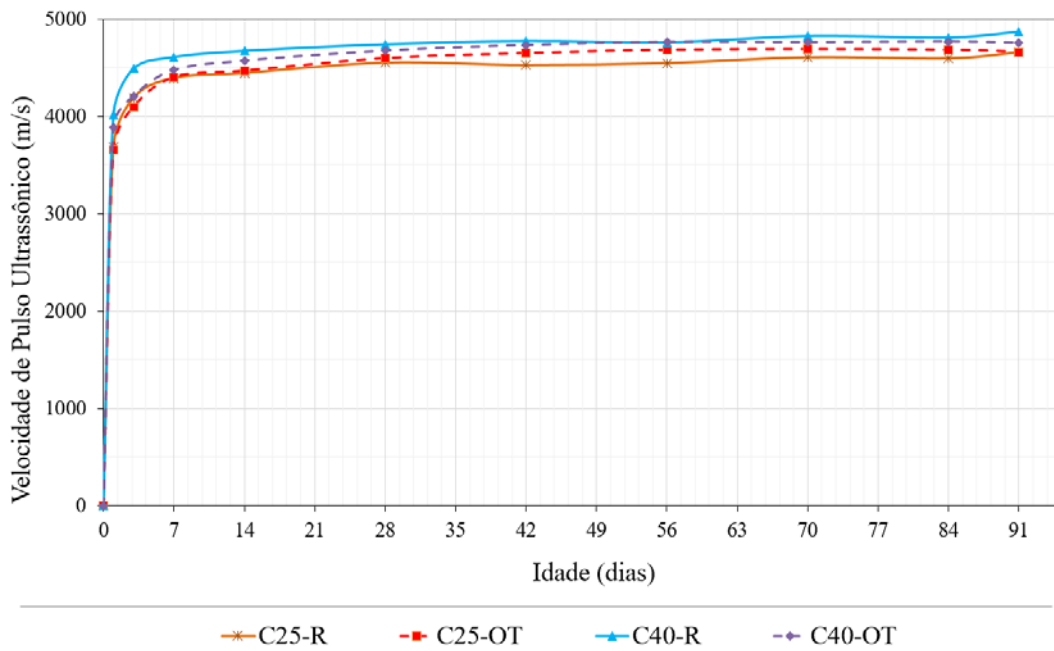
O teste *t*, apresentado em Apêndice I, foi aplicado nas duas idades de referência (28 e 91 dias) para cada classe de concreto. Constatou-se que os valores de velocidade de pulso ultrassônico possuem diferença significativa para concretos de classe C40 e C80 aos 28 e 91 dias, C50 aos 91 dias de idade. No caso dos demais concretos, a diferença resultante do teste *t* não é significativa. Vale destacar, que o ensaio de VPU mostrou-se expressivo apenas para comparar de forma indireta o mesmo tipo de concreto, não sendo indicado para a análise de concretos diferentes visto que possuem diversos fatos que interferem na medição, em especial, o teor de agregado graúdo presente na mistura, conforme observado no presente trabalho.

Naik, Malhotra e Popovics (2004) apresentam uma relação geral classificando a qualidade do concreto como muito boa, média e muito ruim para uma velocidade do pulso ultrassônico de 5000 m/s, 4000 m/s e 3000 m/s, respectivamente. Assim, os valores da velocidade média do pulso ultrassônico foram superiores a 4500 m/s, aos 28 e 91 dias, para todos os concretos, permitindo classificá-los como de média a boa qualidade ou de excelente qualidade conforme estabelecido por Cánovas (1998) e Saint-Pierre *et al.* (2016). De maneira geral, Feldman (1977) afirma que velocidades de onda mais altas são um indicativo de boa qualidade do concreto.

As Figuras 34 e 35 apresentam a evolução da velocidade do pulso ultrassônico para as classes de concretos convencionais e de alta resistência, respectivamente. É perceptível o

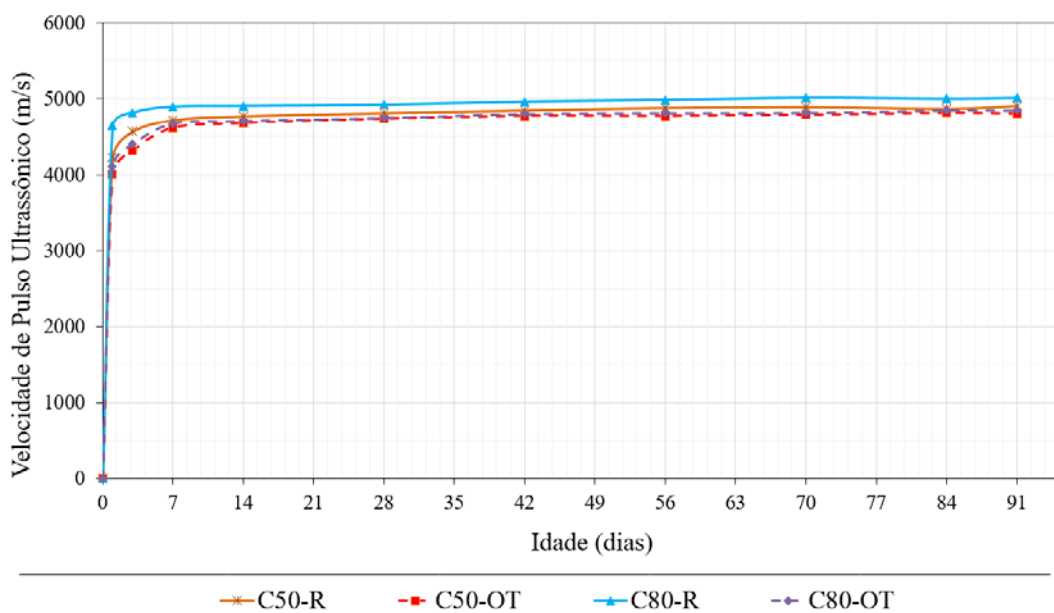
crescimento da velocidade nas primeiras idades, em decorrência das reações de hidratação do cimento. Verifica-se a tendência de estabilização dos valores da velocidade com a aproximação da idade de 28 dias para os concretos convencionais, e 7 dias para os concretos de alta resistência.

Figura 34 – Velocidade de pulso ultrassônico para classe de concretos convencionais.



Fonte: Autor (2019).

Figura 35 – Velocidade de pulso ultrassônico para classe de concretos otimizados.



Fonte: Autor (2019).

A seguir, estão dispostos nas Figuras 36 a 43 os gráficos que correlacionam os módulos de elasticidade e de cisalhamento dinâmicos, a resistência média à compressão e a velocidade do pulso ultrassônico em todas as idades de ensaio para cada tipo de concreto analisado.

Figura 36 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C25-R.

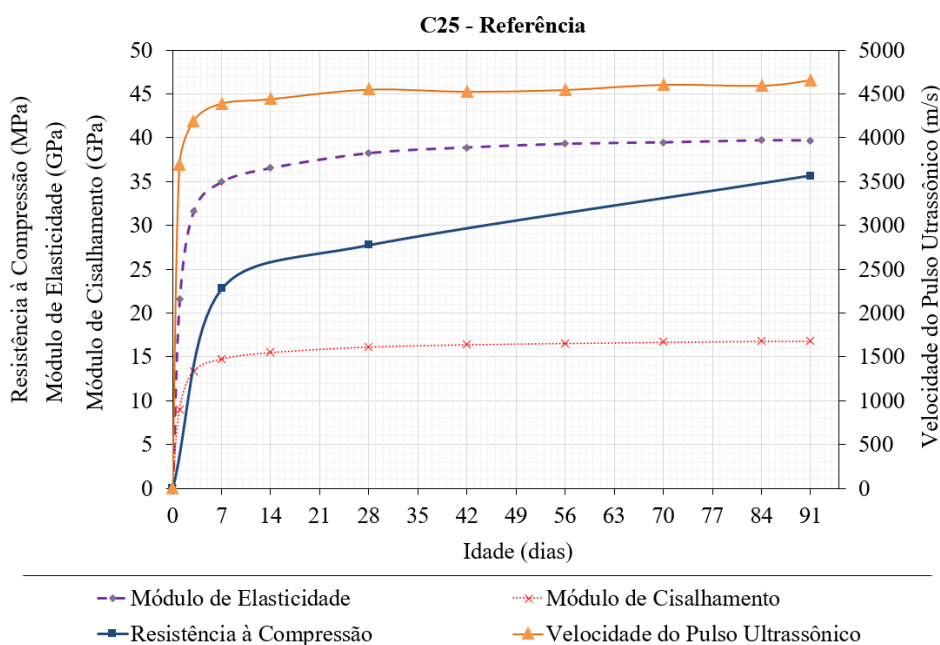


Figura 37 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C25-OT.

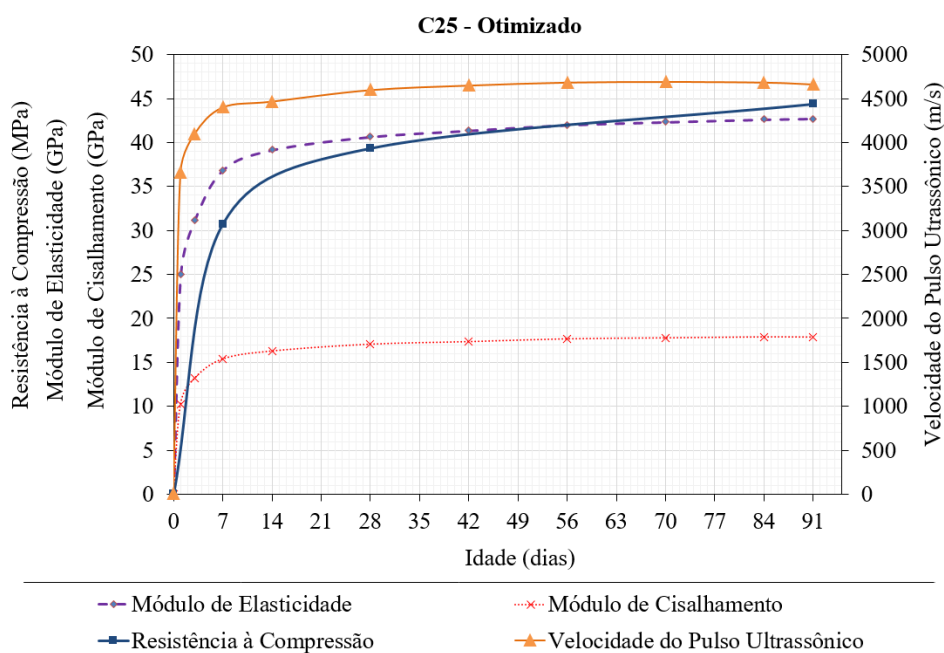
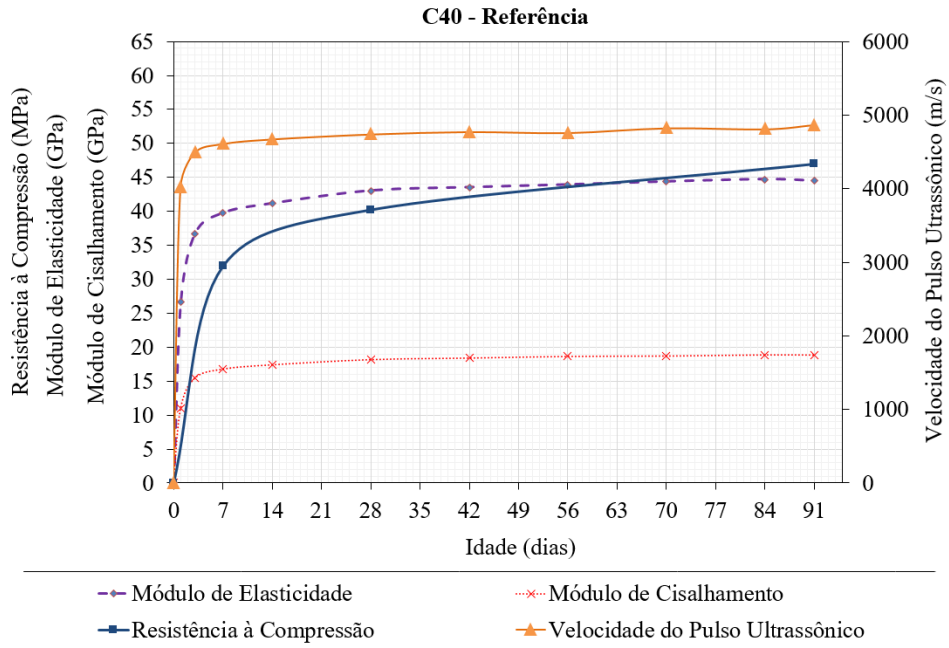
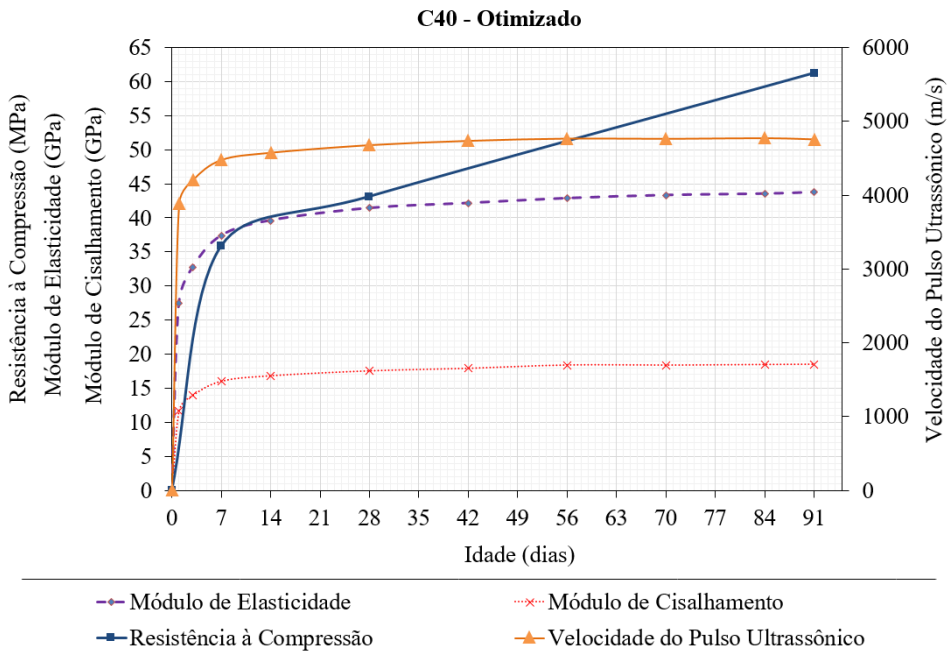


Figura 38 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C40-R.



Fonte: Autor (2019).

Figura 39 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C40-OT.



Fonte: Autor (2019).

Figura 40 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C50-R.

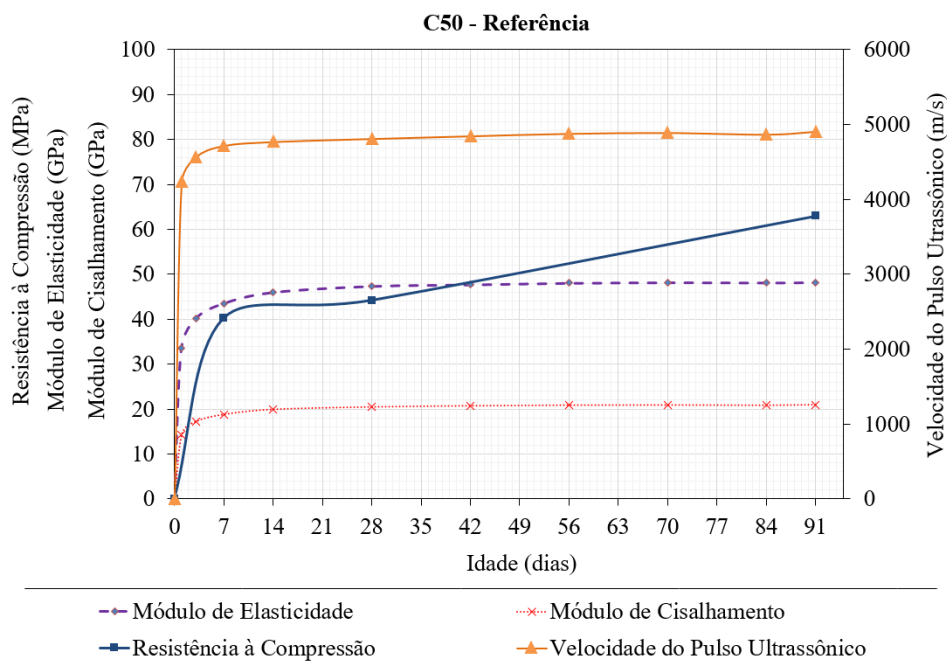


Figura 41 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C50-OT.

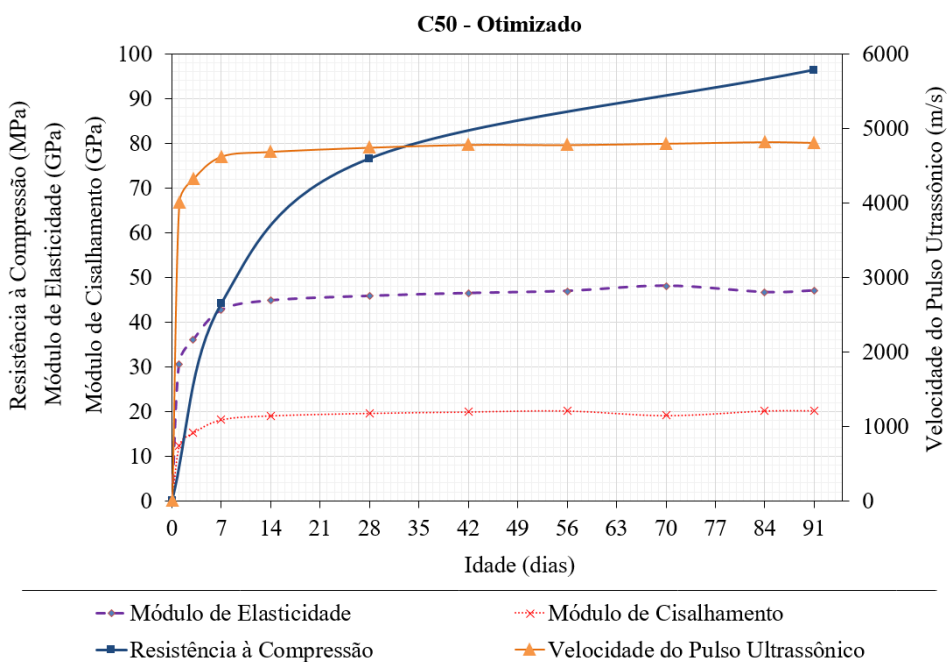
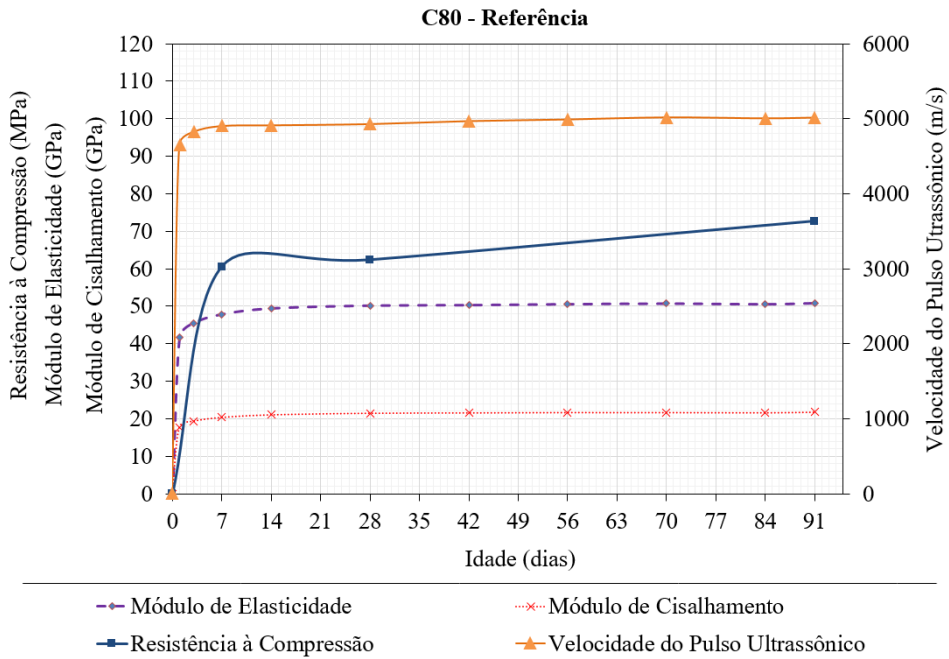
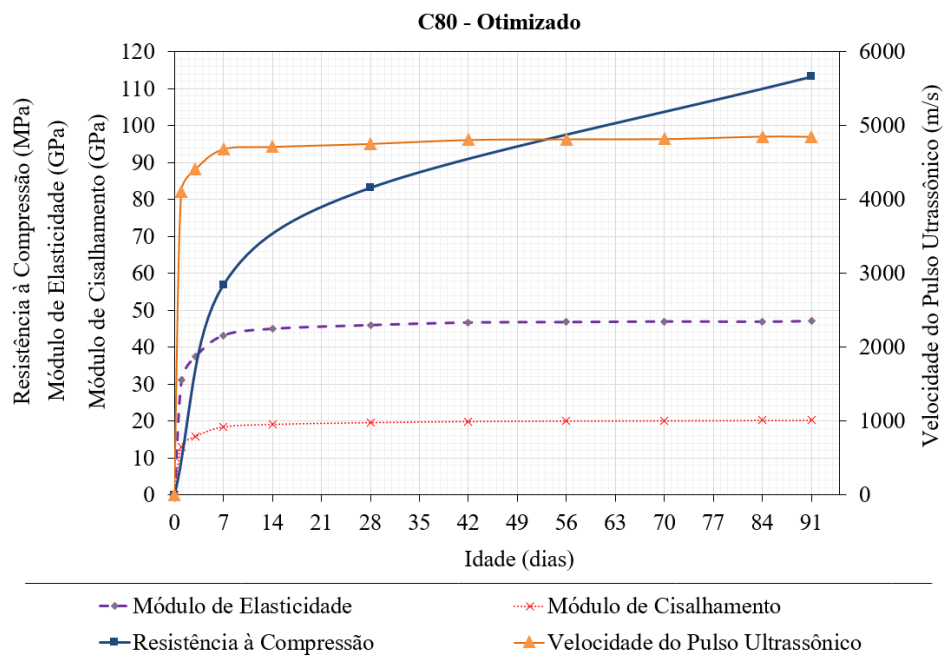


Figura 42 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C80-R.



Fonte: Autor (2019).

Figura 43 – Evolução dos parâmetros físicos e mecânicos para a classe de convencional C80-OT.



Fonte: Autor (2019).

Os gráficos retratam a tendência de as curvas de velocidade apresentarem a mesma configuração observada nos módulos de elasticidade e cisalhamento dinâmicos. Esse comportamento de estabilização dos valores de velocidade ultrassônica e módulos dinâmicos é verificado de forma mais acentuada nos concretos de referência. Por exemplo, o concreto C80-R atinge sua plenitude com a aproximação da idade de 7 dias, enquanto mesmo comportamento é verificado no concreto C80-OT aos 14 dias de idade.

Isso ocorre porque, conforme ASTM C 597:2016 (ASTM, 2016), a velocidade do pulso ultrassônico é proporcional ao valor do módulo de elasticidade. Por outro lado, para as idades analisadas, a resistência média à compressão possui uma tendência de crescimento, em especial para os concretos otimizados, o que indica que as propriedades dinâmicas e velocidade ultrassônica não depende preponderantemente dessa propriedade mecânica.

Outra análise de interesse é referente às curvas dos módulos dinâmicos. Como apresentado anteriormente, o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento são diretamente proporcionais e dependem do valor do coeficiente de Poisson. Isso faz com que as curvas dos módulos dinâmicos e velocidade ultrassônica apresentem um crescimento para as primeiras idades, enquanto que, após os 14 dias as inclinações são praticamente idênticas.

#### 4.7 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DOS CONCRETOS

A otimização de dosagem utilizando o conceito de empacotamento de partículas modificou os parâmetros inicialmente pré-estabelecidos em termos de composição das misturas. Apenas a relação água/materiais secos manteve-se constante. Dessa forma, a análise das propriedades mecânicas isoladamente não é suficiente para avaliar o desempenho ambiental dos concretos elaborados na pesquisa, sendo necessário utilizar a eficiência no uso dos ligantes para cada classe de concreto aos 7, 28 e 91 dias de idade.

Os valores de índice de ligantes foi tratado de duas formas distintas no trabalho considerando: (i) o consumo de ligantes apenas com a parcela de cimento, e (ii) o consumo de ligantes como a resultante da parcela de cimento com as adições minerais (sílica ativa). Na Tabela 29 são apresentados os valores de índice de intensidade de ligantes correspondente a cada tipo de concreto considerando apenas o cimento como ligante ( $IL_c$ ).

Tabela 29 – Valores de  $IL_c$  para cada tipo de concreto.

$IL_c$ ( $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$ )			
Tipo de concreto	7 dias	28 dias	91 dias
C25 - R	14,58	11,97	9,31
C25 - OT	11,86	9,27	8,22
C40 - R	14,21	11,28	9,66
C40 - OT	12,26	10,19	7,18
C50 - R	9,33	8,48	5,96
C50 - OT	7,93	4,57	3,63
C80 - R	10,02	9,74	8,36
C80 - OT	7,38	5,05	3,71

Fonte: Autor (2019).

Damineli (2013) indica que no mercado brasileiro os concretos dosados em central com resistência à compressão abaixo de 40 MPa (grande parcela de concretos de mercado) possuem  $IL$  entre 7 e 14  $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$  para idade de referência de 28 dias. De fato, os traços de concretos convencionais elaborados na pesquisa (referência e otimizados) se enquadram dentro desse intervalo. Um dado que chama atenção é a redução entre 22% e 26% do índice de ligantes dos concretos convencionais otimizados em relação aos de referência aos 28 e 91 dias para classe de concreto C25 e C40. A redução do índice de ligantes com o tempo apresentou-se de forma mais expressiva nos concretos C40-OT e C50-R que tiveram uma redução de 30 % aos 91 dias em relação à idade de referência, respectivamente.

Tratando-se da classe de concretos de alta resistência percebe-se uma redução em torno de 48% no índice de ligantes aos 28 dias para as misturas que utilizaram a técnica de empacotamento de partículas em relação aos concretos de referência.

Um concreto de alta resistência dosado por Oliveira *et al.* (2018) aplicando a técnica de empacotamento de partículas atingiu um índice de intensidade de ligantes de 4,94  $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$ , enquanto que a mistura de referência apresentava um índice de 7,29  $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$  resultado similar aos desenvolvidos na presente pesquisa para essa modalidade de concreto.

Os concretos convencionais e de alta resistência otimizados que contém consumo de cimento reduzido obtiveram valores de resistência média à compressão relativamente altos, se comparados com os obtidos pela formulação de tradicional. Isso sugere que a estratégia de empacotamento de partículas ajudaria a compensar a falta de ligantes e atingindo resistências mais elevadas. Damineli *et al.* (2010) preveem que com índices de ligantes abaixo de 5  $kg.m^{-3}$



$^3.\text{MPa}^{-1}$  sejam possíveis aplicações práticas em concretos com resistência à compressão abaixo de 50 MPa.

A Tabela 30 apresenta os valores de índice de intensidade de ligantes correspondentes a cada tipo de concreto considerando as parcelas do cimento e de adições minerais como ligante ( $IL_{ag}$ ).

Tabela 30 – Valores de  $IL_{ag}$  para cada tipo de concreto.

$IL_{ag} \text{ (kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}\text{)}$			
Tipo de concreto	7 dias	28 dias	91 dias
C25 - R	14,58	11,97	9,31
C25 - OT	11,86	9,27	8,22
C40 - R	14,21	11,28	9,66
C40 - OT	12,26	10,19	7,18
C50 - R	10,26	9,33	6,56
C50 - OT	12,84	7,41	5,88
C80 -R	11,03	10,71	9,19
C80 - OT	12,70	8,69	6,39

Fonte: Autor (2019).

O índice de intensidade de ligantes considerando a sílica ativa também como um ligante não alterou os valores para concretos convencionais, visto que não empregou adição mineral para essa modalidade de concretos. Com relação aos concretos de alta resistência foi verificada uma redução do índice de ligantes, mesmo com o elevado consumo de sílica, entre 18,82% e 20,64% aos 28 dias de idade, porcentagem menor se comparada com a Tabela 29, mas representa uma redução considerável desse parâmetro ambiental ao utilizar a técnica do empacotamento de partículas.

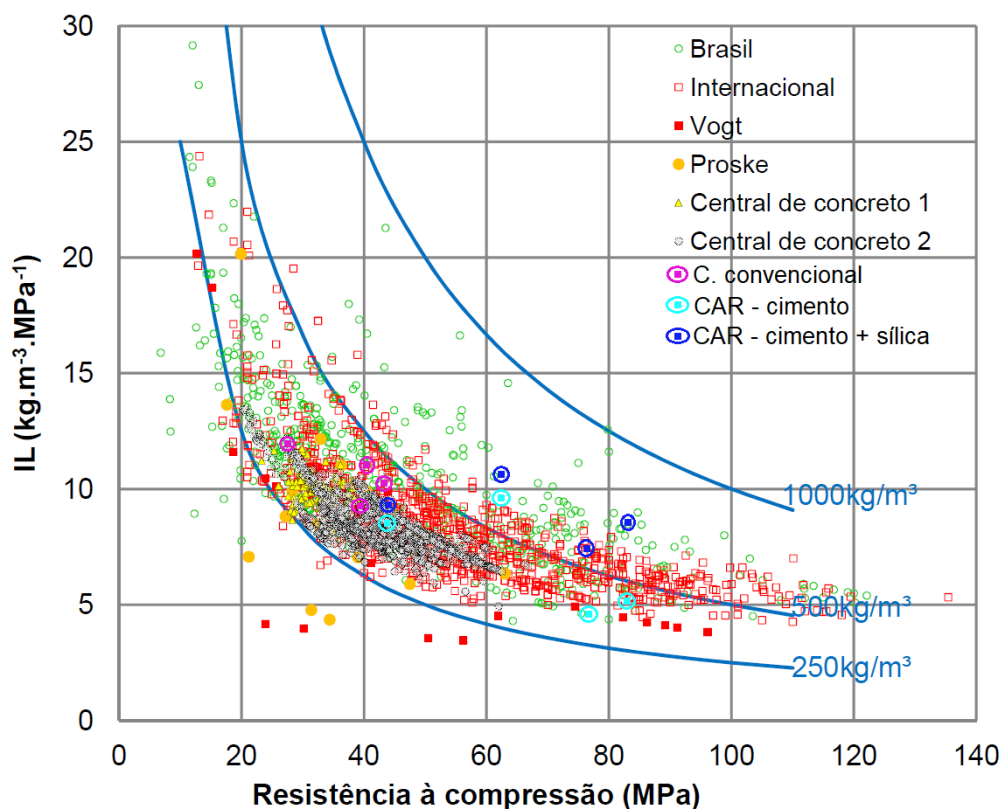
Conforme visto nas Tabelas 29 e 30 os valores de índice de ligantes possuem uma redução entre os 28 e 91 dias de idade. Acredita-se que o efeito do empacotamento pode proporcionar uma maior eficiência além da idade normalmente considerada de referência (28 dias) pelo fato de ter a tendência de ganho de resistência mecânica após essa idade. Com relação aos valores de índice de ligantes serem maiores em concretos convencionais otimizados em relação aos de alta resistência, este resultado já era esperado.

À medida que o valor do coeficiente de distribuição ( $q$ ) diminui, há a tendência de aumento da quantidade de finos como os finos são cimento e sílica. Como o valor de “ $q$ ” é o mesmo para os traços de referência e otimizados, houve uma adequação da curva pelo ajuste das proporções dos materiais e consideração de outros que favoreceram o empacotamento da mistura e um melhor desempenho mecânico. Assim, reduzindo ou mesmo mantendo o consumo de aglomerantes, como a resistência à compressão aumentou, o índice de ligantes foi menor para os concretos otimizados. Ao longo do tempo, as reações de hidratação vão desenvolvendo, a reação pozolânica é potencializada, favorecendo ainda mais o desempenho mecânico.

Nos concretos de alta resistência otimizados a sílica foi utilizada para preencher o intervalo de partículas finas, além de atribuir com efeito pozolânico na mistura, que refletiu no acréscimo de resistência mecânica e redução do consumo de ligante, resultando no decréscimo mais acentuado do índice de ligante desses concretos. Enquanto isso, nos concretos convencionais otimizados optou-se por não utilizar nenhum material com granulometria abaixo do cimento, como é feito na prática, o que prejudicou a eficiência do empacotamento nesses concretos, não se obtendo o mesmo desempenho dos concretos de alta resistência.

Damineli *et al.* (2010) fizeram um levantamento e apresentaram valores de intensidade de ligantes para diversos tipos de concreto de acordo com a resistência à compressão variando de 4,3 a 29  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ , sendo que a maior parte dos concretos se encontra entre 5 e 15  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ . Nesse contexto, a Figura 44 apresenta o gráfico “resistência à compressão *versus* IL”, com inserção dos dados dos concretos executados experimentalmente (laboratório) neste trabalho pesquisa (C, convencional, CAD – cimento e CAD cimento + sílica) com a finalidade de verificar a acurácia dos resultados em relação aos dados brasileiros e internacionais.

Figura 44 – Gráfico “resistência à compressão *versus* IL” com a inserção dos dados experimentais.



Fonte: Adaptado de Damineli (2013).

Os concretos convencionais de referência se enquadram nas faixas de valores encontrados para concretos elaborados no Brasil e com resistência à compressão entre 25 MPa e 40 MPa como mostra a Figura 43. Nota-se que os traços C25-OT e C40-OT apresentam valores de IL menores que os encontrados para os concretos elaborados no Brasil com a mesma faixa de resistência à compressão.

O índice de intensidade de ligantes obtido para os concretos de alta resistência de referência são maiores que os determinados para concretos elaborados no Brasil com a mesma faixa de resistência à compressão. Isso é justificado pela estagnação da resistência à compressão aos 7 dias de idade, que impediu o ganho de resistência esperado para o concreto em idades posteriores, afetando diretamente no parâmetro ambiental desse concreto.

Percebe-se que a aplicação do conceito de empacotamento de partículas nos concretos de alta resistência executados tornou possível obter concretos com IL igual ou inferior a  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , quando considerado apenas o cimento como ligante. Damineli (2013) e Rebmann (2016) afirmam que para concretos com mais de 50 MPa, o valor mínimo de índice de ligantes é de  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , com casos isolados de valores próximos de  $4 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ .

Além disso, observa-se que os traços C50-OT e C80-OT tem valores de IL próximos, indicando que o aumento da eficiência dos concretos é similar devido à otimização do empacotamento do material. Se for utilizado este parâmetro para comparação com resultados históricos percebe-se que os resultados são tão mais promissores quanto maior for o nível de substituição do cimento.

Os resultados de índice de ligantes para misturas de concretos aplicando o conceito de empacotamento de partículas apresentaram menores valores de IL quando comparado aos concretos dosados pela metodologia tradicional, contribuindo para a obtenção de concretos mais sustentáveis do ponto de vista ambiental, visto que a produção de cimento é responsável por emissões significativas de gases de efeito estufa. Essa maior eficiência ambiental corrobora o potencial das estratégias adotadas neste estudo.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Os métodos de dosagem clássicos implementados no país definem uma metodologia que busca misturas econômicas e que atenda a critérios específicos de projeto. Entretanto, a técnica de dosagem dos concretos é bastante conservadora, não havendo grandes modificações ou atualizações ao longo do tempo. Deve-se salientar que a tecnologia atual de concretos não está errada, mas sim incompleta. A implementação de modelos de empacotamento, com uma correta seleção de materiais, no âmbito nacional, permitirá aumentar os rendimentos dos traços dosados, além do acréscimo de resistência mecânica para um mesmo consumo de concreto aumentando a eficiência do uso dos ligantes com consequência direta sobre a sustentabilidade do concreto.

O desenvolvimento do programa computacional (planilha de cálculo) foi concebido inicialmente para a determinação do coeficiente de distribuição e se estendeu para otimização das misturas de concreto estudadas, com a implementação do modelo de empacotamento de Alfred podendo-se, entretanto, aplicar para os diversos tipos de concreto. Além disso, o caminho inverso permitiu a otimização dessas misturas, ao se adicionar ou alterar as quantidades dos materiais até atingir uma distribuição com granulometria contínua que viabilize um acréscimo nas propriedades do concreto. O modelo de empacotamento adotado (Modelo de Alfred) considera na sua formulação partículas perfeitamente esféricas desconsiderando a influência da morfologia das mesmas. Sendo assim, esta é uma das limitações do modelo teórico aplicado para obter distribuições de partículas reais, o que resulta em uma dispersão entre os resultados.

De maneira geral, o valor dos coeficientes de distribuição determinados para as misturas de concretos relativamente baixos em relação a literatura. Entretanto, os concretos produzidos podem se encaixar na faixa de concretos vibrados. Os coeficientes de correlação entre as curvas teórica e experimental não atingiram sua plenitude devido à baixa quantidade de materiais empregados na mistura e, principalmente, à falta de materiais na fração mais fina, no intervalo de 1 a 10  $\mu\text{m}$ . Essa mesma dificuldade foi encontrada para a otimização dos traços de concreto: houve dificuldade na otimização da dosagem, principalmente na fração mais fina (entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ ) para classe de concretos convencionais. A falta de materiais com granulometria adequada nessa faixa foi justificada por não se utilizar, na prática da construção civil, materiais finos com as adições minerais na composição desses

A partir da análise dos resultados obtidos com base no programa experimental definido para a presente pesquisa, verificou-se um ganho sensível nos parâmetros de dosagem com a aplicação do conceito de empacotamento de partículas, tanto nas propriedades associadas à durabilidade quanto às propriedades mecânicas. No entanto, o incremento proposto pelo empacotamento de partículas mostrou-se excessivo com relação a consistência da mistura, necessitando aumentar consideravelmente o consumo de aditivo para atingir a consistência desejada.

O comportamento no estado fresco de todas as misturas otimizadas foi similar, apresentando perda sistemática da trabalhabilidade, sendo necessário o aumento do consumo de aditivo plastificante e/ou superplastificante. Na aplicação desse tipo de concreto em obras convencionais poderiam ser verificadas dificuldades durante o lançamento e o adensamento, não sendo indicado a utilização de aditivo plastificantes/superplastificante com baixa eficiência. Com relação a massa específica dos concretos no estado fresco teve uma variação de 2,42 g/cm<sup>3</sup> a 2,53 g/cm<sup>3</sup>. Como esperado, a técnica de empacotamento de partículas aumentou a densidade dos concretos e, conseqüentemente, o valor dessa propriedade.

Os ensaios mecânicos conduziram a níveis bastante satisfatórios de resistência à compressão demonstrando a possibilidade de dosar um concreto com consumo de cimento reduzido, com base no conceito de empacotamento de partículas, que se comporte mecanicamente de forma semelhante (ou até melhor) aos concretos dosados por metodologias tradicionais de dosagem. Nas primeiras idades, é evidenciado um acréscimo de resistência menor em relação às idades posteriores para os concretos otimizadas. Isso é atribuído à redução da quantidade de agregado graúdo, visto que esse material favorece o desempenho mecânico nas primeiras idades, enquanto nas idades mais avançadas há contribuição do empacotamento de partículas dos materiais granulares e da matriz pasta de cimento hidratada.

Os ensaios balizadores de durabilidade apresentaram uma boa homogeneidade dos resultados indicando uma baixa porosidade dos concretos otimizadas, inferiores ao concreto de referência. O bom desempenho desses concretos pode ser atribuído à densificação da matriz, refinando os poros com o aumento do teor de materiais finos. Todos os tipos de concretos produzidos podem ser considerados duráveis.

Com relação aos ensaios não destrutivos, a velocidade do pulso ultrassônico possui a mesma tendência de crescimento do módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo. Por outro lado, para as idades analisadas, a resistência média à compressão não possui o mesmo comportamento, em especial para os concretos otimizadas, o que indica que as propriedades dinâmicas e velocidade ultrassônica não depende preponderantemente dessa propriedade

mecânica. Verificou-se uma redução do módulo de elasticidade dos concretos otimizados em relação ao de referência, apresentando menor rigidez e, conseqüentemente, maior capacidade de deformação desses concretos.

Em geral, conforme observado nos resultados estatísticos, a técnica de empacotamento de partículas aplicada no processo de dosagem de concretos ocasionou alterações significativas nas propriedades físicas e mecânicas dos traços otimizados em relação aos referência dosados pela metodologia tradicional IPT/EPUSP.

O índice de intensidade de ligantes para concretos com esqueleto granular modificado, obtidos a partir do empacotamento de partículas, por via de regra apresentaram menor índice de intensidade de ligantes, podendo ser considerado mais sustentáveis que os concretos de referência. Foi desenvolvido concreto com intensidade de ligantes de apenas  $4,57 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  aos 28 dias de idade, sendo raros na literatura concretos com intensidade de ligantes abaixo de  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ .

Na presente pesquisa foram avaliados dois tipos de dosagem de concreto, sendo uma de forma tradicional e outra aplicando o conceito de empacotamento de partículas com a finalidade de produzir concretos mais sustentáveis do ponto de vista ambiental. De maneira geral, o presente trabalho apresentou resultados muito satisfatórios, sendo os objetivos inicialmente propostos atingidos. As misturas desenvolvidas/otimizadas com base no conceito de empacotamento de partículas mostram um grande potencial de aplicação em obras de construção civil, porém é importante que sejam feitos ajustes a fim de suprimir os problemas encontrados principalmente no estado fresco.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Vale destacar que esse foi um trabalho inicial sobre o tema de otimização de traços de concreto convencional e de alta resistência aplicados na prática da construção civil. Assim, é importante um aprofundamento de trabalhos experimentais a fim de estabelecer correlações mais precisas e condizentes com as características de empacotamento de partículas para dosagem de concretos de cimento Portland, adequando-os para aplicação em obras. A partir dos resultados obtidos no programa experimental sugerem-se algumas recomendações e sugestões para trabalhos futuros sobre o tema, a saber:

- Avaliar o desempenho do empacotamento de partículas modificando a razão entre o intervalo de abertura de peneiras;

- Aprofundar a avaliação da durabilidade de concretos otimizados a partir do conceito de empacotamento de partículas, com a inclusão de outros ensaios, como: resistência à carbonatação, resistência à penetração de cloretos, resistência a sulfatos;
- Avaliar os parâmetros reológicos de concretos otimizados pela técnica de empacotamento de partículas, por apresentarem dificuldades no manejo;
- Verificar a influência do tipo e forma dos agregados na otimização de dosagem utilizando empacotamento de partículas;
- Determinar uma correlação entre o valor do coeficiente de distribuição de uma mistura de concreto com as propriedades físicas e mecânicas desse material;
- Aplicar misturas ternárias e quaternárias na fração fina entre os componentes do concreto.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R-98**: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, MI, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 215 – 14**: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Pennsylvania, 2014. 7p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1876 – 15**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Pennsylvania, 2015. 17p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 597-16**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, 2016. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006a. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006b. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. 7p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009a. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009b. 11p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009c. 6p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009d. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 19p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 23p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015. 11p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017a. 4p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017b. 14p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019. 11p.

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região noroeste do paraná. 2002. 234 f. Dissertao (Mestrado) - Programa de Pos-graduao em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.**

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ipsilon, v.1, 2011. p. 185-232.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. 180 f. Dissertao (Mestrado) – Escola de Engenharia, Programa de Pos-graduao em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p.

CAMPOS, H. F.; MARQUES FILHO, J.; KLEIN, N. S. Concretos Sustentáveis Otimizados por Modelos de Empacotamento de Partículas: Revisão bibliográfica. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 58., 2016, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: Ibracon, 2016. p. 1 - 13.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto**. São Paulo. Pini, 1998.

CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 17, p.19-28, 2008.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009.

CASTRO, A.; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. **Ingeniería de Construcción**, v. 31, n. 2, p. 91–104, 2016.

CAVALIERE, I. S. G.; CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; JACINTHO, A. E. P. G. A. Efeito dos agregados graúdos reciclados nas propriedades de concretos autoadensáveis dosados por empacotamento de partículas. In: Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactable y Hormigones Especiales, 5., 2018, Valência. **Anais**. Valência: HAC, 2018. p. 147 - 156.

CEMBUREAU. **Activity Report 2015**. Brussels, Belgium: CEMBUREAU, 2015.

CHUNG, H. W.; LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique, **Concrete International**, n.5, p.42-49, 1985.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ipsilon, v.1, 2011. p. 261-309.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. 237 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 10, n. 5, p.998-1024, set. 2017.

FELDMAN, R. F. Non-Destructive Testing of Concrete. **CBD-187**. National Research Council of Canada. 1977. 6p.

FLATT, R. J.; ROUSSEL, N.; CHEESEMAN, C. R. Concrete: An eco material that needs to be improved. **Journal Of The European Ceramic Society, Special Issue: ECerS XII, 12th Conference of the European Ceramic Society**, v. 32, n. 11, p. 2787-2798, 2012.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process controlo f crowded particulate suspensions**: Applied to Ceramic Manufacturing. New York: Springer Science Business Media, 1994.

GHODDOUSI, P.; JAVID, A. A. S.; SOBHANI, J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. **Construction And Building Materials**, n.53, p.102-109, dez. 2013.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. 2015. 131 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

GONDIM, R. M. L. **Avaliação dos efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônico em corpos de prova de concreto submetidos a compressão uniaxial**. 2018. 133p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

GRAZIA, M. T.; SANCHEZ, L. F. M.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 524-536, 2019.

HAACH, V. G., CARRAZEDO, R., OLIVEIRA, L. M. F., CORRÊA, M. R. S. Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. **NDT&E Internacional**. v. 59, p. 18-24, abr. 2013.

HAACH, V. G.; JULIANI, L. M.; DA ROZ, M. R. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concrete produces with high early strength cement. **Construction and Building Materials**. v. 96, p. 1-10. 2015

HABERT, G.; ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbono mitigation objectives. **Cement and concrete composites**, n. 31, p. 397-402, 2009.

HELENE, P. R. L. La agresividade del médio y la durabilidade del Hormigón. **Hormigón**, AATH, n. 10, p. 25-35, ago. 1983.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992. 349 p.

HERMANN, A. **Empacotamento de agregados reciclados para concretos vibrocompactados**. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L.; KLEIN, N. S. Particle packing of cement and sílica fume in pastes using an analytical model. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 9, p.48-65, fev. 2016.

HERNÁNDEZ, M. G.; IZQUIERDO, M. A. G.; IBÁÑÉS, A.; ANAYA, J. J.; ULLATE, L. G. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. **Ultrasonics**. v. 38, p. 531-533. 2000.

INTERNATIONAL TUNNELLING ASSOCIATION. Shotcrete for rock support: a summary report of the state of the art in 15 countries. **Tunneling and Underground Space Technology**. v.8, n.4, pp. 441-470, 1993.

ISO 13320:2009. **Particle size analysis - Laser diffraction methods**. International Organization for Standardization, 2009.

JOHN, V. M. Concreto Sustentável. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ipsilon, v.2, 2011. p. 1843–1870.

JULIANI, L. M. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos**. 2014. 193p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction And Building Materials**, n. 61, p.270-277, abr. 2014.

LENZ, L. A. **Avaliação da influência do empacotamento de partículas do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. **Powder Technology**, n. 253, p.514-521, dez. 2013.

LIMA, C. I. V.; COUTINHO, C. O. D.; AZEVEDO, G. G. C.; BARROS, T. Y. G.; TAUBER, T. C.; LIMA, S. F. Concreto e suas inovações. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Maceió, v. 1, n. 1, p.31-40, maio 2014.

LIMA, S. F. S.; GOMES, S. C.; OLIVEIRA, W. G.; QUINTANILHA, L. C.; MENDES, A. S.; TOCHTROP, H. Estudo da Influência do Método do Empacotamento do Agregado Miúdo na Resistência do Concreto Convencional. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 58., 2016, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: Ibracon, 2016. p. 1 - 13.

LONDERO, C. **Dosagem de concreto ecológico com base em empacotamento de partículas.** 2016. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, n. 63, p.22-33, 2017.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição.** 2012. 192 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

METHA, P. K. **A glimpse into sustainable ternary-blended cements of the future.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50. Salvador: Ibracon, 2008.

MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 4ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. The ultrasonic pulse velocity method. In: MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete.** 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.

OLIVEIRA, C. O.; MACIEL, G. F.; CASTRO, A. L.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 23, n. 1, 5 mar. 2018.

ORDOÑEZ, M. F. C. **Efeito do empacotamento de partículas nas propriedades mecânicas e tribológicas de misturas de argila-rocha.** 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. Estimativa do módulo de elasticidade estático de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso. Informativo técnico-científico ITC-07/ATCP. 2017. 36p.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 152, p.269-284, out. 2017.

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

RICCI, B. O. L.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L. Estudo de Dosagens Visando Obter Concretos para Obras de Pequeno Porte. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, p.182-194, 2017.

SAINT-PIERRE, F.; PHILIBERT, A.; GIROUX, B.; RIVARD, P. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. **Construction and Building Materials** **125**. 2016. p. 1022-1027.

SANTOS, E. A. F. **Estudo da influência das propriedades elásticas da interface bloco-argamassa na rigidez de paredes de alvenaria**. 2014. 277p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SCHIAVON, K. F. B. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. 2015. 130p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SHARP, J. H.; GARTNER, E. M.; MACPHEE, D. E. Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium. **Advances In Cement Research**, v. 22, n. 4, p.195-202, out. 2010.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. **Relações entre distribuição granulométrica, morfologia e empacotamento de partículas num sistema real: alta alumina**. In Congresso Brasileiro de Cerâmica, 47, João Pessoa-PB, 2003. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2003.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. **Cerâmica**, v. 50, p. 345–354, 2004.

SILVA JÚNIOR, F. A. **Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formulação de compósitos cimentícios**. 2014. 183 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório anual 2013**, 2013.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Consumo aparente de cimento por regiões e estados**, 2014.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Vendas de cimento encerram 2018 em queda de 1,2%**, 2018.

SUNAYANA, S.; BARAI, S. V. Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 156, p.376-386, dez. 2017.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. *In*: ISAIÁ, G.C. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São Paulo: Ispis, v.1, 2011. p. 415–452.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas.** 2004. 168 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.



## APÊNDICE A – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

As Tabelas A1 a A8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à compressão de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,54 e 1,65, considerando 4 e 5 medições, respectivamente.

Tabela A1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C25-R.

C25 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
25,48	1,22	Ok	26,08	0,86	Ok	36,72	0,56	Ok
22,52	0,12	Ok	27,68	0,03	Ok	36,73	0,57	Ok
23,05	0,12	Ok	25,58	1,12	Ok	37,55	1,01	Ok
19,37	1,54	Ok	29,75	1,03	Ok	33,87	0,98	Ok
23,47	0,31	Ok	29,65	0,98	Ok	33,51	1,17	Ok
Média	22,78		Média	27,75		Média	35,68	
Desvio-padrão	2,21		Desvio-padrão	1,94		Desvio-padrão	1,85	
Coefficiente de variação	9,70		Coefficiente de variação	7,01		Coefficiente de variação	5,18	

Fonte: Autor (2019).

Tabela A2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C25-OT.

C25 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
30,01	0,24	Ok	39,61	0,19	Ok	44,11	0,05	Ok
34,59	1,22	Ok	37,18	1,62	Ok	37,96	1,05	Ok
27,17	1,15	Ok	40,54	0,88	Ok	40,89	0,57	Ok
33,35	0,83	Ok	39,12	0,17	Ok	54,20	1,60	Ok
28,71	0,66	Ok	40,32	0,72	Ok	44,80	0,07	Ok
Média	30,77		Média	39,35		Média	44,39	
Desvio-padrão	3,12		Desvio-padrão	1,34		Desvio-padrão	6,13	
Coefficiente de variação	10,15		Coefficiente de variação	3,41		Coefficiente de variação	13,80	

Fonte: Autor (2019).

Tabela A3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C40-R.

C40 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
32,26	0,14	Ok	39,85	0,23	Ok	47,22	1,03	Ok
33,83	0,81	Ok	39,04	0,72	Ok	46,77	1,05	Ok
33,85	0,82	Ok	42,43	1,33	Ok	46,86	0,64	Ok
28,18	1,62	Ok	41,40	0,71	Ok	47,14	0,66	Ok
31,58	0,15	Ok	38,43	1,08	Ok	Média		47,00
Média	31,94		Média	40,23		Desvio-padrão		0,22
Desvio-padrão	2,32		Desvio-padrão	1,66		Coefficiente de variação		0,46
Coefficiente de variação	7,27		Coefficiente de variação	4,12				

Fonte: Autor (2019).

Tabela A4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C40-OT.

C40 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
34,99	0,40	Ok	45,73	0,82	Ok	63,26	0,66	Ok
39,25	1,50	Ok	42,29	0,27	Ok	64,81	1,16	Ok
36,15	0,12	Ok	40,55	0,82	Ok	56,91	1,41	Ok
33,06	1,26	Ok	47,15	1,26	Ok	61,47	0,08	Ok
35,96	0,03	Ok	39,98	1,00	Ok	59,74	0,49	Ok
Média	35,88		Média	43,14		Média		61,24
Desvio-padrão	2,25		Desvio-padrão	3,17		Desvio-padrão		3,08
Coefficiente de variação	6,26		Coefficiente de variação	7,35		Coefficiente de variação		5,03

Fonte: Autor (2019).

Tabela A5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C50-R.

C50 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
40,50	0,08	Ok	44,81	0,30	Ok	68,54	1,39	Ok
45,88	1,54	Ok	44,62	0,21	Ok	62,81	0,03	Ok
35,98	1,15	Ok	41,12	1,54	Ok	59,11	0,94	Ok
40,50	0,08	Ok	46,63	1,21	Ok	61,19	0,43	Ok

38,24	0,54	Ok	43,85	0,18	Ok	Média	62,91
Média	40,22		Média	44,21		Desvio-padrão	4,05
Desvio-padrão	3,68		Desvio-padrão	2,00		Coefficiente de variação	6,43
Coefficiente de variação	9,14		Coefficiente de variação	4,53			

Fonte: Autor (2019).

Tabela A6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C50-OT.

C50 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
42,14	0,95	Ok	80,48	0,92	Ok	92,46	0,65	Ok
44,48	0,16	Ok	71,04	1,28	Ok	91,27	0,85	Ok
41,98	1,03	Ok	75,29	0,29	Ok	101,60	0,88	Ok
46,94	1,33	Ok	79,34	0,65	Ok	92,33	0,67	Ok
45,17	0,49	Ok	Média	76,54		104,00	1,28	Ok
Média	44,14		Desvio-padrão	4,29		Média	96,33	
Desvio-padrão	2,10		Coefficiente de variação	5,60		Desvio-padrão	5,98	
Coefficiente de variação	4,76					Coefficiente de variação	6,21	

Fonte: Autor (2019).

Tabela A7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C80-R.

C80 - REFERÊNCIA								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
63,16	0,77	Ok	60,34	1,25	Ok	62,31	1,37	Ok
55,28	1,58	Ok	63,65	0,79	Ok	73,61	0,12	Ok
59,24	0,40	Ok	61,40	0,60	Ok	70,37	0,30	Ok
62,76	0,65	Ok	64,32	1,20	Ok	73,69	0,13	Ok
62,51	0,57	Ok	62,15	0,14	Ok	83,42	1,42	Ok
Média	60,59		Média	62,37		Média	72,68	
Desvio-padrão	3,35		Desvio-padrão	1,62		Desvio-padrão	7,58	
Coefficiente de variação	5,54		Coefficiente de variação	2,60		Coefficiente de variação	10,44	

Fonte: Autor (2019).

Tabela A8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto C80-OT.

C80 - OTIMIZADO								
7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado	Resistência (MPa)	Critério de Chauvenet	Resultado
56,84	0,08	Ok	83,31	0,02	Ok	117,20	1,33	Ok
54,60	1,25	Ok	83,34	0,02	Ok	114,40	0,37	Ok
57,74	0,39	Ok	83,77	0,13	Ok	113,50	0,06	Ok
56,05	0,49	Ok	88,53	1,32	Ok	109,30	1,40	Ok
59,74	1,43	Ok	77,28	1,49	Ok	112,30	0,36	Ok
Média	56,99		Média	83,25		Média	113,34	
Desvio-padrão	1,92		Desvio-padrão	3,99		Desvio-padrão	2,89	
Coefficiente de variação	3,37		Coefficiente de variação	4,80		Coefficiente de variação	2,55	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas A9 e A10 são apresentados os detalhes do teste t para resistência à compressão para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias de idade, respectivamente.

Tabela A9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na resistência à compressão aos 28 dias.

Teste estatístico - Resistência à compressão - 28 dias						
Tipo de concreto	GL	t	P(T<=t) bi-caudal	t crítico	Diferença significativa?	
C25-R e C25-OT	8	10,9914	0,0000	2,3060	Sim	
C40-R e C40-OT	8	3,4817	0,0083	2,3060	Sim	
C50-R e C50-OT	7	15,1082	0,0000	2,3646	Sim	
C80-R e C80-OT	8	10,8261	0,0000	2,3060	Sim	

Fonte: Autor (2019).

Tabela A10 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na resistência à compressão aos 91 dias.

Teste estatístico - Resistência à compressão - 91 dias						
Tipo de concreto	GL	t	P(T<=t) bi-caudal	t crítico	Diferença significativa?	
C25-R e C25-OT	8	3,0461	0,0159	2,3060	Sim	
C40-R e C40-OT	7	2,3953	0,0478	2,3646	Sim	
C50-R e C50-OT	7	9,5053	0,0000	2,3646	Sim	
C80-R e C80-OT	8	11,2007	0,0000	2,3060	Sim	

Fonte: Autor (2019).

## APÊNDICE B – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DO CONCRETO

As Tabelas B1 a B8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para absorção de água por imersão de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela B1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C25-R.

<b>C25 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 DIAS</b>			<b>91 DIAS</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
4,55	0,59	Ok	3,38	1,14	Ok
4,17	1,15	Ok	3,65	0,41	Ok
4,54	0,56	Ok	3,70	0,73	Ok
Média	4,42		Média	3,58	
Desvio-padrão	0,22		Desvio-padrão	0,17	
Coefficiente de variação	4,87		Coefficiente de variação	4,87	

Fonte: Autor (2019).

Tabela B2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C25-OT.

<b>C25 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
4,04	0,93	Ok	3,13	0,82	Ok
3,93	1,06	Ok	3,72	1,11	Ok
3,99	0,12	Ok	3,29	0,30	Ok
Média	3,99		Média	3,38	
Desvio-padrão	0,06		Desvio-padrão	0,30	
Coefficiente de variação	1,40		Coefficiente de variação	8,94	

Fonte: Autor (2019).

Tabela B3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C40-R.

<b>C40 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
3,86	0,94	Ok	2,04	0,07	Ok
3,65	0,11	Ok	1,96	1,03	Ok
3,36	1,05	Ok	2,10	0,96	Ok
Média	3,62		Média	2,04	
Desvio-padrão	0,25		Desvio-padrão	0,07	
Coefficiente de variação	6,96		Coefficiente de variação	3,45	

Fonte: Autor (2019).

Tabela B4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C40-OT.

<b>C40 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
3,56	1,08	Ok	2,71	1,10	Ok
3,78	0,90	Ok	3,05	0,25	Ok
3,70	0,18	Ok	3,20	0,85	Ok
Média	3,68		Média	2,99	
Desvio-padrão	0,11		Desvio-padrão	0,25	
Coefficiente de variação	2,96		Coefficiente de variação	8,40	

Fonte: Autor (2019).

Tabela B5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C50-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
1,58	0,00	Ok	1,46	0,75	Ok
1,54	1,00	Ok	1,44	0,38	Ok

1,63	1,00	Ok	1,36	1,14	Ok
Média	1,58		Média	1,42	
Desvio-padrão	0,04		Desvio-padrão	0,05	
Coefficiente de variação	2,66		Coefficiente de variação	3,42	

Fonte: Autor (2019).

Tabela B6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C50-OT.

<b>C50 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
1,55	0,03	Ok	1,31	0,39	Ok
1,62	1,01	Ok	1,39	1,14	Ok
1,49	0,99	Ok	1,29	0,74	Ok
Média	1,55		Média	1,33	
Desvio-padrão	0,07		Desvio-padrão	0,05	
Coefficiente de variação	4,27		Coefficiente de variação	3,83	

Fonte: Autor (2019).

Tabela B7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C80-R.

<b>C80 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
1,37	0,41	Ok	1,24	1,12	Ok
1,44	1,14	Ok	1,16	0,81	Ok
1,36	0,73	Ok	1,18	0,30	Ok
Média	1,39		Média	1,19	
Desvio-padrão	0,05		Desvio-padrão	0,04	
Coefficiente de variação	3,26		Coefficiente de variação	3,42	

Fonte: Autor (2019).

Tabela B8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por imersão do concreto C80-OT.

<b>C80 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por imersão (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
1,34	0,12	Ok	1,13	0,05	Ok
1,38	0,94	Ok	1,09	1,02	Ok
1,27	1,05	Ok	1,17	0,97	Ok
Média	1,33		Média	1,13	
Desvio-padrão	0,05		Desvio-padrão	0,04	
Coefficiente de variação	3,94		Coefficiente de variação	3,66	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas B9 e B10 são apresentados os detalhes do teste t para absorção de água por imersão para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela B9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na absorção de água por imersão aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Absorção por imersão - 28 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	3,3678	0,0281	2,7764	Sim
C40-R e C40-OT	4	0,3544	0,7409	2,7764	Não
C50-R e C50-OT	4	0,6678	0,5408	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	1,4581	0,2186	2,7764	Não

Fonte: Autor (2019).

Tabela B10 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na absorção de água por imersão aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Absorção por imersão - 91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	0,9802	0,3825	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	6,3372	0,0032	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	2,1405	0,0990	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	1,8414	0,1394	2,7764	Não

Fonte: Autor (2019).



## APÊNDICE C – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ÍNDICE DE VAZIOS DO CONCRETO

As Tabelas C1 a C8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o índice de vazios de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela C1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C25-R.

<b>C25 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
10,44	0,62	Ok	8,06	1,10	Ok
9,82	1,15	Ok	8,59	0,24	Ok
10,41	0,53	Ok	8,83	0,86	Ok
Média	10,22		Média	8,49	
Desvio-padrão	0,35		Desvio-padrão	0,39	
Coefficiente de variação	3,40		Coefficiente de variação	4,60	

Fonte: Autor (2019).

Tabela C2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C25-OT.

<b>C25 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
9,62	0,52	Ok	7,66	0,79	Ok
9,43	1,15	Ok	8,87	1,12	Ok
9,63	0,63	Ok	7,95	0,33	Ok
Média	9,56		Média	8,16	
Desvio-padrão	0,11		Desvio-padrão	0,63	
Coefficiente de variação	1,19		Coefficiente de variação	7,75	

Fonte: Autor (2019).

Tabela C3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C40-R.

<b>C40 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Crítério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Crítério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
9,05	0,96	Ok	4,85	0,14	Ok
8,54	0,07	Ok	4,71	0,92	Ok
7,90	1,04	Ok	5,06	1,06	Ok
Média	8,49		Média	4,87	
Desvio-padrão	0,58		Desvio-padrão	0,18	
Coefficiente de variação	6,79		Coefficiente de variação	3,67	

Fonte: Autor (2019).

Tabela C4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C40-OT.

<b>C40 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Crítério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Crítério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
8,54	1,02	Ok	6,57	1,11	Ok
9,07	0,97	Ok	7,39	0,26	Ok
8,83	0,05	Ok	7,74	0,84	Ok
Média	8,81		Média	7,24	
Desvio-padrão	0,27		Desvio-padrão	0,60	
Coefficiente de variação	3,02		Coefficiente de variação	8,30	

Fonte: Autor (2019).

Tabela C5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C50-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Crítério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Crítério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
3,87	0,36	Ok	3,57	0,86	Ok
3,71	1,13	Ok	3,49	0,23	Ok
3,91	0,77	Ok	3,30	1,10	Ok
Média	3,83		Média	3,46	
Desvio-padrão	0,10		Desvio-padrão	0,14	
Coefficiente de variação	2,70		Coefficiente de variação	3,97	

Fonte: Autor (2019).

Tabela C6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C50-OT.

<b>C50 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
3,78	0,03	Ok	3,21	0,39	Ok
3,95	1,01	Ok	3,40	1,14	Ok
3,63	0,99	Ok	3,16	0,75	Ok
Média	3,79		Média	3,26	
Desvio-padrão	0,16		Desvio-padrão	0,12	
Coefficiente de variação	4,20		Coefficiente de variação	3,80	

Fonte: Autor (2019).

Tabela C7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C80-R.

<b>C80 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
3,38	0,40	Ok	3,07	1,11	Ok
3,54	1,14	Ok	2,87	0,83	Ok
3,35	0,74	Ok	2,93	0,28	Ok
Média	3,42		Média	2,96	
Desvio-padrão	0,10		Desvio-padrão	0,10	
Coefficiente de variação	2,97		Coefficiente de variação	3,42	

Fonte: Autor (2019).

Tabela C8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto C80-OT.

<b>C80 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
3,23	0,15	Ok	2,74	0,02	Ok
3,32	0,91	Ok	2,64	1,01	Ok
3,08	1,07	Ok	2,84	0,99	Ok
Média	3,21		Média	2,74	
Desvio-padrão	0,12		Desvio-padrão	0,10	
Coefficiente de variação	3,76		Coefficiente de variação	3,60	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas C9 e C10 são apresentados os detalhes do teste t para índice de vazios para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela C9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no índice de vazios aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Índice de vazios - 28 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	3,1531	0,0344	2,7764	Sim
C40-R e C40-OT	4	0,8673	0,4347	2,7764	Não
C50-R e C50-OT	4	0,4003	0,7094	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	2,3256	0,0806	2,7764	Não

Fonte: Autor (2019).

Tabela C10 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no índice de vazios aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Índice de vazios - 91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	0,7831	0,4774	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	6,5314	0,0028	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	1,8597	0,1364	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	2,6481	0,0571	2,7764	Não

Fonte: Autor (2019).

## APÊNDICE D – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA DE CONCRETO

As Tabela D1 a D8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela D1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C25-R.

<b>C25 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,30	0,51	Ok	2,39	0,66	Ok
2,35	1,15	Ok	2,35	1,15	Ok
2,29	0,64	Ok	2,38	0,49	Ok
Média	2,31		Média	2,38	
Desvio-padrão	0,04		Desvio-padrão	0,02	
Coeficiente de variação	1,52		Coeficiente de variação	0,78	

Fonte: Autor (2019).

Tabela D2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C25-OT.

<b>C25 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,38	1,07	Ok	2,45	1,00	Ok
2,40	0,16	Ok	2,39	1,00	Ok
2,41	0,91	Ok	2,42	0,00	Ok
Média	2,40		Média	2,42	
Desvio-padrão	0,02		Desvio-padrão	0,03	
Coeficiente de variação	0,63		Coeficiente de variação	1,22	

Fonte: Autor (2019).

Tabela D3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C40-R.

<b>C40 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,34	0,13	Ok	2,38	1,11	Ok
2,34	0,93	Ok	2,40	0,29	Ok
2,35	1,06	Ok	2,41	0,82	Ok
Média	2,34		Média	2,39	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,02	
Coefficiente de variação	0,27		Coefficiente de variação	0,69	

Fonte: Autor (2019).

Tabela D4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C40-OT.

<b>C40 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,40	0,31	Ok	2,42	0,50	Ok
2,40	0,81	Ok	2,42	0,65	Ok
2,39	1,12	Ok	2,42	1,15	Ok
Média	2,40		Média	2,42	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,33		Coefficiente de variação	0,15	

Fonte: Autor (2019).

Tabela D5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C50-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,44	1,15	Ok	2,46	1,15	Ok
2,41	0,48	Ok	2,43	0,50	Ok
2,40	0,67	Ok	2,42	0,65	Ok
Média	2,42		Média	2,44	
Desvio-padrão	0,02		Desvio-padrão	0,02	
Coefficiente de variação	0,85		Coefficiente de variação	0,73	

Fonte: Autor (2019).

Tabela D6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C50-OT.

<b>C50 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,44	0,06	Ok	2,45	0,82	Ok
2,43	1,03	Ok	2,44	1,11	Ok
2,44	0,97	Ok	2,45	0,29	Ok
Média	2,44		Média	2,45	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,07		Coefficiente de variação	0,04	

Fonte: Autor (2019).

Tabela D7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C80-R.

<b>C80 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,47	0,52	Ok	2,48	0,27	Ok
2,46	1,15	Ok	2,48	0,84	Ok
2,47	0,63	Ok	2,48	1,11	Ok
Média	2,47		Média	2,48	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,29		Coefficiente de variação	0,06	

Fonte: Autor (2019).

Tabela D8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto C80-OT.

<b>C80 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica seca (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,42	0,53	Ok	2,42	0,95	Ok
2,41	1,15	Ok	2,42	1,04	Ok
2,42	0,62	Ok	2,42	0,09	Ok
Média	2,42		Média	2,42	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,22		Coefficiente de variação	0,10	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas D9 e D10 são apresentados os detalhes do teste t para massa específica da amostra seca para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela D9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra seca aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Massa da amostra seca - 28 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	3,7399	0,0201	2,7764	Sim
C40-R e C40-OT	4	8,6524	0,0010	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	1,5827	0,1886	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	10,0054	0,0006	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).

Tabela D3 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra seca aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Massa da amostra seca - 91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	2,0284	0,1124	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	2,7187	0,0531	2,7764	Não
C50-R e C50-OT	4	1,0231	0,3641	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	34,2206	0,0000	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).



## APÊNDICE E – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SATURADA DE CONCRETO

As Tabelas E1 a E8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela E1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C25-R.

<b>C25 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,40	0,50	Ok	2,47	0,44	Ok
2,45	1,15	Ok	2,44	1,15	Ok
2,40	0,65	Ok	2,47	0,70	Ok
Média	2,42		Média	2,46	
Desvio-padrão	0,03		Desvio-padrão	0,02	
Coeficiente de variação	1,31		Coeficiente de variação	0,73	

Fonte: Autor (2019).

Tabela E2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C25-OT.

<b>C25 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,48	1,03	Ok	2,52	1,04	Ok
2,49	0,07	Ok	2,48	0,95	Ok
2,51	0,96	Ok	2,50	0,10	Ok
Média	2,49		Média	2,50	
Desvio-padrão	0,02		Desvio-padrão	0,02	
Coeficiente de variação	0,61		Coeficiente de variação	0,94	

Fonte: Autor (2019).

Tabela E3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C40-R.

<b>C40 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,43	0,93	Ok	2,42	1,08	Ok
2,42	1,06	Ok	2,45	0,18	Ok
2,43	0,13	Ok	2,46	0,90	Ok
Média	2,43		Média	2,44	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,02	
Coefficiente de variação	0,21		Coefficiente de variação	0,71	

Fonte: Autor (2019).

Tabela E4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C40-OT.

<b>C40 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,48	0,03	Ok	2,49	1,09	Ok
2,49	1,01	Ok	2,50	0,87	Ok
2,47	0,99	Ok	2,49	0,22	Ok
Média	2,48		Média	2,49	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,36		Coefficiente de variação	0,18	

Fonte: Autor (2019).

Tabela E5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C50-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,48	1,15	Ok	2,49	1,15	Ok
2,44	0,53	Ok	2,46	0,45	Ok
2,44	0,63	Ok	2,46	0,69	Ok
Média	2,46		Média	2,47	
Desvio-padrão	0,02		Desvio-padrão	0,02	
Coefficiente de variação	0,85		Coefficiente de variação	0,77	

Fonte: Autor (2019).

Tabela E6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C50-OT.

<b>C50 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,47	0,51	Ok	2,45	1,14	Ok
2,47	1,15	Ok	2,45	0,75	Ok
2,47	0,64	Ok	2,45	0,39	Ok
Média	2,47		Média	2,45	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,00		Coefficiente de variação	0,08	

Fonte: Autor (2019).

Tabela E7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C80-R.

<b>C80 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,50	0,54	Ok	2,51	0,38	Ok
2,49	1,15	Ok	2,50	1,13	Ok
2,51	0,62	Ok	2,51	0,75	Ok
Média	2,50		Média	2,51	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,25		Coefficiente de variação	0,07	

Fonte: Autor (2019).

Tabela E8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto C80-OT.

<b>C80 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica saturada (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,45	0,69	Ok	2,45	1,14	Ok
2,44	1,15	Ok	2,45	0,75	Ok
2,45	0,46	Ok	2,45	0,39	Ok
Média	2,45		Média	2,45	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,17		Coefficiente de variação	0,08	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas E9 e E10 são apresentados os detalhes do teste t para massa específica da amostra saturada para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela E9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra saturada aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Massa da amostra saturada - 28 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	3,7486	0,0200	2,7764	Sim
C40-R e C40-OT	4	6,8223	0,0024	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	1,5325	0,2002	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	12,3095	0,0003	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).

Tabela E10 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra saturada aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Massa da amostra saturada - 91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	2,1973	0,0929	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	4,8707	0,0082	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	1,8875	0,1321	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	37,0068	0,0000	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).

## APÊNDICE F – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA REAL DE CONCRETO

As Tabelas F1 a F8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra real de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela F1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C25-R.

<b>C25 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,56	0,48	Ok	2,60	0,06	Ok
2,61	1,15	Ok	2,57	1,03	Ok
2,56	0,67	Ok	2,62	0,97	Ok
Média	2,58		Média	2,60	
Desvio-padrão	0,03		Desvio-padrão	0,02	
Coeficiente de variação	1,13		Coeficiente de variação	0,78	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C25-OT.

<b>C25 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,63	0,96	Ok	2,65	1,14	Ok
2,65	0,07	Ok	2,62	0,75	Ok
2,67	1,03	Ok	2,62	0,39	Ok
Média	2,65		Média	2,63	
Desvio-padrão	0,02		Desvio-padrão	0,02	
Coeficiente de variação	0,64		Coeficiente de variação	0,59	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C40-R.

<b>C40 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,58	1,14	Ok	2,50	1,02	Ok
2,56	0,40	Ok	2,52	0,03	Ok
2,55	0,74	Ok	2,54	0,98	Ok
Média	2,56		Média	2,52	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,02	
Coefficiente de variação	0,50		Coefficiente de variação	0,78	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C40-OT.

<b>C40 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,62	0,40	Ok	2,59	1,15	Ok
2,64	1,14	Ok	2,62	0,47	Ok
2,62	0,74	Ok	2,62	0,68	Ok
Média	2,63		Média	2,61	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,01	
Coefficiente de variação	0,48		Coefficiente de variação	0,56	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C50-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,54	1,15	Ok	2,55	1,14	Ok
2,50	0,60	Ok	2,51	0,39	Ok
2,50	0,56	Ok	2,51	0,74	Ok
Média	2,51		Média	2,52	
Desvio-padrão	0,02		Desvio-padrão	0,02	
Coefficiente de variação	0,88		Coefficiente de variação	0,85	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C50-OT.

<b>C50 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,53	0,01	Ok	2,53	0,19	Ok
2,53	1,00	Ok	2,53	1,08	Ok
2,53	1,00	Ok	2,53	0,89	Ok
Média	2,53		Média	2,53	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,10		Coefficiente de variação	0,09	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C80-R.

<b>C80 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,56	0,58	Ok	2,56	0,81	Ok
2,55	1,15	Ok	2,55	1,12	Ok
2,56	0,57	Ok	2,55	0,31	Ok
Média	2,55		Média	2,55	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,19		Coefficiente de variação	0,12	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto C80-OT.

<b>C80 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>M. específica real (%)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
2,50	0,99	Ok	2,49	0,99	Ok
2,49	1,00	Ok	2,49	0,01	Ok
2,50	0,01	Ok	2,49	1,01	Ok
Média	2,50		Média	2,49	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	0,13		Coefficiente de variação	0,09	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas F9 e F10 são apresentados os detalhes do teste t para massa específica da amostra real para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela F9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra real aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Massa da amostra real - 28 dias</b>						
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>	
C25-R e C25-OT	4	3,7260	0,0204	2,7764	Sim	
C40-R e C40-OT	4	6,1517	0,0035	2,7764	Sim	
C50-R e C50-OT	4	1,4353	0,2245	2,7764	Não	
C80-R e C80-OT	4	17,3809	0,0001	2,7764	Sim	

Fonte: Autor (2019).

Tabela F10 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na massa específica da amostra real aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Massa da amostra real - 91 dias</b>						
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>	
C25-R e C25-OT	4	2,3606	0,0776	2,7764	Não	
C40-R e C40-OT	4	6,5697	0,0028	2,7764	Sim	
C50-R e C50-OT	4	0,4596	0,6697	2,7764	Não	
C80-R e C80-OT	4	28,1086	0,0000	2,7764	Sim	

Fonte: Autor (2019).



## APÊNDICE G – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DO CONCRETO

As Tabelas G1 a G8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para absorção de água por capilaridade (72h) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela G1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C25-R.

<b>C25 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,65	0,60	Ok	0,64	0,78	Ok
0,66	0,56	Ok	0,60	0,35	Ok
0,74	1,15	Ok	0,46	1,13	Ok
Média		0,68	Média		0,57
Desvio-padrão		0,05	Desvio-padrão		0,09
Coefficiente de variação		7,19	Coefficiente de variação		16,69

Fonte: Autor (2019).

Tabela G2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C25-OT.

<b>C25 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,72	1,11	Ok	0,55	0,39	Ok
0,79	0,26	Ok	0,65	1,14	Ok
0,81	0,84	Ok	0,53	0,75	Ok
Média		0,77	Média		0,58
Desvio-padrão		0,05	Desvio-padrão		0,06
Coefficiente de variação		6,15	Coefficiente de variação		10,74

Fonte: Autor (2019).

Tabela G3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C40-R.

<b>C40 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,60	1,08	Ok	0,41	0,51	Ok
0,72	0,17	Ok	0,34	1,15	Ok
0,79	0,90	Ok	0,42	0,64	Ok
Média	0,70		Média	0,39	
Desvio-padrão	0,09		Desvio-padrão	0,04	
Coeficiente de variação	13,53		Coeficiente de variação	10,16	

Fonte: Autor (2019).

Tabela G4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C40-OT.

<b>C40 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,52	0,99	Ok	0,45	1,15	Ok
0,63	1,01	Ok	0,42	0,56	Ok
0,58	0,03	Ok	0,42	0,59	Ok
Média	0,58		Média	0,43	
Desvio-padrão	0,06		Desvio-padrão	0,02	
Coeficiente de variação	9,55		Coeficiente de variação	4,65	

Fonte: Autor (2019).

Tabela G5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C50-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,06	1,13	Ok	0,06	1,03	Ok
0,06	0,35	Ok	0,06	0,07	Ok
0,05	0,78	Ok	0,05	0,97	Ok
Média	0,06		Média	0,06	
Desvio-padrão	0,01		Desvio-padrão	0,01	

Coeficiente de variação	10,27	Coeficiente de variação	8,81
-------------------------	-------	-------------------------	------

Fonte: Autor (2019).

Tabela G6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C50-OT.

<b>C50 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,04	0,28	Ok	0,06	1,13	Ok
0,04	0,83	Ok	0,06	0,38	Ok
0,05	1,11	Ok	0,06	0,76	Ok
Média	0,04		Média	0,06	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coeficiente de variação	4,10		Coeficiente de variação	4,30	

Fonte: Autor (2019).

Tabela G7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C80-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,04	0,58	Ok	0,06	1,10	Ok
0,04	0,58	Ok	0,04	0,86	Ok
0,04	1,15	Ok	0,05	0,23	Ok
Média	0,04		Média	0,05	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,01	
Coeficiente de variação	2,06		Coeficiente de variação	17,70	

Fonte: Autor (2019).

Tabela G8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para a absorção de água por capilaridade do concreto C80-OT.

<b>C80 - OTIMIZADO</b>					
<b>28 dias</b>			<b>91 dias</b>		
<b>Absorção por imersão (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Critério de Chauvenet</b>	<b>Resultado</b>
0,05	1,00	Ok	0,06	1,06	Ok

0,04	0,00	Ok	0,06	0,13	Ok
0,04	1,00	Ok	0,06	0,93	Ok
Média	0,04		Média	0,06	
Desvio-padrão	0,00		Desvio-padrão	0,00	
Coefficiente de variação	3,41		Coefficiente de variação	2,06	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas G9 e G10 são apresentados os detalhes do teste t para absorção de água por capilaridade para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela G9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Absorção de água por capilaridade (72h) - 28 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	2,2444	0,0882	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	1,9314	0,1256	2,7764	Não
C50-R e C50-OT	4	3,8051	0,0190	2,7764	Sim
C80-R e C80-OT	4	2,0000	0,1161	2,7764	Não

Fonte: Autor (2019).

Tabela G10 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na absorção de água por capilaridade aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Absorção água por capilaridade (72h) - 91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	0,1049	0,9215	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	1,5794	0,1894	2,7764	Não
C50-R e C50-OT	4	1,4270	0,2267	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	2,4041	0,0740	2,7764	Não

Fonte: Autor (2019).

## APÊNDICE H – TESTES ESTATÍSTICOS PARA PROPRIEDADES DINÂMICAS DO CONCRETO

Nas Tabelas H1 e H2 são apresentadas os resultados do critério do teste t *Student* para o módulo de elasticidade dinâmico para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela H1 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Módulo de elasticidade dinâmico - 28 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	28,6914	0,0000	2,7764	Sim
C40-R e C40-OT	4	3,5871	0,0230	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	3,1080	0,0359	2,7764	Sim
C80-R e C80-OT	4	14,5338	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).

Tabela H2 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no módulo de elasticidade dinâmico aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Módulo de elasticidade dinâmico - 91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	39,1738	0,0000	2,7764	Sim
C40-R e C40-OT	4	2,1516	0,0978	2,7764	Não
C50-R e C50-OT	4	2,4423	0,0710	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	11,7779	0,0003	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas H3 e H4 são apresentadas os resultados do critério do teste t *Student* para o módulo de cisalhamento dinâmico para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela H3 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no módulo de cisalhamento dinâmico aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Módulo de cisalhamento dinâmico - 28 dias</b>						
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>	
C25-R e C25-OT	4	12,1642	0,0003	2,7764	Sim	
C40-R e C40-OT	4	3,8186	0,0188	2,7764	Sim	
C50-R e C50-OT	4	3,7958	0,0192	2,7764	Sim	
C80-R e C80-OT	4	12,6685	0,0002	2,7764	Sim	

Fonte: Autor (2019).

Tabela H4 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no módulo de cisalhamento dinâmico aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Módulo de cisalhamento dinâmico - 91 dias</b>						
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>	
C25-R e C25-OT	4	30,0826	0,0000	2,7764	Sim	
C40-R e C40-OT	4	2,4223	0,0726	2,7764	Não	
C50-R e C50-OT	4	3,3951	0,0274	2,7764	Sim	
C80-R e C80-OT	4	10,0727	0,0005	2,7764	Sim	

Fonte: Autor (2019).

Nas Tabelas H5 e H6 são apresentadas os resultados do critério do teste t *Student* para o coeficiente de Poisson para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela H5 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no coeficiente de Poisson aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - Coeficiente de Poisson - 28 dias</b>						
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>	
C25-R e C25-OT	4	9,8271	0,0006	2,7764	Sim	
C40-R e C40-OT	4	3,8013	0,0191	2,7764	Sim	
C50-R e C50-OT	4	8,4853	0,0011	2,7764	Sim	
C80-R e C80-OT	4	4,8990	0,0080	2,7764	Sim	

Fonte: Autor (2019).

Tabela H6 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas no coeficiente de Poisson aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - Coeficiente de Poisson - 91 dias</b>						
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>	
C25-R e C25-OT	4	6,4143	0,0030	2,7764	Sim	
C40-R e C40-OT	4	3,4641	0,0257	2,7764	Sim	
C50-R e C50-OT	4	13,0000	0,0002	2,7764	Sim	
C80-R e C80-OT	4	7,0000	0,0022	2,7764	Sim	

Fonte: Autor (2019).





## APÊNDICE I – TESTES ESTATÍSTICOS PARA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO DO CONCRETO

Nas Tabelas I1 e I2 são apresentadas os resultados do critério do teste t *Student* para a velocidade do pulso ultrassônico para cada classe de concreto aos 28 e 91 dias, respectivamente.

Tabela I1 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na velocidade de pulso ultrassônico aos 28 dias.

<b>Teste estatístico - VPU - 28 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	2,1141	0,1020	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	2,8537	0,0462	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	2,1264	0,1006	2,7764	Não
C80-R e C80-OT	4	10,7255	0,0004	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).

Tabela I2 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na velocidade de pulso ultrassônico aos 91 dias.

<b>Teste estatístico - VPU -91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	0,1579	0,8822	2,7764	Não
C40-R e C40-OT	4	5,4008	0,0057	2,7764	Sim
C50-R e C50-OT	4	3,0286	0,0388	2,7764	Sim
C80-R e C80-OT	4	29,4264	0,0000	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).



## APÊNDICE J – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CONCRETO

As Tabela J1 a J8 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à tração na flexão de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio-padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela J1 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C25-R.

<b>C25 - REFERÊNCIA - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
4,82	0,94	Ok
4,38	1,05	Ok
4,63	0,10	Ok
Média	4,61	
Desvio-padrão	0,22	
Coeficiente de variação	4,78	

Fonte: Autor (2019).

Tabela J2 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C25-OT.

<b>C25 - OTIMIZADO - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
7,07	1,12	Ok
6,60	0,81	Ok
6,72	0,31	Ok
Média	6,80	
Desvio-padrão	0,24	
Coeficiente de variação	3,56	

Fonte: Autor (2019).

Tabela J3 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C40-R.

<b>C40 - REFERÊNCIA - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
6,08	1,02	Ok
6,36	0,04	Ok
6,60	0,98	Ok
Média	6,35	
Desvio-padrão	0,26	
Coefficiente de variação	4,11	

Fonte: Autor (2019).

Tabela J4 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C40-OT.

<b>C40 - OTIMIZADO - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
8,39	1,15	Ok
6,85	0,65	Ok
6,98	0,50	Ok
Média	7,41	
Desvio-padrão	0,86	
Coefficiente de variação	11,56	

Fonte: Autor (2019).

Tabela J5 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C50-R.

<b>C50 - REFERÊNCIA - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
10,43	0,48	Ok
10,56	0,67	Ok
9,27	1,15	Ok
Média	10,09	
Desvio-padrão	0,71	
Coefficiente de variação	7,02	

Fonte: Autor (2019).

Tabela J6 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C50-OT.

<b>C50 - OTIMIZADO - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
13,70	0,39	Ok
12,54	1,14	Ok
13,98	0,75	Ok
Média	13,41	
Desvio-padrão	0,76	
Coefficiente de variação	5,68	

Fonte: Autor (2019).

Tabela J7 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C80-R.

<b>C80 - REFERÊNCIA - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
12,87	0,87	Ok
12,32	1,09	Ok
12,69	0,23	Ok
Média	12,63	
Desvio-padrão	0,28	
Coefficiente de variação	2,21	

Fonte: Autor (2019).

Tabela J8 – Medidas estatísticas e resultados do critério do *Chauvenet* para resistência à tração na flexão do concreto C80-OT.

<b>C80 - OTIMIZADO - 91 DIAS</b>		
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Critério de <i>Chauvenet</i></b>	<b>Resultado</b>
14,47	1,06	Ok
14,15	0,14	Ok
13,93	0,93	Ok
Média	14,18	
Desvio-padrão	0,27	
Coefficiente de variação	1,90	

Fonte: Autor (2019).

Na Tabelas J9 são apresentados os detalhes do teste t para resistência à compressão para cada classe de concreto aos 91 dias de idade.

Tabela J9 – Teste t para avaliar a influência do empacotamento de partículas na resistência à compressão aos 91 dias.

<b>Teste estatístico 91 dias</b>					
<b>Tipo de concreto</b>	<b>GL</b>	<b>t</b>	<b>P(T&lt;=t) bi-caudal</b>	<b>t crítico</b>	<b>Diferença significativa?</b>
C25-R e C25-OT	4	11,5788	0,0003	2,7764	Sim
C40-R e C40-OT	4	2,0507	0,1096	2,7764	Não
C50-R e C50-OT	4	5,5328	0,0052	2,7764	Sim
C80-R e C80-OT	4	6,9178	0,0023	2,7764	Sim

Fonte: Autor (2019).