

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS FRANCISCO GRIEBLER

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FORMATO DO AGREGADO GRAÚDO  
NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2018

MATHEUS FRANCISCO GRIEBLER

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DO FORMATO DO AGREGADO GRAÚDO  
NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 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

2018



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Toledo  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de N° 172

### **Análise da influência do formato do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto estrutural**

por

**Matheus Francisco Griebler**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9:10 h do dia **07 de novembro 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. Marcos Evandro Kolling  
(UTFPR – TD)

---

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

---

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

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

*À Deus por me guiar e me proteger  
em toda a minha vida.*

*Aos meus pais, Ruben e Claudete,  
e minha irmã Gabriela, pelo amor e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus pela vida, por ter oportunidade de cursar uma graduação e assim, enriquecer meu conhecimento.

À minha família por ser fundamental na minha vida, pelo amor e carinho recebidos e pelos conselhos e aprendizados que me fortaleceram nesse período de graduação.

Ao meu orientador, professor Dr. Lucas Boabaid Ibrahim, pelo companheirismo e pelas orientações e sugestões que ajudaram no trabalho.

À banca avaliadora, professores Carlos Eduardo Tino Balestra e Evandro Marcos Kolling, pelas sugestões que ajudaram a melhorar meu trabalho.

Aos técnicos de laboratório Marcos Vinicius Schlichting e Wilson Leobet, pelo auxílio na realização da parte prática do meu trabalho.

A todos meus amigos de graduação pelo companheirismo e pela troca de conhecimento durante todo o curso.

A todos os meus professores que me ensinaram e me incentivaram a buscar o conhecimento.

Agradeço à CMIX Mineração pelo fornecimento do agregado graúdo, no qual foi fundamental para a realização do trabalho, e também ao Cléber, operador de máquinas, que me deu uma força na separação do material a ser utilizado neste trabalho.

Agradeço à Direção da UNIPAR – Universidade Paranaense, câmpus Toledo, por ter disponibilizado o laboratório para a realização dos ensaios, e também, o Alex, laboratorista que me ajudou na execução dos ensaios.

*"Não sou obrigado a vencer, mas tenho o dever de ser verdadeiro. Não sou obrigado a ter sucesso, mas tenho o dever de corresponder à luz que tenho."*

(Abraham Lincoln)

## RESUMO

GRIEBLER, Matheus Francisco. **Análise da influência do formato do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto estrutural.** 2018. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

O concreto é o material estrutural mais utilizado por apresentar propriedades e características importantes e que se adequa a diversas finalidades. É um material constituído por agregados graúdos e miúdos, aglomerante e água, em que o estudo dos diversos componentes são de extrema importância, pois influenciam na qualidade do concreto. Deste modo, a pesquisa analisa a influência ocasionada pela diferença de formato do agregado graúdo basáltico nas propriedades do concreto usual ( $f_{ck}=25$  MPa) em estado fresco, analisando a consistência pelo abatimento do tronco de cone e, no estado endurecido, analisando a resistência à compressão. A dosagem e a confecção dos corpos-de-prova foram realizadas de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Os resultados demonstraram que a utilização de agregados graúdos irregulares são prejudiciais nas propriedades do estado fresco e no estado endurecido do concreto, tanto na trabalhabilidade e na resistência à compressão.

**Palavras-chave:** Agregados graúdos. Diferenciado formato do agregado graúdo. Influências nas propriedades. Trabalhabilidade. Resistência à compressão.

## ABSTRACT

GRIEBLER, Matheus Francisco. **Analysis of the influence of the coarse aggregate shape on the compressive strength of the structural concrete.**2018. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

Concrete is the most used structural material because it has important properties and characteristics and is suitable for a variety of purposes. It is a material made up of coarse and fine aggregates, binder and water, in which the study of the various components is extremely important because they influence the quality of the concrete. Thus, the research analyzes the influence caused by the difference in the shape of the basaltic aggregate in the properties of the usual concrete ( $f_{ck}=25$  MPa) in fresh condition, analyzing the consistency by the slump test and, in the hardened state, analyzing the compressive strength. The dosage and the preparation of the specimens were carried out according to the Brazilian Portland Cement Association (ABCP). The results showed that the use of irregular aggregates is harmful in the fresh state and in the hardened state of the concrete, both in the workability and in the compressive strength.

**Keywords:** Coarse aggregates. Difference in the shape of the coarse aggregate. Influence on properties. Workability. Compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes formas básicas dos agregados .....	23
Figura 2 - Forma e textura superficial de partículas de agregados graúdos: (a) Cascalho, arredondado e liso; (b) Brita, equidimensional; (c) Brita, alongada; (d) Brita, achadatada; (e) Agregado leve, anguloso e áspero; (f) Agregado leve, arredondado e liso .....	23
Figura 3 - Arredondamento .....	25
Figura 4 - Dimensões de corpo-de-prova a serem medidos .....	27
Figura 5 - (a) Dimensão "a" do agregado cúbico; (b) Dimensão "b" do agregado cúbico; (c) Dimensão "c" do agregado cúbico .....	28
Figura 6 - (a) Dimensão "a" do agregado lamelar; (b) Dimensão "b" do agregado lamelar; (c) Dimensão "c" do agregado lamelar .....	28
Figura 7 - (a) Dimensão "a" do agregado alongado; (b) Dimensão "b" do agregado alongado; (c) Dimensão "c" do agregado alongado .....	29
Figura 8 - Valores de resistência à compressão para concreto curado aos 28 dias ( $\sigma_{c28}$ ) como uma função de várias proporções de mistura para diferentes índices de forma do agregado graúdo .....	31
Figura 9 - Valores de resistência à tração para concreto curado aos 28 dias ( $\sigma_{t28}$ ) como uma função de várias proporções de mistura para diferentes índices de forma do agregado graúdo .....	32
Figura 10 - (a) Representação esquemática da exsudação no concreto fresco recém-lançado; (b) Falha de aderência por cisalhamento em um corpo-de-prova ensaiado à compressão uniaxial .....	35
Figura 11 - Fatores que influenciam a resistência do concreto .....	39
Figura 12 - Diagrama de distribuição normal.....	39
Figura 13 - Modelo cilíndrico de corpo-de-prova de concreto .....	41
Figura 14 - Agregado miúdo.....	43
Figura 15 - Agregado graúdo .....	43
Figura 16 - Etapas para o método de dosagem da ABCP .....	44
Figura 17 - Amostra de agregado imersa em água .....	48
Figura 18 - Ensaio de determinação da massa unitária compactada dos agregados graúdos .....	50

Figura 19 - Ensaio de distribuição granulométrica .....	51
Figura 20 - Frasco de Le Chatelier.....	52
Figura 21 - Verificação do abatimento do concreto pelo método tronco de cone.....	53
Figura 22 - Moldes metálicos .....	54
Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	57
Figura 24 - (a) Slump Test realizado com concreto com agregado graúdo cúbico; (b) Slump Test realizado com concreto com agregado lamelar; (c) Slump Test realizado com agregado graúdo alongado .....	61
Figura 25 - Corpos-de-prova utilizando agregado graúdo lamelar .....	63
Figura 26 - Corpos-de-prova utilizando agregado graúdo alongado .....	63
Figura 27 - Relação entre abatimento e índice de forma .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência à compressão das rochas.....	22
Tabela 2 - Módulo de elasticidade de rochas utilizadas na construção.....	22
Tabela 3 - Classificação segundo a forma das partículas e exemplos.....	25
Tabela 4 - Classificação da textura superficial dos agregados com exemplos .....	26
Tabela 5 - Classificação da forma dos fragmentos do corpo-de-prova .....	28
Tabela 6 - Efeitos da forma e da textura superficial do agregado na resistência do concreto .....	36
Tabela 7 - Quantitativo dos corpos-de-prova .....	41
Tabela 8 - Desvio padrão adotado em cada condição de preparo do concreto .....	44
Tabela 9 - Consumo de água para o método da ABCP ( $l/m^3$ ).....	45
Tabela 10 - Obtenção do volume de agregado graúdo seco .....	46
Tabela 11 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	56
Tabela 12 - Características do agregado miúdo.....	57
Tabela 13 - Características do agregado graúdo .....	58
Tabela 14 - Índice de forma dos agregados graúdos .....	58
Tabela 15 - Características do cimento.....	59
Tabela 16 - Características do concreto para a dosagem.....	60
Tabela 17 - Slump Test: Determinação da consistência do concreto.....	61
Tabela 18 - Resistência à compressão axial (MPa) nos diferente formatos de agregados graúdos .....	64
Tabela 19 - Informações estatísticas das amostras dos concretos aos 28 dias.....	65

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados dos testes de resistência à compressão ( $\sigma_{c_{28}}$ ) e à tração ( $\sigma_{t_{28}}$ ), em MPa, em amostras de concreto com agregado graúdo tendo diferentes índices de forma .....	31
Quadro 2 - Consumo de cimento necessário para ganhar 1 MPa de tensão de compressão na concretagem com agregado graúdo tendo diferentes índices de forma.....	33
Quadro 3 - Limites de resistência à compressão .....	34

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Insititute

CMIX - Corretora, Mineração e Imóveis

CP - Cimento Portland

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

NBR- Norma Brasileira

NM- Normalização no Mercosul

PR - Paraná

TD - Toledo

UNIPAR - Universidade Paranaense

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

VSI - Vertical Shaft Impactor

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_E$  - Parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade

$f_c$  - Resistência à compressão do concreto

$f_{ck}$  - Resistência característica à compressão do concreto

$f_{cm}$  - Resistência média à compressão do concreto

$f_{cd}$  - Resistência de dosagem à compressão do concreto

$S_d$  - Desvio padrão conforme a condição de preparo do concreto

$a/c$  - Fator água cimento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	17
1.2.1 Objetivo geral .....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1 CONCRETO .....	19
2.2 AGREGADOS MIÚDOS E GRAÚDOS .....	19
2.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS .....	20
2.3.1 Massa específica e massa unitária .....	21
2.3.2 Granulometria.....	21
2.3.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos agregados graúdos	21
2.4 FORMA DOS GRÃOS.....	22
2.5 CLASSIFICAÇÃO DO FORMATO DO AGREGADO GRAÚDO .....	24
2.6 INFLUÊNCIA DO FORMATO DOS AGREGADOS GRAÚDOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	30
2.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	36
2.7.1 Resistência à compressão .....	38
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	42
3.1.1 Cimento Portland.....	42
3.1.2 Agregados miúdos e graúdos.....	42
3.2 DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP).....	43
3.3 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS ...	47
3.3.1 Ensaio da massa específica aparente dos agregados miúdos.....	47
3.3.2 Ensaio da massa específica aparente dos agregados graúdos .....	48
3.3.3 Ensaio de massa unitária compactada dos agregados graúdos .....	49
3.3.4 Ensaio de granulometria dos agregados miúdos e graúdos.....	50
3.3.5 Ensaio de massa específica do cimento .....	52
3.4 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL .....	53

3.4.1 Ensaio de concreto no estado fresco: Abatimento tronco de cone.....	53
3.4.2 Ensaio de concreto endurecido: Resistência à compressão axial.....	54
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>56</b>
4.1 ANÁLISE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA DOSAGEM DO CONCRETO	
ESTRUTURAL.....	56
4.1.1 Características do agregado miúdo.....	56
4.1.2 Características do agregado graúdo.....	58
4.1.3 Característica do aglomerante: Cimento Portland CP II - Z.....	59
4.1.4 Definição do traço para o concreto.....	59
4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	60
4.2.1 Consistência do concreto: Slump Test – Abatimento do concreto pelo método	
tronco de cone de acordo com a norma NBR NM 67/1998.....	61
4.3 PROPRIEDADE DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	64
4.3.1 Análise comparativa da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova de	
concreto confeccionados.....	64
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO A – Curva de Abrams.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais importante na construção civil. É considerado umas das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da sociedade e na sua qualidade de vida, mesmo sendo um material de descoberta recente na construção de estruturas (HELENE; ANDRADE, 2010).

O motivo da grande importância e quantidade de uso vem de sua versatilidade, ou seja, possui várias vantagens, como por exemplo, mais econômico que outros materiais estruturais, adaptação a qualquer formato de forma e fácil execução e entre outros (ALHADAS, 2008).

Seu uso é amplamente utilizado em estruturas, desde edifícios, pontes, barragens, pavimentos, túneis, rodovias, aeroportos, oleodutos, plataformas de petróleo e até mesmo em ferrovias de alta velocidade (LI, 2011).

Devido à essa grande utilização, é imprescindível o conhecimento sobre as propriedades do concreto para sua qualidade. Além do mais, com o avanço da tecnologia, busca-se mais informações a respeito desse material primordial nas estruturas.

Segundo Neville e Brooks (2010), as propriedades mecânicas mais importantes do concreto em seu estado endurecido é a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, porém Mehta e Monteiro (2008) relatam, que a resistência à compressão é a propriedade mais valorizada, pois o concreto é o material ideal para receber estes esforços e também, os ensaios para determinação da resistência são relativamente simples.

Entretanto Geyer (2006) descreve, que a resistência à compressão não é suficiente para garantir a qualidade do concreto, com isso, também deve-se analisar o módulo de elasticidade para ter conhecimento da capacidade de deformação da estrutura. Sem esse estudo, podem ocorrer deformações excessivas ou até mesmo o colapso da estrutura. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o módulo de elasticidade é uma propriedade relacionada à resistência do concreto e com isso, pode ser determinado por meio de equações. Como por exemplo, a Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT(2014), estima o módulo de elasticidade a partir de equações dependentes da resistência característica à compressão do concreto.

Devido a constituição do concreto ser feita em sua grande parte por agregados, o estudo da influência dos agregados graúdos no concreto é fundamental para o controle de qualidade. Segundo Mehta e Monteiro (2008), os agregados graúdos influenciam indiretamente em idades mais avançadas do concreto, como a resistência à compressão. Além disso, as próprias características dos agregados como porosidade, composição granulométrica, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão e módulo de elasticidade interferem na qualidade do concreto e por isso, devem ser estudadas.

### 1.1 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA

Os agregados, conforme Ambrozewicz (2012), representam cerca de 3/4 do volume de dosagem do concreto, sendo que a maior parte deste volume é ocupado por agregados graúdos, deste modo, a análise das características dos agregados são importantes para as propriedades da mistura do concreto.

Com isso, é fundamental estudar as características do agregado graúdo nas propriedades do concreto. No entanto, existem poucos trabalhos na literatura sobre a influência do formato do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto, deste modo para amplificar o entendimento é necessário realizar estudos sobre o assunto.

Desta forma, com um estudo mais aprofundado sobre o assunto, pode-se quantificar a influência do formato do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto, como por exemplo, a resistência à compressão. Na qual, é a principal propriedade mecânica do estado endurecido do concreto utilizado para fins estruturais. E assim, concluir quais formatos são desejáveis para fabricação do concreto, ou seja, os formatos dos agregados graúdos que garantem melhores propriedades ao concreto.

### 1.2 OBJETIVOS

No presente trabalho de curso serão abordados o objetivo geral e os objetivos específicos neste trabalho.

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência dos formatos do agregado graúdo basáltico no comportamento da seguinte propriedade: resistência à compressão do concreto com resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência dos formatos do agregado graúdo basáltico, utilizado na fabricação do concreto para fins estruturais na resistência à compressão do concreto;
- Analisar a influência dos formatos do agregado graúdo basáltico na propriedade no estado fresco do concreto, pelo abatimento tronco de cone;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo consiste em uma revisão bibliográfica em que serão abordados os conceitos dos agregados miúdos e graúdos e do concreto. Além disso, o agregado graúdo terá mais ênfase, sendo descritas suas principais propriedades, sua classificação quanto ao formato e a sua influência do formato nas propriedades mecânicas do concreto em estado fresco e endurecido.

### 2.1 CONCRETO

O concreto é uma mistura entre aglomerantes (cimento), agregados graúdos (brita), agregados miúdos (areia) e água. Estes materiais que formam o concreto são adicionados com uma proporção racional. Existem várias finalidades deste material, tais como, elemento estrutural, revestimentos, pavimentos, paredes, fundações, canalizações e outros. E por isso, é o material mais importante na construção civil e para chegar em boas qualidades do concreto, como alta resistência mecânica, durabilidade, impermeabilidade quando endurecido, é fundamental conhecer os fatores que influenciam e um deles é a qualidade dos materiais. Com isso, serão descritos os agregados e suas principais propriedades (AMBROZEWICZ, 2012).

### 2.2 AGREGADOS MIÚDOS E GRAÚDOS

São materiais particulados com forma e volume indefinidos, considerados incoesivos e praticamente inertes. Os agregados têm propriedades e dimensões adequadas para a utilização em argamassas e concretos. A qualidade do agregado é de grande importância, pois ocupa pelo menos  $3/4$  do volume do concreto (AMBROZEWICZ, 2012).

Os agregados são classificados por três fatores, origem, massa unitária e pelas dimensões das partículas. Segundo a origem dividem em dois, naturais e industrializados, naturais são aqueles encontrados na natureza, já os industrializados são materiais que sofreram processos industriais. Pela massa unitária do material são subdividido em três, leves, médios e pesados. A classificação

pelas dimensões das partículas é separada em duas partes, miúdos que são as areias e os graúdos que são os cascalhos e as britas (BAUER,2008).

Em relação as dimensões das partículas, os agregados miúdos, são aqueles que passam na peneira ABNT NBR NM ISO 3310 – 1 de 4,75mm e ficam retidos na peneira ABNT NBR NM ISO 3310 – 1 de 150µm. Considera-se agregados graúdos os grãos que passam na peneira com abertura de 75 mm e ficam retidos na peneira ABNT NBR NM ISO 3310 – 1 de 4,75 mm.

As características dos agregados que são importantes para a fabricação do concreto incluem a porosidade, classificação granulométrica, absorção de umidade, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e substâncias nocivas presentes. Estas características são devido à composição e ao tipo de exposição em que a rocha mãe foi submetida e também, ao tipo de britador em que foi fabricado o agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os autores Neville e Brooks (2010) acrescentam, que algumas dessas propriedades são ausentes na rocha mãe, como é o caso da forma, o tamanho da partícula e textura superficial, em que podem influenciar na qualidade do concreto no estado fresco e no endurecido.

### 2.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Além das importantes propriedades dos agregados que modificam as qualidades do concreto como foi citado anteriormente, o agregado desempenha outras funções, como por exemplo, o custo e a trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O próprio autor divide as características dos agregados em três grupos:

- a) Características relacionadas a porosidade: massa específica aparente, absorção de água, resistência, módulo de elasticidade e solidez;
- b) Características relacionadas as condições prévias e condicionantes de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- c) Características relacionadas a composição química e mineralógica: resistência, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Com base nisso, serão descritas as três principais propriedades dos agregados que influenciam na fabricação e nas propriedades do concreto.

### 2.3.1 Massa específica e massa unitária

A massa específica é a relação entre a massa e o volume do material que constitui os grãos dos agregados. A massa unitária é a mesma relação, porém o volume de vazios é considerado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

É necessário ter conhecimento dessas duas propriedades dos agregados graúdos para a fabricação do concreto, em que são utilizados pelo método de dosagem ABCP, na qual será detalhado sua determinação no tópico de materiais e métodos.

### 2.3.2 Granulometria

É a distribuição das partículas do agregado em vários intervalos de tamanho, geralmente expressos em porcentagens acumulativas. Os principais motivos para estabelecer tamanhos máximo do agregado e limites de aberturas de peneiras são as influências na funcionalidade e o custo do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Uma destas influências é a trabalhabilidade que depende da dimensão máxima do agregado e da uniformidade dos grãos. Entretanto, se a uniformidade dos grãos for muito alta o concreto será menos trabalhável. No caso da dimensão máxima, como agregados maiores tem menor área de superfície por unidade de massa, o concreto necessita menos água e a relação água/cimento diminui e a resistência do concreto aumenta, porém existe um limite de dimensão máxima do agregado que com a diminuição da relação água/cimento não eleva sua resistência devido a diminuição da área de ligação entre agregado e a pasta de cimento, e as descontinuidades geradas pelas partículas são muito grandes, o que torna o concreto bastante heterogêneo (NEVILLE; BROOKS, 2010).

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

Os agregados utilizados na produção de concreto usuais têm resistência muitos superiores a pasta de cimento, em que não existem nenhum impedimento para tal função. Entretanto, quando usamos concretos de alta resistência, a resistência do agregado pode ser menor que a pasta, levando a ruptura dos grãos (BAUER, 2008).

Como observa-se na Tabela 1, a relação da resistência à compressão de diferentes tipos de rochas. Em que, todas as rochas, principalmente o basalto que será utilizado na confecção do concreto neste trabalho, são mais resistentes que o concreto usual que tem resistência à compressão do concreto igual a 25 MPa.

**Tabela 1 - Resistência à compressão das rochas**

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

Fonte: Bauer (2008).

O módulo de elasticidade das rochas pode ser observado na Tabela 2, sendo superiores ao do concreto usual de 25 MPa. Como por exemplo, comparando o módulo de elasticidade do basalto que fica entre 34 a 80 GPa com a fórmula de módulo de elasticidade do concreto presente na ABNT NBR 6118/2014, que fica em torno de 33,6 GPa, utilizando o mesmo agregado graúdo. Como será visto adiante, o módulo de elasticidade é uma propriedade relacionada a resistência à compressão característica do concreto.

**Tabela 2 - Módulo de elasticidade de rochas utilizadas na construção**

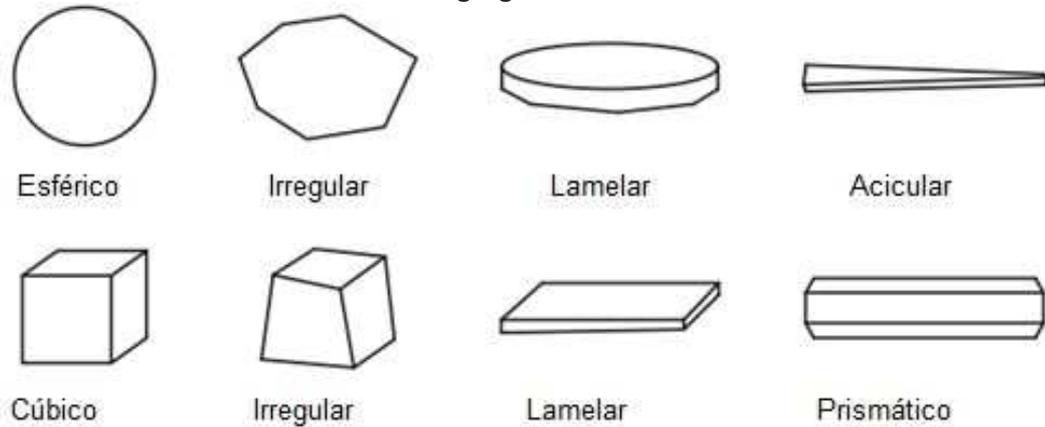
<b>Rocha</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
<b>Granito</b>	34
<b>Basalto</b>	34 a 80
<b>Gnaise</b>	46 a 66
<b>Calcário</b>	74
<b>Arenito</b>	20

Fonte: Bauer (2008).

## 2.4 FORMA DOS GRÃOS

Existem diversos formatos para os agregados, como por exemplo, esférico, irregular, lamelar, acicular, cúbico e prismático. Porém, muitos destes formatos não são ideais para a fabricação do concreto, em que muitas propriedades do concreto são afetadas, como serão descritas ao longo do trabalho. Os formatos básicos estão representados na Figura 1.

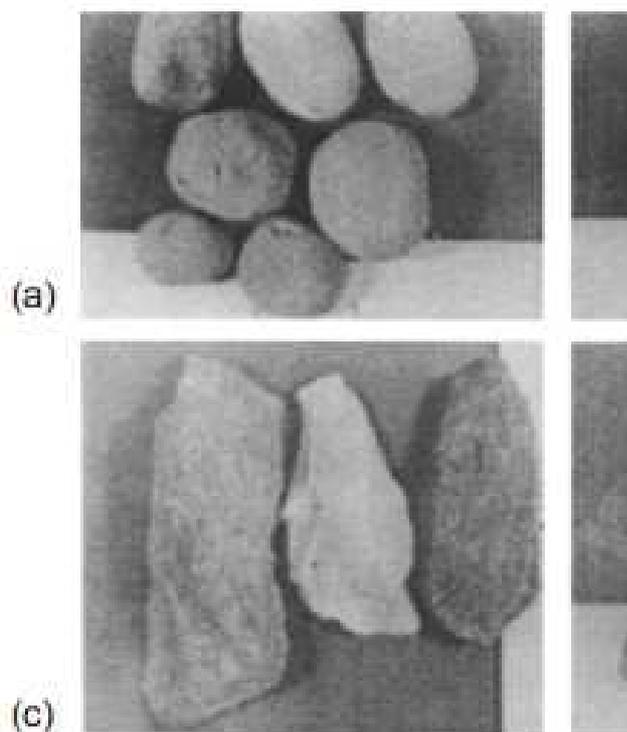
**Figura 1 - Diferentes formas básicas dos agregados**



Fonte: Li (2011).

Na Figura 2, pode-se observar alguns tipos de formatos e a textura superficial que cada tipo de agregado apresenta.

**Figura 2 - Forma e textura superficial de partículas de agregados graúdos: (a) Cascalho, arredondado e liso; (b) Brita, equidimensional; (c) Brita, alongada; (d) Brita, achatada; (e) Agregado leve, angular e áspero; (f) Agregado leve, arredondado e liso**



**Fonte: Mehta e Monteiro (2008).**

Na Figura 2a, o cascalho tem o formato arredondado e sua superfície é lisa. No caso do agregado britado, Figuras 2b, 2c e 2d, o formato depende do tipo de britador e da rocha, podendo ser, cúbica, achatado ou alongado, em que várias propriedades do concreto são afetadas negativamente. Já pedra-pomes, Figura 2e, são agregados leves sendo angular e superfície áspera e a argila expandida na Figura 2f, geralmente tem o mesmo formato do cascalho (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No caso dos agregados industrializados, as características principais do formato são a natureza da rocha e o tipo de britador final na linha de britagem, no qual produzem grãos bem rugosos e com divisões bem definidas. As britas de basalto provenientes do britador de mandíbula são em sua maioria irregulares, alongados e lamelares. Para diminuir a quantidade de agregados irregulares no basalto, pode processar nos britadores de cone especiais ou de martelo (BAUER, 2008).

## 2.5 CLASSIFICAÇÃO DO FORMATO DO AGREGADO GRAÚDO

Na literatura existem diversos métodos de classificação do formato do agregado graúdo. A grande parte dessas classificações são a partir de medições geométricas, como por exemplo, a curvatura e esfericidade, índice de lamelação, índice de alongamento, índice de esfericidade e índice volumétrico.

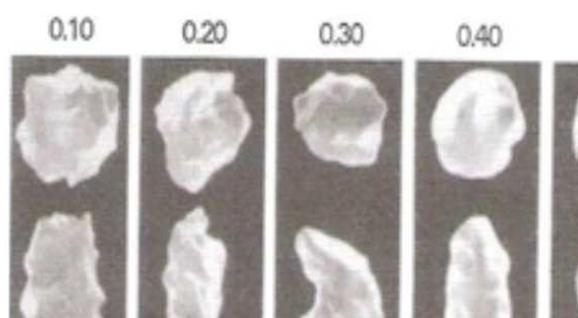
Entretanto, como existem vários métodos de classificação do formato será brevemente explicado algumas descrições de textura superficial e formato do agregado graúdo para compreender as diferenças existentes entre os dois. Logo em seguida, será descrito as normas brasileiras utilizadas no trabalho, que classificam o agregado graúdo pelo formato.

As características geométricas do agregado, como formato e textura superficial, são importantes nas propriedades do concreto em estado fresco e endurecido. A forma tridimensional de um agregado é difícil ser estabelecida e por isso, adota-se certos parâmetros geométricos desses corpos (NEVILLE; BROOKS, 2010).

A redondeza é o grau em que a partícula tem de angularidade nas bordas e cantos. A redondeza real é o desgaste sofrido pela força e resistência à abrasão da rocha mãe e também de outros impactos em que foi submetida. Já o agregado britado, sua forma depende de sua constituição, do tipo de britador e da relação entre o tamanho inicial da rocha e do tamanho do produto britado (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Powers (1953), classifica a redondeza da superfície de cada partícula, como mostra a Figura 3.

**Figura 3 - Arredondamento**



Fonte: Powers (1953) apud Farias, Palmeira e Beja (2017).

É apresentado na Tabela 3, uma ampla classificação segundo a forma das partículas.

**Tabela 3 - Classificação segundo a forma das partículas e exemplos**

Classificação	Descrição	Exemplos
<b>Arredondado</b>	Totalmente desgastado pela ação de água ou totalmente conformado por atrito	Seixo de rio ou zonas litorâneas marítimas; areia de deserto, de origem eólica ou de litoral marítimo
<b>Irregular</b>	Naturalmente irregular ou parcialmente conformado por atrito com arestas arredondadas	Outros seixos
<b>Lamelar</b>	Material em que a espessura é menor que as outras duas dimensões	Rochas lamelares
<b>Anguloso</b>	Possuem arestas bem definidas na interseção de faces razoavelmente planas	Pedras britadas de todos os tipos e escória britada
<b>Alongado</b>	Material, em geral anguloso no qual o comprimento é consideravelmente maior que as outras duas dimensões	—

<b>Lamelar e Alongado</b>	Material com o comprimento bem maior que a largura e esta bem maior que a espessura	—
---------------------------	---	---

Fonte: Neville e Brooks (2010).

A classificação pela textura superficial é adotada conforme os seguintes parâmetros em que a partícula se encontra, se é polida ou opaca, lisa ou áspera e o tipo de rugosidade. A textura depende da dureza, granulometria, porosidade da rocha mãe e também do nível da força em que está sendo submetida a superfície tornando-se lisas ou ásperas. A rugosidade pode ser bem definida visualmente, conforme a Tabela 4 (NEVILLE; BROOKS, 2010).

**Tabela 4 - Classificação da textura superficial dos agregados com exemplos**

Grupo	Textura superficial	Características	Exemplos
1	Vítrea	Fratura concoidal	Escória vítrea
2	Lisa	Desgaste pela água, ou lisa devido a fratura de rocha laminada ou de granulação fina	Cascalhos, sílex, ardósia, mármore, alguns riolitos
3	Granular	Fratura mostrando grãos arredondados mais ou menos uniformes	Arenito
4	Áspera	Fratura áspera de grão fino ou médio, não contendo constituintes cristalinos facilmente visíveis	Basalto, pórfiro, calcário
5	Cristalina	Contendo constituintes cristalinos facilmente visíveis	Granito, gabro, gnaisse
6	Porosa	Com poros e cavidades visíveis	Tijolo, pedra-pomes, clínquer, argila expandida

Fonte: Neville e Brooks (2010).

Entretanto Bauer (2008), sugere uma outra classificação quanto a conformidade da superfície, na qual se subdivide em angulosos e arredondados. Angulosos tem arestas vivas e pontas, como as britas. Arredondados não tem arestas vivas e pontas, como os seixos. Quando a forma das faces, separaram-se em conchoidal e defeituoso. Conchoidal quando apresenta pelo menos uma face côncava e defeituoso quando tem trechos convexos.

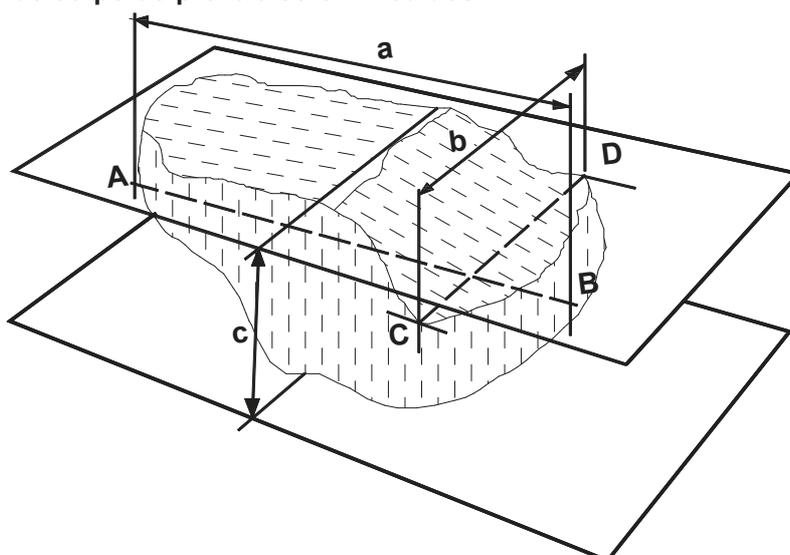
A classificação do formato do agregado foi realizada pelas normas NBR 7809 – Índice de Forma do Agregado Graúdo pelo Método do Paquímetro (2006) e NBR 5564- Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio (2014).

Segundo a NBR 7809/2006, o índice de forma do agregado graúdo é a média da relação entre comprimento e espessura ( $C/e$ ), de todos os grãos medidos. Os grãos devem ser medidos com ajuda de um paquímetro, com resolução de 0,1 mm. Entretanto, o índice de forma é uma escala que segundo a NBR 7211/2009, não deve ultrapassar 3 a relação entre comprimento e espessura, em que, quanto mais próximo de 0 mais cúbico é o agregado e mais próximo de 3 mais irregular (alongado e achatado) sendo portanto, insuficiente para diferenciar os formatos.

A classificação do formato do agregado graúdo pela ABNT NBR 5564/2014 é mais complexa, em que classificação agregado graúdo em quatro divisões por suas três dimensões, em cúbica e não cúbicas (alongados, lamelares e alongados-lamelares). Portanto, serão medidas as três dimensões  $a$ ,  $b$  e  $c$  de cada agregado, com ajuda de um paquímetro, no qual as dimensões serão medidas em centímetros e arredondadas em uma casa decimal.

As três dimensões  $a$ ,  $b$  e  $c$ , são descritas conforme a mesma norma, portanto, “ $a$ ” é a distância entre dois pontos  $A$  e  $B$  do corpo de prova (maior distância) a dimensão “ $b$ ” é a distância entre duas retas paralelas à reta que passa por  $A$  e  $B$ , tangenciando  $C$  e  $D$  do corpo-de-prova (média distância), a dimensão “ $c$ ” é a maior distância entre dois planos paralelos às retas  $AB$  e  $\overline{CD}$  e que tangenciam a superfície do corpo-de-prova (menor distância), como observa-se na Figura 4.

Figura 4 - Dimensões de corpo-de-prova a serem medidos



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 5564 (2014).

Com isso, calcula-se as relações  $b/a$  e  $c/b$  para cada agregado analisado, e assim, classifica-se o agregado pelo formato conforme a Tabela 5.

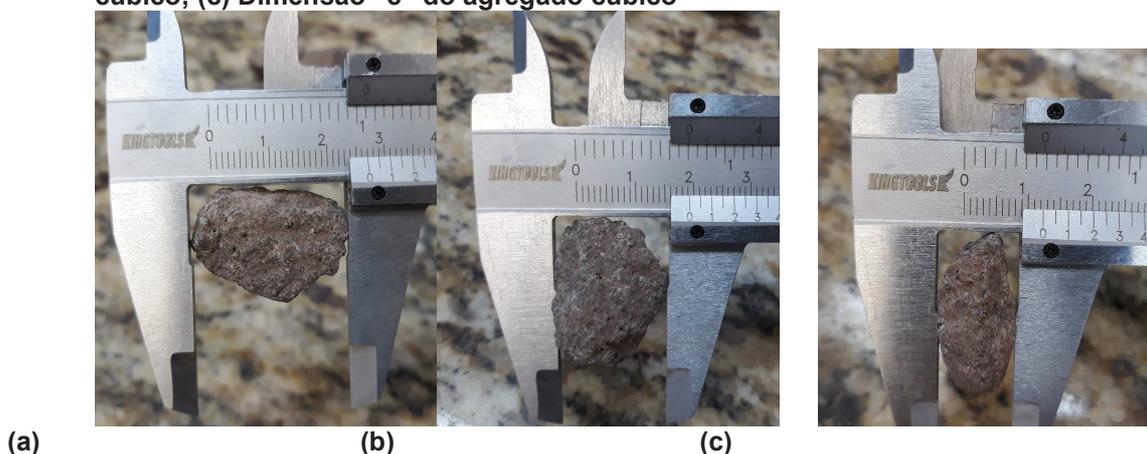
**Tabela 5 - Classificação da forma dos fragmentos do corpo-de-prova**

Relações $b/a$ e $c/b$	Classificação da forma
$b/a \geq 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Alongada
$b/a \geq 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar

Fonte: ABNT NBR 5564 (2014).

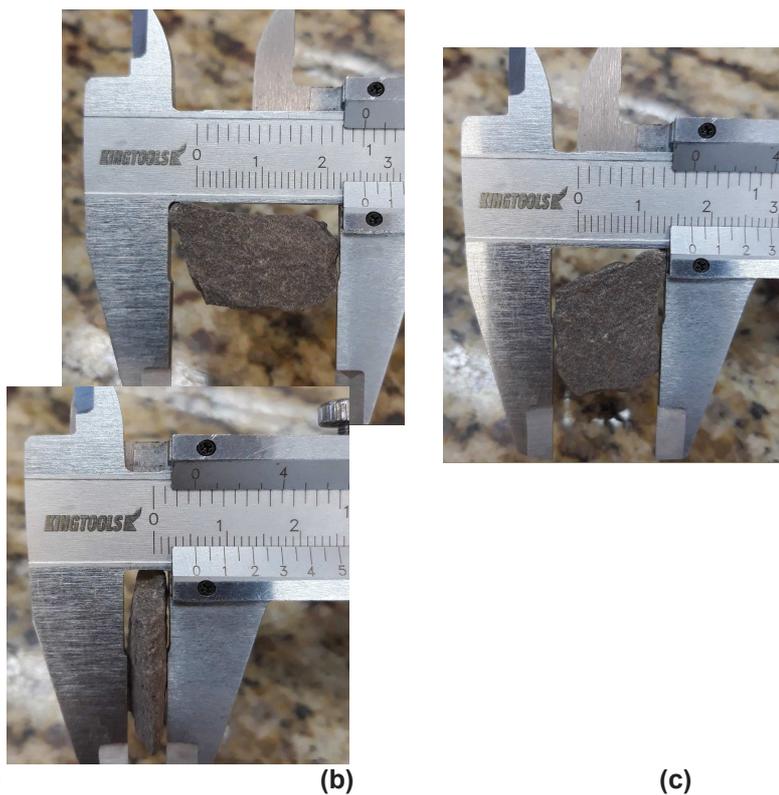
Como observa-se nas Figuras 5, 6 e 7, a medição das três dimensões (a, b e c) necessárias para classificar o agregado graúdo quanto ao formato.

**Figura 5 - (a) Dimensão "a" do agregado cúbico; (b) Dimensão "b" do agregado cúbico; (c) Dimensão "c" do agregado cúbico**



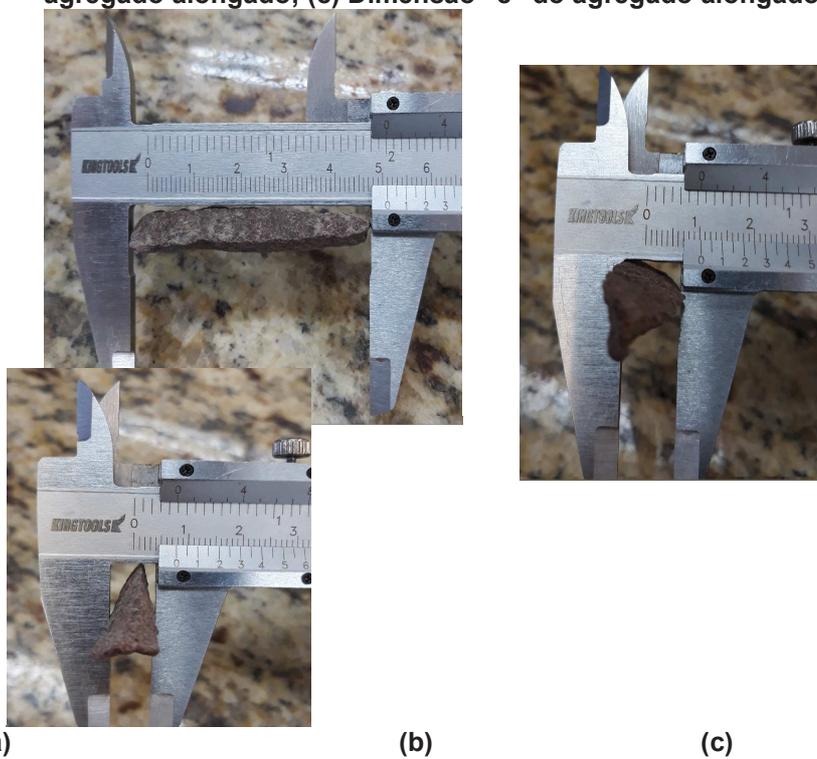
(a)  
Fonte: Autor (2018).

**Figura 6 - (a) Dimensão "a" do agregado lamelar; (b) Dimensão "b" do agregado lamelar; (c) Dimensão "c" do agregado lamelar**



(a)  
Fonte: Autor (2018).

(b) Dimensão "a" do agregado alongado; (b) Dimensão "b" do agregado alongado; (c) Dimensão "c" do agregado alongado



(a)  
Fonte: Autor (2018).

Neste presente trabalho não foi possível realizara preparação das amostras conforme descrito nas normas NBR 5564/2014 e NBR 7809/2006, pois o agregado graúdo foi separado por apenas os intervalos de tamanho da brita 1, no qual é o

tamanho mais utilizado comercialmente, devido ao intuito de analisar apenas a influência da forma do agregado graúdo, e com isso, os agregados passaram nas peneiras ABNT NBR NM ISSO 3310-1 nas aberturas de 19 mm e ficaram retidos nas de 9,5 mm, em relação ao procedimento completo realizado na classificação do formato do agregado graúdo será descrito no tópico de materiais e métodos.

## 2.6 INFLUÊNCIA DO FORMATO DOS AGREGADOS GRAÚDOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Os formatos dos grãos dos agregados graúdos influenciam em várias características do concreto. Como a mudança da trabalhabilidade e assim, modificando os condicionantes de bombeamento, lançamento e adensamento (BAUER, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o estado fresco do concreto é mais influenciado pela forma e textura superficial das partículas do agregado em relação ao estado endurecido. Os autores comparam os agregados lisos e arredondados com os angulares e alongados em que, estes últimos necessitam mais pasta de cimento para ter uma mistura de concreto viável.

Isso se justifica por diversos fatores, um deles é que os grãos arredondados garantem uma maior trabalhabilidade que os irregulares devido ao formato, em que fica evidente no teste de abatimento. Bauer (2008) complementa, os concretos feitos com grãos irregulares possuem resistência menor sem alterar o traço, pois os grãos podem ficar presos na armação devido à falta de trabalhabilidade e a concretagem não será uniforme, ocasionando uma falha na concretagem, sendo um fenômeno altamente prejudicial à estrutura.

Além de ser mais prejudicial à estrutura, para se obter a mesma resistência e abatimento com os grãos irregulares que dos grãos cuboides, deve-se aumentar a quantidade de finos e de água no traço. Com isso, além de ser inviável estruturalmente também será oneroso (BAUER, 2008).

Torna-se evidente as afirmações anteriores sobre as influências do formato do agregado graúdo, Frazao e Sbrighi (1984), na pesquisa intitulada como "*The influence of the shape of the coarse aggregate on some hydraulic concrete properties*". Em que, avaliou-se a influência do formato do agregado graúdo em algumas propriedades do concreto. O índice de forma utilizado foi pelo método DPT

M-86/69 padronizado segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), em que, a escala vai de 0 a 1, no qual quanto mais próximo do 0 corresponde um agregado mais achatado, e mais próximo do 1 mais cúbico.

Os resultados do trabalho demonstram que os agregados cuboides garantem uma maior resistência à compressão ao concreto do que agregados irregulares, entretanto nos testes de resistência a tração não obtiveram uma diferença significativa nos resultados entre os diferentes formatos, sendo que a trabalhabilidade e a quantidade de cimento foram mantidas a mesma, conforme o Quadro 1.

**Quadro 1 - Resultados dos testes de resistência à compressão ( $\sigma_{c28}$ ) e à tração ( $\sigma_{t28}$ ), em MPa, em amostras de concreto com agregado graúdo tendo diferentes índices de forma**

Índice de forma	Proporções de mistura							
	1:4		1:5		1:6		1:7	
	$\sigma_{c28}$	$\sigma_{t28}$	$\sigma_{c28}$	$\sigma_{t28}$	$\sigma_{c28}$	$\sigma_{t28}$	$\sigma_{c28}$	$\sigma_{t28}$
0,30	45	3,8	36	3,4	27	2,7	15	1,8
0,52	49	4,1	37	3,4	29	2,5	18	1,8
0,75	50	4	40	3,4	28	2,4	18	2
0,97	52	4	40	3,1	34	2,6	22	2,3

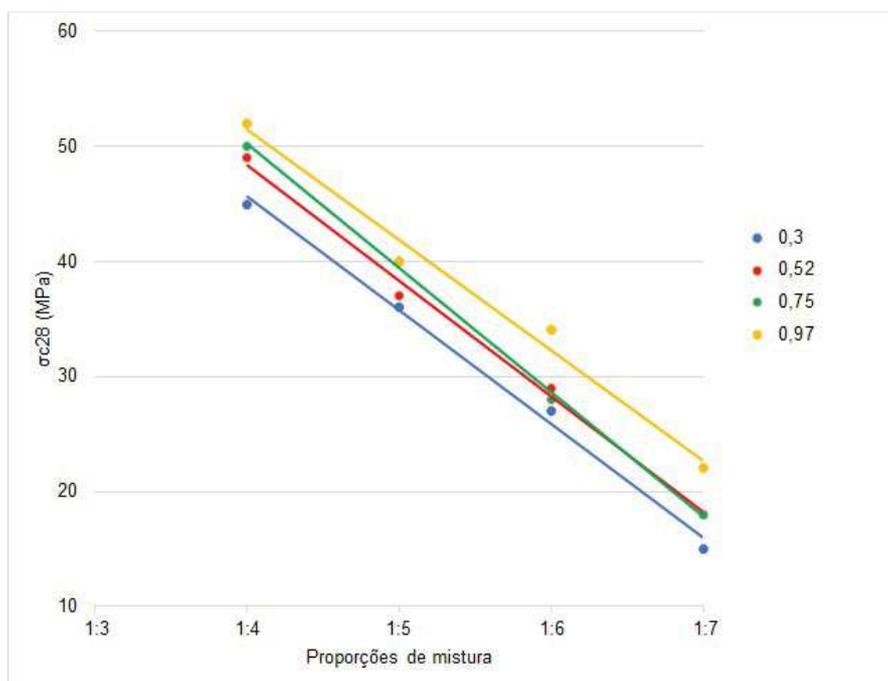
Fonte: Frazao e Sbrighi (1984).

Na Figura 8, pode-se verificar que o índice de forma tem influência na resistência à compressão do concreto, quanto menor foi o índice de forma menos resistência apresentou, isso significa que quanto mais irregular é o agregado graúdo utilizado na confecção diminuirá a resistência à compressão do concreto. Além disso, em relação ao traço, quanto mais agregado graúdo na composição do concreto menor foi a resistência à compressão.

Na Figura 9, pode-se verificar que não existiu diferença significativa entre o índice de forma e a resistência à tração, conclui-se que o formato do agregado graúdo influencia na resistência à compressão e na resistência à tração tem pouca influência. Em relação ao traço, quanto mais agregados no traço menor a resistência à tração do concreto.

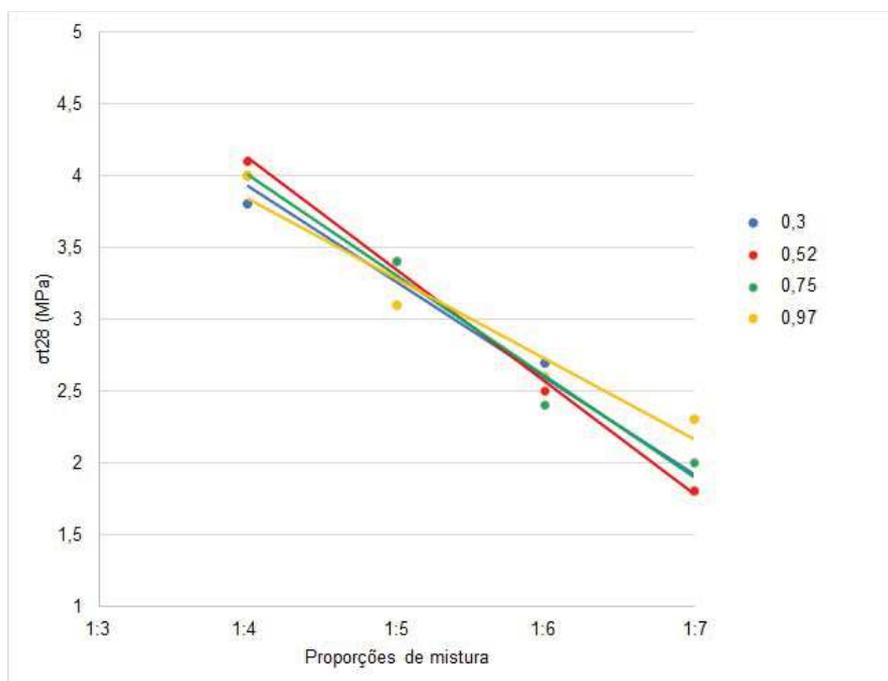
**Figura 8 - Valores de resistência à compressão para concreto curado aos 28 dias ( $\sigma_{c28}$ ) como uma função de várias proporções de mistura para diferentes índices de forma do agregado**

graúdo



Fonte: Adaptado de Frazao e Sbrighi (1984).

Figura 9 - Valores de resistência à tração para concreto curado aos 28 dias ( $\sigma_{c28}$ ) como uma função de várias proporções de mistura para diferentes índices de forma do agregado graúdo



Fonte: Adaptado de Frazao e Sbrighi (1984)

Os resultados da pesquisa também demonstram que os grãos cuboides necessitam menos quantidade de cimento para obter a mesma resistência à compressão do que os grãos mais irregulares, como mostra o Quadro 2.

**Quadro 2 - Consumo de cimento necessário para ganhar 1 MPa de tensão de compressão na concretagem com agregado graúdo tendo diferentes índices de forma**

Índice de forma	Proporções de mistura							
	1:4		1:5		1:6		1:7	
	$\varnothing$ $\sigma_{c28}$	$a/c$	$\varnothing$ $\sigma_{c28}$	$a/c$	$\varnothing$ $\sigma_{c28}$	$a/c$	$\varnothing$ $\sigma_{c28}$	$a/c$
0,30	0,99	0,43	1,00	0,51	1,14	0,58	1,76	0,74
0,52	0,93	0,41	1,00	0,50	1,10	0,58	1,52	0,71
0,75	0,91	0,39	0,93	0,46	1,11	0,53	1,49	0,69
0,97	0,88	0,38	0,92	0,45	0,94	0,54	1,24	0,64
* $\varnothing/\sigma_{c28}(\%)$	12	-	9	-	21	-	42	-

Fonte: Frazao e Sbrighi (1984).

Os valores de  $\varnothing/\sigma_{c28}$  representam a relação entre a quantidade de cimento por metro cúbico de concreto e valor médio da resistência à compressão para cada proporção de mistura e índice de forma. Como por exemplo, o índice de forma varia de 0,30 a 0,97, na proporção de 1:4, tem-se que  $\varnothing/\sigma_{c28}$  varia de 0,99 a 0,88, o que representa uma redução de 12 % na quantidade de cimento para obter a mesma resistência à compressão.

Segundo Frazao e Sbrighi (1984), os dados mostram que com o uso do agregado cúbico ocorre uma redução de até 40 kg cimento por metro cúbico de concreto para obter a mesma resistência à compressão. No Quadro 2, os valores da relação  $a/c$  diminuem quando o índice de forma aumenta, portanto, quanto menos irregular for o agregado graúdo melhores serão as qualidades mecânicas para o concreto, como por exemplo, a resistência à compressão.

Arndt, Souza e Bianchini (2007), na pesquisa intitulada “Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto”, foram utilizados dois tipos de formatos de agregado graúdo da mesma pedra, em que se diferenciam pelo processo, uma foi produzida pelo britador de mandíbulas denominada como “COMUM” e a outra produzida pelo impactador de eixo vertical denominada de “VSI”.

O índice de forma foi calculado pela NBR 7809/2006, em que, o agregado “COMUM” teve seu índice de forma igual a 4,0 e do “VSI” igual a 1,8. Sendo que o objetivo do trabalho é de avaliar a influência do formato, foram utilizados o mesmo

traço e a mesma trabalhabilidade, com teste de abatimento igual a  $120 \pm 20$  mm, com acréscimo de água para até atingir o abatimento desejado.

**Quadro 3 - Limites de resistência à compressão**

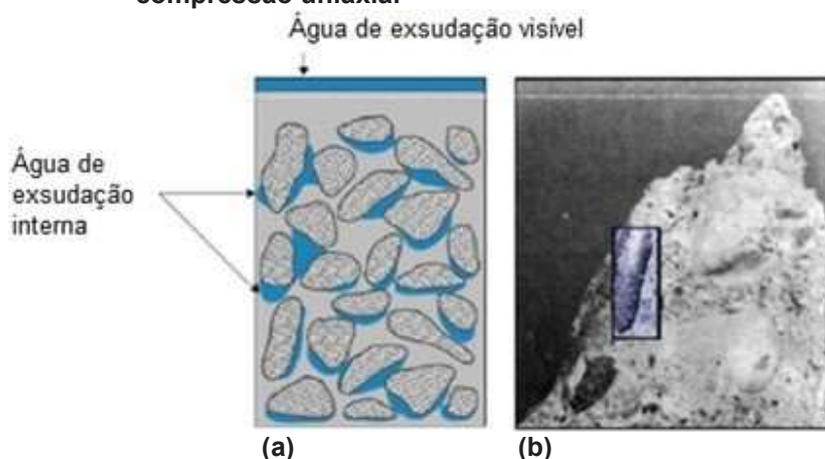
Idade (dias)	Resistência a compressão (MPa)	
	COMUM	VSI
7	26,9	27,9
	26,1	29,0
	27,0	28,1
	26,5	28,8
28	28,2	33,2
	29,0	32,0
	29,2	32,2
	28,0	33,1
abat.	120 mm	120 mm
<i>a/c</i>	0,57	0,52
Índice de forma	4,0	1,8

Fonte: Arndt; Souza e Bianchini (2007).

Com os resultados apresentados no Quadro 3, verifica-se que quanto mais elevado o índice de forma haverá mais necessidade de água para obter o mesmo abatimento ou seja, os agregados mais irregulares necessitam mais água para ter a mesma trabalhabilidade e com isso, suas propriedades mecânicas são afetadas, principalmente a resistência à compressão, na qual apresentou uma diferença de aproximadamente 10% entre os dois concretos. Os autores citam que a utilização do agregado graúdo VSI apresenta uma redução de aproximadamente de 15 kg cimento por metro cúbico de concreto, com isso, a utilização do agregado mais regular apresenta uma redução dos custos, além de propiciar melhores qualidades mecânicas ao concreto.

Uma das justificativas que a mistura de concreto com agregado graúdo mais irregular necessita mais cimento e sua resistência a compressão é menor, é descrito por Mehta e Monteiro (2008), no qual quanto maior a dimensão e mais alongado e achatados for o agregado usado no concreto, maior será o acúmulo de água na superfície do agregado, como mostra na Figura 10. Esse fenômeno é conhecido como exsudação, faz com que enfraqueça a zona de transição na interface pasta-agregado.

**Figura 10 - (a) Representação esquemática da exsudação no concreto fresco recém-lançado; (b) Falha de aderência por cisalhamento em um corpo-de-prova ensaiado à compressão uniaxial**



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Diferenças entre o formato arredondado e liso e agregados rugosos e angulares é descrito também por Neville e Brooks (2010), em que as formas tem relação direta com a fissuração. Pedregulhos ou seixos lisos ocorrem a fissuração em tensões menores que em relação à agregados britados rugosos e angulosos.

A textura superficial também pode modificar algumas propriedades do concreto, conforme Mehta e Monteiro (2008), um agregado com textura rugosa ou agregado britado apresenta uma resistência nas primeiras idades um pouco mais alta (especialmente a tração) do que um agregado liso. Isso se deve, pois, a ligação física entre o agregado britado e a pasta de cimento hidratada é mais forte que do agregado liso. Porém, com o avanço da idade, o efeito químico começa a aparecer entre a ligação entre o agregado e a pasta de cimento fazendo com que a ligação física diminua sua influência.

Outra relação é citada por Bauer (2008), em que os grãos irregulares, tem maior aderência na pasta de cimento do que os grãos cuboideis, isso ocorre devido os grãos irregulares apresentarem superfícies e textura que garantem maior aderência.

A forma e a textura superficial são características que afetam principalmente a relação água/cimento, entretanto existem outras características citadas anteriormente que podem influenciar além da relação água/cimento, como por exemplo, a zona de transição pasta-agregado. Portanto estas características influenciam indiretamente no estado endurecido do concreto, como por exemplo, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, afetando o formato da curva

tensão-deformação. Além destas, a forma e a textura superficial do agregado são determinantes na magnitude da retração por secagem e na fluência do concreto. Outras características dos agregados podem afetar indiretamente as propriedades do concreto, através da compatibilidade da mistura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo os estudos de Giaccio e Zerbino (1996), concretos produzidos com agregados britados podem ter 15% a mais de resistência à compressão comparado com os agregados arredondado e liso (seixo natural de rio).

Em complementação, segundo Almeida (1990), cita que a utilização de agregados britados no concreto apresenta maiores resistência à tração na flexão, na resistência à tração direta e no módulo de elasticidade, em que são propriedades dependentes da a zona de transição na interface pasta-agregado, ou seja, pela textura superficial e angulosidade das partículas.

Contudo, a influência da forma dos agregados no estado sólido do concreto é mais significativa na resistência à flexão do que na resistência à compressão ou tração. Desta forma, o formato angular do agregado dará ao concreto uma maior resistência à flexão do que o arredondado. Entretanto, em misturas com a mesma trabalhabilidade existe pouca diferença na resistência à flexão, pois o agregado arredondado precisa menor quantidade de água que os agregados angulosos (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Como observa-se na Tabela 6, segundo as estatísticas experimentais, o efeito da forma é maior na resistência à flexão do que à compressão, porém na textura superficial essa relação é inversa.

**Tabela 6 - Efeitos da forma e da textura superficial do agregado na resistência do concreto**

Resistência afetada	Efeito relativo (%) da	
	Forma	Textura superficial
Compressão	22	44
Flexão	31	26

Fonte: Waddal e Dobrowolski (1993) apud Li (2011).

## 2.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO

É de fundamental importância o conhecimento das propriedades do concreto para a qualidade do material. Com isso, adequa-se o concreto para diferentes

finalidades, ou seja, atende-se as condições necessárias ao concreto com alternativas com menor custo (BAUER, 2008).

As propriedades do concreto são divididas em duas fases, no estado fresco e no estado endurecido do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008), as propriedades do estado endurecido é seriamente influenciado pelo estado fresco. As principais propriedades mecânicas do estado fresco a serem estudadas são, trabalhabilidade, segregação, exsudação e retração.

A importância da trabalhabilidade é notável, em que é umas das principais propriedades do estado fresco do concreto que influenciam na eficiência de uma construção. Trabalhabilidade é o esforço necessário para produzir o lançamento, adensamento e acabamento. O esforço total necessário para o controle do fluxo que depende das propriedades reológicas da pasta de cimento e do atrito interno entre as partículas dos agregados e também, entre o atrito externo e a superfície da fôrma (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Consistência é à medida que indica a mobilidade ou a fluidez do concreto fresco, em que é determinada pelo abatimento do tronco de cone pela NBR NM 67/1998. Em que, a consistência é uma propriedade intrínseca do concreto fresco, relacionadas com a fluidez, que é a facilidade de mobilidade e a coesão, que é a resistência à exsudação ou à segregação (BAUER, 2008).

A segregação é a separação dos materiais do concreto no estado fresco até um limite em que a sua distribuição será desuniforme. A segregação se divide em dois tipos, a primeira é relacionada com misturas secas, que é a separação entre agregados e a argamassa de concreto. E a segunda, ocorre em misturas fluidas, fenômeno conhecido como exsudação, é definida com o aparecimento de água na superfície do concreto após as fases de lançamento e adensamento na superfície do concreto. É importante reduzir ao máximo a segregação, pois não ocorrerá a compactação total, sendo que é fundamental para atingir a máxima resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Além da segregação, a trabalhabilidade influencia a resistência do concreto em outras características, como por exemplo, a eliminação da presença de vazios, o que reduz a porosidade e aumenta a densidade e assim, aumentará a resistência do concreto. Os autores Neville e Brooks (2010), citam que para conseguir tal densidade, a trabalhabilidade deve ser suficiente para ocasionar a compactação quase total do concreto. É notável que a presença de vazios reduzirá a densidade e

sua força, essa relação é bastante significativa pois, 5% de vazios podem reduzir a força em até 30%.

Outra propriedade importante que influencia nas propriedades mecânicas do concreto é a retração, ocorrendo a redução de volume do concreto, ocasionando fissuras por retração plástica no concreto. Esse fenômeno acontece devido a vários fatores, como por exemplo, a rápida perda de água por evaporação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As propriedades do concreto que mais nos interessam são no seu estado endurecido, pois é nesse estado que irá apresentar seu desempenho nas estruturas. Os autores Neville e Brooks (2010) e Bauer (2008), destacam a resistência à compressão como a principal propriedade a ser estudada e analisada.

### 2.7.1 Resistência à compressão

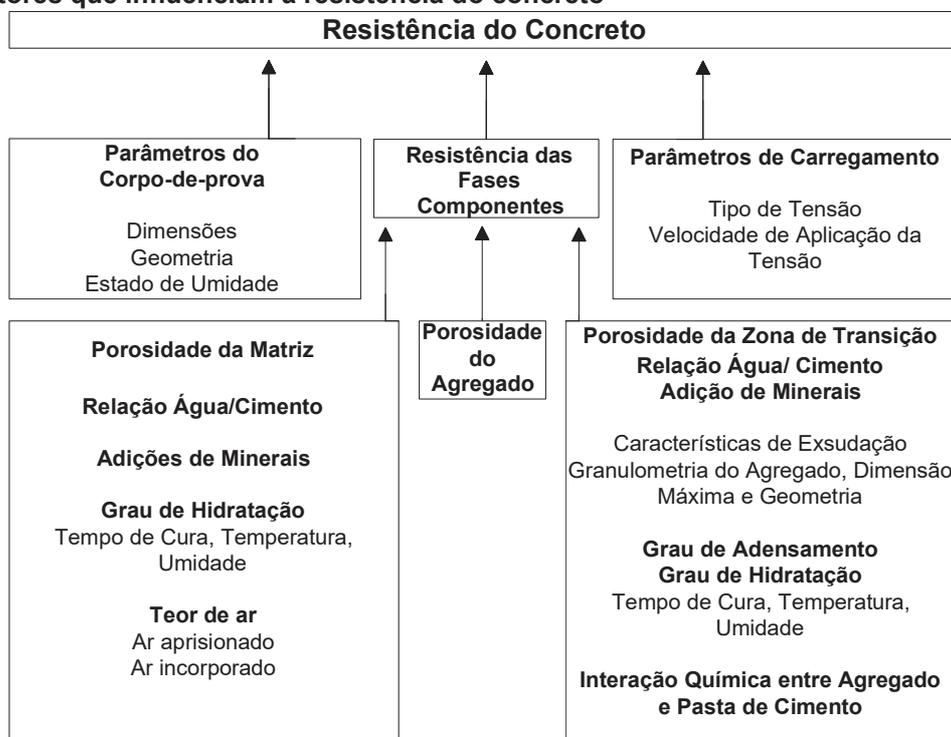
A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes do concreto, sendo que na maior parte dos esforços submetidos no concreto estrutural são tensões de compressão. Além disso, a verificação da resistência à compressão é relativamente simples, portanto é a propriedade mais avaliada do concreto (AMBROZEWICZ, 2012).

Resistência de um material é a capacidade de resistir a esforços sem se romper. Em alguns casos, a ruptura é conhecida por apresentar fissuras no material. Porém, no concreto apresentam fissuras antes de receber tensões externas. Portanto, resistência é máxima tensão antes da sua ruptura. No ensaio de tração, a fratura do corpo-de-prova geralmente leva a ruptura. No caso do ensaio de compressão é diferente, o corpo-de-prova é considerado rompido, antes mesmo de haver fratura externa. Entretanto, as fissuras internas não suportaram mais carga por estarem em um nível bem avançado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência mecânica do concreto é influenciada por vários fatores, como: fator água/cimento, tipo de cimento, agregados, parâmetros de corpos-de-prova, idade do concreto, condições de carregamento entre outras. Contudo, a relação água/cimento é o fator mais importante, pois afeta a porosidade tanto da matriz pasta de cimento como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo, como foi demonstrado no tópico

anterior que a porosidade é inversamente proporcional a resistência. A Figura 11, mostra os fatores que influenciam a resistência do concreto.

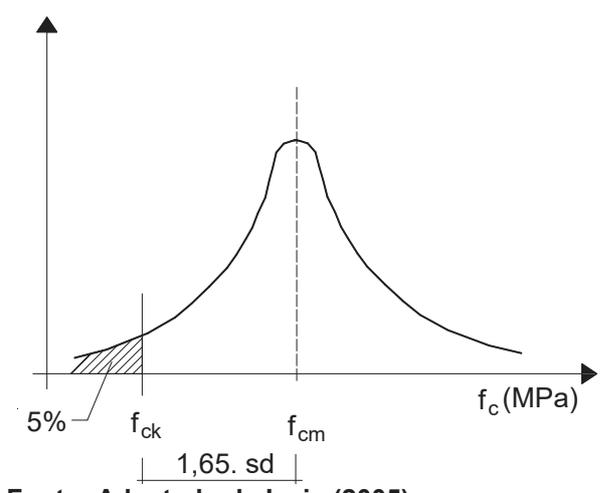
**Figura 11 - Fatores que influenciam a resistência do concreto**



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

A resistência característica à compressão do concreto ( $F_{ck}$ ) é definida por engenheiros projetistas como um valor de referência, que representa um nível de confiança de 95%, portanto apenas 5% dos valores da resistência à compressão do concreto devem ser menores que o valor adotado para a referência de acordo com a NBR 12655/2015, portanto a resistência utilizada para a dosagem do concreto ( $f_{cd}$ ) será a resistência média à compressão do concreto ( $f_{cm}$ ), como mostra a Figura 12.

**Figura 12 - Diagrama de distribuição normal**



Fonte: Adaptado de Isaia (2005).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram realizadas três amostras de concreto contendo 14 corpos-de-prova para a análise da resistência à compressão do concreto, utilizando o mesmo traço, alterando apenas o formato do agregado graúdo. A Tabela 7, fornece os dados dos corpos-de-prova desenvolvidos.

Tabela 7 - Quantitativo dos corpos-de-prova

Formato do agregado graúdo	Corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão (und.)
Cúbico	14
Lamelar	14
Alongado	14
<b>Total</b>	<b>42</b>

Fonte: Autor (2018)

Conforme a ABNT (2007), os corpos-de-prova de formato cilíndrico têm 100mm de base e 200mm de altura, como observa-se na Figura 13.

Figura 13 - Modelo cilíndrico de corpo-de-prova de concreto



Fonte: Autor (2018).

Os corpos-de-prova foram moldados no laboratório de materiais de construção civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus Toledo. A resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) é de 25 MPa, e os corpos-de-prova foram rompidos após 28 dias de sua confecção.

### 3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Serão abordados os materiais que constituem a fabricação do concreto, como o cimento e agregados.

#### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento escolhido foi o CP II Z, e apresenta resistência à compressão aos 28 dias de 32 MPa. No qual será adquirido na cidade de Toledo- PR.

#### 3.1.2 Agregados miúdos e graúdos

Os agregados miúdos são do tipo areia natural como pode-se ver na Figura 14, e os agregados graúdos são dos formatos cúbico e lamelar e alongado. Os agregados miúdos serão fornecidos pelo laboratório da UTFPR- Câmpus Toledo, e o agregado graúdo será fornecido pela pedreira CMIX Mineração, como mostra na Figura 15.

O agregado graúdo utilizado foi separado por dois meios de produção, os agregados graúdos irregulares (lamelar e alongado) passaram pelo britador primário, em que, quebra o material até um tamanho próximo dos 20 cm, logo em seguida é levada ao britador CONE, em que apresentam grandes porcentagem de grãos irregulares no tamanho da brita 1. No caso dos agregados graúdos cúbicos, além do processo anterior o material passou pelo britador final VSI, na qual arredonda as faces dos grãos irregulares, deixando o grão mais arredondado, vale ressaltar que a classificação quanto ao formato seguiu a norma NBR 5564/2014, que classifica esse último formato de agregado como cúbico.

Portanto, os agregados utilizados e classificados como lamelares e alongados, foram produzidos pelo britador CONE, em que apresenta grandes porcentagens de grãos irregulares. Com isso, passaram pelas peneiras do intervalo de tamanho da brita 1, como foi dito anteriormente no trabalho, em seguida, foram medidos e separados 20 grãos de cada formato (lamelar e alongado) seguindo a NBR 5564/2014, para ter essas amostras servindo de gabarito, em que o restante do material utilizado no trabalho foram separados visualmente pelo formato a partir das amostras. No caso da brita que passou pelo britador VSI foi realizado o mesmo

processo, porém não precisou separar pelo formato, pois só existiam grãos cuboídes. O cálculo do índice de forma foi calculado com 20grãos de cada formato utilizado no trabalho, seguindo as orientações da NBR 7809/2006.

**Figura 14 - Agregado miúdo**



Fonte: Autor (2018).

**Figura 15 - Agregado graúdo**



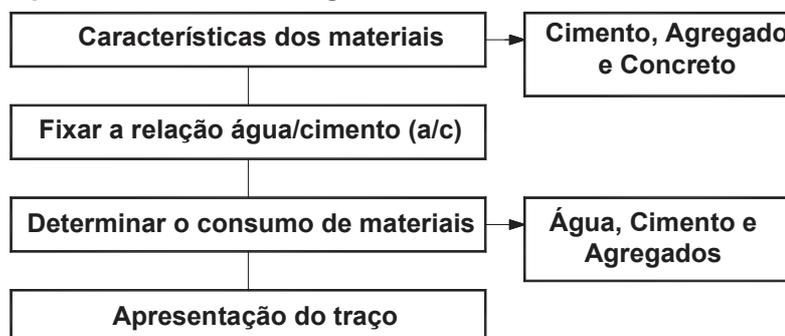
Fonte: Autor (2018).

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

O método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), é uma adaptação do método da American Concrete Institute (ACI), de acordo com

Ambrozewicz (2012), o método ABCP é uma estimativa de materiais a serem utilizados no traço, em que deve-se caracterizar os materiais constituintes do concreto para a sua dosagem, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Etapas para o método de dosagem da ABCP



Fonte: Adaptado de Ambrozewicz (2012).

A caracterização envolve três materiais, o cimento, os agregados e o concreto. No caso do cimento é necessário conhecer a tipologia utilizada, a massa específica e a resistência à compressão aos 28 dias, indicado pelo fabricante.

Nos agregados, são determinados o módulo de finura do agregado miúdo, dimensão máxima do agregado graúdo por meio de análises granulométricas, a massa específica de cada tipo de agregado e a massa compactada do agregado graúdo. No concreto, são determinadas a consistência desejada no estado fresco, as condições em que o concreto será exposto e a sua resistência à compressão (AMBROZEWICZ, 2012).

Logo após a caracterização dos materiais, é fixada o fator água cimento ( $a/c$ ), no qual obtém-se com ajuda da curva de Abrams (Anexo A), em que relaciona a resistência à compressão de dosagem do concreto requerida aos 28 dias com a resistência normal do cimento aos 28 dias.

A resistência de dosagem do concreto é calculada a partir do modo de preparo, em que pode-se observar na Tabela 8, em que a primeira condição é a mais segura, pois tem o menor desvio padrão.

Tabela 8 - Desvio padrão adotado em cada condição de preparo do concreto

Condição de preparo	Descrição	Desvio Padrão
A	Aplicável a todas as classes do concreto, os componentes são medidos em massa, ou em volume no caso da água que é corrigida em função da umidade dos agregados.	4,0

<b>B</b>	Aplicavel nas classes C10 a C20, cimento e agregados medidos em massa, água é medida em volume.	5,5
<b>C</b>	Aplicavel apenas para as classes C10 e C15, cimento é medido em massa, agregados e a água em volume.	7,0

Fonte: Adaptado da ABNT (2015).

Segundo a NBR 12655/2015, a resistência de dosagem ( $f_{cd}$ ) deve levar em conta o desvio-padrão,  $S_d$ , como foi demonstrado anteriormente. Essa desvio-padrão representa as variabilidades apresentadas durante a construção, como mostra a equação 1.

$$f_{cd} = f_{ck} + 1,65xS_d \quad (1)$$

Sendo:

$f_{cd}$  = Resistência de dosagem à compressão do concreto (MPa)

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

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

A etapa seguinte é a determinação dos materiais constituintes do concreto. O consumo de água ( $Ca$ ), é determinado pela Tabela 9, em que relaciona o abatimento do concreto em seu estado fresco com a dimensão máxima do agregado graúdo, determinado através de análise granulométrica.

Tabela 9 - Consumo de água para o método da ABCP (l/m³)

Abatimento (mm)	D <sub>máx</sub> agregado aproximado (l/m³)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
<b>40 a 60</b>	220	195	190	185	180
<b>60 a 80</b>	225	200	195	190	185
<b>80 a 100</b>	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado de Ambrozewicz (2012).

O consumo de cimento é dependente do consumo de água, como mostra a equação 2.

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

Sendo:

$C$ : Consumo de cimento (kg/m³)

$Ca$ : Consumo de água (l/m³)

$a/c$ : Fator água/cimento

A determinação do consumo de agregado graúdo utiliza-se a equação 3, em que é a multiplicação entre o volume do agregado seco de concreto e a massa unitária compactada do agregado graúdo. A obtenção do volume do agregado graúdo seco é obtido através da Tabela 10, em que relaciona o módulo de finura do agregado miúdo com a dimensão máxima do agregado graúdo.

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

Sendo:

$C_b$  = Consumo do agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup>)

$V_c$  = Volume do agregado seco por m<sup>3</sup> de concreto (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$M_c$  = Massa unitária compactada do agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup>)

**Tabela 10 - 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	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,802
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado de Ambrozewicz (2012).

A determinação do consumo de agregado miúdo é realizada através da equação 4.

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

Sendo:

$C_m$ : Consumo de agregado miúdo (kg/m<sup>3</sup>)

$C$ : Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_c$ : Massa específica do cimento (kg/m<sup>3</sup>)

$C_b$ : Consumo de agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup>)

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

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

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

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

Após todo esse procedimento o traço resultante é representado pela sequência de relação do consumo de cimento/cimento, agregado miúdo/cimento, agregado graúdo/ cimento e água/cimento.

### 3.3 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Os corpos-de-prova foram realizados a partir do método de dosagem da ABCP, no qual foi realizada a caracterização de todos os materiais utilizados no concreto. Desta forma, as características físicas dos agregados miúdos e graúdos, como a massa específica aparente, massa unitária, dimensão máxima característica dos agregados graúdos e módulo de finura dos agregados miúdos foram determinadas a partir de ensaios. Todos esses ensaios foram realizados por meio das seguintes normas brasileiras vigentes, NBR NM 52/2009, NBR NM 53/2009, NBR NM45/2006 e NBR 248/2003. A massa específica do aglomerante utilizado, foi realizada de acordo com a norma NBR 23/2001.

#### 3.3.1 Ensaio da massa específica aparente dos agregados miúdos

O ensaio de massa específica dos agregados miúdos segue a norma NBR NM 52/2009. Necessita-se de 1 kg de amostra de agregados miúdos para a realização do ensaio, com isso a amostra é colocada por um período de 24 horas em imersão em um recipiente metálico com água. Em seguida, a amostra é retirada e seca ao ar, para a obtenção da massa saturada de superfície seca. Logo após a secagem da superfície dos agregados, 500 g da amostra é colocada dentro de um picnômetro para determinação da massa específica.

O procedimento seguinte é o enchimento de água no frasco até a marcação de 500 ml, foram realizados movimentos circulares para a retirada de ar retido no frasco.

Logo após, é novamente colocado água até a marcação de 500 ml e determinada a massa do conjunto em uma balança de precisão, por seguinte, é retirado a amostra de agregado miúdo e secado na estufa com uma temperatura constante de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 horas, para a secagem total dos agregados miúdos.

A massa específica é determinada pelas equações 5 e 6.

$$d = \frac{m}{V-V_a}(5) \quad V_a = \frac{m_2-m_1}{\rho_a}(6)$$

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

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

$m_1$ : Massa do conjunto frasco + agregado (g)

$m_2$ : Massa do conjunto frasco + agregado + água (g)

$V$ : Volume do frasco ( $\text{cm}^3$ )

$V_a$ : Volume de água adicionado no frasco ( $\text{cm}^3$ )

$\rho_a$ : Massa específica da água ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 3.3.2 Ensaio da massa específica aparente dos agregados graúdos

O ensaio para a determinação da massa específica aparente do agregado graúdo segue as orientações da NBR NM 53/2009. A realização do ensaio necessita de alguns instrumentos como, balança de precisão, recipiente e tanque de água para os agregados graúdos. O primeiro passo é deixar a amostra do agregado imersa em um recipiente contendo água, por um período de  $24\pm 4$  horas, como mostra a Figura 17. Esse tempo é necessário para que a água preencha todos os poros e assim, os agregados ficam em estado de saturação.

A próxima etapa, o material saturado é enxugado com um pano absorvente, para retirar o excesso de água contido nas superfícies dos agregados. Em seguida, a amostra estará na situação superfície saturada seca, a massa é aferida na balança de precisão, e então mede-se a massa imersa na água. Finalmente, a amostra é colocada na estufa para secagem na temperatura de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ , por um período de 24 horas contínuas.

**Figura 17 - Amostra de agregado imersa em água**



Fonte: Autor (2018).

A massa específica aparente do material é calculada a partir da equação 7.

$$d_a = \frac{m}{m - m_a} \quad (7)$$

Sendo:

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

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

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

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

Segundo a ABNT (2006), a massa unitária é a relação entre a massa do agregado e o volume do recipiente contido nele. A realização do ensaio necessita de alguns instrumentos como, balança de precisão, haste para a realização do adensamento do material, recipiente cúbico resistente, concha metálica e estufa.

Deve-se efetuar a medição da massa do recipiente cilíndrico vazio, em seguida, preenche-se 1/3 do volume com o agregado e é realizado o adensamento com uma haste metálica, sendo realizados 25 golpes em cada camada preenchida, conforme descreve a NBR NM 45/2006. A segunda camada terá 2/3 do volume, sendo realizado o mesmo processo de adensamento da primeira camada. Logo após, preenche o recipiente e realiza o mesmo procedimento de adensamento da última camada. Sendo que como recomendação da norma NBR NM 45/2006, os adensamentos realizados com a haste metálica não devem ultrapassar as camadas

anteriores e na primeira camada adensada, não deve tocar o fundo do recipiente. Após o processo nivela-se o material com o topo da borda do recipiente. A Figura 18, mostra a realização do ensaio.

**Figura 18 - Ensaio de determinação da massa unitária compactada dos agregados graúdos**



Fonte: Autor (2018).

Com isso, determina a massa total do conjunto, com a equação 8.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V_r} (8)$$

Sendo:

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

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

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

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

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

As características físicas dos agregados podem ser encontradas a partir do ensaio de granulometria, em que, pode-se determinar a dimensão máxima do agregado graúdo e o módulo de finura dos miúdos.

De acordo com a ABNT (2003), o ensaio necessita de alguns aparelhos como, balança de precisão, estufa, peneiras com malhas de série normal e intermediárias, agitador mecânico com pode-se observar na Figura 19, e pincel com cerdas macias.

**Figura 19 - Ensaio de distribuição**



**Fonte: Autor (2018).**

Conforme a NBR NM 26/2009, o ensaio necessita de alguns pré-requisitos, como a seleção dos materiais para serem secos em estufa na temperatura de  $105 \pm 5$  °C.

O procedimento do ensaio granulométrico, separa os agregados miúdos e graúdos com seu conjunto de peneira adequado. Os agregados miúdos são peneirados com abertura de peneira entre 4,75 mm até 150µm de forma decrescente. Os agregados graúdos serão, serão peneirados com conjunto de peneiras com aberturas de peneiras de 19 mm até 9,5 mm, o que caracteriza como um agregado de tamanho de brita 1.

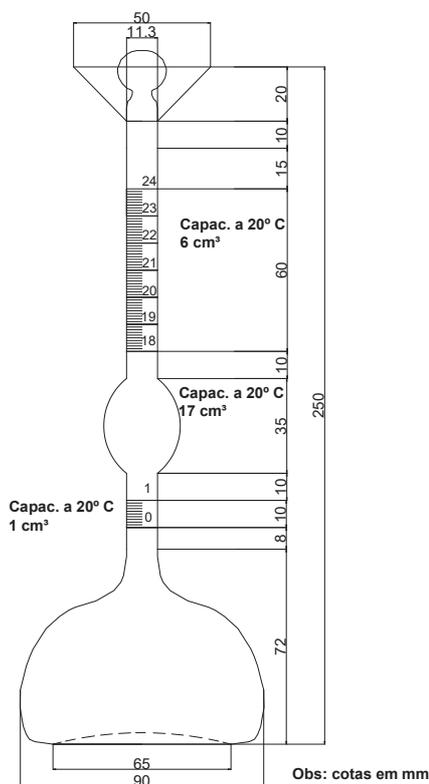
Coloca-se o material nas peneiras e logo após, ocorre a agitação mecânica, ação que distribui os grãos na malha das peneiras. Em seguida, o material retido em cada peneira é aferido sua massa e calcula-se a porcentagem retida e a retida acumulada para cada agregado.

Segundo a ABNT (2003), a dimensão máxima característica é calculada pela porcentagem de pelo menos 5% do material retido na abertura da peneira. O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas das peneiras de série normal acumuladas do agregado dividido por 100.

### 3.3.5 Ensaio de massa específica do cimento

De acordo com a ABNT (2001), a massa específica do cimento é a relação entre a massa e o volume do material. O ensaio se resume no preenchimento de querosene nas marcações existente entre 0 e 1 cm<sup>3</sup> no frasco de Le Chatelier, como pode-se observar na Figura 20.

**Figura 20 - Frasco de Le Chatelier**



Fonte: Adaptado da ABNT NBR

NM 23 (2001).

Após a estabilização do fluido, afere-se a leitura inicial ( $V_1$ ), logo em seguida, despeja-se o cimento e após a estabilização da mistura, afere-se o segundo volume ( $V_2$ ). O cálculo da massa específica do cimento se dá conforme a equação 9.

$$\rho = \frac{m_c}{V_2 - V_1} \quad (9)$$

Sendo:

$\rho$ : Massa específica do cimento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$m_c$ : Massa do cimento (g)

$V_1$ : Volume inicial do frasco Le Chatelier ( $\text{cm}^3$ )

$V_2$ : Volume final do frasco Le Chatelier ( $\text{cm}^3$ )

### 3.4 PROCEDIMENTOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL

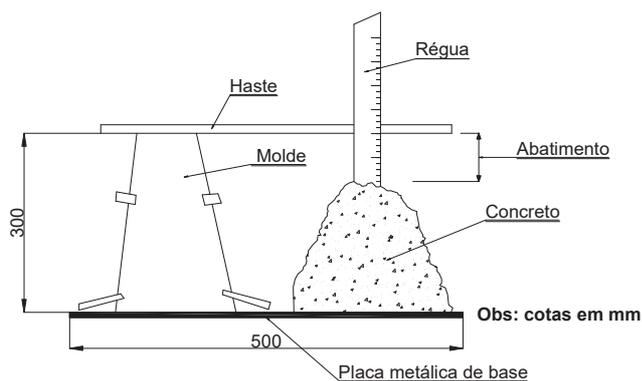
A caracterização das propriedades do concreto foi realizada pelas normas brasileiras vigentes, a verificação da consistência do concreto por meio do abatimento utilizando o tronco de cone pela NBR NM 67/1998. Com a NBR 5739/2007 para realização da análise da resistência à compressão axial do concreto confeccionado.

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

O ensaio começa com o umedecimento das partes internas do tronco de cone, ou seja, a placa base e o molde interno do tronco cônico. Logo após, despeja-se o concreto em 3 camadas de mesma altura e em cada camada devem ser efetuados 25 golpes uniformemente com haste metálica, sendo que, os golpes efetuados não devem ultrapassar as camadas anteriores, para ocorrer um adensamento mais homogêneo (ABNT, 1998).

Depois de todo o procedimento citado acima, levanta-se o tronco de cone e mede-se o abatimento do concreto com uma régua. Como pode-se observar na Figura 21, retirado da NBR NM 67/1998, o abatimento é a diferença entre a altura do molde tronco cônico e a altura da massa de concreto após retirar o molde.

**Figura 21 - Verificação do abatimento do concreto pelo método tronco de cone**



Fonte: Adaptado ABNT NBR NM 67 (1998).

### 3.4.2 Ensaio de concreto endurecido: Resistência à compressão axial

A verificação da resistência à compressão axial do concreto, foi realizada a partir da ABNT (2007), em que a relação entre a altura e a base do corpo-de-prova deve ser igual a 2. O ensaio ocorre com o posicionamento do corpo-de-prova na prensa, na qual aplicará um carregamento com velocidade constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s até a ocorrência da queda da força indicando a ruptura do material. Os corpos-de-prova foram moldados nos recipientes metálicos presentes no laboratório da universidade. Pode-se visualizar os moldes pela Figura 22.

Figura 22 - Moldes metálicos



Fonte: Autor (2018).

A determinação da resistência à compressão é dada pela equação 10, conforme a NBR 5739/2007.

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.d_{cp}^2} \quad (10)$$

Sendo:

$f_c$ : Resistência à compressão axial do concreto (MPa)

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

$d_{cp}$ : Diâmetro do corpo de prova de concreto (mm)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão demonstrados os resultados e discutidos os valores das características necessárias dos materiais para a dosagem do concreto e também das propriedades do concreto no seu estado fresco e endurecido encontrados através dos ensaios descritos anteriormente.

### 4.1 ANÁLISE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA DOSAGEM DO CONCRETO ESTRUTURAL

Conforme Ambrozewicz (2012), necessita-se caracterizar algumas propriedades dos materiais para chegar em um traço que represente as características desejadas para o concreto, características dos materiais como distribuição granulométrica, módulo de finura, dimensão máxima do agregado entre outras que serão apresentadas.

#### 4.1.1 Características do agregado miúdo

As características necessárias do agregado miúdo para a dosagem do concreto pelo método ABCP, são as seguintes, módulo de finura e massa específica. A obtenção do módulo de finura é realizada a partir do peneiramento e por seguinte, determinar a distribuição granulométrica, como mostra a Tabela 11.

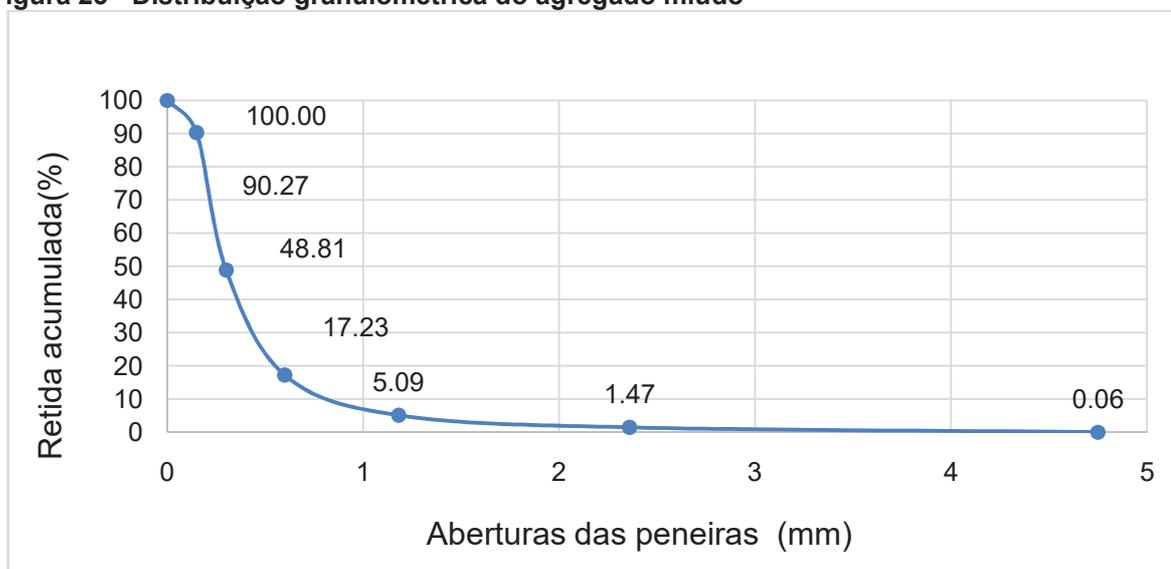
**Tabela 11 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo**

Peneiras (mm)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
<b>4,750</b>	0,28	0,06
<b>2,36</b>	7,37	1,47
<b>1,180</b>	25,07	5,09
<b>0,600</b>	80,59	17,23
<b>0,300</b>	188,99	48,81
<b>0,150</b>	178,88	90,27
<b>Fundo</b>	19,29	100,00

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 23, é representado os valores da Tabela 11 de forma gráfica.

**Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo**



Fonte: Autor (2018).

Segundo os dados obtidos na distribuição granulométrica, e observando a Figura 23, conclui-se que o agregado miúdo utilizado no trabalho apresenta uma boa distribuição granulométrica e é considerado um agregado miúdo de grãos finos.

Os resultados do módulo de finura e da massa específica do agregado graúdo são demonstrados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Características do**

agregado miúdo	
Característica	Resultado
Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2653
Módulo de finura	1,87

Fonte: Autor (2018).

Em relação, ao módulo de finura do agregado miúdo, segundo a NBR 7211/2009, o módulo de finura de zona ótima está entre 2,2 a 2,9, porém, o resultado obtido está no intervalo da zona utilizável inferior, em que, varia de 1,55 a 2,2, conclui-se que o agregado miúdo utilizado no trabalho não apresenta um ótimo módulo de finura, porém, é utilizável. A massa específica aparente obtida no

trabalho apresenta dentro dos valores da maioria da literatura referentes aos materiais de construção civil.

#### 4.1.2 Características do agregado graúdo

As características do agregado graúdo necessárias para a dosagem do concreto são a massa específica aparente, massa unitária compactada e dimensão máxima característica, em que são apresentadas na Tabela 13.

**Tabela 13 - Características do agregado graúdo**

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
<b>Massa específica aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2830
<b>Massa unitária compactada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1573
<b>Dimensão máxima característica (mm)</b>	19
<b>Classificação granulométrica</b>	Brita 1

Fonte: Autor (2018).

Os resultados obtidos como a massa específica aparente e a massa unitária compactadas são coerentes com as literaturas, como por exemplo, Bauer (2008). Em relação a dimensão máxima, como foi determinado intervalos de tamanho de 19 mm a 9,5 mm, desta forma, a dimensão máxima é exatamente a abertura de peneira de 19 mm.

Além das características necessárias para determinar o traço a ser utilizado, serão apresentadas as características quanto ao formato do agregado graúdo, em que, a determinação do formato se seguiu a norma NBR 5564/2014 e para o índice de forma a norma NBR 7809/2006, os resultados do índice de forma é mostrado na Tabela 14.

**Tabela 14 - Índice de forma dos**

<b>agregados graúdos</b>	
<b>Formato do agregado graúdo</b>	<b>Índice de forma</b>
<b>Cúbico</b>	1,97
<b>Lamelar</b>	4,87
<b>Alongado</b>	6,05

**Fonte: Autor (2018).**

Observa-se que apenas o agregado graúdo cúbico possui o índice de forma abaixo de 3, conforme recomenda a NBR 7211/2009, e com isso, conclui-se que os agregados irregulares, lamelar e alongado, não são recomendáveis para utilização em concreto estrutural.

#### 4.1.3 Característica do aglomerante: Cimento Portland CP II - Z

A massa específica é a única característica a ser especificada na dosagem do concreto e o resultado é mostrado na Tabela 15.

**Tabela 15 - Características do cimento**

<b>Características</b>	<b>Resultado</b>
<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2899

**Fonte: Autor (2018).**

O resultado da massa específica do cimento pelo ensaio seguindo a NBR NM 23, são coerentes aos encontrados na literatura, para este tipo de cimento. O tipo de cimento (CP II – Z) e a resistência à compressão aos 28 dias do cimento (32 MPa) é fornecido pelo fabricante.

#### 4.1.4 Definição do traço para o concreto

Após a caracterização dos materiais constituintes do concreto, para a definição do traço segue-se o procedimento descrito pelo método de dosagem da ABCP. Dessa forma, deve-se estabelecer o abatimento desejado, neste trabalho foi adotado entre 80 a 100 mm. Com o abatimento escolhido e a dimensão máxima do agregado graúdo foi possível determinar o consumo de água.

O fator  $a/c$  foi encontrado a partir da resistência de dosagem e pela resistência do cimento aos 28 dias por meio da curva de Abrams (anexo A). Na Tabela 16, são apresentados os dados necessários para obtenção da relação  $a/c$ . Em seguida, determina-se o consumo de cimento, o consumo de agregado graúdo e

o consumo de agregado miúdo, seguindo equações e tabelas apresentadas no tópico anterior do método de dosagem da ABCP.

**Tabela 16 - Características do concreto para a dosagem**

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
<b>Abatimento estimado (mm)</b>	80 a 100
<b>Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)</b>	19
<b>Resistência característica à compressão (MPa)</b>	25
<b>Desvio padrão (MPa)</b>	5,5
<b>Resistência à compressão de dosagem (MPa)</b>	34
<b>Fator <math>a/c</math></b>	0,475

Fonte: Autor (2018).

Com os dados das Tabelas 15 e 16e seguindo os procedimentos do método de dosagem ABCP, obtém-se o seguinte traço.

1:1,418:2,78:0,475

A partir disso foram moldados os corpos de provas, sendo que foram realizados 3 tipos de concreto, apenas alterando o formato do agregado graúdo. Vale ressaltar que o traço obtido se seguiu apenas as características do agregado graúdo cúbico, sendo assim a definição de um traço único para avaliar as propriedades mecânicas do concreto. Os corpos-de-prova foram moldados seguindo a NBR 5738/2015.

## 4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As propriedades analisadas foram a partir do teste de abatimento do concreto (Slump Test), em que, pode-se determinar o estado de consistência, propriedade relacionada a fluidez e a coesão.

#### 4.2.1 Consistência do concreto: Slump Test – Abatimento do concreto pelo método tronco de cone de acordo com a norma NBR NM 67/1998

A Tabela 17, representa os valores dos abatimentos dos três traços de concretos, utilizando três formatos diferentes de agregado graúdo.

**Tabela 17 - Slump Test: Determinação da**

consistência do concreto	
Formato do agregado graúdo	Abatimento do concreto (mm)
Cúbico	120
Lamelar	85
Alongado	80

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 24, são ilustrados os três estados de consistência do concreto fresco com os diferentes formatos de agregados graúdos, segundo o ensaio de abatimento tronco de cone.

**Figura 24 - (a) Slump Test realizado com concreto com agregado graúdo cúbico; (b) Slump Test realizado com concreto com agregado lamelar; (c) Slump Test realizado com agregado graúdo alongado**



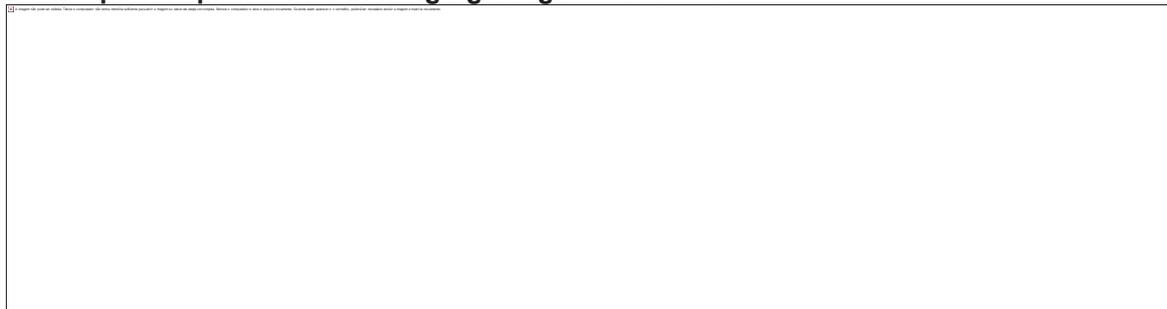
(a) (b) (c)  
Fonte: Autor (2018).

Analisando os testes de abatimentos pela Tabela 17 e a Figura 24, houveram diferenças significativas em relação a trabalhabilidade. O aspecto visual é o que causou maior discrepância pois, quanto maior foi o abatimento menor foi a segregação entre a pasta de cimento e o agregado graúdo. Um dos principais fatores foi a exsudação, conforme descrito por Mehta e Monteiro (2008), sendo que quanto maior é a área superficial do agregado mais segregação ocorreu, em que a água migra para a superfície do concreto e outra parte se aloja na superfície do agregado.

Além disso, os concretos preparados com agregado graúdo cúbicos apresentaram mais coesão e portanto, melhor fluidez, o que representa uma melhor trabalhabilidade e conseqüentemente o adensamento foi mais uniforme. Nos casos dos concretos realizados com agregados graúdos irregulares (lamelar e alongado), ocorreu o inverso, o concreto apresentou menos fluidez e mais segregação e, portanto, menor foi a trabalhabilidade, conseqüentemente, o adensamento foi mais desuniforme, devido também a geometria dos grãos no momento da compactação, pois os grãos mais cúbicos deslizam-se com maior facilidade na mistura do concreto em relação aos grãos irregulares.

Essa diferença de trabalhabilidade pode ser analisada também no estado endurecido do concreto pois, os corpos-de-prova realizados com concretos utilizando agregados graúdos irregulares apresentaram certos graus vazios ocasionados tanto pela segregação, fluidez e também na dificuldade de adensamento devido a geometria dos grãos. Além disso, a presença de vazios e a sua grande diferença entre os corpos-de-prova podem ser explicadas, pois, para nivelar os corpos-de-prova após a compactação, utilizou-se uma certa quantidade da pasta de cimento da mistura do concreto produzida, e com isso ocorreu o aparecimento de vazios nos corpos-de-prova seguintes a serem confeccionados, como são demonstradas nas Figuras 25 e 26. Este procedimento foi utilizado para nivelar a área de contato do corpo-de-prova para receber esforços bem distribuídos da máquina de ensaios para a realização da resistência à compressão.

**Figura 25 - Corpos-de-prova utilizando agregado graúdo lamelar**



Fonte: Autor (2018).

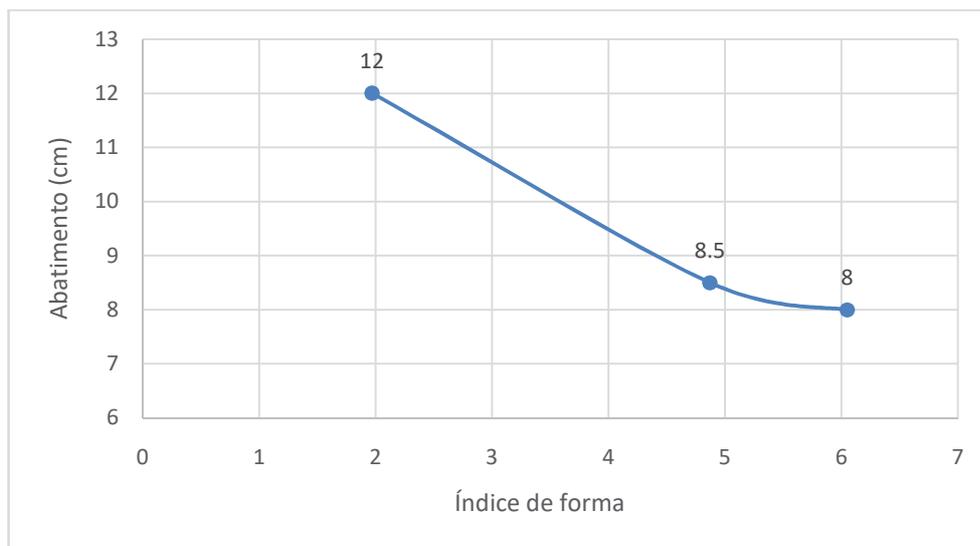
**Figura 26 - Corpos-de-prova utilizando agregado graúdo alongado**



Fonte: Autor (2018).

O índice de forma é um outro parâmetro para comparar as diferentes formas dos agregados graúdos com as propriedades mecânicas do concreto, sendo assim, quanto maior o índice de forma maior a relação entre comprimento e espessura dos grãos, conforme a NBR 7809/2006, ou seja, mais irregulares eles são. E como mostra a Figura 27, quanto maior o índice de forma menor é o abatimento, uma relação aproximadamente linear, portanto, é um dado que comprova que grãos irregulares são prejudiciais nas propriedades mecânicas do estado fresco do concreto, sendo que, quanto menor é o abatimento menos trabalhabilidade tem o concreto no estado fresco.

**Figura 27 - Relação entre abatimento e índice de forma**



Fonte: Autor (2018).

### 4.3 PROPRIEDADE DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Serão demonstrados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial do concreto e analisando as influências com os diferentes formatos de agregados graúdos utilizados na produção do concreto.

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

Os resultados da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova são apresentados na Tabela 18, em que foram ordenados na ordem decrescente de resistência à compressão.

**Tabela 18 - Resistência à compressão axial (MPa) nos diferentes formatos de agregados graúdos**

Corpos de prova	Cúbico	Lamelar	Alongado
CP 1	41,578	33,123	23,014
CP 2	41,094	31,856	22,326
CP 3	40,444	29,068	21,874
CP 4	38,936	27,604	21,849
CP 5	38,808	27,527	21,632
CP 6	37,471	27,349	21,626
CP 7	37,465	26,515	21,359
CP 8	35,835	25,751	21,053
CP 9	33,505	25,535	20,856
CP 10	33,492	23,128	20,671
CP 11	32,506	22,899	20,525

<b>CP 12</b>	31,869	22,180	15,419
<b>CP 13</b>	31,035	19,907	15,381
<b>CP 14</b>	25,789	19,130	11,542

Fonte: Autor (2018).

Os dados da Tabela 18, demonstram que a resistência à compressão é afetada negativamente com a inserção de agregados irregulares, sendo que a trabalhabilidade do concreto afetou indiretamente na resistência do concreto, sendo que quanto menor foi seu abatimento menor foi a resistência à compressão.

Além disso, apenas o concreto realizado com agregado graúdo cúbico obteve todos os resultados das resistências à compressão acima da resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ ), ou seja, é o único formato de agregado analisado no presente trabalho utilizável para o concreto estrutural.

Na Tabela 19, é apresentada o estudo estatístico com os resultados da resistência à compressão dos três diferentes formatos de agregados graúdos utilizados.

**Tabela 19 - Informações estatísticas das amostras dos concretos aos 28 dias**

<b>Formato do agregado graúdo</b>	<b>Média da resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão (MPa)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
<b>Cúbico</b>	35,702	4,533	12,697
<b>Lamelar</b>	25,827	4,096	15,858
<b>Alongado</b>	19,938	3,339	16,748

Fonte: Autor (2018).

No estudo estatístico pode-se observar que em relação à média o agregado graúdo cúbico foi o único a apresentar a resistência à compressão aproximadamente da resistência de dosagem ( $f_{cd} = 34 \text{ MPa}$ ), a maioria dos corpos-de-prova confeccionados com agregados graúdos irregulares não apresentaram resistência desejadas, ou seja, inferior a 25 MPa.

Em relação a dispersão dos resultados do espaço amostral, sabendo-se que quanto menor é a variância dos dados maior sua confiança, o formato de agregado graúdo cúbico foi o que apresentou maior variabilidade dos dados, porém em relação a média foi o que menos apresentou. Segundo Pimentel (1985), os dados de coeficiente de variação apresentam uma média de dispersão de dados, ou seja, existe uma variância significativa e isso acarreta na diminuição da confiabilidade dos

resultados, em que podem ser influenciados tanto no modo de preparo, como na precisão da máquina de ensaios utilizados para a obtenção da resistência à compressão.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram a grande influência do formato do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco, observou-se que os agregados mais irregulares (lamelares e alongados) tem menor trabalhabilidade, tendo menor coesão entre agregado e pasta de cimento, e conseqüentemente, maior segregação ente os componentes do concreto, e com isso, o adensamento tornou-se desuniforme pela falta de fluidez, ocasionando falhas de concretagem e assim, diminuindo a resistência à compressão do concreto.

Pode-se perceber que o estado fresco do concreto influencia indiretamente o estado endurecido, devido a falhas de adensamento, o concreto perdeu resistência mecânica e por isso, não é viável a utilização dos agregados graúdos irregulares para a fabricação do concreto, principalmente para fins estruturais. Pois, necessitam de mais água e aglomerantes para se ter uma mistura com a mesma trabalhabilidade e obter a mesma resistência à compressão, e com isso, é mais econômico a utilização de agregados graúdos cúbicos com maiores índices de arredondamentos, o que garante um melhor adensamento.

Em relação aos dados, apresentaram uma média dispersão de dados, o que não garante uma ótima confiabilidade nos resultados, o que pode ter sido causado, pelo modo de preparo do concreto, ou também pela precisão da máquina utilizada, entre outros fatores que afetam a resistência do concreto. Contudo, os dados permitem uma boa comparação entre os diferentes formatos de agregado graúdos utilizados nas misturas do concreto, e determinar que os agregados irregulares utilizados no trabalho são impraticáveis para concreto com fins estruturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHADAS, Miguel Fernando Schettini. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto.** 2008. Tese de Mestrado – Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade: composição e características.** Lisboa, 1990. 740 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa.

AMBROZEWICZ, Paulo H. L. **Materiais de Construção.** 1.ed. Editora: Pini Ltda: São Paulo, 2012.

ARNDT, Josué A.; SOUZA, J. de; BIANCHINI, Maurício. **Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto.** Anais do 49º congresso brasileiro do concreto. IBRACON, 1-9, setembro/2007.

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

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

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

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: Agregado graúdo: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2006.

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

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5564**: Via Férrea: Lastro Padrão. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM ISSO 3310-1**: Peneiras de ensaio: Requisitos técnicos e verificação-Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.

BAUER, Luiz A. F. **Materiais de Construção**. 5.ed. Volume 1. Editora: LTC: Rio de Janeiro, 2008.

FRAZAO, E. B; SBRIGHI, Neto C. **The influence of the shape of the coarse aggregate on some hydraulic concrete properties**. Bulletin of International Association of Engineering Geology. 1-4,1984.

GIACCIO, G.; ZERBINO, R. Effect of aggregate type on the behavior of high strength concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis,SC, Jun. 1996.p.52-60.

GEYER, A.L.B. **Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco**. Goiás, a.2, n.2, julho 2006.

HELENE, Paulo R. L.; ANDRADE, Tibério. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. ed. G.C. Isaia. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

ISAIA, G.C. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 V. 1600P.

LI, Zongjin. **Advanced concrete technology**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.  
MASAD, E. et al., (2005) - **Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity** - National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) – Report 555 (2005)

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**.3.ed. Editora: McGraw-Hill: New York, 2008.

NEVILLE, Adam M; BROOKS, J.J. **Concrete Technology**. 2nd ed. Editora: Pearson: Harlow, 2010.

POWERS, M.C.; A new roundness scale for sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.23, p.117-119,1953apud FARIAS, Márcio M. de.; PALMEIRA, Ennio M.; BEJA, Igor A. Agregados para a Construção Civil. In: **Materiais de Construção Civil e Princípio da Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. ISAIA, G. C. 3. Ed. São Paulo, IBRACON, 2017. Volume 1.

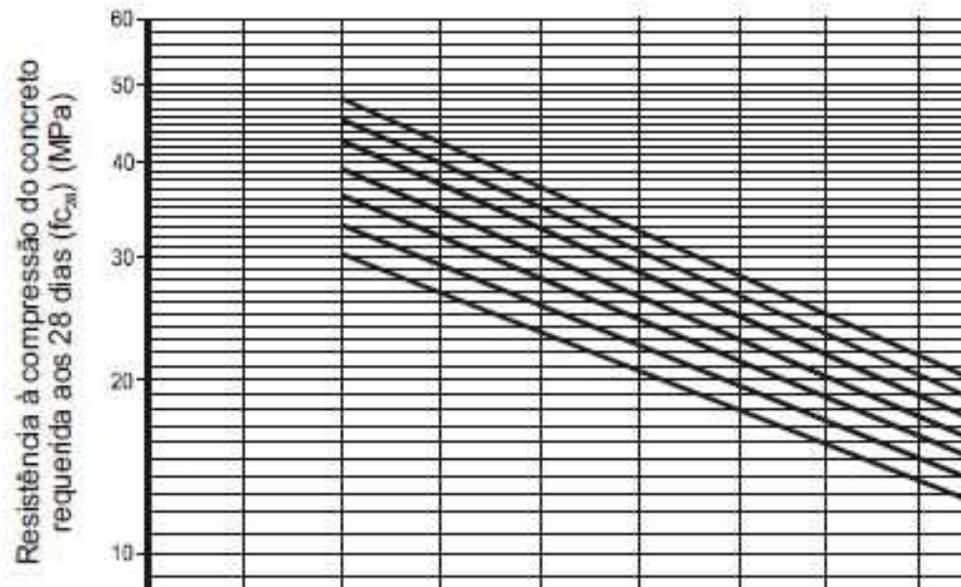
PIMENTEL-GOMES, **Curso de Estatística Experimental**,Piracicaba-SP. ESALQ/USP, 1985.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

WADDALL, J. J; DOBROWOLSKI, J. A. **Concrete construction handbook**, 3rd ed.,York:McGraw-Hill, 1993 apud LI, Zongjin. **Advanced concrete technology**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

## ANEXO A – Curva de Abrams

Figura 1 – Curva de Abrams



Fonte: Rodrigues (1998).