

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS QUADROS REIS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO AGREGADO  
GRAÚDO NAS PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO E  
ENDURECIDO DO CONCRETO ESTRUTURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO - PR

2018

VINICIUS QUADROS REIS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO AGREGADO  
GRAÚDO NAS PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO E  
ENDURECIDO DO CONCRETO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim

TOLEDO – PR

2018



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de N° 146

### **Análise da influência do diâmetro do agregado graúdo nas propriedades do estado fresco e endurecido do concreto estrutural**

por

**Vinícius Quadros Reis**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às **09:10 h** do dia **14 de Junho de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra  
(UTFPR – TD)

---

Prof. Dr. Evandro Marcos Kolling  
(UTFPR – TD)

---

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim  
(UTFPR – TD)  
Orientador

---

Visto da Coordenação  
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber  
Coordenador da COECI

À Deus por me guiar, abençoar e sempre me fortalecer em todos os momentos.

À minha família por me amparar em cada etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela vida, pela oportunidade de cursar uma graduação e a capacidade de adquirir conhecimento a fim de desempenhá-los em minha profissão.

À minha família por ser o meu alicerce, me fortalecer, amparar, dar carinho e amor nos momentos difíceis ao longo da graduação.

À minha namorada Letícia, pelo companheirismo, pelo amor e carinho, pelas palavras de apoio e de otimismo, e por sua dedicação em corrigir e sugerir melhorias a serem agregadas ao meu trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Lucas Boabaid Ibrahim, pelas orientações, sugestões, disposições para com meu trabalho, bem como, as correções e enriquecimento do mesmo.

À banca avaliadora, professores Carlos Eduardo Tino Balestra e Evandro Marcos Kolling, por todas as sugestões e contribuições destacadas na etapa inicial de meu trabalho.

Ao Engenheiro Civil Wilson Leobet, pelo auxílio na realização dos ensaios no laboratório de materiais de construção e na confecção dos corpos de prova de concreto.

À todos os meus amigos da graduação, pela oportunidade de trocar conhecimento, pelas experiências vivenciadas, pelas conversas e momentos de descontração.

Por fim, agradeço à todos os professores que me incentivaram a buscar conhecimento e sempre aprimorá-los.

“Faça o seu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”

(Mário Sérgio Cortella)

## RESUMO

REIS, Vinícius Quadros. Análise da influência do diâmetro do agregado graúdo nas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto estrutural. 2018. 68f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

O concreto, material constituído usualmente por agregados graúdos, miúdos, aglomerante e água, é na atualidade da construção civil nacional e internacional, um dos principais compostos utilizados na elaboração de elementos estruturais. Assim, pesquisas de cunho qualitativo dos materiais que o compõe, tornam-se essenciais no aprimoramento tecnológico do mesmo. Por ser constituído de outros materiais, denominados de primários ou formadores, o concreto acaba por exprimir em suas propriedades, características variáveis advindas do seu processo de formação e dos materiais empregados. Com isso, a referida pesquisa teve como objetivo analisar a influência ocasionada pela variação do diâmetro dos agregados graúdos basálticos nas propriedades do concreto com caráter estrutural, sendo destacadas características no estado fresco, como o abatimento tronco cônico da amostra, a coesão e o teor de ar, e também no estado endurecido, evidenciando principalmente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. De forma complementar, comparou-se os valores experimentais obtidos para o módulo de elasticidade estático, com a normativa nacional NBR 6118/2014, e as principais normativas internacionais como, ACI 318, EUROCODE 2/2004 e CEB Model Code/2010. A metodologia de dosagem e confecção dos corpos de provas de concreto foram de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Quanto aos resultados obtidos, evidenciou-se em termos de abatimento e plasticidade, que concretos com agregados de menores dimensões apresentam maior coesão entre as partículas e a pasta aglomerante. Já em relação a resistência à compressão, evidenciou-se que agregados de menores dimensões, como a brita 0, acarretam em significativo acréscimo no valor da propriedade, fato que não é constatado para o módulo de elasticidade, que retrata um comportamento igualitário para todas as faixas de agregados graúdos utilizados na elaboração das amostras. Ao se comparar os valores experimentais e teóricos do módulo de elasticidade estático, verificou-se variação na estimativa realizada por cada normativa, sendo algumas com características mais conservadoras.

**Palavras-chave:** Agregado graúdo. Dimensão do agregado. Influência nas propriedades. Resistência à compressão. Módulo de elasticidade.

## ABSTRACT

REIS, Vinícius Quadros. Analysis of the influence of the aggregate diameter on the fresh and hardened properties of the structural concrete. 2018. 68f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

Concrete, usually made up of coarse aggregates, sand, cement and water, is currently one of the main components used in the construction of structural elements. Thus, qualitative research of the materials that compose it, become essential in the technological improvement of the same. Because it is composed of other materials, called primers or formers, the concrete ends up expressing in its properties, variable characteristics that come from its formation process and the materials used. The aim of this research was to analyze the influence of the variation of the diameter of the coarse aggregates of basaltic on the concrete properties with a structural character. The characteristics of the fresh state were emphasized, such as the conical truncation of the sample, the air content, and also in the hardened state, showing mainly the compressive strength and modulus of elasticity. In a complementary way, the experimental values obtained for the static elastic modulus were compared with the national standard NBR 6118/2014, and the main international standards such as ACI 318, EUROCODE 2/2004 and CEB Model Code/2010. The methodology of dosing and confection of concrete test bodies was according to the Brazilian Association of Portland Cement (ABCP). As for the results obtained, it was evidenced in terms of abatement and plasticity, that concrete with smaller aggregates present greater cohesion between the particles and the cement paste. Regarding the compressive strength, it was evidenced that smaller aggregates, such as gravel 0, result in a significant increase in the value of the property, a fact that is not observed for the modulus of elasticity, which shows an egalitarian behavior for all bands of coarse aggregates used in the preparation of samples. When comparing the experimental and theoretical values of the static modulus of elasticity, there was variation in the estimation performed by each standard, some of them with more conservative characteristics.

**Keywords:** Coarse aggregate. Size of aggregate. Influence in the properties. Compressive strength. Modulus of elasticity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dimensão máxima do agregado x Resistência à compressão do concreto.....	22
Figura 2 – Influência do diâmetro dos agregados graúdos na resistência à compressão do concreto auto adensável.....	23
Figura 3 – Representação do módulo de elasticidade secante do concreto.....	28
Figura 4 – Representação do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto.....	29
Figura 5 – Etapas para o método de dosagem da ABCP.....	30
Figura 6 – Vista superior do molde metálico para os corpos de prova de concreto.....	35
Figura 7 – Vista lateral do molde metálico para o concreto.....	35
Figura 8 – Agregado miúdo.....	36
Figura 9 – Agregado graúdo.....	36
Figura 10 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	40
Figura 11 – Separação do agregado graúdo.....	40
Figura 12 – Frasco de Le Chatelier para determinação da massa específica do cimento.....	41
Figura 13 – Molde tronco de cone, placa e haste metálica utilizados na consistência do concreto.....	42
Figura 14 – Preparação da amostra de concreto conforme NBR 9833.....	43
Figura 15 – Determinação da massa da amostra de concreto.....	43
Figura 16 – Determinação da massa imersa do concreto endurecido, conforme NBR 9778.....	45
Figura 17 – Determinação da massa saturada superfície seca do concreto endurecido, conforme NBR 9778.....	45
Figura 18 – Determinação da massa seca da amostra de concreto endurecido.....	46
Figura 19 – Instalação dos medidores de deformação para os concretos.....	47
Figura 20 – Análise do Módulo de elasticidade estático dos concretos.....	47
Figura 21 – Moldes metálicos a serem utilizados para confecção dos corpos de prova.....	49
Figura 22 – Corpos de prova de concreto realizados com brita 0, 1 e 2.....	49
Figura 23 – Materiais utilizados para a elaboração do concreto com brita 0.....	53
Figura 24 – Materiais utilizados para a elaboração do concreto com brita 2.....	53

Figura 25 – Corpos de prova de concreto moldados de acordo com a NBR 5738.....	53
Figura 26 – Slump Test, abatimento realizado com concreto de brita 0 conforme a norma NBR NM 67.....	54
Figura 27 – Slump Test, abatimento realizado com concreto de brita 2 conforme a norma NBR NM 67.....	54
Figura 28 – Curva Abrams relacionando a resistência à compressão do concreto aos 28 dias, a relação água/cimento e a resistência do cimento.....	68

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resistência à compressão das rochas.....	20
Quadro 2 – Módulo de elasticidade de rochas utilizados na construção civil.....	20
Quadro 3 – Resultados de análise da resistência à compressão dos concretos.....	24
Quadro 4 – Desvio padrão adotado em cada condição de preparo do concreto.....	27
Quadro 5 – Equações propostas pelas normas nacionais e internacionais para determinação do módulo de elasticidade do concreto.....	30
Quadro 6 – Consumo de água para o método da ABCP (l/m <sup>3</sup> ).....	31
Quadro 7 – Obtenção do volume de agregado graúdo seco.....	32
Quadro 8 – Quantitativo de corpos de prova.....	34
Quadro 9 – Limites granulométricos utilizados para a separação dos agregados graúdos.....	40
Quadro 10 – Agregado miúdo - Granulometria.....	50
Quadro 11 – Características do agregado miúdo para a dosagem do concreto.....	51
Quadro 12 – Características do agregado graúdo para a dosagem do concreto.....	51
Quadro 13 – Características do aglomerante.....	52
Quadro 14 – Características do concreto a ser dosado.....	52
Quadro 15 – Slump Test: Determinação da consistência do concreto.....	54
Quadro 16 – Características dos concretos produzidos.....	55
Quadro 17 – Massas, Absorção de água e Índice de vazios apresentados pelos corpos de prova de concretos após 28 dias.....	57
Quadro 18 – Resistência à compressão axial apresentados pelos concretos com brita 0 aos 28 dias.....	57
Quadro 19 – Resistência à compressão axial apresentados pelos concretos com brita 1 aos 28 dias.....	58
Quadro 20 – Resistência à compressão axial apresentados pelos concretos com brita 2 aos 28 dias.....	58
Quadro 21 – Informações estatísticas das amostras dos concretos aos 28 dias.....	59
Quadro 22 – Módulo de elasticidade e parâmetros estatísticos dos concretos aos 28 dias.....	60
Quadro 23 – Análise comparativa do módulo de elasticidade experimental e o teórico.....	61
Quadro 24 – Variação do módulo de elasticidade estático.....	62

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 AGREGADOS MIÚDOS E GRAÚDOS.....	17
2.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS .....	18
2.2.1 Massa específica.....	18
2.2.2 Granulometria.....	18
2.2.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos agregados graúdos.....	19
2.3 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	21
2.4 CONCRETO ESTRUTURAL E SUAS PROPRIEDADES.....	25
2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	26
2.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	27
2.6.1 Módulo de elasticidade secante e módulo de elasticidade tangente inicial.....	28
2.6.2 Equações teóricas para módulo de elasticidade.....	29
2.7 DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP) .....	30
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	35
3.1.1 Cimento Portland.....	35
3.1.2 Agregados miúdos e graúdos.....	36
3.2 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS ...	36
3.2.1 Ensaio de massa específica aparente dos agregados miúdos e graúdos.....	37
3.2.2 Ensaio de massa unitária compactada dos agregados graúdos.....	38
3.2.3 Ensaio de granulometria dos agregados miúdos e graúdos.....	39
3.2.4 Ensaio de massa específica do cimento.....	41
3.3 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO .....	42
3.3.1 Ensaio de concreto no estado fresco: Abatimento tronco de cone.....	42
3.3.2 Ensaio de concreto no estado fresco: Teor de ar na amostra e massa específica.....	43

3.3.3 Ensaio de concreto no estado endurecido: Índice de vazios, massa específica seca e absorção de água.....	45
3.3.4 Ensaio de concreto no estado endurecido: Módulo de elasticidade tangente inicial estático do concreto.....	47
3.3.5 Ensaio de concreto no estado endurecido: Resistência à compressão axial....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1 ANÁLISE DOS MATERIAIS PRIMÁRIOS E DOSAGEM DO CONCRETO ESTRUTURAL.....	50
4.1.1 Característica dos agregados graúdos e miúdos.....	50
4.1.2 Característica do aglomerante: Cimento Portland CP II Z.....	51
4.1.3 Definição do traço para o concreto.....	52
4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	54
4.2.1 Consistência do concreto: Slump Test – Abatimento do concreto pelo método tronco de cone de acordo com a norma NBR NM 67.....	54
4.2.2 Teor de ar e Massa específica do concreto – NBR 9833.....	55
4.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	56
4.3.1 Absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova de concreto – NBR 9778.....	56
4.3.2 Análise comparativa da resistência à compressão axial dos corpos de prova de concreto confeccionados.....	57
4.3.3 Análise comparativa do módulo de elasticidade estático dos corpos de prova de concreto confeccionados.....	60
4.3.4 Análise comparativa do módulo de elasticidade estático dos concretos confeccionados com as normativas nacionais, internacionais e a literatura.....	61
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>
ANEXO A – Curva de Abrams.....	68

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil desde a sua idealização até tempos atuais. Essa mistura de materiais primários que comumente é compreendida de agregados graúdos e miúdos, aglomerante e água, podendo também serem utilizados aditivos como plastificantes, retardadores ou aceleradores de pega e incorporados de ar, é capaz de apresentar características físicas importantíssimas para o desenvolvimento de uma gama de construções com finalidade da utilização do ser humano.

Quando em seu estado sólido, o composto apresenta propriedades mecânicas capazes de resistir a solicitações de esforços no elemento confeccionado com o material, assim, a utilização do mesmo é evidenciada em diversificadas construções atualmente, como por exemplo, em edificações simples ou de múltiplos pavimentos, nos elementos estruturais de viadutos, na pavimentação rígida de rodovias, em pontes, na elaboração de grandes galerias pluviais de cidades, entre outras.

A mistura aglomerante em comparação a outros materiais também empregados na Engenharia Civil, apresenta características favoráveis para o seu uso, como por exemplo, a sua boa resistência à compressão, a facilidade de moldagem e adaptação na maioria das execuções de projetos arquitetônicos, e também o fator econômico, pois, o processo de fabricação do mesmo tem custos inferiores a materiais como o aço, por exemplo (ALHADAS, 2008).

Por ser um dos principais materiais no ramo da construção civil, o concreto tem um amplo foco para estudos variados, principalmente quando se trata de suas propriedades mecânicas. Quando em seu estado endurecido, Neville e Brooks (2013) destacam que o mesmo apresenta características importantes a serem avaliadas, como, por exemplo, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, que são amplamente utilizadas na elaboração de projetos estruturais.

A primeira característica mencionada é uma das principais a serem consideradas nos projetos de concreto armado<sup>1</sup>, sendo que, a mesma representa a capacidade que o elemento tem de resistir aos esforços de compressão solicitados ao longo de sua vida útil. Já a segunda característica, fornece a deformação elástica

---

<sup>1</sup> Elemento formado pela presença do concreto simples juntamente com a adesão de barras de aço.

inicial que ocorre nos elementos constituídos de concreto devido principalmente as tensões atuantes, geradas, conforme a normativa NBR 6118 descrita pela ABNT (2014), a partir da combinação de cargas, sendo estas oriundas do peso próprio do elemento, de sobrecargas fixas impostas ou também de forças advindas de eventos externos, como por exemplo a ação dos ventos. Tal deformação é descrita na NBR 8522, de acordo com a ABNT (2017), ocorrente nos 30% iniciais da resistência à compressão do concreto.

Por ser uma mistura composta de materiais primários, a qualidade do concreto conseqüentemente terá certa dependência da qualidade apresentada pelos materiais que o compõe, já que, de acordo com Ambrozewicz (2012), os agregados representam cerca de 3/4 do volume na dosagem do concreto, e em sua maioria ocupados por agregados graúdos, logo, características físicas e químicas destes, bem como, a proporção utilizada na mistura, interferem no elemento final a ser produzido (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Em idades mais avançadas, os agregados de granulometria maiores influenciam diretamente as propriedades mecânicas no estado endurecido do concreto, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Características como a dimensão máxima, a resistência à compressão e o módulo de deformação pertencentes aos materiais particulados, acabam por contribuírem com a recepção de esforços solicitados no elemento moldado em concreto, conseqüentemente, apresentam relevância para os projetos estruturais. A tipologia mineral do agregado também é um agente influenciador, visto que, materiais como basalto, granito, arenito ou qualquer outro tipo litológico de rocha, detém propriedades diferentes entre si, sendo cada qual originária de um processo de formação natural, interferindo diretamente no desempenho do elemento final produzido.

Destacando a variação da dimensão do agregado a ser utilizado no preparo do concreto, autores como Khaleel, Al-mishhadani e Razak (2011), Mehta e Monteiro (2014) e Neville e Brooks (2013), acreditam que o aumento da dimensão do agregado graúdo resulta na tendência de apresentar menor resistência à compressão para o concreto confeccionado, pois, a organização e/ou disposição dos grãos particulados de dimensões maiores é inferior em comparação a grãos de menores dimensões, logo, granulometrias menores evidenciam um melhor ajuste das partículas, uma maior área de contato e também uma melhor atuação em conjunto com a pasta aglomerante

nas denominadas regiões de zonas de transição existente no concreto, retardando a fissuração imediata e posteriormente o rompimento da área de atuação dos esforços.

Além das interferências destacadas anteriormente, Alhadad (2008) complementa que o desempenho de estruturas de concreto, também é dependente de alguns fatores na elaboração do mesmo, como por exemplo, a qualidade e quantidade adequadas dos materiais a serem utilizados, a realização de adensamento de forma homogênea na mistura, o tempo de cura, a desforma adequada e os cobrimentos das barras de aço utilizadas. Logo, a importância e os cuidados com as etapas iniciais podem garantir uma melhora nas propriedades do concreto elaborado.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A análise do comportamento do concreto, principalmente em seu estado sólido, quanto a quesitos como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, é extremamente importante na elaboração e preparação de projetos de estruturas. A busca por melhoria nas propriedades, qualidade do material, bem como a redução do custo-benefício em sua produção, alavancam pesquisas científicas referentes ao assunto. Uma das possibilidades de melhoria de desempenho da mistura são as características dos seus materiais primários de formação, tendo destaque para os agregados graúdos, que conforme descrevem Mehta e Monteiro (2014), são importantes influenciadores das propriedades finais apresentadas pelo composto.

A variação do diâmetro dos agregados, a organização entre os grãos particulados e a interação com a pasta aglomerante, são possíveis influências existentes entre os componentes primários e a mistura final elaborada. Desta forma, o trabalho visou contribuir para as pesquisas envolvendo as propriedades mecânicas do concreto, tanto em seu estado fresco quanto em seu estado endurecido, destacando principalmente as características apresentadas frente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos mesmos, verificando seu comportamento quando utilizados diferentes dimensões de agregados graúdos de origem basáltica.

Também foi escopo da pesquisa, analisar e comparar o módulo de elasticidade obtido experimentalmente com as descrições e considerações das normativas nacionais e internacionais, já que, a normativa brasileira NBR 6118/2014, acabou por modificar a expressão utilizada para o parâmetro do concreto, sendo



incrementado um coeficiente “ $\alpha_e$ ”, que é dependente do tipo do agregado graúdo utilizado na confecção do concreto estrutural.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos, tanto geral quanto específicos desta pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência das diferentes dimensões (faixa granulométrica entre 4,75 mm à 25 mm) de agregado graúdo basáltico no comportamento das propriedades do concreto com resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa<sup>2</sup>.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Dosar e estabelecer um traço para a produção de um concreto com finalidade estrutural de acordo com procedimentos descritos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP);
- Avaliar propriedades no estado fresco do concreto, como a massa específica aparente, o abatimento e o teor de ar na amostra;
- Avaliar propriedades no estado endurecido do concreto confeccionado, como a massa específica no estado seco, o índice de vazios, a resistência à compressão característica e o módulo de elasticidade tangente inicial estático;
- Avaliar a influência da variação da dimensão dos agregados graúdos basálticos na resistência à compressão e no módulo de elasticidade estático tangente inicial do concreto com finalidade estrutural;
- Analisar e comparar os valores experimentais dos módulos de elasticidade estáticos, com os valores teóricos presentes nas normativas NBR 6118/2003, NBR 6118/2014, ACI 318, EUROCODE 2/2004 e CEB Model Code/2010.

---

<sup>2</sup> Mega Pascal, unidade representativa da relação existente entre uma força sobre uma parcela de área.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção foram abordados os conceitos e características dos agregados miúdos e graúdos, sendo analisado neste último a influência da utilização dos diferentes diâmetros. Além disso, também foram retratados os conceitos e as propriedades mecânicas no estado fresco e no estado endurecido do concreto.

### 2.1 AGREGADOS MIÚDOS E GRAÚDOS

Os agregados são materiais particulados, que tem atividade química praticamente nula, são compostos com diversificados tamanhos e formas irregulares, podendo ser arredondados, cubóides ou lamelares. Eles ocupam uma parcela de 3/4 do volume do concreto e tem preço relativamente menor quando comparado a outros componentes (AMBROZEWICZ, 2012).

São definidos como agregados miúdos (areias) quando apresentam diâmetros menores de 4,75 mm e a maioria de seus grãos não passam pela peneira de abertura de 0,075 mm. Enquanto que, denominam-se agregados graúdos (britas) quando apresentam diâmetros inferiores a peneira de 75 mm e superiores a peneira de 4,75 mm, podendo ser subdivididos em classes de acordo com a faixa de dimensão dos grãos, como por exemplo, brita 0, brita 1 e brita 2 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b; ABNT, 2009c; AMBROZEWICZ, 2012; BAUER, 2013).

Os agregados podem ser classificados como naturais, quando encontrados em forma particulada na natureza, ou artificiais, quando obtidos por meio de processos industrializados. Os mesmos apresentam diferentes propriedades físicas, como a massa específica, textura superficial, formatos, tipologia mineral, resistência à compressão, módulo de elasticidade e afins (BAUER, 2013). Tais propriedades, influenciam, de acordo com Alhadad (2008), diretamente nas propriedades do concreto quando este encontra-se em estado fresco ou endurecido, assim, a seleção correta dos agregados no preparo do concreto tem importância em seu desempenho estrutural.

## 2.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Os materiais particulados utilizados no preparo do concreto, apresentam características físicas importantes a serem verificadas, pois, tais propriedades influenciam o estado final do concreto, bem como, podem proporcionar misturas mais econômicas (ALHADAS, 2008). Desse modo, foram destacadas algumas características dos agregados relevantes na dosagem de concretos, como, a massa específica, granulometria, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

### 2.2.1 Massa específica

O agregado, sendo considerado miúdo ou graúdo, tem como uma de suas propriedades físicas, a massa específica, que é descrita como a relação entre a massa e seu volume, sendo incluso os poros permeáveis do agregado, assim como, os vazios presentes entre as partículas. A mesma também pode ser denominada de massa específica aparente ou massa unitária (ABNT, 2009a).

Conforme é destacado por Barbosa (2009), a massa específica é de grande importância para a caracterização dos materiais, pois, métodos de dosagens para a confecção do concreto, como o proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), utilizam-se das mesmas para a estimativa de quantitativos no traço do concreto, de forma a se obter o melhor desempenho do mesmo.

### 2.2.2 Granulometria

Os agregados utilizados para a produção do concreto, apresentam diferentes diâmetros e formatos podendo conter grãos mais achatados e alongados, assim como, grãos mais arredondados, logo, caracterizando-se como uma propriedade física do material. A granulometria, processo que analisa a distribuição de diâmetros dos agregados, é de acordo com Bauer (2013), essencial para caracterizar as tipologias, pois, através do ensaio de análise granulométrica, proposto pela ABNT (2003), caracterizam-se os agregados como miúdos ou graúdos, como também repassam informações referentes a uniformidade dos grãos e seus formatos, que segundo Neville e Brooks (2013), influenciam diretamente no comportamento de pastas e concretos nos estados fresco e endurecido.

No estado fluido do material, a presença de grãos mais arredondados e lisos, garantem uma menor consistência física, já que, a pouca rugosidade entre os agregados e a pasta aglomerante permitem a fluidez mais acentuada entre as partículas. Alhadas (2008) destaca que concretos confeccionados com agregados pouco rugosos tendem a apresentar uma menor adesão entre a pasta e as partículas granulares, conseqüentemente a resistência aos esforços de compressão pode ser de menor magnitude. A adesão de aglomerante (cimento) ou material fino na mistura produzida detém a finalidade de melhorar a estabilidade entre os grãos, tornando o conjunto moldável.

A presença de agregados graúdos com superfícies achatadas e alongadas, evidenciam maior dificuldade na homogeneização da mistura, além da necessidade de maior presença de aglomerante para envolvê-las, assim, acarretando em um maior consumo de um dos principais materiais da composição do concreto e de certa forma tornando a massa aglomerante produzida menos econômica (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A presença de partículas cubóides geralmente se sobressaem dos demais formatos, visto que, ao contrário dos demais, eles apresentam rugosidade em sua superfície que proporciona uma maior adesão do aglomerante, como também, detém granulometria favorável a organização entre os agregados e os demais materiais constituintes do concreto.

As propriedades desenvolvidas no estado fresco do concreto estão diretamente interligadas com o estado endurecido do mesmo, compondo alterações principalmente em propriedades de resistência e deformabilidade do concreto.

### 2.2.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos agregados graúdos

Parâmetros físicos que apresentam valores superiores a resistência dos concretos convencionais, logo, não apresentam restrições em seu uso para a dosagem dos mesmos. Porém, ao serem empregados agregados na elaboração de concretos de alta resistência ( $\geq 50$  MPa), se faz necessário uma verificação mais cautelosa do agregado, pois, tais materiais interferem diretamente no desempenho dos elementos estruturais já que auxiliam na recepção dos esforços solicitados (WU et al., 2001).

A resistência das variadas rochas utilizadas na construção civil, conforme é destacado por Ambrozewicz (2012), geralmente apresentam resistências à compressão de 2,5 a 3 vezes superiores a resistência de projeto do concreto ( $f_{cj}$ ), conseqüentemente, tais partículas não são rompidas quando submetidas aos esforços impostos. De modo a elucidar tal afirmação, Bauer (2013) relata resistências médias obtidas para algumas das principais rochas utilizadas para a produção de concretos, como pode ser visualizado no Quadro 1.

Quadro 1 – Resistência à compressão das rochas

<b>Rocha</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
Granito	90
Basalto	140 a 180
Gnaisse	90 a 110
Calcário	160
Arenito	50 a 180

Fonte: Dados obtidos de Bauer (2013)

Todos os valores apresentados no Quadro 1, são superiores a resistência à compressão característica do concreto de 25 MPa, convencionalmente utilizado para a construção civil urbana, nesse sentido, concorda-se com a afirmação de Alhadad (2008) em que a pasta de cimento torna-se o principal influenciador direto na resistência do concreto confeccionado, sendo a mesma a receptora da maior parcela de esforços transferidos, logo, a resistência do concreto é refletida de acordo com a resistência da pasta aglomerante.

Quanto ao módulo de elasticidade dos agregados graúdos, Bauer (2013) destaca no Quadro 2, valores médios obtidos para a determinada propriedade, exprimindo que os agregados geralmente detêm valores superiores ao do concreto, conseqüentemente, também é responsabilidade da pasta aglomerante a maior parcela de deformação no concreto.

Quadro 2 – Módulo de elasticidade de rochas utilizados na construção civil

<b>Rocha</b>	<b>Módulo de elasticidade (MPa)</b>
Granito	34000
Basalto	34000 a 80000
Gnaisse	46000 a 66000
Calcário	74000
Arenito	20000

Fonte: Dados obtidos de Bauer (2013)

Compreende-se que, na produção de concretos de resistências usuais na construção civil, dentro de uma faixa entre 20 à 30 MPa, os agregados graúdos desempenham uma função discreta no desempenho do conjunto, ficando a cargo da qualidade da pasta aglomerante, a principal função atrelada as propriedades do concreto. Entretanto, conforme ocorre a diminuição da relação água/cimento para algo em torno de 0,4, Wu et al. (2001) destaca a atuação do agregado graúdo de forma mais contundente no concreto, passando também a ser agente influenciador das propriedades do mesmo.

### 2.3 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Em pesquisas envolvendo a tecnologia do concreto, muitas vezes é dado ênfase a relação existente entre os parâmetros da água/cimento com a resistência do concreto, omitindo a interferência da resistência do agregado na pasta, já que a mesma, apresenta-se de forma superior (MEHTA; MONTEIRO, 2008). No entanto, certas características dos agregados como a origem mineral, a dimensão granulométrica, o formato e a textura superficial, são influentes na pasta, como é destacado pelos mesmos autores:

Frequentemente, o efeito das características do agregado sobre a resistência do concreto pode determinar uma alteração da relação água/cimento. Porém, há evidências suficientes na literatura existente de que nem sempre este é o caso. A partir de considerações teóricas, pode-se também prever que, independente da relação água/cimento, a dimensão, forma, textura superficial e mineralogia das partículas de agregado influenciarão nas características da zona de transição na interface e, portanto, afetarão a resistência do concreto. (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 57)

Em conjunto com o agregado graúdo, a estrutura da pasta de cimento, sem sofrer solicitações de esforços externos, apresenta falhas e descontinuidades (NEVILLE; BROOKS, 2013), onde acabam por gerar zonas frágeis e suscetíveis ao aparecimento de microfissuras que reduzem a resistência e a qualidade do concreto confeccionado, ou seja, influenciam diretamente nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (JEBLI et al., 2018). Nessa perspectiva, Mehta e Monteiro (2008) relacionam essa redução da resistência à elevação do fator água/cimento na zona de transição da pasta, que acaba por deixá-la enfraquecida.

Apesar de inicialmente a pasta de aglomerante ser o principal receptor dos esforços solicitados no concreto, a medida que a idade do concreto progride ocorre uma redistribuição dos esforços, sendo que parte dos mesmos são repassados para os agregados, ocasionando na contribuição destes para a resistência do conjunto (ALHADAS, 2008). Deste modo, a qualidade e as características dos agregados empregados na produção do elemento passam a ter destaque maior na composição do concreto.

Mehta e Monteiro (2008) relatam que a utilização de diâmetros maiores nos agregados graúdos ocasionará na distribuição das fissuras nas interfaces da pasta de cimento, pois, Alhadadas (2008) afirma que as zonas de transição da mistura se tornam mais fracas, devido a menor área superficial e também ao aumento de tensões entre a pasta e os agregados.

Conforme é destacado nos resultados experimentais obtidos por Cordon e Gillispie (1963) *apud* Mehta e Monteiro (2008), a resistência à compressão em concretos de alta e média resistência, aos 28 dias de cura, são influenciadas diretamente pela dimensão máxima característica dos agregados graúdos utilizados na mistura. Enquanto que para concretos com resistência à compressão baixa, o efeito não é tão perceptível. Tal afirmação é demonstrada na Figura 1, onde os autores relacionam a resistência à compressão de três qualidades de concretos com variados diâmetros de agregados graúdos.

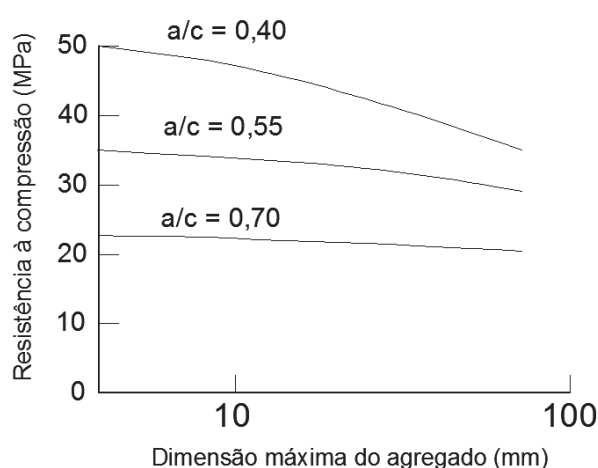


Figura 1 - Dimensão máxima do agregado graúdo x Resistência à compressão do concreto  
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008, p. 57)

Os mesmos autores relatam que normalmente o diâmetro maior dos agregados influencia negativamente nas propriedades do concreto com baixa relação água/cimento, o que não fica evidente nas misturas com maior relação água/cimento.

A influência do diâmetro dos agregados utilizados, também pode ser constatada em outra propriedade do concreto, o módulo de elasticidade estático, que conforme Proske e Graubner (2005) há uma diminuição quando empregado agregados de dimensões maiores, entretanto, ocorre o aumento do valor da propriedade quando utilizadas granulometrias menores, já que, as propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto estão diretamente vinculadas.

Khaleel, Al-mishhadani e Razak (2011), na pesquisa intitulada como “The Effect of Coarse Aggregate on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)” analisaram as propriedades no estado fresco e endurecido de concretos auto adensáveis, onde detinham como principal objetivo a influência proporcionada pela utilização de dimensões diferentes de agregados graúdos, para tanto, definiram uma proporção de materiais (traço) constante para todos os corpos de provas realizados, alterando somente a inserção da dimensão do agregado graúdo na mistura. Ao final, constaram que a utilização de agregados com dimensões próximas de 10 mm (brita 0), resultaram tanto em uma maior resistência à compressão quanto no módulo de elasticidade estático, quando comparados a agregados com dimensões próximas a 20 mm (brita 1), evidenciando a influência positiva dos menores diâmetros nas propriedades endurecidas da mistura.

A Figura 2 expressa os resultados de resistência à compressão do concreto obtidos pelos autores, onde as abreviaturas CU, C e CL representam respectivamente os agregados de cascalho não esmagado, cascalho esmagado e calcário esmagado. Enquanto que MU, MC e ML, são referentes aos mesmos agregados, porém com o emprego da substância metacaulim, utilizada na pesquisa em substituição de parte do cimento Portland.

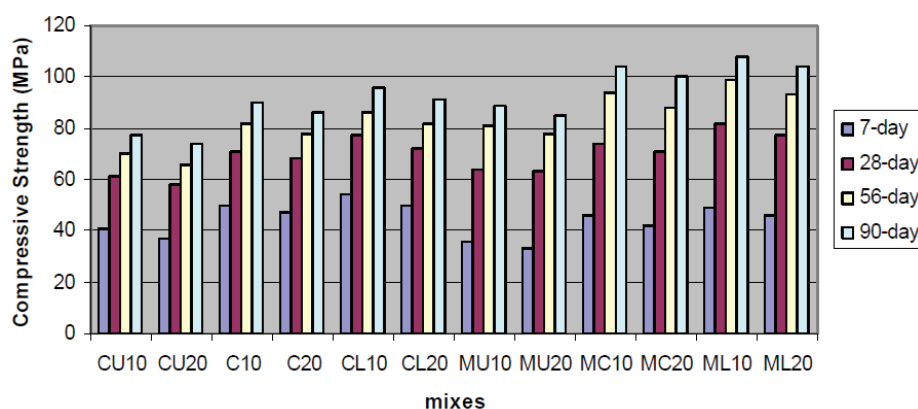


Figura 2 – Influência do diâmetro dos agregados graúdos na resistência à compressão do concreto auto adensável

Fonte: Khaleel, Al-mishhadani e Razak (2011)



Os mesmos autores também destacam que os agregados graúdos de dimensões menores são melhores envoltos pela pasta de cimento e conseqüentemente a formação da zona de transição é fortalecida no conjunto.

Paralelo as pesquisas com materiais primários convencionais, Uddin et al. (2017), na pesquisa intitulada *“Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete”*, analisaram agregados graúdos reciclados provenientes de restos de material cerâmico, como tijolos e telhas, e verificaram que ao serem utilizados diâmetros de até 37,5 mm, os concretos confeccionados apresentaram aumento na resistência à compressão, já para a mesma relação de água/cimento, porém com diâmetros maiores do que os descritos anteriormente, os autores evidenciaram efeito contrário na propriedade da massa. Tais resultados levam a crer na interferência direta existente da dimensão dos materiais utilizados na composição do traço do concreto.

De forma complementar Wu et al. (2001) acreditam que a tipologia do agregado graúdo é um ponto notável a ser destacado nas propriedades mecânicas do concreto endurecido. No Quadro 3, são apresentados dados obtidos pelos autores em sua pesquisa descrita como *“Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete”*, onde nota-se grande variação na propriedade mecânica de resistência à compressão ( $f_c$ ) do concreto aos 28 dias, sendo que foram utilizados 4 tipos de agregados graúdos descritos como Quartzo (CQ), Granito (CG), Calcário (LS) e Mármore (MB).

Quadro 3 – Resultados de análise da resistência à compressão dos concretos

W/C	Aggregate	$f_c$ (MPa)	W/C	Aggregate	$f_c$ (MPa)	W/C	Aggregate	$f_c$ (MPa)
0,26	CQ	98,2	0,44	CQ	70,4	0,55	CQ	44,8
	CG	99,1		CG	65,8		CG	43,2
	LS	83,4		LS	60,5		LS	46,6
	MB	79,8		MB	62,1		MB	45,0

Fonte: Adaptado de Wu et al., 2001

Os autores atrelam a variação da resistência à compressão do concreto, as características físicas dos agregados graúdos que o compõem, destacando que baixas relações de água/cimento fortalecem a influência do material primário na qualidade do concreto.

## 2.4 CONCRETO ESTRUTURAL E SUAS PROPRIEDADES

O concreto estrutural, conforme prevê a ABNT (2014), é aquele que pode ser destinado para a elaboração de elementos estruturais, como fundações, pilares, vigas, lajes e afins, ou seja, tem como funcionalidade principal a resistência a esforços internos e externos submetidos a uma edificação, por exemplo. Quando empregados nas construções civis urbanas, devem apresentar uma resistência característica à compressão com no mínimo 25 MPa.

Essa mistura de aglomerantes, agregados e água, podendo conter, ou não, aditivos melhoradores, tem propriedades que de acordo com Pacheco, Calmon e Zandonade (2007), são de fundamental importância para o projeto estrutural a ser executado, pois, com a determinação da resistência à compressão e o módulo de elasticidade, por exemplo, pode-se prever comportamentos estruturais dos elementos de concreto, como a flecha de serviço imediata, ou também a abertura de fissuras.

Os projetos estruturais são desenvolvidos de acordo com dados obtidos por meio de ensaios de compressão do concreto, mas, para se ter uma previsão de um comportamento realista do mesmo, se faz necessário o conhecimento do módulo de elasticidade, retração, fluência e outros parâmetros (NETO; HELENE, 2002).

As principais propriedades mecânicas identificadas no concreto em seu estado fresco são, a consistência, a trabalhabilidade, a coesão e a massa específica (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Quanto a trabalhabilidade, os mesmos autores, destacam que:

[...] A trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção de adensamento total. O trabalho interno útil é uma propriedade física inerente do concreto e é o trabalho ou energia exigido para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto. (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 78)

A trabalhabilidade é uma propriedade do concreto fresco que verifica se o mesmo é apto a ter finalidade na construção civil, logo, deve apresentar certa fluidez, coesão e resistência à segregação do material (NEVILLE; BROOKS, 2013). Nesse sentido, a consistência é definida como um parâmetro da trabalhabilidade, podendo ser determinada no ensaio tronco de cone, prescrito pela normativa NBR NM 67, sendo que é evidenciada pelo abatimento registrado da mistura (ABNT, 1998).

Outra propriedade de destaque no concreto é a massa específica normal, que a ABNT (2014), descreve para concreto estrutural a faixa de valores compreendidos entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  e  $2800 \text{ kg/m}^3$ . Assim, Neville e Brooks (2013) relatam a influência direta da massa específica na resistência do concreto, já que, “Devido à resistência do concreto ser afetada significativa e negativamente pela presença de vazios na massa compactada, é fundamental alcançar a maior massa específica possível. [...]” (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 78).

Os autores ainda complementam destacando que a resistência à compressão do concreto é reduzida quando o mesmo apresenta vazios em sua composição, já que, “[...] a presença de vazios no concreto reduz sua massa específica e diminui bastante a resistência: 5% de vazios podem diminuir em cerca de 30% a resistência.” (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 79).

No estado endurecido, o concreto apresenta propriedades fundamentais para a avaliação de seu uso e desempenho na elaboração de elementos estruturais. Autores como Neville e Brooks (2013) e Bauer (2013), destacam a resistência à compressão e o módulo de elasticidade como principais propriedades a serem analisadas.

## 2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Um parâmetro fundamental do concreto, é a resistência à compressão, que conforme é destacado por Mehta e Monteiro (2014), trata-se da capacidade que o material tem de resistir às tensões sem sofrer rompimento. Os autores relatam que a resistência se relaciona diretamente com as tensões últimas a serem resistidas, ou seja, os esforços máximos que o elemento estrutural resiste antes de ir a ruína. Também destacam que o corpo de prova de concreto submetido a um máximo esforço de tração terá sua fratura descrita como ruptura, mas, se o esforço de compressão for solicitado denomina-se a fratura como sendo rompida.

A resistência à compressão no concreto, conforme a ABNT (2015a), é influenciada de acordo com o modo de preparo da mistura, se a mesma apresenta um controle tecnológico ou não, ou seja, se no procedimento da dosagem, os materiais são pesados.

São evidenciadas na normativa NBR 12655/2015, três condições de preparo (A, B e C), sendo que a primeira, apresenta o grau de confiabilidade maior, e

consequentemente o desvio padrão da resistência a ser aferida é menor do que nas demais condições. No Quadro 4, são demonstradas as condições de preparo do concreto e o desvio padrão considerado em cada situação.

Quadro 4 – Desvio padrão adotado em cada condição de preparo do concreto

Condição de preparo do concreto	Descrição	Desvio padrão (MPa)
A	Aplicável a todas as classes de concreto, sendo que os componentes do mesmo são medidos em massa e a quantidade de água é corrigida conforme umidade dos agregados.	4,0
B	Aplicável as classes C10 e C20 do concreto, sendo que o aglomerante e os agregados são medidos em massa, enquanto que a água é aferida em volume.	5,5
C	Aplicável as classes C10 e C15 do concreto, onde somente o aglomerante é medido em massa.	7,0

Fonte: Adaptado da ABNT (2015a)

O desvio padrão indicado pela ABNT (2015a), é consequência da possibilidade de ocorrência de discrepância dos resultados no ensaio de resistência à compressão axial do concreto, assim, é sugerido que na dosagem empírica seja assumido uma resistência à compressão média ( $f_{cmj}$ ), expressa pela equação 1, maior do que a resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) a ser utilizada em projeto estrutural, garantindo, de acordo com a ABNT (2014), uma distribuição normal com 5% de possibilidade de resistências menores que a definida em projeto.

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

Sendo:

$f_{cmj}$ : Resistência média à compressão da dosagem do concreto (MPa)

$f_{ck}$ : Resistência à compressão característica do concreto (MPa)

$S_d$ : Desvio padrão conforme a condição de preparo do concreto (MPa)

## 2.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é um parâmetro necessário a ser verificado nas estruturas de concreto, pois, relaciona-se diretamente com a deformação de seus componentes quando aplicado esforços de compressão. Assim, estimar a deflexão

que ocorrerá nos elementos estruturais, é necessário para garantir que o mesmo não venha a sofrer um colapso (GALOBARDES et al., 2014; ALSALMAN et al., 2017).

Als Salman et al. (2017), também destaca que essa propriedade mecânica do concreto, pode ser obtido por meio de ensaios laboratoriais ou estimado através de equações empíricas propostas por normativas de cada região.

### 2.6.1 Módulo de elasticidade secante e módulo de elasticidade tangente inicial

Os módulos de elasticidade, também podem ser denominados de módulos de deformação do concreto, e são apresentados em dois tipos principais: módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ). Ambos relacionam as tensões aplicadas no concreto e as deformações específicas sofridas pelo mesmo, assim como, retratam comportamentos que o concreto pode vir a apresentar com a sua utilização como elemento estrutural (ABNT, 2017).

O primeiro módulo, é relacionado como o coeficiente de angulação originado entre a reta AB e o eixo das deformações específicas do concreto ( $\epsilon$ ), onde, a reta AB tem suas extremidades entre 0,5 MPa e  $\sigma_b$ <sup>3</sup>, como pode ser visualizado na Figura 3.

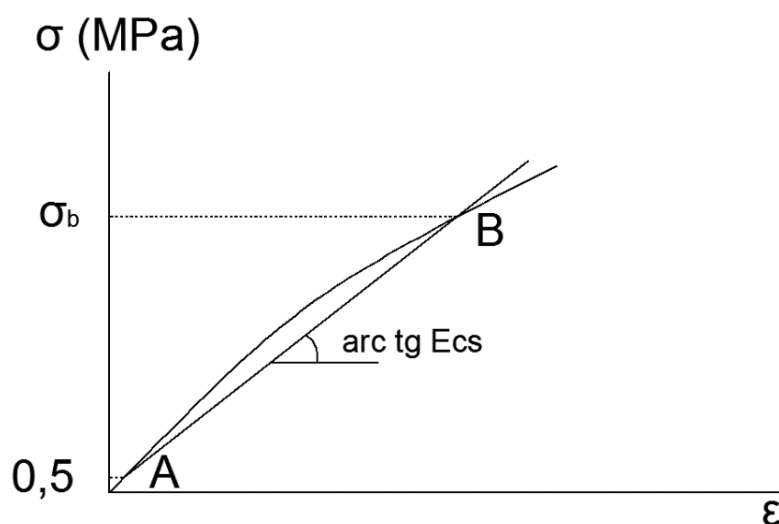


Figura 3 – Representação do módulo de elasticidade secante do concreto  
Fonte: ABNT NBR 8522 (2017)

O módulo de elasticidade secante, conforme descreve a ABNT (2014), é utilizado para a simulação do comportamento das estruturas em que o concreto ainda apresenta elasticidade, ou seja, as deformações ocorridas devido ao carregamento

<sup>3</sup> Tensão arbitrária ou comumente utilizada a tensão equivalente a 30% da resistência característica à compressão do concreto analisado.

voltam ao estado inicial após o descarregamento do elemento estrutural. Nas verificações de estado limite de serviço (ELS), o referente módulo é comumente empregado.

O segundo módulo, descrito como sendo o módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ), é caracterizado como equivalente ao módulo de elasticidade secante entre as tensões  $\sigma_a$  de 0,5 MPa e  $\sigma_b$  sendo 30% da resistência à compressão do concreto analisado (ABNT, 2017). Usualmente é empregada como uma propriedade do concreto para análise da estrutura de forma global. Na Figura 4, é representado a curva tensão-deformação para a obtenção do referido módulo de elasticidade.

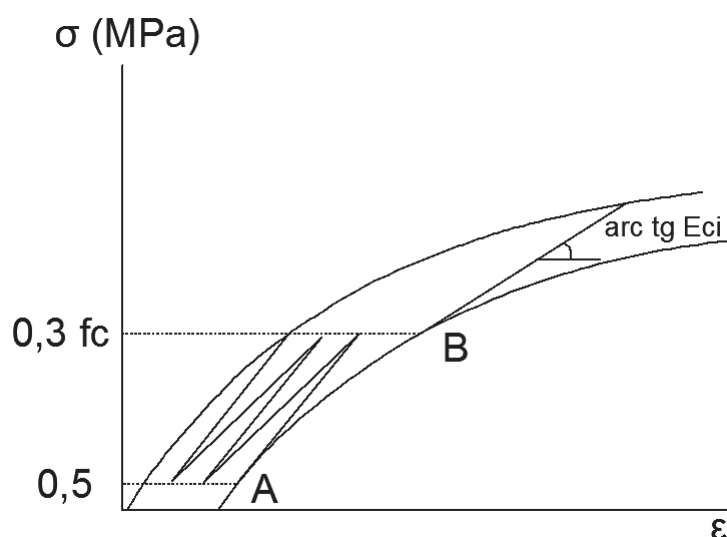


Figura 4 – Representação do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto  
Fonte: ABNT NBR 8522 (2017)

### 2.6.2 Equações teóricas para módulo de elasticidade

Como forma de estimativa para essa propriedade do concreto, Barbosa (2009), sugere algumas normas desenvolvidas a partir de pesquisas envolvendo o comportamento da mistura com a sua resistência característica ( $f_{ck}$ ). Dentre elas são destacadas no Quadro 5, as nacionais e algumas internacionais, amplamente utilizadas.

Quadro 5 – Equações propostas pelas normas nacionais e internacionais para determinação do módulo de elasticidade do concreto

Referência	Equação	Observações
ACI 318 (ACI, 2014)	$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$E_c$ = módulo válido para 0,45 $f_{ck}$
CEB Model Code (2010)	$E_{ci} = \alpha_e \cdot 21500 \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{10}}$	$f_{cm} = f_{ck} + 8$
EUROCODE 2 (2004)	$E_c = \alpha_e \cdot 22000 \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{10}}$	$E_c$ = módulo secante para 0,45 $f_{ck}$ 12 MPa $\leq f_{ck} \leq$ 90 MPa $f_{cm} = f_{ck} + 8$
NBR 6118 (ABNT, 2003)	$E_{ci} = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$E_{ci}$ = Módulo de elasticidade tangente inicial
NBR 6118 (ABNT, 2014)	$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$\alpha_e = 1,2$ (Basalto) $\alpha_e = 1,0$ (Granito e Gnaiss) $\alpha_e = 0,9$ (Calcário) $\alpha_e = 0,7$ (Arenito) 20 MPa $\leq f_{ck} \leq$ 50 MPa

Fonte: Adaptado de Barbosa (2009)

É notório que em todas as equações é utilizado o parâmetro da resistência à compressão do concreto, ou seja, as propriedades são vinculadas e conseqüentemente causam interferência quando modificadas.

## 2.7 DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP)

O referido método consiste em uma adaptação da metodologia de dosagem da *American Concrete Institute*<sup>4</sup> (ACI), sendo que de acordo com Ambrozewicz (2012), o mesmo fornece uma aproximação da quantidade de materiais e implica primeiramente na caracterização destes para a realização da dosagem do concreto.

A Figura 5, apresenta as etapas ordenadas no desenvolvimento do método de dosagem.

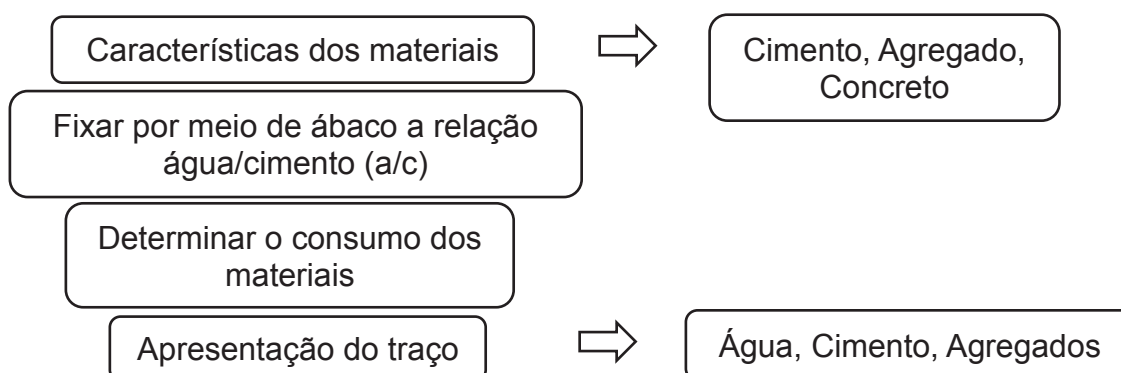


Figura 5 – Etapas para o método de dosagem da ABCP

Fonte: Adaptado de Ambrozewicz (2012)

<sup>4</sup> Provável tradução: Instituto Americano do Concreto

Primeiramente são determinadas as características dos materiais utilizados na confecção do concreto. Para o cimento é considerado a tipologia utilizada, a massa específica e a resistência a compressão aos 28 dias indicada pelo fabricante.

Nos agregados são realizadas as análises granulométricas, no qual, determina-se o módulo de finura do agregado miúdo e a dimensão máxima do agregado graúdo, além de suas respectivas massas específicas e a massa compactada do graúdo. Já para o concreto, são especificadas a consistência desejada no estado fresco, as condições a que o material será exposto e a resistência à compressão a ser obtida na dosagem (AMBROZEWICZ, 2012).

Após as considerações das características dos materiais empregados, determina-se o fator água/cimento ( $a/c$ ) por meio da curva de Abrams (ANEXO A), que relaciona a resistência à compressão requerida do concreto aos 28 dias, a resistência do cimento aos 28 dias e o fator  $a/c$ .

Determinar o consumo dos materiais é a etapa seguinte no método da ABCP. O consumo de água ( $Ca$ ) é dado em litros por metro cúbico, e relaciona o abatimento do concreto fresco juntamente com a dimensão máxima do agregado graúdo obtido por meio da análise granulométrica. No Quadro 6, são destacadas as relações entre os fatores.

Quadro 6 – Consumo de água para o método da ABCP ( $l/m^3$ )

Abatimento (mm)	D <sub>máx</sub> agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado de Ambrozewicz (2012)

A determinação do consumo de cimento ( $c$ ) é diretamente dependente do consumo de água, assim, a equação 2 é estabelecida.

$$c = \frac{Ca}{a/c} \quad (2)$$

Sendo:

$c$ : Consumo de cimento ( $kg/m^3$ )

$Ca$ : Consumo de água ( $l/m^3$ )

$a/c$ : Fator água/cimento



Para a determinação do consumo de agregado graúdo ( $C_b$ ) em metros cúbicos é utilizado a equação 3, que é a multiplicação do volume do agregado seco pela massa unitária compactada do mesmo. No Quadro 7, são expressos os volumes do agregado graúdo no estado seco, de acordo com o módulo de finura do agregado miúdo e a dimensão máxima do agregado graúdo.

$$C_b = V_c \times M_c \quad (3)$$

Sendo:

$C_b$ : Consumo de agregado graúdo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$V_c$ : Volume do agregado seco ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$M_c$ : Massa unitária compactada do agregado graúdo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Quadro 7 – Obtenção do volume de agregado graúdo seco

Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665

Fonte: Adaptado de Ambrozewicz (2012)

O consumo de agregado miúdo é determinado através da equação 4, o mesmo é dado em metros cúbicos.

$$C_m = \left[ 1 - \left( \frac{c}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_w} \right) \right] \times \rho_m \quad (4)$$

Sendo:

$C_m$ : Consumo de agregado miúdo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c$ : Consumo de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_c$ : Massa específica do cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_b$ : Consumo de agregado graúdo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_b$ : Massa específica do agregado graúdo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_a$ : Consumo de água ( $\text{l}/\text{m}^3$ )

$\rho_w$ : Massa específica da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_m$ : Massa específica do agregado miúdo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

O traço resultante do concreto dosado pelo método da ABCP é representado na sequência de relação cimento/cimento, agregado miúdo/cimento, agregado graúdo/cimento e água/cimento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram confeccionados três conjuntos de concreto, sendo cada qual estabelecido por uma determinada faixa de dimensões de agregado graúdo a serem utilizados, e compreendendo 12 corpos de prova (CPs) elaborados com o mesmo traço em massa de concreto definido inicialmente.

O agregado graúdo empregado no primeiro conjunto foi o de dimensão máxima característica de 9,5 mm, também denominado comercialmente como sendo a brita 0. Para a análise do módulo de elasticidade do concreto foram empregados 5 CPs, enquanto que na determinação da resistência à compressão utilizaram-se os 5 CPs referentes ao módulo de elasticidade acrescidos de outras 5 unidades confeccionadas na mesma betonada. Também foram dispostas 2 unidades de CPs para a verificação de propriedades no estado endurecido do concreto, como a massa específica, o índice de vazios e afins. Totalizou-se em 12 unidades para o conjunto realizado com a brita 0.

No segundo conjunto de concreto confeccionado, utilizou-se o agregado de dimensão máxima de 19 mm, comercialmente descrito como brita 1. Enquanto que no terceiro, utilizou-se o agregado de dimensão máxima de 25 mm, denominado de brita 2. Destaca-se que a lógica utilizada para a brita 0 foi seguida para as demais britas, sendo assim, a quantidade e descrição de procedimentos realizados para o primeiro agregado foi seguida para os demais seguintes.

O Quadro 8 contém informações a respeito dos corpos de prova desenvolvidos.

Quadro 8 – Quantitativo de corpos de prova

<b>Dimensão máxima do agregado graúdo (mm)</b>	<b>CPs para ensaio de módulo de elasticidade (und)</b>	<b>CPs para ensaio de resistência à compressão (und)</b>	<b>CPs para a análise das propriedades no estado endurecido (und)</b>
9,5	5	10	2
19	5	10	2
25	5	10	2
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>6</b>

Fonte: Autor

A norma NBR 8522 estabelece que a amostra de corpos de prova mínima para o ensaio de módulo de elasticidade seja composta por três unidades, porém, de modo a ter uma melhor representatividade nos dados, optou-se aumentar o número

amostral para a referente pesquisa tanto para os ensaios de módulo de elasticidade quanto para a análise da resistência à compressão.

As dimensões dos corpos de prova foram de 100 mm de base e 200 mm de altura (ABNT, 2007; ABNT, 2015b), sendo todos no formato cilíndrico, como pode ser visualizado por meio das Figuras 6 e 7.

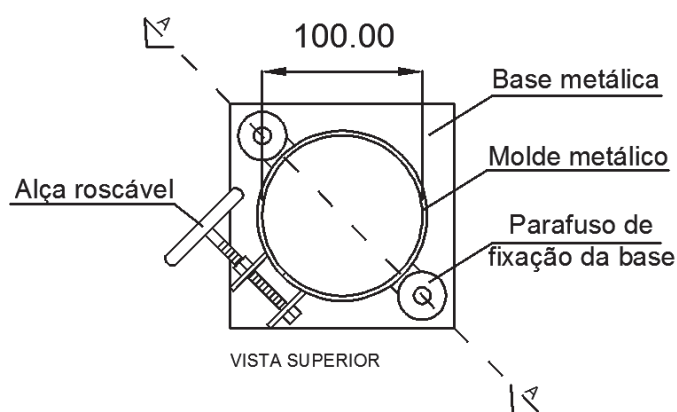


Figura 6 – Vista superior do molde metálico para os corpos de prova de concreto  
Fonte: Autor

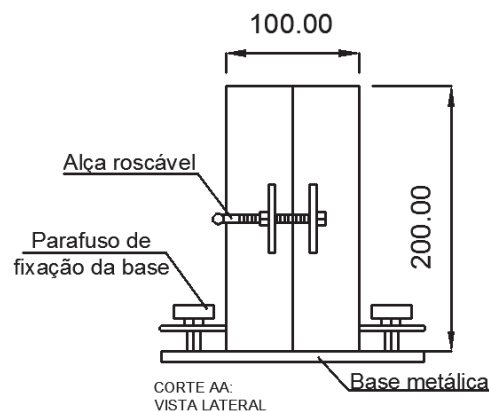


Figura 7 – Vista lateral do molde metálico para o concreto  
Fonte: Autor

Todos os corpos de prova foram produzidos no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, de acordo com o que é descrito na norma NBR 5738/2015. É importante salientar que o concreto confeccionado deveria apresentar uma resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa, e todas as suas amostras foram rompidas e analisadas no 28º dia contados a partir da confecção.

### 3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta seção são abordados os materiais a serem utilizados, tais como cimento e agregados, assim como, suas características apresentadas na confecção do concreto.

#### 3.1.1 Cimento Portland

Na confecção dos corpos de prova desta pesquisa se utilizou o cimento Portland CP II Z, caracterizado por apresentar resistência a compressão de 32 MPa quando transcorrido 28 dias. O mesmo foi adquirido na cidade de Toledo/PR.

### 3.1.2 Agregados miúdos e graúdos

Os agregados miúdos foram do tipo areia natural, enquanto que os agregados graúdos utilizados foram a brita 0, brita 1 e brita 2, sendo os dois primeiros provenientes do laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo e o último advindo de uma pedreira da localidade. As Figuras 8 e 9, demonstram alguns dos agregados utilizados na pesquisa.

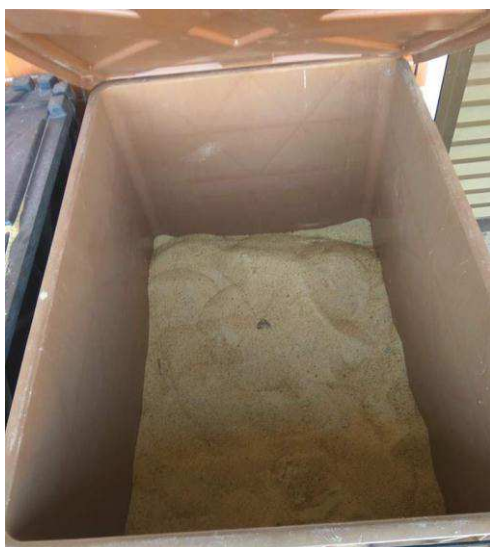


Figura 8 – Agregado miúdo  
Fonte: Autor



Figura 9 – Agregado graúdo  
Fonte: Autor

## 3.2 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Para a confecção dos corpos de prova, de acordo com o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), foram necessários a caracterização de todos os materiais constituintes do concreto. Assim, as características físicas dos agregados miúdos e graúdos, como a massa específica aparente, massa unitária compactada, dimensão máxima característica dos agregados graúdos e módulo de finura dos agregados miúdos, foram determinadas por meio das suas respectivas normas brasileiras vigentes, sendo NBR NM 52/2009, NBR NM 53/2009, NBR NM45/2006 e NBR 248/2003. Também determinou-se a massa específica do aglomerante utilizado nesta pesquisa, de acordo com a norma NBR NM 23/2001.

### 3.2.1 Ensaio de massa específica aparente dos agregados miúdos e graúdos

Na preparação do ensaio para os agregados miúdos, necessitou de uma amostra de 1 kg do respectivo agregado que foi destinado para a imersão em água, de modo a saturá-lo, em um recipiente metálico. Transcorridas 24 horas, conforme determinações da ABNT (2009b), a amostra foi retirada e deixada para secagem ao ar, de modo a obter a massa saturada superfície seca, condição na qual as partículas se encontram úmidas interiormente, porém não apresentam umidade superficial considerável. Após a condição estabelecida, cerca de 500 g do agregado miúdo foi destinado para o interior de um picnômetro e o conjunto teve sua massa determinada.

O procedimento seguinte consistiu na introdução de água dentro do picnômetro até a marcação de 500 mL, assim, o agregado analisado passou a estar imerso no líquido. De forma complementar foram realizados movimentos circulares para a eliminação de possíveis bolhas de ar aprisionadas no frasco.

Na etapa final, o frasco é preenchido até a marcação referente a 500 cm<sup>3</sup> e determinada a massa do conjunto na balança de precisão, seguidamente a amostra de agregado se destina a estufa com uma temperatura constante de 105 ± 5 °C por um período de 24 horas, assim garantindo o estado de secagem completo do agregado miúdo.

A equação 5 foi utilizada para a determinação da massa específica do agregado analisado.

$$d = \frac{m}{V - V_a} \quad V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (5)$$

Sendo:

d: Massa específica aparente do agregado miúdo (g/cm<sup>3</sup>)

m: Massa da amostra seca em estufa do agregado miúdo (g)

m<sub>1</sub>: Massa do conjunto frasco + agregado (g)

m<sub>2</sub>: Massa do conjunto frasco + agregado + água (g)

V: Volume do frasco (cm<sup>3</sup>)

V<sub>a</sub>: Volume de água adicionado no frasco (cm<sup>3</sup>)

ρ<sub>a</sub>: Massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>)

Na determinação da massa específica aparente dos agregados graúdos, seguiu-se as orientações referentes a normativa NBR NM 53 da ABNT (2009a). Para os procedimentos sugeridos, inicialmente se fez necessário a separação de instrumentos como, balança de precisão e recipiente, posteriormente as amostras de agregados graúdos foram destinadas para a imersão em um tanque de água por um período de  $24 \pm 4$  horas, de modo que todos os poros permeáveis das partículas fossem preenchidos com o líquido e os agregados se apresentassem em um estado saturado. Em sequência, os agregados foram enxugados com um pano absorvente, para a retirada do excesso de umidade de suas superfícies, posteriormente, a amostra teve sua massa na condição saturada superfície seca determinada na balança de precisão, além da massa imersa em água. Por fim, os agregados graúdos foram colocados na estufa para o processo de secagem a uma temperatura de  $105 \pm 5$  °C, durante 24 horas consecutivas.

Na determinação da massa específica aparente do material analisado utilizou-se a equação 6.

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (6)$$

Sendo:

$d_a$ : Massa específica aparente do agregado graúdo ( $\text{g/cm}^3$ )

$m$ : Massa seca e estufa do agregado graúdo (g)

$m_s$ : Massa na condição saturada superfície seca (g)

$m_a$ : Massa saturada imersa em água do agregado graúdo (g)

### 3.2.2 Ensaio de massa unitária compactada dos agregados graúdos

De acordo com a ABNT (2006), a massa unitária é a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume do recipiente utilizado. Para o processo do ensaio foram necessários equipamentos como, balança de precisão, haste para a realização do adensamento do material, recipiente resistente, concha metálica e estufa.

No procedimento do ensaio determinou-se a massa do recipiente vazio, após, efetuou-se com a utilização de uma concha, o preenchimento de  $1/3$  do recipiente com o agregado, seguidamente foi realizado o adensamento do material com haste

metálica, sendo golpeados 25 vezes a camada preenchida dentro do recipiente, conforme prescreve a norma NBR NM 45/2006. Na continuação do ensaio, novamente foram aderidos material ao recipiente até cerca de 2/3 do seu volume, e então foi realizado novo processo de adensamento com 25 golpes de haste metálica. Na etapa final, preencheu-se a última camada do material, golpeou-se com a haste metálica e realizou o rasamento superficial com a borda do recipiente. A massa total do conjunto pode ser determinada de acordo com a equação 7.

$$\rho_b = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (7)$$

Sendo:

$\rho_b$ : Massa unitária compactada do agregado graúdo ( $\text{kg/m}^3$ )

$m_{ar}$ : Massa do recipiente contendo o agregado ( $\text{kg/m}^3$ )

$m_r$ : Massa do recipiente ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$ : Volume do recipiente ( $\text{m}^3$ )

### 3.2.3 Ensaio de granulometria dos agregados miúdos e graúdos

O ensaio de granulometria é necessário para realizar a caracterização física dos materiais a serem empregados na confecção do concreto, com a mesma, é possível determinar a dimensão máxima dos agregados graúdos e miúdos, bem como o módulo de finura dos mesmos.

Conforme é descrito pela ABNT (2003), para a realização do ensaio são necessárias aparelhagens como, balança de precisão, estufa, peneiras com malhas de série normal e intermediárias, agitador mecânico e pincel com cerdas macias.

Antes da execução do ensaio, as amostras do material a ser analisado foram selecionadas conforme ABNT (2009d), além de também serem secadas em estufa a temperatura de  $105 \pm 5$  °C.

No procedimento do ensaio granulométrico, as amostras de materiais foram destinadas separadamente em conjunto de peneiras, sendo utilizado para o agregado miúdo o intervalo de peneiras com abertura decrescente de 4,75 mm até 0,15 mm, enquanto que para os agregados graúdos as peneiras são decrescentes no intervalo



de 31,5 mm até 19 mm para a brita 2, de 25 mm até 9,5 mm para a brita 1 e 12,5 mm até 4,75 mm para a brita 0.

Após a distribuição do material nas peneiras se realizou a agitação mecânica para a distribuição dos grãos entre as malhas das peneiras utilizadas (Figuras 10 e 11). Em seguida as massas retidas em cada peneira foram determinadas e posteriormente calculadas as porcentagens retidas e retidas acumuladas para os agregados miúdos.



Figura 10 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo  
Fonte: Autor



Figura 11 – Separação do agregado graúdo  
Fonte: Autor

A obtenção da dimensão máxima característica, conforme descreve a ABNT (2003), se dá pela abertura da malha da peneira que retém uma porcentagem de 5% ou valores inferiores. Já o módulo de finura, é caracterizado pela soma das porcentagens retidas acumuladas do agregado, divididos por 100.

Salienta-se que os agregados graúdos foram separados por classe granulométrica, sendo assim, nenhum grão menor ou maior ao intervalo pertencente ao agregado foi utilizado na confecção das misturas de concreto. O Quadro 9, expressa as faixas de peneiras pertencentes a cada classe de brita utilizada.

Quadro 9 – Limites granulométricos utilizados para a separação dos agregados graúdos

Agregado graúdo	Limite das peneiras (mm)
Brita 0	4,75 a 9,50
Brita 1	9,50 a 19,00
Brita 2	19,00 a 25,00

Fonte: Dados obtidos de Ambrozewicz (2013)

### 3.2.4 Ensaio de massa específica do cimento

A massa específica do cimento é a relação existente entre a massa do material e o volume ocupado pelo mesmo, conforme prescreve a ABNT (2001). Na realização do ensaio, o frasco de Le Chatelier (Figura 12), foi preenchido com querosene até a marcação existente entre 0 e 1 cm<sup>3</sup>. Após, se realizou a estabilização do líquido e determinou a leitura inicial (v1) no frasco, sequencialmente aderiu-se no recipiente o cimento a ser analisado e novamente, após total estabilização das partículas do aglomerante, se realizou a leitura final apresentada (v2). A determinação da massa específica do cimento foi determinada conforme a descrição da equação 8.

$$\rho_c = \frac{m}{v_2 - v_1} \quad (8)$$

Sendo:

$\rho_c$ : Massa específica do cimento (g/cm<sup>3</sup>)

m: Massa do cimento (g)

v<sub>1</sub>: Volume inicial do frasco Le Chatelier (cm<sup>3</sup>)

v<sub>2</sub>: Volume final do frasco Le Chatelier (cm<sup>3</sup>)

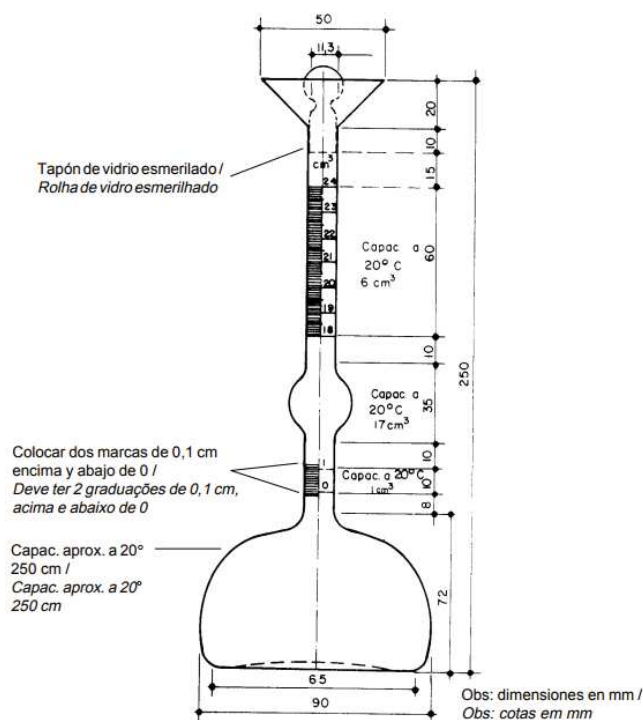


Figura 12 – Frasco de Le Chatelier para determinação da massa específica do cimento  
Fonte: ABNT NBR NM 23 (2001)

### 3.3 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Para a caracterização das propriedades do concreto estrutural foram utilizadas as normativas brasileiras vigentes, sendo a NBR NM 67/1998 para a verificação da consistência do concreto por meio do abatimento utilizando o molde tronco de cone, a NBR 9833/2009 para verificar o teor de ar, assim como, a massa específica no estado fresco do concreto, a NBR 9778/2009 para a análise da absorção de água, índice de vazios na amostra e a massa específica no estado seco do concreto. Também foram utilizadas a norma NBR 8522/2017, necessária para a análise do módulo de elasticidade inicial, e a NBR 5739/2007 para a realização da análise da resistência à compressão axial do concreto confeccionado.

#### 3.3.1 Ensaio de concreto no estado fresco: Abatimento tronco de cone

O ensaio para a avaliação do abatimento da pasta de concreto foi realizado primeiramente umedecendo a placa base e o molde tronco cônico. Em sequência, o concreto a ser analisado foi preenchido dentro do recipiente em três camadas de alturas iguais, sendo que a cada inserção do material se realizou a compactação da amostra com 25 golpes de haste metálica distribuídas uniformemente (ABNT, 1998).

Após o total preenchimento do molde e os processos de compactação, levantou-se o tronco de cone e foi determinado o abatimento do concreto com uma régua metálica. Como é retratado na norma NBR NM 67/1998, o abatimento (Figura 13) é a diferença entre a altura da base superior do molde tronco de cone e a altura do eixo central da amostra de concreto obtida no ensaio.

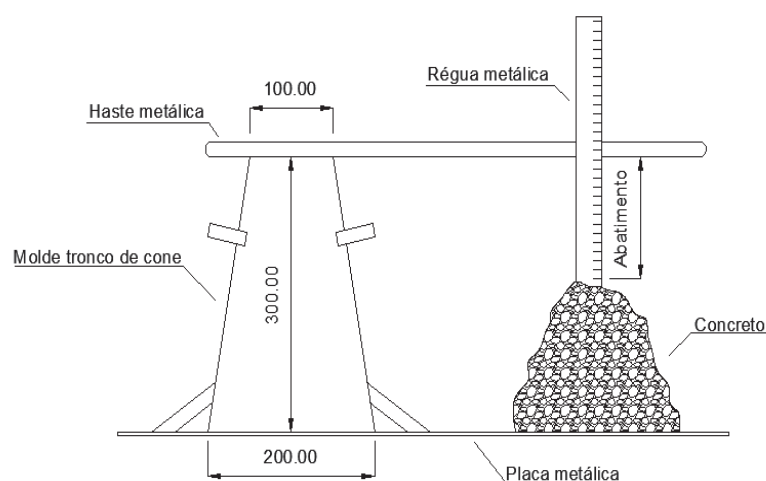


Figura 13 – Molde tronco de cone, placa e haste metálica utilizados na consistência do concreto  
Fonte: Autor

### 3.3.2 Ensaio de concreto no estado fresco: Teor de ar na amostra e massa específica

O procedimento para a avaliação da massa específica no estado fresco consistiu primeiramente na separação das amostras de concretos confeccionados com as 3 classes de britas utilizadas. Após, em um recipiente cilíndrico de dimensões 205 mm para o diâmetro da base e 303 mm de altura, foi preenchido cerca de um terço com a amostra de concreto elaborado com brita 0, seguidamente golpeou-se 25 vezes com a haste metálica na camada inicial. Também suavemente foram desferidos golpes com um martelo de borracha na lateral do recipiente, de modo que a superfície da camada não apresentasse qualquer marcação oriundas dos golpes da haste metálica.

O procedimento seguinte consistiu na adesão do segundo terço do recipiente e novamente desferiu-se os golpes verticais na amostra e os laterais na superfície do recipiente. Na última etapa houve o total preenchimento do recipiente juntamente com o adensamento e o rasamento da amostra de concreto (Figura 14). A amostra foi pesada e determinada sua massa na balança de precisão (Figura 15).



Figura 14 – Preparação da amostra de concreto conforme NBR 9833  
Fonte: Autor



Figura 15 – Determinação da massa da amostra de concreto  
Fonte: Autor

Para a determinação do teor de ar e a massa específica em cada material analisado, utilizou-se as equações 9, 10, 11, 12 e 13, como é descrito na normativa NBR 9833.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \quad (9)$$

Sendo:

$\rho_{ap}$ : Massa específica aparente do concreto (kg/m<sup>3</sup>)

m: Massa de concreto (kg)

v: Volume do recipiente cilíndrico (m<sup>3</sup>)

$$R = \left( \frac{m_c + m_f + m_g + m_a}{\rho_{ap}} \right) \quad (10)$$

Sendo:

$m_c$ : Massa de cimento da betonada (kg)

$m_f$ : Massa de agregados miúdos da betonada (kg)

$m_g$ : Massa de agregados graúdos da betonada (kg)

$m_a$ : Massa de água da betonada (kg)

$$V_t = \left( \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_g}{\rho_g} + \frac{m_a}{\rho_a} \right) \quad (11)$$

Sendo:

$V_t$ : Volume total de componentes da betonada (m<sup>3</sup>)

$\rho_c$ : Massa específica do cimento, determinada conforme NBR NM 53 (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_f$ : Massa específica dos agregados miúdos, conforme NBR NM 52 (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_g$ : Massa específica dos agregados graúdos, conforme NBR NM 53 (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_a$ : Massa específica da água, adotada como sendo 1000 kg/m<sup>3</sup>

$$I_a = \frac{R}{V_t} \quad (12)$$

Sendo:

$I_a$ : Índice de ar presente na amostra de concreto

$$A = \left( 1 - \frac{1}{I_a} \right) \quad (13)$$

Sendo:

A: Teor de ar presente na amostra de concreto (%)

Após a finalização do ensaio descrito pela ABNT (2009e), o concreto foi destinado para a betoneira para ser homogeneizado com o material restante, e posteriormente para uso nos demais ensaios realizados.

Destaca-se que todo o procedimento descrito para o concreto confeccionado com a brita 0 foram realizados para as britas 1 e 2.

### 3.3.3 Ensaio de concreto no estado endurecido: Índice de vazios, massa específica seca e absorção de água

Após o procedimento referente a concretagem dos corpos de prova, transcorreu-se 28 dias de imersão dos mesmos em tanque de água com a finalidade de cura do concreto. Conforme orientações na normativa NBR 9778 descritas pela ABNT (2009f), duas amostras de corpos de prova de cada concreto confeccionado foram selecionadas de modo a terem seus dados extraídos para a determinação dos parâmetros de índices de vazios, massa específica seca e absorção de água. Para tanto, a massa imersa em água e a massa saturada superfície seca dos corpos de prova foram determinadas inicialmente em balança de precisão, conforme são destacadas nas Figuras 16 e 17.



Figura 16 – Determinação da massa imersa do concreto endurecido, conforme NBR 9778  
Fonte: Autor

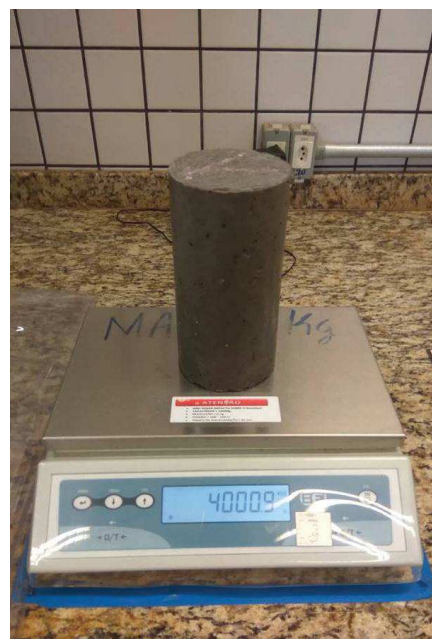


Figura 17 – Determinação da massa saturada superfície seca do concreto endurecido, conforme NBR 9778  
Fonte: Autor

Na etapa seguinte, as amostras foram destinadas para a secagem em estufa com temperatura constante de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por um período de 72 horas, de forma a determinar a massa referente ao estado seco do concreto (Figura 18).

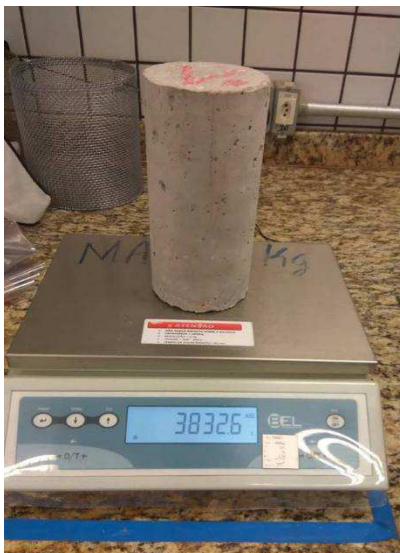


Figura 18 – Determinação da massa seca da amostra de concreto endurecido  
Fonte: Autor

Conforme orientações advindas da NBR 9778, a massa específica, a absorção de água e o índice de vazios das amostras de concreto no estado endurecido, foram determinadas mediante as equações 14, 15 e 16, respectivamente.

$$M_{\text{esp}} = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (14)$$

Sendo:

$M_{\text{esp}}$ : Massa específica do concreto no estado endurecido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$m_s$ : Massa do corpo de prova seco em estufa (kg)

$m_{\text{sat}}$ : Massa do corpo de prova saturado superfície seca (kg)

$m_i$ : Massa do corpo de prova imerso em água (kg)

$$\text{ABS} = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (15)$$

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (16)$$

Sendo:

ABS: Absorção de água no corpo de prova analisado (%)

$I_v$ : Índice de vazios no corpo de prova analisado (%)

Os procedimentos referentes a análise das massas foram realizados para os concretos com brita 0, 1 e 2.

### 3.3.4 Ensaio de concreto no estado endurecido: Módulo de elasticidade tangente inicial estático do concreto

O concreto no estado endurecido apresenta características mecânicas importantes para a aplicabilidade na Engenharia Civil. Uma dessas características a serem analisadas é o módulo de elasticidade do concreto, descrito pela ABNT (2017) como sendo o coeficiente angular originado entre a reta de tensão aplicada e o eixo de medição da sua deformação apresentada. Na verificação desta propriedade mecânica, a ABNT (2017), descreve que o ensaio necessita de instrumentos como máquina de esforços, medidores de deformação e paquímetros.

Após a elaboração e tempo de cura pré-determinado dos corpos de prova de concreto, o ensaio de módulo de elasticidade foi realizado seguindo as orientações descritas na NBR 8522. Para tal, foram analisadas cinco unidades de corpos prova cilíndricos de cada concreto descrito na pesquisa, sendo que os mesmos se dispuseram verticalmente na máquina EMIC modelo DL30000N (Figuras 19 e 20) para a aplicação das cargas de compressão e também para a análise de deformações específicas do material.



Figura 19 – Instalação dos medidores de deformação para os concretos  
Fonte: Autor



Figura 20 – Análise do Módulo de elasticidade estático dos concretos  
Fonte: Autor



O módulo de elasticidade tangente inicial estático foi obtido conforme equação 17, apresentada pela ABNT (2017).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (17)$$

Sendo:

$E_{ci}$ : Módulo de elasticidade inicial do concreto (GPa)

$\sigma_b$ : Tensão maior aplicada no ensaio (MPa)

$\sigma_a$ : Tensão básica aplicada no ensaio (MPa)

$\varepsilon_b$ : Deformação específica média dos corpos de prova em relação a  $\sigma_b$

$\varepsilon_a$ : Deformação específica média dos corpos de prova em relação a tensão  $\sigma_a$

Ressalta-se que a máquina de carga dispõe-se de *script*<sup>5</sup> de programação seguindo as orientações pertinentes a metodologia A da normativa NBR 8522, a fim de realizar as determinações das deformações e módulo de elasticidade do material, sendo necessário somente a entrada de dados iniciais pelo usuário, como por exemplo, a altura e o diâmetro do corpo de prova, as nomenclaturas para cada amostra analisada, assim como, a resistência característica estimada para o concreto a ser analisado, obtida nesta pesquisa pelo ensaio de resistência à compressão axial, conforme a normativa NBR 5739.

No ensaio realizado, todos os corpos de prova tiveram suas bases devidamente niveladas na retífica pertencente a universidade, de modo a não comprometer os resultados emitidos pelo maquinário de compressão, já que, a presença de um desnivelamento na superfície do elemento resulta na concentração de tensões locais, falseando os dados obtidos referente ao corpo de prova.

### 3.3.5 Ensaio de concreto no estado endurecido: Resistência à compressão axial

Para a obtenção do parâmetro mecânico de resistência à compressão axial do concreto, foi realizado o ensaio prescrito pela ABNT (2007), sendo que o mesmo descreve a possibilidade de serem utilizados corpos de prova no formato cilíndrico,

---

<sup>5</sup> *Script*: Conjunto de instruções desenvolvidas para a realização de uma determinada função de um programa computacional.

onde a relação da altura do corpo de prova deve ser igual ao dobro da base do modelo adotado. Os moldes utilizados para a confecção dos corpos de prova são demonstrados na Figura 21, enquanto que os modelos de corpos de prova endurecidos são evidenciados na Figura 22.



Figura 21 – Moldes metálicos a serem utilizados para confecção dos corpos de prova  
Fonte: Autor



Figura 22 – Corpos de prova de concreto realizados com brita 0, 1 e 2  
Fonte: Autor

Todos os corpos de prova foram moldados dentro de recipientes metálicos fornecidos pela universidade, e a determinação da resistência à compressão das amostras se deu utilizando a equação 18, conforme é prevista na norma NBR 5739/2007.

$$f_{ck} = \frac{4 \times F}{\pi \times d^2} \quad (18)$$

Sendo:

$f_{ck}$ : Resistência a compressão axial do concreto (MPa)

$F$ : Força axial aplicada no corpo de prova de concreto (N)

$d$ : Diâmetro do corpo de prova de concreto (mm)

No presente ensaio, também foram realizados os procedimentos referentes ao nivelamento de todos os corpos de provas, de modo a garantir o total contato entre a superfície dos elementos confeccionados com a superfície do maquinário de compressão utilizado, evitando possíveis dados falseados dos corpos de prova analisados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DOS MATERIAIS PRIMÁRIOS E DOSAGEM DO CONCRETO ESTRUTURAL

Para a dosagem do concreto, conforme Ambrozewicz (2012), foram necessários caracterizar todos os materiais envolvidos, como o agregado graúdo, agregado miúdo e o aglomerante. Nos tópicos seguintes são destacadas características como a massas específicas, módulo de finura e dimensão do agregado utilizado na dosagem.

#### 4.1.1 Característica dos agregados graúdos e miúdos

No Quadro 10 e Gráfico 1 são demonstradas a distribuição granulométrica do agregado miúdo, enquanto que no Quadro 11, são destacadas as demais características referentes ao agregado utilizado na dosagem do concreto.

Quadro 10 – Agregado miúdo - Granulometria

Peneiras (mm)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
4,750	0	0
2,380	0,72	0,72
1,180	5,40	6,12
0,600	23,94	30,06
0,300	50,1	80,16
0,150	18,68	98,84
Fundo	1,16	100,00

Fonte: Autor

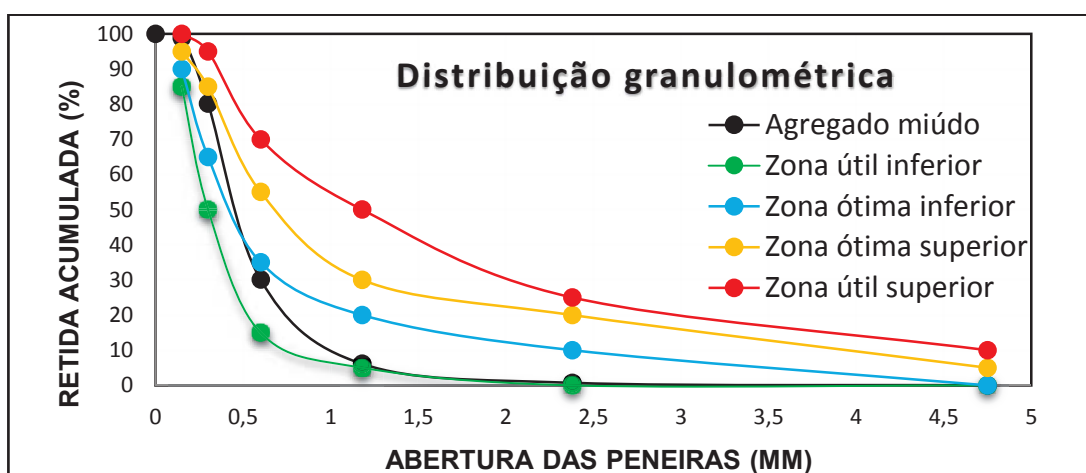


Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Fonte: Autor

Quadro 11 – Características do agregado miúdo para a dosagem do concreto

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2650
Classificação granulométrica	Areia Fina
Módulo de finura	2,16
Dimensão máxima característica (mm)	2,38

Fonte: Autor

Para o agregado miúdo percebe-se uma boa distribuição granulométrica, pois, a curva apresentada pelo mesmo encontra-se entre os limites utilizáveis determinados pela normativa nacional, caracterizando o material como útil para a dosagem do concreto. Também evidencia-se que o agregado miúdo é enquadrado como um agregado de grãos finos, apresentando módulo de finura de 2,16, e sua massa específica aparente determinada no ensaio, apresentou-se dentro da maioria das literaturas referentes a materiais de construção civil divulgadas atualmente.

No Quadro 12 são destacas informações referentes ao agregado graúdo utilizado na dosagem do concreto proposto na pesquisa.

Quadro 12 – Características do agregado graúdo para a dosagem do concreto

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2900
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1700
Dimensão máxima característica (mm)	19
Classificação granulométrica	Brita 1

Fonte: Autor

A massa específica determinada para o agregado graúdo está coerente com o valor teórico de 3000 kg/m<sup>3</sup> para agregados de rocha basálticas, conforme estimativa advinda da normativa NBR 6120 (ABNT, 1980).

#### 4.1.2 Característica do aglomerante: Cimento Portland CP II Z

No Quadro 13 constam os resultados obtidos referente a caracterização do aglomerante utilizado na confecção dos corpos de prova de concreto.

Quadro 13 – Características do aglomerante

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	3120
Classificação	Cimento Portland CP II - Z
Resistência à compressão ao 28º dia (MPa)	32

Fonte: Autor

O aglomerante utilizado apresenta resistência à compressão mínima, aos 28 dias do estado endurecido, de 32 MPa conforme dados fornecidos pelo distribuidor do mesmo, também ressalta-se que possui um percentual de pozolana que varia entre 6 a 14% introduzida em seu processo de fabricação, de modo retardar a geração de calor.

#### 4.1.3 Definição do traço para o concreto

Na definição do traço de concreto foram necessários estabelecer considerações referentes ao abatimento do mesmo, a faixa de dimensão dos agregados graúdos e o fator água/cimento de acordo com a resistência à compressão a ser obtida. Assim, no Quadro 14 são apresentadas as informações pertinentes a dosagem.

Quadro 14 – Características do concreto a ser dosado

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Abatimento estimado (mm)	70
Faixa de dimensão do agregado graúdo (mm)	9,5 a 19
Fator a/c	0,47
Resistência à compressão característica (MPa)	25
Desvio padrão (MPa)	5,5
Resistência à compressão de projeto (MPa)	34

Fonte: Autor

A condição de qualidade de produção do concreto foi estabelecida com um desvio de 5,5 MPa, se enquadrando na condição B referenciada pela norma NBR 12655, onde evidencia-se principalmente que, o aglomerante e os agregados são pesados em massa para a elaboração do traço de concreto.

Salienta-se que a dosagem do concreto pelo método da ABCP foi em função do agregado graúdo de dimensão de 19 mm, logo, todas as correções para a obtenção do traço advieram de recomendações para a brita 1. O traço obtido é representado abaixo, sendo respectivamente valores de: Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água.

$$1 : 1,46 : 2,92 : 0,47$$

O traço em massa foi utilizado em todos os corpos de prova elaborados, sendo que somente houveram alterações na faixa de dimensão do agregado graúdo a ser utilizado.

As Figuras 23 e 24 retratam a separação dos materiais na dosagem e posteriormente produção dos concretos, enquanto que a Figura 25 evidencia parte dos concretos já moldados de acordo com a norma NBR 5738.



Figura 23 – Materiais utilizados para a elaboração do concreto com brita 0  
Fonte: Autor



Figura 24 – Materiais utilizados para a elaboração do concreto com brita 2  
Fonte: Autor



Figura 25 – Corpos de prova de concreto moldados de acordo com a NBR 5738  
Fonte: Autor

## 4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Nos tópicos seguintes são descritos os resultados referentes as propriedades do concreto em seu estado fresco, como, a trabalhabilidade e coesão das amostras, o teor de ar impregnado, bem como a massa específica.

### 4.2.1 Consistência do concreto: Slump Test – Abatimento do concreto pelo método tronco de cone de acordo com a norma NBR NM 67

As consistências dos concretos foram analisadas com o procedimento utilizando o molde tronco de cone, os resultados são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 – Slump Test: Determinação da consistência do concreto

Classe do agregado graúdo	Intervalo da dimensão do agregado (mm)	Abatimento do concreto (mm)
Brita 0	4,8 a 9,5	64
Brita 1	9,5 a 19	145
Brita 2	19 a 25	170

Fonte: Autor

Nas Figuras 26 e 27 são retratados os procedimentos referentes a verificação do abatimento do concreto produzido.



Figura 26 – Slump Test, abatimento realizado com concreto de brita 0 conforme a norma NBR NM 67  
Fonte: Autor



Figura 27 – Slump Test, abatimento realizado com concreto de brita 2 conforme a norma NBR NM 67  
Fonte: Autor

Observa-se, de acordo com o quadro apresentado e a visualização das figuras acima, que o comportamento do abatimento dos concretos é fortemente influenciado de acordo com a dimensão do agregado graúdo, sendo que conforme aumenta-se a dimensão do mesmo, a tendência apresentada é a diminuição da coesão entre os agregados miúdos e graúdos com a pasta aglomerante, tornando-a uma mistura pouco moldável.

O fato da mistura aglomerante não ser coesa, não evidencia que houve alteração na relação água/cimento, mas só garante que a interação entre os agregados e a pasta não é suficiente para a manutenção da estrutura cônica, o que pode acarretar, quando o concreto estiver no estado endurecido, em zonas formadas somente pela pasta aglomerante sem a presença do agregado graúdo, caracterizando uma zona de transição suscetível a aparição de microfissuras, conforme são destacados por autores como Alhadas (2008), Mehta e Monteiro (2014), Neville e Brooks (2013).

No quesito da trabalhabilidade, conforme aumentou-se o diâmetro dos agregados a fluidez do elemento foi evidenciada, porém, a amostra apresentou-se com aspecto aquoso, e conseqüentemente a segregação das partes constituintes do concreto tornou-se perceptível, comprometendo o desempenho do concreto principalmente em seu estado endurecido, já que, zonas de pouca presença de agregados tendem a apresentar uma maior microfissuração na pasta aglomerante, acarretando em prejuízo aos elementos estruturais.

#### 4.2.2 Teor de ar e Massa específica do concreto – NBR 9833

Os concretos produzidos foram avaliados quanto a sua massa específica e a presença de ar nas amostras, sendo os resultados expressos no Quadro 16.

Quadro 16 – Características dos concretos produzidos

Concretos	Agregado graúdo	Massa (kg)	Volume do recipiente (m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar (%)
Concreto B0	Brita 0	24,624	0,010	2462	1,1
Concreto B1	Brita 1	24,774	0,010	2477	0,5
Concreto B2	Brita 2	24,994	0,010	2499	-0,4

Fonte: Autor



Nota-se que para o mesmo recipiente cilíndrico utilizado, conforme aumenta-se a dimensão do agregado graúdo, a massa determinada e conseqüentemente a massa específica da amostra, também elevam-se, já quanto ao teor de ar presente na amostra, o comportamento é inversamente proporcional, ou seja, o aumento da dimensão do agregado resulta em uma diminuição do quesito analisado.

A presença de graduações maiores dos agregados acarreta em uma amostra mais fluida e de aspecto aquoso, devido principalmente à pouca interação entre os grãos dos agregados e a pasta produzida, em conseqüência, a pasta aglomerante tende a ser o elemento principal para o preenchimento do recipiente, diminuindo os espaços existentes entre os agregados e aumentando a massa determinada no ensaio.

Em todas as amostras analisadas, as massas específicas estão em concordância com o que é proposto pela normativa NBR 6120, onde a massa específica do concreto simples é destacada como sendo de  $2400 \text{ kg/m}^3$  (ABNT, 1980).

O concreto confeccionado com agregado graúdo de até 9,5 mm (Brita 0), apresentaram a menor massa específica e conseqüentemente a maior presença de ar, enquanto que o concreto confeccionado com o agregado graúdo da faixa de 19 mm a 25 mm apresentou a maior massa específica e menor teor de ar devido principalmente a maior presença da pasta aglomerante espaçada entre os agregados de maiores dimensões.

#### 4.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

As nomenclaturas de cada corpo de prova (CP) foram definidas como sendo CP X – Brita Y, sendo que a letra X representa a numeração do corpo de prova elaborado, enquanto que a letra Y destaca o número comercial do agregado utilizado na confecção do concreto.

##### 4.3.1 Absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova de concreto – NBR 9778

No estado endurecido do concreto, são apresentados no Quadro 17 os seguintes resultados quanto as propriedades mencionadas.

Quadro 17 – Massas, Absorção de água e Índice de vazios apresentados pelos corpos de prova de concretos após 28 dias

Corpo de prova	Massa superfície saturada (kg)	Massa seca em estufa (kg)	Massa imersa (kg)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
CP 1 – Brita 0	4000,00	3832,60	2400,00	4,39	10,51
CP 2 – Brita 0	3970,40	3765,70	2372,00	5,43	12,81
CP 1 – Brita 1	4000,13	3813,40	2419,40	4,90	11,81
CP 2 – Brita 1	4007,50	3797,50	2427,00	5,53	13,29
CP 1 – Brita 2	4060,50	3873,80	2502,00	4,82	11,98
CP 2 – Brita 2	4112,40	3920,40	2465,00	4,90	11,65

Fonte: Autor

Nota-se que os CPs apresentaram tanto na absorção de água quanto no índice de vazios, resultados parecidos, sendo a amostra CP 2 – Brita 1 a responsável pelos maiores índices. Todavia, Neville e Brooks (2013) destacam que o índice de vazios pode ser um fator influenciador das propriedades mecânicas no estado endurecido do concreto, já que a minimização dos vazios na amostra acarreta em um ganho de resistência final. Os interstícios existentes diminuem-se entre os agregados, o que melhora a interação entre os grãos e a pasta aglomerante.

#### 4.3.2 Análise comparativa da resistência à compressão axial dos corpos de prova de concreto confeccionados.

A utilização de agregados graúdos com os diâmetros de até 9,5 mm (brita 0), 19 mm (brita 1) e 25 mm (brita 2), resultaram quanto a propriedade da resistência à compressão, as informações apresentadas no Quadro 18, 19 e 20, respectivamente.

Quadro 18 – Resistência à compressão axial apresentados pelos concretos com brita 0 aos 28 dias

Corpo de prova	Agregado graúdo (mm)	Resistência à compressão axial (MPa)	Média do conjunto (MPa)	Resistência característica (MPa)	Resistência de projeto (MPa)
CP 3 - Brita 0	9,5	43,13	42,91	25,00	34,00
CP 4 - Brita 0		40,35			
CP 5 - Brita 0		42,69			
CP 6 - Brita 0		44,65			
CP 7 - Brita 0		38,83			
CP 8 - Brita 0		44,70			
CP 9 - Brita 0		43,60			
CP 10 - Brita 0		43,70			
CP 11 - Brita 0		43,15			
CP 12 - Brita 0		44,30			

Fonte: Autor

Quadro 19 – Resistência à compressão axial apresentados pelos concretos com brita 1 aos 28 dias

Corpo de prova	Agregado graúdo (mm)	Resistência à compressão axial (MPa)	Média do conjunto (MPa)	Resistência característica (MPa)	Resistência de projeto (MPa)
CP 3 - Brita 1	19	36,31	36,70	25,00	34,00
CP 4 - Brita 1		35,18			
CP 5 - Brita 1		36,59			
CP 6 - Brita 1		33,43			
CP 7 - Brita 1		38,48			
CP 8 - Brita 1		38,20			
CP 9 - Brita 1		36,20			
CP 10 - Brita 1		38,00			
CP 11 - Brita 1		37,40			
CP 12 - Brita 1		37,20			

Fonte: Autor

Quadro 20 – Resistência à compressão axial apresentados pelos concretos com brita 2 aos 28 dias

Corpo de prova	Agregado graúdo (mm)	Resistência à compressão axial (MPa)	Média do conjunto (MPa)	Resistência característica (MPa)	Resistência de projeto (MPa)
CP 3 - Brita 2	25	20,22	22,04	25,00	34,00
CP 4 - Brita 2		22,04			
CP 5 - Brita 2		24,28			
CP 6 - Brita 2		23,00			
CP 7 - Brita 2		24,27			
CP 8 - Brita 2		23,90			
CP 9 - Brita 2		20,30			
CP 10 - Brita 2		19,70			
CP 11 - Brita 2		19,00			
CP 12 - Brita 2		23,69			

Fonte: Autor

Conforme os resultados apresentados nos quadros anteriores, percebe-se que os corpos de prova elaborados com brita 0 e brita 1 superaram a resistência à compressão de 25 MPa inicialmente estabelecida na dosagem pelo método da ABCP do concreto, em contrapartida, nenhuma amostra confeccionada com brita 2 apresentou a resistência mínima estabelecida. Assim, somente os concretos dosados com brita 0 e brita 1 podem ser enquadrados como satisfatórios no quesito de concreto estrutural, já que, de acordo com a ABNT (2014), todo e qualquer concreto que apresente resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) maior ou igual a 25 MPa estão aptos para tal finalidade.

Em relação a variação das resistências obtidas frente a média da amostra analisada, são destacadas as informações contidas no Quadro 21.

Quadro 21 – Informações estatísticas das amostras dos concretos aos 28 dias

<b>Corpo de prova</b>	<b>Média da resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão (MPa)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Concretos Brita 0	42,91	1,90	4,44
Concretos Brita 1	36,70	1,54	4,19
Concretos Brita 2	22,04	2,06	9,34

Fonte: Autor

No escopo da pesquisa, apesar da mesma relação água/cimento estabelecida, destaca-se que os concretos elaborados apresentaram discrepância em relação a propriedade de resistência à compressão, sendo que os corpos de prova realizados com agregados graúdos de menores dimensões (brita 0), foram os mais elevados no quesito, enquanto que os detentores de agregados de dimensões maiores (brita 2) retrataram praticamente metade da resistência à compressão obtida pelos anteriores.

Salienta-se o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada amostra como outras principais informações a serem obtidas na análise dos concretos, pois, tratam-se da dispersão dos resultados de cada corpo de prova frente a média estabelecida no conjunto amostral, assim, quanto menor a variação dos dados, maior é a confiabilidade no resultado esperado pela amostra analisada, logo, concretos confeccionados com agregados graúdos do tipo brita 0 e brita 1 foram os que melhor apresentaram confiabilidade de se obter tais resultados no traço de concreto definido. As amostras contendo brita 2 apresentam um coeficiente de variação elevado quando comparado aos demais, conseqüentemente seus dados foram mais dispersos e suscetíveis a não obtenção da resistência à compressão requerida do traço.

A influência significativa nesta propriedade do concreto, refere-se principalmente a interação na zona de transição existente entre os agregados e a pasta aglomerante, sendo que, agregados de menores dimensões quando utilizados no preparo do concreto, tendem a apresentar menores zonas de microfissuras, ou seja, as envoltórias dos agregados (zona de transição) são fortalecidas, conseqüentemente melhora-se a transferência de esforços no conjunto, ocorrendo a contribuição da pasta aglomerante e do agregado graúdo, assim evidencia-se a melhora na resistência mecânica do elemento de concreto (ALHADAS, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014; JEBLI et al., 2017). Em contrapartida, a utilização de granulometrias maiores, evidencia maiores zonas de

microfissuras, a envoltório em cada partícula do agregado utilizado torna-se enfraquecida, acarretando no pouco auxílio do mesmo para com o concreto produzido.

#### 4.3.3 Análise comparativa do módulo de elasticidade estático dos corpos de prova de concreto confeccionados

Quanto a propriedade do módulo de elasticidade estático dos concretos confeccionados, são destacadas as informações contidas no Quadro 22.

Quadro 22 – Módulo de elasticidade e parâmetros estatísticos dos concretos aos 28 dias

Corpo de prova	Agregado graúdo (mm)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
CP 8 - Brita 0	9,5	36,4	36,66	2,35	6,42
CP 9 - Brita 0		37,7			
CP 10 - Brita 0		34,9			
CP 11 - Brita 0		34,2			
CP 12 - Brita 0		40,1			
CP 8 - Brita 1	19	37,9	38,76	1,94	5,01
CP 9 - Brita 1		39,1			
CP 10 - Brita 1		36,4			
CP 11 - Brita 1		38,7			
CP 12 - Brita 1		41,7			
CP 8 - Brita 2	25	34,4	36,96	4,50	12,19
CP 9 - Brita 2		34,8			
CP 10 - Brita 2		39,3			
CP 11 - Brita 2		43,7			
CP 12 - Brita 2		32,6			

Fonte: Autor

A propriedade módulo de elasticidade estático do concreto, apresentou resultados parecidos quanto à média obtida no ensaio, onde as amostras confeccionadas com brita 1 se sobressaíram em relação as demais, também resultaram nas menores variações dos resultados individuais, pois tanto o desvio padrão quanto o coeficiente de variação das mesmas foram os menores nos ensaios realizados.

O agregado graúdo denominado de brita 2 foi o que apresentou o maior desvio padrão e coeficiente de variação, devido principalmente a alguns dados extremos obtidos nas análises, caracterizando a amostra como suscetível a uma maior oscilação nos valores determinados.

Constata-se que a propriedade do módulo de elasticidade estático do concreto, é influenciado principalmente pela pasta aglomerante utilizada em seu

preparo, ou seja, o conjunto água e cimento acabam por determinar os resultados obtidos no ensaio, pois, as médias obtidas para a propriedade se assemelham, bem como, destaca-se que em toda betonada realizada, a relação aglomerante/água foi idêntica. Assim, na análise do conjunto obtido, o agregado graúdo basáltico utilizado na confecção dos concretos, pouco interferiu quando solicitadas cargas baixas nas amostras.

#### 4.3.4 Análise comparativa do módulo de elasticidade estático dos concretos confeccionados com as normativas nacionais, internacionais e a literatura.

Quanto ao comparativo dos valores obtidos experimentalmente e os valores propostos pelas normativas nacionais, internacionais e a literatura referente as propriedades do concreto, são destacados os resultados expostos no Quadro 23.

Quadro 23 – Análise comparativa do módulo de elasticidade experimental e o teórico

Referência	Agregado graúdo (mm)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
<b>Autor</b>	9,5	36,66*
<b>Autor</b>	19	38,76*
<b>Autor</b>	25	36,96*
<b>ACI 318 (ACI, 2014)</b>	Não especificado	23,50**
<b>CEB Model Code (2010)</b>	Não especificado	38,41**
<b>EUROCODE 2 (2004)</b>	Não especificado	39,30**
<b>NBR 6118 (ABNT, 2003)</b>	Não especificado	28,00**
<b>NBR 6118 (ABNT, 2014)</b>	Não especificado	33,60**

\* Valores médios obtidos nos ensaios

\*\* Valores calculados a partir da resistência à compressão característica estipulada inicialmente para o concreto de 25 MPa

Fonte: Autor

Percebe-se que o módulo de elasticidade experimental de quase todos os concretos ensaiados, detêm valores inferiores as normativas CEB Model Code e a EUROCODE 2, porém, as normativas acabam por apresentarem uma estimativa próxima dos valores experimentais obtidos. Já, no que se refere a normativa nacional NBR 6118/2003 e a norte americana ACI 318, nota-se que ambas são conservativas frente aos resultados experimentais, destacando resultados abaixo dos experimentais para todas as classes de britas utilizadas, e o incremento do parâmetro  $\alpha_e$  na determinação do módulo de elasticidade estático do concreto pela normativa NBR

6118/2014, acaba por melhorar a estimativa verificada na determinação da propriedade, elevando e aproximando-a dos resultados obtidos em laboratório.

No Quadro 24 são demonstradas as discrepâncias existentes entre os dados experimentais e teóricos do módulo de elasticidade.

Quadro 24 – Variação do módulo de elasticidade estático

<b>Referência</b>	<b>Discrepância: Brita 0 (%)</b>	<b>Discrepância: Brita 1 (%)</b>	<b>Discrepância: Brita 2 (%)</b>
<b>Autor</b>	Valor de referência	Valor de referência	Valor de referência
<b>ACI 318 (ACI, 2014)</b>	- 35,90	- 39,37	- 36,42
<b>CEB Model Code (2010)</b>	4,77	- 0,90	3,92
<b>EUROCODE 2 (2004)</b>	7,20	1,39	6,33
<b>NBR 6118 (ABNT, 2003)</b>	- 23,62	- 27,76	- 24,24
<b>NBR 6118 (ABNT, 2014)</b>	- 8,35	- 13,31	- 9,09

Fonte: Autor

A normativa norte americana ACI 318 é a que apresentou a pior discrepância entre as analisadas, sendo que todos os valores obtidos nos agregados resultaram em subestimação da propriedade do módulo de elasticidade, assim, tornando-a a mais conservadora quando comparada as demais. Em contrapartida, a normativa europeia EUROCODE 2, apresentou todos os resultados superiores e com proximidade dos evidenciados experimentalmente para os concretos com diferentes agregados, tornando-a uma estimativa inicial coerente para a propriedade do módulo de elasticidade estático.

## 5 CONCLUSÃO

A análise do comportamento do concreto quanto as suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido são essenciais para a caracterização do elemento estrutural. Ao ser empregado na construção civil, o material reflete a qualidade adquirida em sua concepção, ou seja, as características dos materiais primários adicionados na mistura, a metodologia de confecção e o controle tecnológico do mesmo, acabam por serem fatores que influenciam diretamente nas propriedades finais a serem obtidas pelo concreto.

Norteados pelo propósito de averiguar a influência ocasionada pela variação da granulometria dos agregados graúdos utilizados no preparo do concreto, a presente pesquisa obteve alguns resultados de destaque, sendo conclusivos quanto a propriedade de resistência à compressão, abatimento tronco de cone (Slump Test) e módulo de elasticidade.

Na resistência à compressão dos concretos produzidos, constatou-se grande variação no valor da propriedade, sendo que, em suma as amostras confeccionadas com agregado graúdo de até 9,5 mm (brita 0), refletem um melhor comportamento interativo entre as partículas granulares e a pasta aglomerante, interferindo na zona de transição existente entre pasta e agregados, acarretando conseqüentemente em um considerável ganho de resistência à compressão quando comparado a graduações maiores. Assim, evidencia-se a forte tendência de melhora em tal propriedade com a utilização de agregados de menores dimensões.

No quesito de abatimento e coesão entre as partículas e a pasta aglomerante, constatou-se forte influência da dimensão dos agregados graúdos. Na metodologia destacada na pesquisa, a utilização do slump test, descrito pela NBR NM 67, retrata que conforme aumenta-se as dimensões dos agregados utilizados, o abatimento do molde cônico utilizado consideravelmente é afetado, sendo que a amostra perde coesão e está mais suscetível a segregação quando comparada as granulometrias menores.

Entretanto, quanto ao módulo de elasticidade, não averiguou-se nos resultados grande variação dos valores determinados para a propriedade, sendo assim, acredita-se na pouca influência inicial dos agregados frente a elasticidade do concreto, ficando a cargo da pasta aglomerante confeccionada como a principal



responsável pela captação dos esforços e comportamento de deformabilidade do concreto.

As demais propriedades do concreto como a massa específica, índice de vazios, teores de ar ou absorção de água, não apresentaram grandes variações entre os concretos com diferentes diâmetros de agregados, logo, incentiva-se a pesquisas minuciosas a serem elaboradas em trabalhos seguintes.

Ressalta-se que a representatividade dos resultados, bem como, a confirmação das considerações descritas será notória ao serem reproduzidos os procedimentos utilizados na metodologia descrita nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHADAS, M. F. S. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO DE DIFERENTES ORIGENS MINERALÓGICAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**. 2008. 126 f. Dissertação. (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ALSAMAN, A.; DANG, C. N.; PRINZ, G. S.; HALE, W. M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 918-928, July, 2017.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais De Construção – Normas, Especificações, Aplicação e Ensaio de Laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14: Structural Concrete Building Code**. Michigan, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo: Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto: Especificação**. Rio de Janeiro, 2009c.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67: Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8522: Concreto: Determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015b.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 26:** Agregados: Amostragem. Rio de Janeiro, 2009d.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833:** Concreto fresco: Determinação de massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009e.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos: Determinação de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009f.

\_\_\_\_\_. **NBR 6120:** Cargas para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

BARBOSA, I. L. S. Influência dos Agregados Graúdos na Região de Goiânia no Módulo de Deformação Tangente Inicial do Concreto. 2009. 136 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5.ed. v.1. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CURTI, R. **Propriedades e Dosagem do Concreto**. Curso Intensivo de Tecnologia Básica do Concreto. Disponível em: <[http://transportes.ime.ub.br/~moniz/matconst2/dosagem\\_abcp.pdf](http://transportes.ime.ub.br/~moniz/matconst2/dosagem_abcp.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2017.

*EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARD: EN 1992-1-1: Eurocode 2: design of concrete structures: part 1: general rules and rules for buildings. London, 2004.*

*FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. Fib Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft, 2010.*

GALOBARDES, I.; CAVALARO, S.; AGUADO, A.; GARCIA, T. Estimation of the modulus of elasticity for sprayed concrete. **Construction Building Materials**. v. 53, p. 48-58, december, 2014.

JEBLI, M.; JAMIN, F.; MALACHANNE, E.; GARCIA-DIAZ, E.; EL YOUSOUFI, M.S. Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete. **Construction and Building Materials**. v. 161, p. 16-25, february, 2018.

KHALEEL, O, R; AL-MISHHADANI, S, A; RAZAK, H, Abdul. The Effect of Coarse Aggregate on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete (SCC). **Procedia Engineering**. v. 14, p. 805-813, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

\_\_\_\_\_. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NETO, A. A. de M.; HELENE, P. R. do L. Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos. **Instituto**

**Brasileiro do Concreto - 44º Congresso Brasileiro de Concreto**, Belo Horizonte, 2002.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PACHECO, R. F. R; CALMON, J. L; ZANDONADE, E. Análise estatística de propriedades mecânicas dos concretos produzidos por centrais da grande Vitória (ES). **Instituto Brasileiro de Concreto - 49º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bento Gonçalves, 2007.

PROSKE, T; GRAUBNER, C, A. Influence of the coarse aggregate on the concrete properties of scc. **Annual Journal on Concrete and Concrete Structures**. v. 20, Darmstadt, 2005.

UDDIN, M. T.; MAHMOOD, A. H.; KAMAL, M. R. I.; YASHIN, S. M.; ZIHAN, Z. U. A. Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 134, p. 713-726, march, 2017.

WU, K.; CHEN, B.; YAO, W.; ZHANG, D. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 31, p. 1421-1425, june, 2001.

## ANEXO A – Curva de Abrams

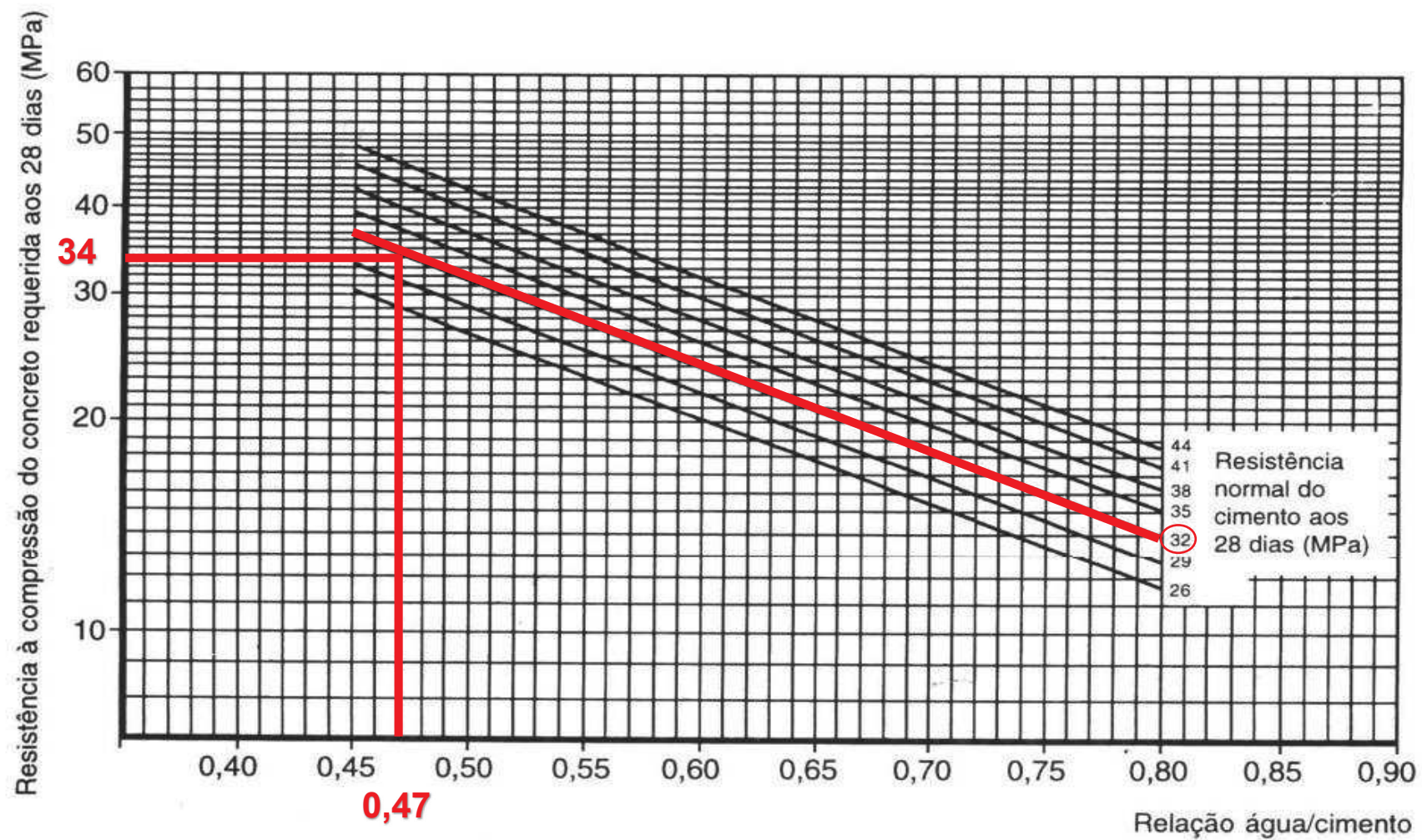


Figura 28 – Curva Abrams relacionando a resistência à compressão do concreto aos 28 dias, a relação água/cimento e a resistência do cimento  
Fonte: Curti, s/a