

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**INGRID ANGELO VIDIGAL**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO AGREGADO  
GRAÚDO NA ANISOTROPIA DO CONCRETO**

**Alegrete  
2021**

**INGRID ANGELO VIDIGAL**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO AGREGADO  
GRAÚDO NA ANISOTROPIA DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

**Alegrete  
2021**

INGRID ANGELO VIDIGAL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO AGREGADO GRAÚDO NA ANISOTROPIA DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharela em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de Setembro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. DSc. EDERLI MARANGON - Orientador - UNIPAMPA

Prof. Dr. LUIS EDUARDO KOSTESKI - UNIPAMPA

Me. Eng. MATTHEWS VARGAS VAUCHER BANDEIRA



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/10/2021, às 08:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/10/2021, às 09:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Matthews Vargas Vaucher Bandeira, Usuário Externo**, em 13/10/2021, às 18:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0634523** e o código CRC **FB3101A6**.

---

## AGRADECIMENTOS

Sou grata primeiramente a Deus por ser meu sustento e por ter me permitido chegar até aqui.

Aos meus pais e meu irmão pelo apoio incondicional que me deram durante esta jornada. Pelas orações, pelo cuidado e atenção doados no decorrer desses anos.

Aos familiares e amigos que sempre torceram pelo meu sucesso, em especial às minhas tias, Alice Lima e Maria Lima que me colocaram nas suas orações.

Ao meu orientador, Dr. Ederli Marangon por toda orientação, dedicação e auxílio, sem as quais, a realização desta pesquisa não seria possível. Grata por confiar a mim o desenvolvimento deste estudo.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas e ao Eng<sup>o</sup>. Matthews Vargas pelas contribuições dadas no desenvolvimento desta pesquisa.

À todos os professores que contribuíram para a minha formação como Engenheira Civil. Sempre serei grata pelos ensinamentos e oportunidades de aprendizagem e crescimento.

À todos que de alguma maneira contribuíram para a realização desta pesquisa, em especial, aos amigos Joyce Tomaz, Alex Tomaz, Dominique Jank e Estevão Marques. Agradeço pelo apoio e auxílio nas etapas desta pesquisa e pela amizade que tornaram todo este processo mais leve.

À Técnica de Laboratório da UNIPAMPA campus Alegrete, Raquel Machado, que teve fundamental participação no desenvolvimento prático deste estudo. Gratidão por todo tempo e esforço dedicado a esta pesquisa.

Aos amigos e companheiros de estudo, aos terceirizados, ao grupo PET CTC Engenharias, aos membros do DAEC e a todos que de alguma forma participaram da minha jornada acadêmica.

À Universidade Federal do Pampa, que me proporcionou a oportunidade de crescimento profissional e de vida. Orgulho de fazer parte desta instituição.

*“O coração do entendido adquire conhecimento, e o ouvido dos sábios busca a ciência”.*

*(Bíblia Sagrada, Provérbios 18:15)*

## RESUMO

O concreto é o material estrutural mais utilizado na construção civil. Em razão disso, ter um bom conhecimento acerca de suas propriedades e características se torna de grande importância principalmente para a garantia da segurança das estruturas. Nesta linha de pensamento, esta pesquisa busca estudar a influência da dimensão máxima do agregado graúdo no grau de anisotropia do concreto. Para isso, corpos de prova cilíndricos e cúbicos foram produzidos com concreto de mesmo traço em massa e relação a/c, variando apenas a dimensão máxima do agregado graúdo. Foram produzidos 3 (três) tipos de concretos, sendo o concreto denominado como C0, produzido com brita 0 e os concretos C1 e C2 com brita 1 e brita 2, respectivamente. Aos 28 dias de idade os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos de Compressão Axial e Tração por Compressão Diametral. As resistências dos concretos foram obtidas para um carregamento imposto na direção perpendicular à direção de moldagem e adensamento e para um carregamento imposto da direção paralela à moldagem e ao adensamento do concreto. Os resultados obtidos apontaram para uma diminuição nas resistências de tração indireta e compressão axial ao aplicar um carregamento nas faces perpendiculares à direção lançamento e adensamento do concreto. A indicação da influência da dimensão máxima do agregado graúdo pôde ser observada nos concretos quando as resistências diminuíram a medida em que a dimensão máxima do agregado graúdo aumentou.

Palavras-Chave: Anisotropia do Concreto, Dimensão Máxima do Agregado, Tração por Compressão Diametral, Compressão Axial.

## **ABSTRACT**

Concrete is the most used structural material in civil construction. For this reason, having a good knowledge of their properties and characteristics becomes of great importance, especially for ensuring the safety of structures. In this line of thought, this research seeks to study the influence of the maximum dimension of the coarse aggregate on the degree of anisotropy of the concrete. For this, cylindrical and cubic specimens were produced with concrete of the same mass and w/c ratio, varying only the maximum dimension of the coarse aggregate. Three (3) types of concrete were produced, the concrete being called C0, produced with 0 gravel and C1 and C2 concretes with 1 and 2 gravel, respectively. At 28 days of age, the specimens were subjected to mechanical tests of Axial Compression and Traction by Diametral Compression. The concrete strengths were obtained for a load imposed in the direction perpendicular to the direction of molding and compaction and for a load imposed in the direction parallel to the molding and compaction of the concrete. The obtained results pointed to a decrease in the indirect tensile strength and axial compression when applying a load on the faces perpendicular to the casting and densification direction of the concrete. The indication of the influence of the maximum dimension of the coarse aggregate could be observed in concretes when the strengths decreased as the maximum dimension of the coarse aggregate increased.

**Keywords:** Concrete Anisotropy, Maximum Aggregate Dimension, Traction by Diametral Compression, Axial Compression.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do concreto.....	12
Figura 2 - Microestrutura do concreto.....	13
Figura 3 - Representação da zona de transição.....	14
Figura 4 – Influência do diâmetro do agregado na quantidade de água de molhagem .....	15
Figura 5 – Exsudação do excesso de água de amassamento .....	16
Figura 6 – Curva Tensão x Deformação na compressão diametral .....	17
Figura 7 – Ruptura na compressão diametral .....	18
Figura 8 - Curva Tensão x Deformação do concreto na compressão axial .....	19
Figura 9 - Influência da direção de carregamento na resistência em ensaios à compressão uniaxial.....	20
Figura 10 - Efeito da anisotropia inicial no concreto .....	21
Figura 11 - Microfissuração em concretos com fck de até 40 MPa submetidos a esforço de compressão .....	23
Figura 12 - Modo de ruptura final em concretos com fck de até 40 MPa submetidos a esforço de compressão .....	23
Figura 13 - Modos de ruptura de corpos de prova de concreto submetidos a esforço de compressão axial.....	24
Figura 14 - Relação a/c e dimensão do agregado na compressão axial .....	25
Figura 15 - Etapas do programa experimental .....	27
Figura 16 - Analisador de partículas.....	29
Figura 17 – Aditivo superplastificante utilizado.....	30
Figura 18 – Estudo adicional do concreto C1 .....	39
Figura 19 - Betoneira utilizada para a produção dos concretos .....	40
Figura 20 - Análise do abatimento dos concretos C0 (a), C1 (b) e C2 (c) .....	31
Figura 21 – (a) Moldes prontos para a moldagem; (b) Moldes preenchidos com concreto.....	41
Figura 22 – Cura dos corpos de prova em tanque de água saturada de cal – (a) e (b) .....	42
Figura 23 – Configuração dos moldes de PVC utilizados.....	43
Figura 24 – Moldes preenchidos com concreto .....	44
Figura 25 – Cortes dos Tubos de PVC.....	44
Figura 26 – Falhas de concretagem no concreto C0.....	45
Figura 27 – (a) Moldagem dos CPs na direção vertical inclinada; (b) Cura na direção horizontal.....	47
Figura 28 – Cortes dos Tubos de PVC.....	48
Figura 29 – Capeamento dos CPs cúbicos – concreto C0.....	49
Figura 30 – Corpos de prova (C0) prontos para ensaio à compressão axial – (a) e (b) .....	49
Figura 31 – Equipamento usado para o ensaio .....	51
Figura 32 – Posição do corpo de prova na prensa .....	52
Figura 33 – Prensa Hidráulica usada para ensaio de compressão axial .....	53
Figura 34 - (a) carregamento $\parallel$ em relação ao adensamento; (b) carregamento $\perp$ em relação ao adensamento .....	54
Figura 35 – Carregamento $\perp$ à moldagem.....	54
Figura 36 - Carregamento $\parallel$ e $\perp$ em relação ao adensamento – (a) e (b).....	55
Figura 37 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C0 – (a) e (b) .....	57

Figura 38 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C1 – (a), (b) e (c) .....	58
Figura 39 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C2 – (a), (b) e (c) .....	60
Figura 40 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C1 adicional – (a) e (b).....	63
Figura 41 – Ruptura à compressão no concreto C0 – (a) e (b) .....	68
Figura 42 – Ruptura à compressão no concreto C1 – (a) e (b) .....	70
Figura 43 – Ruptura à compressão no concreto C2 – (a) e (b) .....	71
Figura 44 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C0⊥ – (a) e (b) ...	75
Figura 45 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C0   – (a) e (b) ....	76
Figura 46 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto – (a) C0⊥; (b) C0   .....	77
Figura 47 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C1⊥ – (a) e (b) ...	78
Figura 48 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C1   – (a) e (b) ....	79
Figura 49 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto – (a) C1⊥; (b) C1   .....	80
Figura 50 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C2⊥ – (a) e (b) ...	82
Figura 51 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C2   – (a) e (b) ....	83
Figura 52 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto – (a) C2⊥; (b) C2   .....	84

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Curva granulométrica do cimento .....	29
Gráfico 2 – Distribuição granulométrica da brita 0.....	34
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da brita 1.....	35
Gráfico 4 – Distribuição granulométrica da brita 2.....	36
Gráfico 5 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	38
Gráfico 6 – Resistência média dos concretos de acordo com a direção do carregamento em relação à moldagem – tração .....	64
Gráfico 7 – Resistência média dos concretos C1 e C1 adicional – tração .....	66
Gráfico 8 – Resistência média dos concretos de acordo com a direção do carregamento em relação à moldagem – CPs cilíndricos .....	72
Gráfico 9 – Resistência média dos concretos de acordo com a direção do carregamento em relação à moldagem – CPs cúbicos.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Quantidade de superplastificante utilizada .....	31
Tabela 2 – Massas específicas e absorção de água dos agregados graúdos .....	32
Tabela 3 – Caracterização da brita 0 .....	33
Tabela 4 – Caracterização da brita 1 .....	34
Tabela 5 – Caracterização da brita 2 .....	35
Tabela 6 – Características do agregado miúdo .....	37
Tabela 7 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo e seus limites .....	37
Tabela 8 - Traço dos concretos de estudo .....	38
Tabela 9 – Método de adensamento .....	42
Tabela 10 – Ensaio à tração por compressão diametral do concreto C0 .....	56
Tabela 11 – Ensaio à tração por compressão diametral do concreto C1 .....	57
Tabela 12 – Ensaio à tração por compressão diametral do concreto C2. ....	60
Tabela 13 – Ensaio à tração por compressão diametral: caso adicional concreto C1. .....	62
Tabela 14 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C0. ....	67
Tabela 15 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C1. ....	69
Tabela 16 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C2. ....	70
Tabela 17 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C0. ....	74
Tabela 18 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C1. ....	77
Tabela 19 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C2. ....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – água/cimento

ARI - Alta resistência inicial

NBR - Norma Brasileira

NM - Norma Mercosul

CPs - Corpos de Prova

SP – Superplastificante

fck – Resistência Característica do Concreto

DMC – Dimensão Máxima Característica

|| - Paralelo

⊥ - Perpendicular

ft – Resistência do Concreto na Tração

fc – Resistência do Concreto na Compressão

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	13
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>1.1 Objetivos</b> .....	10
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	10
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	10
<b>1.2 Organização do Trabalho</b> .....	10
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	12
<b>2.1 Microestrutura do Concreto</b> .....	12
<b>2.2 Hidratação da Pasta de Cimento e Formação das Zonas de Transição</b> .....	13
<b>2.3 Influência da Fase Agregado nas Propriedades do Concreto</b> .....	15
<b>2.4 Ensaio Mecânicos</b> .....	16
<b>2.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral no Concreto Simples</b> .....	17
<b>2.4.2 Resistência à Compressão Axial no Concreto Simples</b> .....	18
<b>2.4.3 Resistência Mecânica do Concreto Influenciada pela Direção do Carregamento</b> .....	19
<b>2.5 Influência do Agregado Graúdo na Resistência do Concreto</b> .....	22
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	27
<b>3.1 Materiais</b> .....	28
<b>3.1.1 Cimento Portland</b> .....	28
<b>3.1.2 Aditivo Superplastificante (SP)</b> .....	30
<b>3.1.3 Agregados</b> .....	32
<b>3.1.3.1 Agregado Graúdo</b> .....	32
<b>3.1.3.2 Agregado Miúdo</b> .....	36
<b>3.2 Métodos</b> .....	38
<b>3.2.1 Produção do Concreto e Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone</b> .....	39
<b>3.2.2 Moldagem dos Corpos de Prova e Cura do Concreto</b> .....	40
<b>3.2.2.1 Corpos de Prova Cilíndricos em moldes de PVC</b> .....	43
<b>3.2.3 Ensaio Mecânicos</b> .....	48
<b>3.2.3.1 Ensaio à Tração por Compressão Diametral</b> .....	50
<b>3.2.3.2 Ensaio à Compressão Axial</b> .....	52

<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	56
<b>4.1 Ensaio à Tração por Compressão Diametral</b> .....	56
<b>4.2 Ensaio à Compressão Axial</b> .....	67
<b>4.2.1 Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cilíndricos</b> .....	67
<b>4.2.2 Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cúbicos</b> .....	74
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	87
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	89
<b>Anexo A – Análises Estatísticas para Resultados de Ensaio à Tração por Compressão Diametral</b> .....	92
<b>Anexo B – Análises Estatísticas para Resultados de Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cilíndricos</b> .....	98
<b>Anexo C – Análises Estatísticas para Resultados de Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cúbicos</b> .....	101

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, ficando atrás somente da água. Na construção civil é o material estrutural mais utilizado em razão de diversas vantagens como, durabilidade, facilidade de execução, economia em relação a outros materiais e a possibilidade de adaptação à diferentes formas, permitindo a concepção arquitetônica. Por ser constantemente utilizado e devido as complexidades das estruturas, há uma necessidade de estudos aprofundados sobre suas propriedades e limitações. Conhecendo o material de trabalho, o profissional pode fazer escolhas mais adequadas, garantindo requisitos como o a qualidade, conforto e principalmente a segurança da estrutura.

Metha e Monteiro (2008) afirmam que o concreto possui uma microestrutura heterogênea e bastante complexa composta por interfaces entre agregado graúdo e pasta de cimento hidratada. Chamadas de zonas de transição, são consideradas como regiões mais frágeis do concreto, pois influenciam na proliferação de fissuras quando o elemento é submetido a esforços como os de compressão, de tração, flexão, e etc.

De acordo com Hansen, Lauridsen e Hoang (2018) fatores como viscosidade da pasta hidratada, densidade, dimensão e forma do agregado podem influenciar a orientação das interfaces fracas, e desse modo o fenômeno da anisotropia, na qual o concreto apresenta propriedades mecânicas distintas nas direções paralela e perpendicular em relação a moldagem e adensamento do elemento. Sendo assim, considerando que os agregados ocupam boa parte do volume do concreto, espera-se que as dimensões dos agregados influenciem no efeito anisotrópico do concreto (ALHADAS, 2008).

Sabe-se que elementos pré-moldados como pilares e postes são lançados e adensados na direção horizontal, porém, solicitados mecanicamente por efeito da compressão, na direção vertical (EL DEBS, 2000). Semelhante ocorre com as vigas, que são concretadas na direção paralela à sua seção transversal e por efeito da flexão, são solicitadas por tração e compressão na direção perpendicular à sua seção. Em virtude disso, esses elementos podem sofrer alguma variação nas suas resistências, tanto à compressão como à tração, devido a orientação das interfaces frágeis, o que evidencia a importância desse estudo para a engenharia civil.

Portanto, a presente pesquisa tem por finalidade averiguar o comportamento mecânico do concreto sob a influência da dimensão máxima do agregado graúdo. Será verificado se a resistência mecânica na direção paralela ao adensamento diverge da resistência à compressão e à tração obtida na direção perpendicular. Para tal, corpos de prova serão submetidos à esforços de compressão axial e de tração por compressão diametral.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Estudar o comportamento mecânico de corpos de prova cilíndricos e cúbicos produzidos com a mesma dosagem e relação água/cimento, variando a dimensão máxima do agregado graúdo e a direção da aplicação do carregamento em relação ao lançamento do concreto.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) averiguar a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos ao aplicar um carregamento paralelo e perpendicular à direção de moldagem dos mesmos;
- b) avaliar a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos aplicando um carregamento paralelo e perpendicular à direção de moldagem das amostras;
- c) estudar a resistência à compressão de corpos de prova cúbicos ao aplicar um carregamento paralelo e perpendicular à direção de moldagem dos mesmos.

## **1.2 Organização do Trabalho**

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- a) O capítulo 1 contextualiza o tema de pesquisa, estabelece os objetivos e justifica a escolha do objeto de estudo;

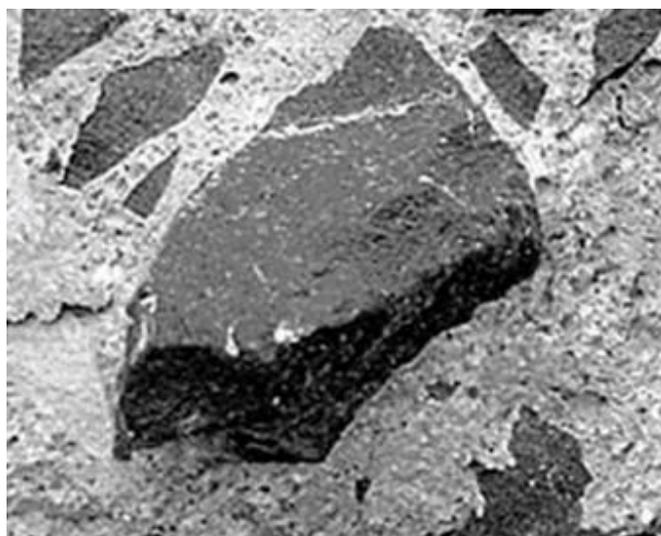
- b) O capítulo 2 consiste em uma revisão de literatura, expondo conceitos importantes para o desenvolvimento deste trabalho;
- c) O capítulo 3 aborda a metodologia de estudo, descrevendo os materiais, equipamentos e procedimentos necessários para o alcance dos objetivos propostos;
- d) Por fim, o capítulo 4 consiste na apresentação do cronograma de atividades propostas para este estudo.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Microestrutura do Concreto

Do ponto de vista macroscópico o concreto pode ser considerado como um material bifásico, composto essencialmente por uma matriz (pasta de cimento hidratada) e por partículas de agregado com dimensões que variam de menos de 1 (um) micron até alguns centímetros (FORMAGINI, 2013). A Figura 1 representa uma peça de concreto vista a olho nu, onde é possível visualizar as duas fases do concreto descritas.

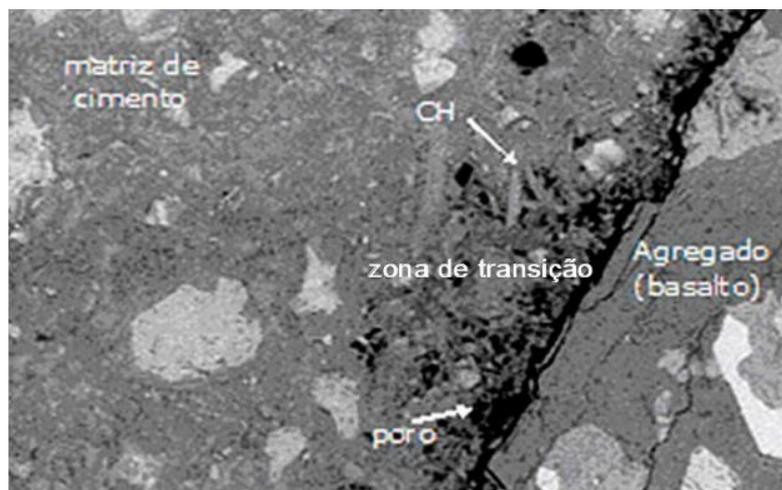
Figura 1 - Estrutura do concreto



Fonte: Rossignolo (2009, p.59)

A nível microscópico, no entanto, observa-se que não há uma distribuição homogênea entre as duas fases e nem entre elas mesmas. É comum que a pasta de cimento hidratada próxima à grandes fragmentos de agregado seja bastante diferente da microestrutura da matriz de pasta ou argamassa. De fato, pode-se considerar o concreto como um sistema trifásico, formado pelo agregado, pela matriz pasta de cimento hidratada e pela zona de transição na interface entre eles, sendo esta zona uma região normalmente mais fraca quando comparada aos outros dois componentes do concreto (METHA; MONTEIRO, 2008). Conforme Figura 2 pode-se verificar uma representação da microestrutura do concreto.

Figura 2 - Microestrutura do concreto



Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009, p.81)

Ainda, segundo Metha e Monteiro (2008) é importante o conhecimento das características de cada microestrutura deste sistema heterogêneo para que seja possível compreender e controlar as propriedades do material. De acordo com Bauer (2008) o conhecimento de suas propriedades e limitações, assim como os fatores que as condicionam, possibilita ao profissional a escolha mais adequada do material de trabalho.

## 2.2 Hidratação da Pasta de Cimento e Formação das Zonas de Transição

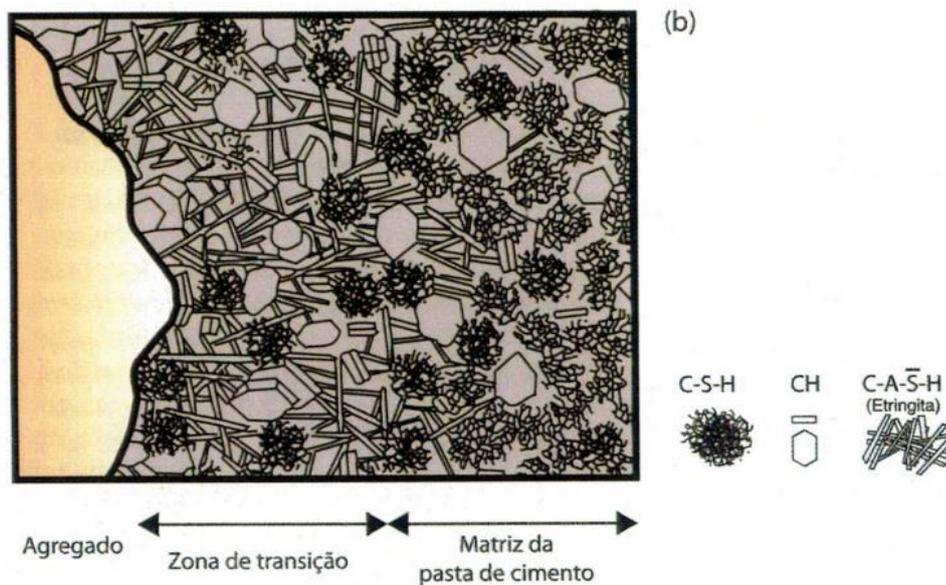
O cimento Portland é constituído por anidros que quando em contato com a água, reagem e formam produtos hidratados. Nesse processo de hidratação do cimento anidros solúveis são transformados em anidros hidratados menos solúveis (PETRUCCI, 1998). Segundo Gonçalves, Toledo Filho e Fairbairn (2006) a ocorrência da hidratação depende de fatores como, finura do cimento, fator água/cimento, temperatura de cura e presença de aditivos.

Basicamente, o processo de hidratação do cimento consiste na reação dos compostos do cimento ( $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ), formando o silicato de cálcio hidratado, o aluminato de cálcio hidratado, a etringita, o monosulfaluminato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio (GONÇALVES; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2006; METHA; MONTEIRO, 2008 )

Neville e Brooks (2013) afirmam que a estrutura da pasta de cimento é complexa e que ela possui diversas fontes de falhas e descontinuidades. Aproximadamente 50% de seu volume pode ser constituído por poros e a presença de agregados pode agravar a situação.

Metha e Monteiro (2008) explicam que com o processo de hidratação do cimento ocorre a formação da zona de transição. Após a compactação do concreto formam-se películas de água nas proximidades do agregado, o que contribui para uma maior relação água/cimento em regiões próximas ao maior agregado. Como resultado de reações entre os compostos do cimento, produtos cristalinos ficam imersos na matriz da pasta (etringita e hidróxido de cálcio). Onde há elevada relação a/c os produtos cristalinos formam uma estrutura com cristais maiores. Essa estrutura é mais porosa do que a própria matriz. As reações de hidratação continuam e o composto pouco cristalino CSH (silicato hidratado de cálcio) começa a preencher os espaços vazios entre essa estrutura, o que aumenta a densidade e conseqüentemente a resistência da zona de transição na interface. A Figura 3 apresenta a zona de transição presente entre a fase agregado e a matriz de cimento hidratado.

Figura 3 - Representação da zona de transição



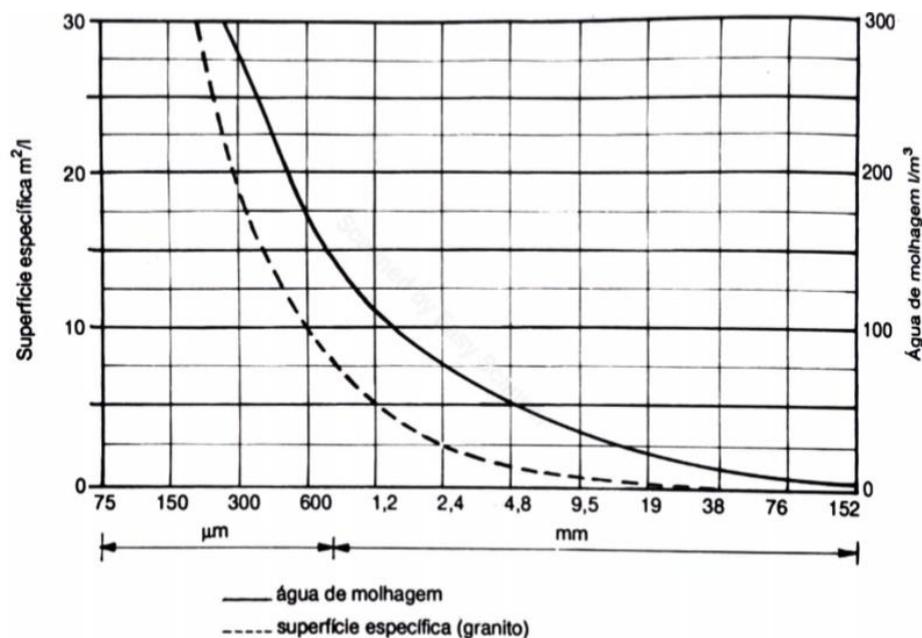
Fonte: Metha e Monteiro (2008, p.43)

### 2.3 Influência da Fase Agregado nas Propriedades do Concreto

De acordo com Metha e Monteiro (2008) a massa unitária, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional do concreto são definidos principalmente pela densidade e resistência do agregado. Essas propriedades do agregado são fortemente determinadas por suas características físicas, tais como, volume, tamanho, porosidade, forma e textura.

Para Bauer (2008) a trabalhabilidade sofre grande influência do formato dos grãos. Partículas em forma cuboide de cascalho, por exemplo, possibilitam maior trabalhabilidade quando comparadas aos grãos lamelares e alongados do basalto. Outro fator importante para essa propriedade do concreto é a distribuição granulométrica, pois ela será determinante na quantidade de água necessária para se obter o fator água/cimento desejado. Partículas muito finas requerem mais água de amassamento. A Figura 4 mostra a relação de água de molhagem necessária em função do diâmetro do agregado, assim como sua superfície específica.

Figura 4 – Influência do diâmetro do agregado na quantidade de água de molhagem

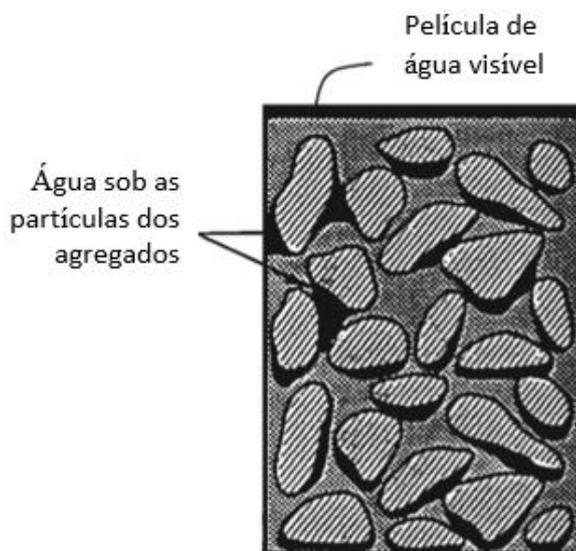


Fonte: Bauer (2008, p.112)

A dimensão e forma do agregado pode influenciar ainda no processo de exsudação. Quanto maior for a granulometria e a proporção de partículas alongadas e

achatadas, maior é a chance de ocorrência de acúmulo de filme de água sob a superfície do agregado, o que acarreta no enfraquecimento da zona de transição na interface pasta-agregado (METHA; MONTEIRO, 2008). Na Figura 5 é possível visualizar a região onde é comumente formada a película de água junto a superfície do agregado.

Figura 5 – Exsudação do excesso de água de amassamento



Fonte: Adaptado de Chandra e Berntsson (2002, p.137)

Quanto maior a dimensão do agregado, maior será a relação  $a/c$  na zona de transição da interface. Como consequência o concreto se torna menos resistente e mais permeável (METHA; MONTEIRO, 2008; NUNES, 2005).

Neville e Brooks (2013) afirmam que apesar de fatores como, a relação agregado/cimento, a qualidade do agregado e sua dimensão característica afetar a resistência do concreto, é comum que esses fatores sejam considerados de importância secundária quando se trabalha com agregados de diâmetro máximo de até 40 mm.

## 2.4 Ensaios Mecânicos

Este item trata dos ensaios a serem utilizados neste estudo. Inicialmente são abordadas brevemente as suas principais características, para finalmente, discorrer sobre a influência que a direção do carregamento tem sobre as resistências obtidas por eles.

### 2.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral no Concreto Simples

A determinação da resistência à tração por compressão diametral é realizada através de ensaio padronizado desenvolvido por Lobo Carneiro e padronizado pela RILEM. O método consiste em aplicar uma compressão transversal em um cilindro posicionado na horizontal. Como consequência surgem tensões normais de tração no plano diametral do elemento (FUSCO, 1995). A Figura 6 apresenta o comportamento dessas tensões no decorrer do ensaio, onde se observa tensões de compressão nas extremidades e tensões de tração no interior da estrutura.

Figura 6 – Curva Tensão x Deformação na compressão diametral

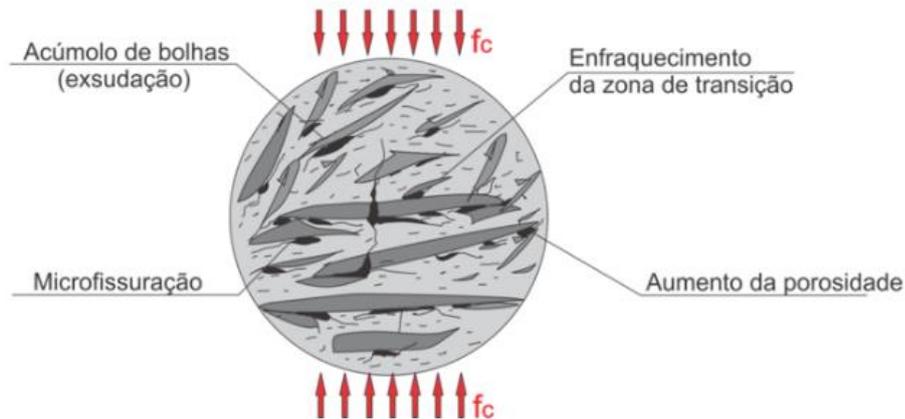


Fonte: Metha e Monteiro (2008, p.73)

Apesar da resistência a tração do concreto ser baixa em relação a de compressão ( $f_t < f_c/10$ ), as tensões de tração não podem ser totalmente ignoradas. Isso porque normalmente a fissuração do concreto ocorre por retração restringida, que frequentemente se dá por redução da temperatura do concreto ou por secagem (KANG; BITTENCOURT, 1999).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), antes da aplicação de qualquer solicitação no elemento de concreto, já existem uma certa quantidade de microfissuras na zona de transição na interface. Ao impor uma solicitação neste elemento o processo de ruptura se desenvolve como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Ruptura na compressão diametral



Fonte: Silva e Geyer (2018)

Conforme NBR 7222 (ABNT, 2011) a resistência do concreto à tração por compressão diametral é obtida através da equação 1:

$$f_{t,D} = \frac{2 * F}{\pi * d * L} \quad (1)$$

Onde:

$f_{t,D}$  = Resistência à tração por compressão diametral, em MPa e aproximação de 0,05MPa;

$F$  = Carga máxima obtida no ensaio (kN);

$d$  = Diâmetro do corpo de prova (mm), e;

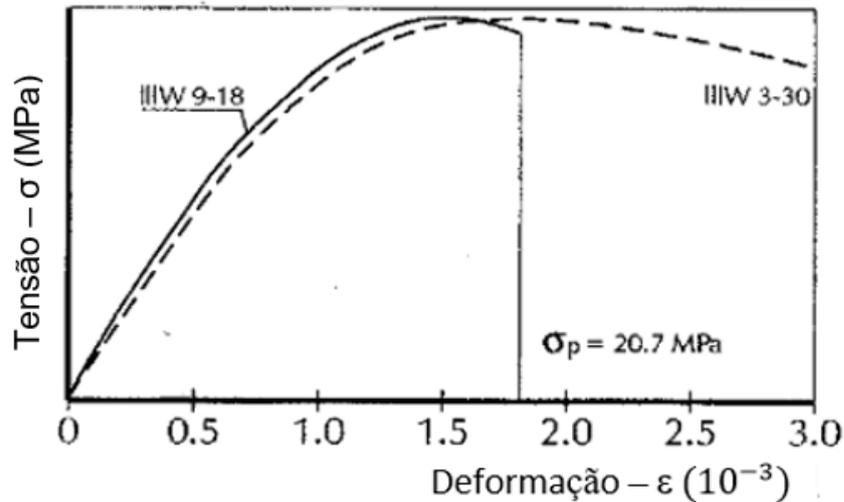
$L$  = Altura do corpo de prova (mm).

#### 2.4.2 Resistência à Compressão Axial no Concreto Simples

A resistência a compressão é determinada através de solitação uniaxial imposta à corpos de prova em ensaios de curta duração, ou seja, com alta velocidade de carregamento (LEONHARDT;MÖNNING,2008). Quando submetido a compressão, um corpo de prova apresenta uma curva tensão-deformação como a representada pela Figura 8. A curva apresenta um ramo ascendente até atingir o pico. A resistência

neste ponto é a tensão de compressão do concreto. Em seguida, ela apresenta um ramo decrescente (KANG;BITTENCOURT, 1999).

Figura 8 - Curva Tensão x Deformação do concreto na compressão axial



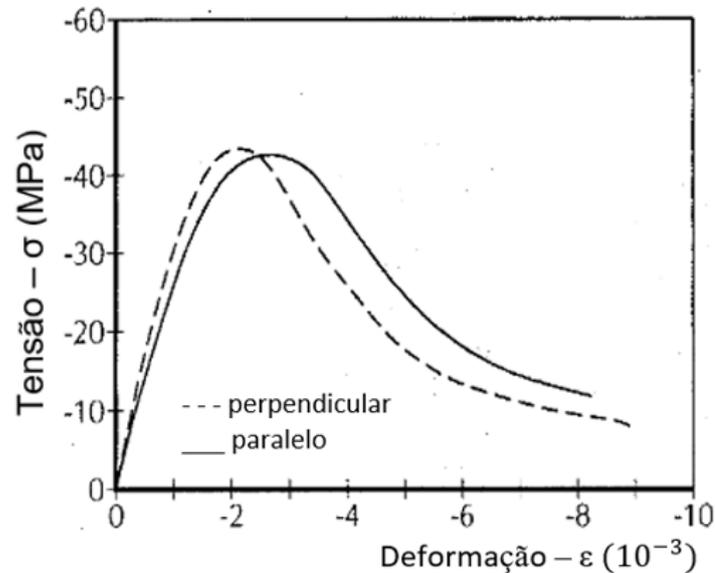
Fonte: Adaptado de Kang e Bittencourt (1999)

Na realidade, o início de carregamento não se comporta de maneira linear, há estudos detalhados que verificaram que existe uma ligeira curvatura desde o início do carregamento devido as tensões de tração existentes na interface agregado-pasta de cimento hidratada. Outros fatores podem ainda afetar o comportamento do concreto ao ensaio de compressão axial (KANG;BITTENCOURT, 1999).

#### 2.4.3 Resistência Mecânica do Concreto Influenciada pela Direção do Carregamento

Sabe-se que podem haver microfissuras iniciais no concreto devido à retração diferencial, a exsudação e a segregação e que essas microfissuras, formadoras de regiões mais frágeis, tendem a se desenvolverem sob os fragmentos de agregados maiores. Pela Figura 9 é possível observar que a rigidez inicial do concreto e o comportamento pré-pico podem variar de acordo com a direção de aplicação do carregamento (KANG;BITTENCOURT, 1999).

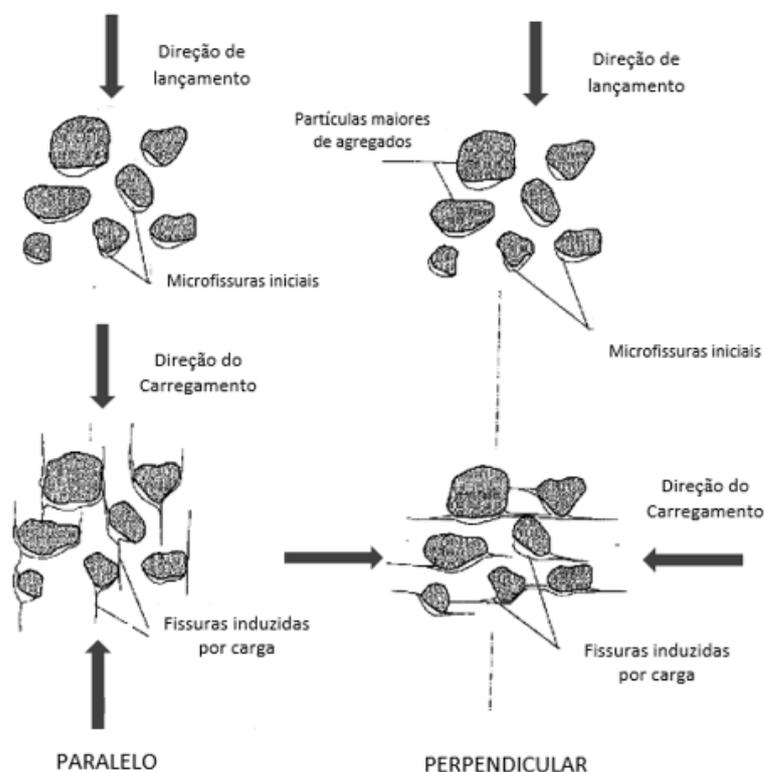
Figura 9 - Influência da direção de carregamento na resistência em ensaios à compressão uniaxial



Fonte: Adaptado de Kang e Bittencourt (1999)

A Figura 10 mostra o micro mecanismo da anisotropia do concreto. Ao ser aplicado um carregamento paralelo (||) à direção de adensamento, a orientação das microfissuras é desfavorável à propagação das fissuras existentes na região. Por outro lado, quando a sollicitação é imposta na direção perpendicular (⊥), as fissuras tendem a se propagar mais rapidamente, isso porque elas estão orientadas de maneira mais vulnerável à propagação das fissuras (KANG, W.T.;BITTENCOURT, 1999; VAN MIER, 1984).

Figura 10 - Efeito da anisotropia inicial no concreto



Fonte: Adaptado de Van Mier (1984)

Hansen, Lauridsen e Hoang (2018) concluíram, em estudo da anisotropia do concreto, que em peças estruturais sem histórico de carga, as zonas frágeis devido à segregação estática e dinâmica do concreto podem explicar a variação da resistência à compressão obtida nas direções  $\parallel$  e  $\perp$  ao adensamento do concreto.

Em pesquisa realizado por Bandeira (2017), verificou-se que em concretos de baixa e alta resistência a influência da direção do carregamento aplicado foi pouco significativa. Os valores encontrados para os concretos C-30 e o C-65 foram 6% e 5%, respectivamente, de aumento de resistência na direção paralela ao adensamento do concreto. Em concretos de resistência intermediária, no entanto, foi observada uma variação significativa. O valor obtido para o concreto C-50 foi de 16% de aumento da resistência na direção paralela ao adensamento do corpo de prova. Esses valores encontrados se justificam pelo fato do concreto de baixa resistência apresentar argamassa frágil, fissurando antes mesmo da zona de transição. Já o concreto de alta resistência por possuir uma baixa relação  $a/c$ , possui escassas zonas de transição, diminuindo a aderência entre agregado e pasta de cimento hidratada. No caso do

concreto de resistência intermediária, matriz e agregado possuem elevada resistência, assim, a propagação das fissuras tende a se concentrar nas zonas mais frágeis, que neste caso são as zonas de transição.

O fenômeno de anisotropia do concreto foi estudado por Vidigal et al (2018) nas idades de 28 e 91 dias. Foi observado uma redução da resistência a compressão na direção  $\perp$  em relação a direção de moldagem e adensamento do concreto. Os valores encontrados para uma relação a/c de 0,5 foi de 2,28% e 10,05% para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.

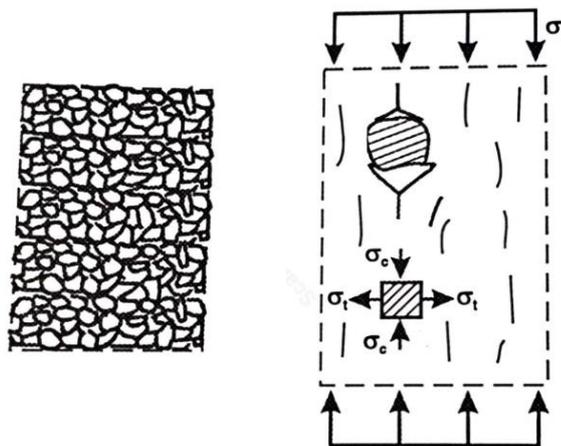
Kosteski, Marangon e Riera (2019) também observaram o fenômeno ao submeterem corpos de prova cilíndricos à esforços de compressão axial e à tração indireta. O valor obtido para ambos os ensaios foi de 15% de redução nas resistências na direção  $\perp$  ao adensamento do concreto.

## **2.5 Influência do Agregado Graúdo na Resistência do Concreto**

Em concretos convencionais, é comum que o módulo de deformação do agregado seja maior do que o da argamassa, assim o início da ruptura do concreto normalmente se dá na zona de transição (ROSSIGNOLO, 2009).

Na compressão simples de concretos de baixa e média resistência, surgem tensões transversais de tração na direção  $\perp$  ao campo onde está sendo aplicado o esforço. Isso ocorre devido aos agregados terem maior rigidez e resistência que a matriz de argamassa. Como consequência, há uma microfissuração generalizada, com fissuras orientadas na direção do esforço de compressão aplicado. Neste caso, há uma tendência da estrutura interna do material a reduzir-se a pequenos fragmentos. Na ruptura final, a fratura ocorre em planos paralelos ao esforço de compressão (FUSCO, 1995). A Figura 11 e a Figura 12 representam esse mecanismo de ruptura.

Figura 11 - Microfissuração em concretos com fck de até 40 MPa submetidos a esforço de compressão



Fonte: Fusco (1995, p.87)

Figura 12 - Modo de ruptura final em concretos com fck de até 40 MPa submetidos a esforço de compressão

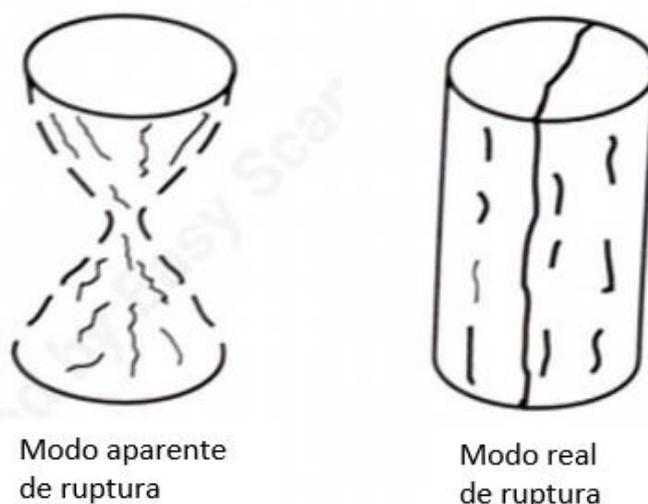


Fonte: Fusco (1995, p.87)

Os caminhos das falhas seguem as interfaces dos maiores agregados e a pasta de cimento é cortada. Ocasionalmente, essas linhas de falhas passam pelas próprias partículas dos agregados (NEVILLE; BROOKS, 2013).

De acordo com Fusco (1995) o modo de ruptura aparente (Figura 13) de testemunhos na forma de cones comumente observada nos ensaios de compressão axial não está associada a uma característica do concreto, mas sim a propriedade do material granular. A forma de cone ocorre pela influência da microfissuração que antecede a ruptura, associado com o atrito dos pratos da máquina.

Figura 13 - Modos de ruptura de corpos de prova de concreto submetidos a esforço de compressão axial



Fonte: Fusco (1995, p.88)

Para reduzir a influência do atrito durante a execução do ensaio à compressão axial, Vidigal et al (2018) sugerem o uso de um material de baixo atrito, como, parafina, vaselina e teflon entre os topos dos corpos de prova e os pratos da máquina.

Na compressão axial do concreto, a fissuração vertical inicia o equivalente a aproximadamente 50 a 75% do carregamento final. Neville (2015) afirma que é provável que os responsáveis por isso sejam as propriedades da superfície e a forma do agregado. Por outro lado, para ele, a relação entre resistência a compressão e resistência a tração não é influenciada pelo tipo de agregado utilizado.

Os efeitos do tipo de agregado graúdo na resistência do concreto foram estudados por Vishalakshi, Revathi e Reddy (2018). Foram verificadas as resistências a compressão e tração de concretos com resistência característica ( $f_{ck}$ ) de 30, 50 e 80 MPa produzidos com Granito Cinzento, Anortosita, Charnokita, Calcário e Gnaisse. Os resultados obtidos apontaram que em concretos de alta resistência os tipos de agregados influenciam significativamente na resistência dos materiais. Ao contrário, no concreto de resistência normal não foi observada variação considerável na resistência do material. Isso se justifica porque neste caso a resistência é determinada pelas características da zona de transição na interface agregado-pasta hidratada.

Evangelista (2002) estudou a influência do tipo e dimensão máxima do agregado graúdo na compressão do concreto nas idades de 3, 7, 14, 28 e 90 dias. A verificação do fator tipo de agregado foi realizado com concretos das séries M1, M3 e M5

(brita de gnaiss, brita de traquito e argila expandida). Com base em análises estatísticas, concluiu-se que, exceto para a argila expandida, o tipo de agregado utilizado tem influência desprezível na resistência à compressão. Quanto à influência da dimensão máxima do agregado, foram estudadas as séries M1 e M2, com DMC de 19mm e 9,5mm, respectivamente. Observou-se que para concretos com relação a/c maiores (0,65 e 0,60), houve pequenas variações de resistência, sendo cerca de 3% a 13% maiores para os da série M1. De modo geral, quando o fator a/c diminuiu, observou-se que para os concretos com agregados de maior dimensão (M1) os valores passaram a ser de 6% a 49% maiores. A Figura 14 mostra os valores obtidos.

Figura 14 - Relação a/c e dimensão do agregado na compressão axial

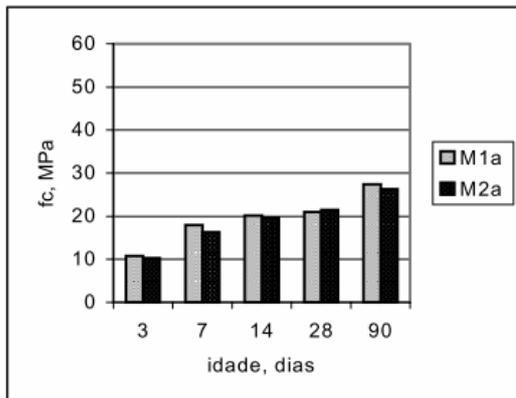


Figura 5.7 - Influência do  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado em  $f_c$  dos concretos com  $a/c=0,65$

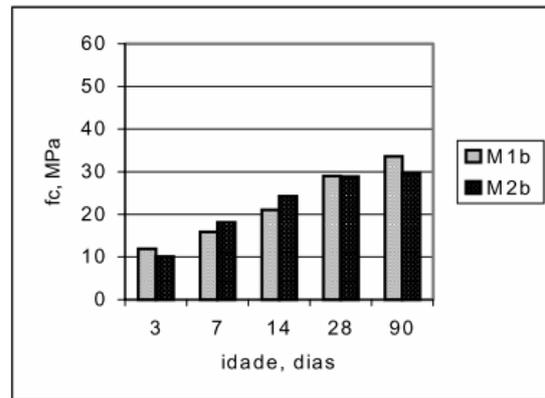


Figura 5.8 - Influência do  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado em  $f_c$  dos concretos com  $a/c=0,60$

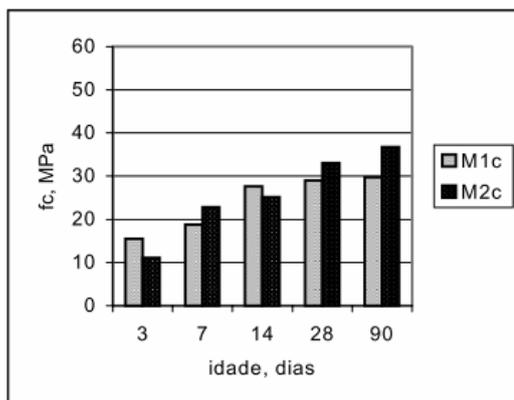


Figura 5.9 - Influência do  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado em  $f_c$  dos concretos com  $a/c=0,55$

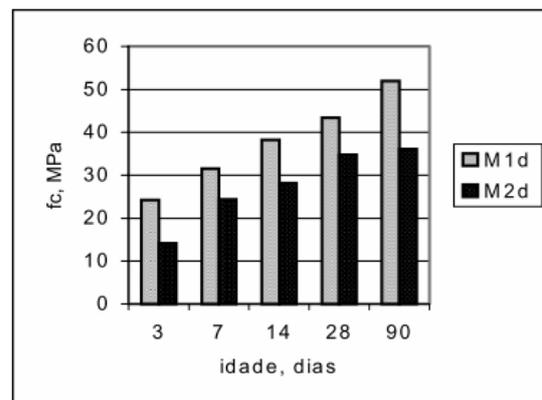


Figura 5.10 - Influência do  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado em  $f_c$  dos concretos com  $a/c=0,50$

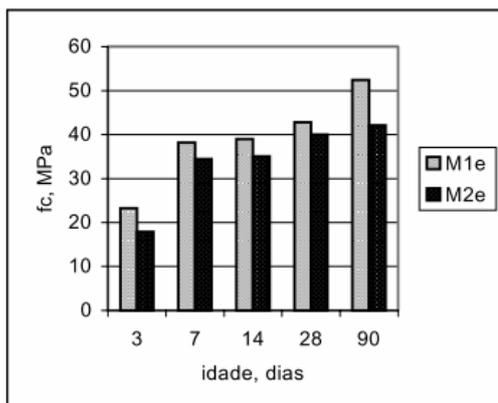


Figura 5.11-Influência do  $D_{\max}$  do agregado em  $f_c$  dos concretos com  $a/c=0,45$

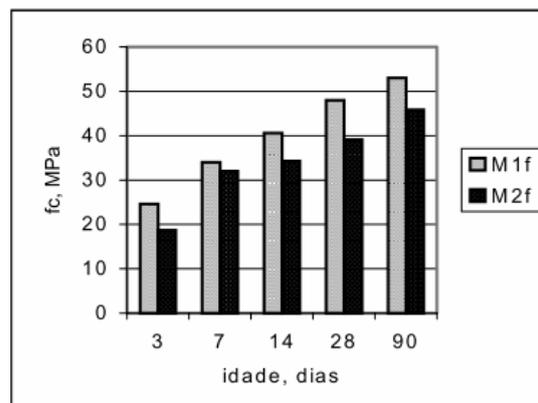


Figura 5.12 - Influência do  $D_{\max}$  do agregado em  $f_c$  dos concretos com  $a/c=0,40$

Fonte: Evangelista (2002)

Após estudo, Al-Oraimi, Taha e Hassan (2006) concluíram que a mineralogia dos agregados desempenha papel significativo nas resistências à tração e à tração indireta. De acordo com eles, o uso de agregado de maior dimensão resulta em uma resistência a compressão menor quando comparada a obtida usando agregado com DMC menor.

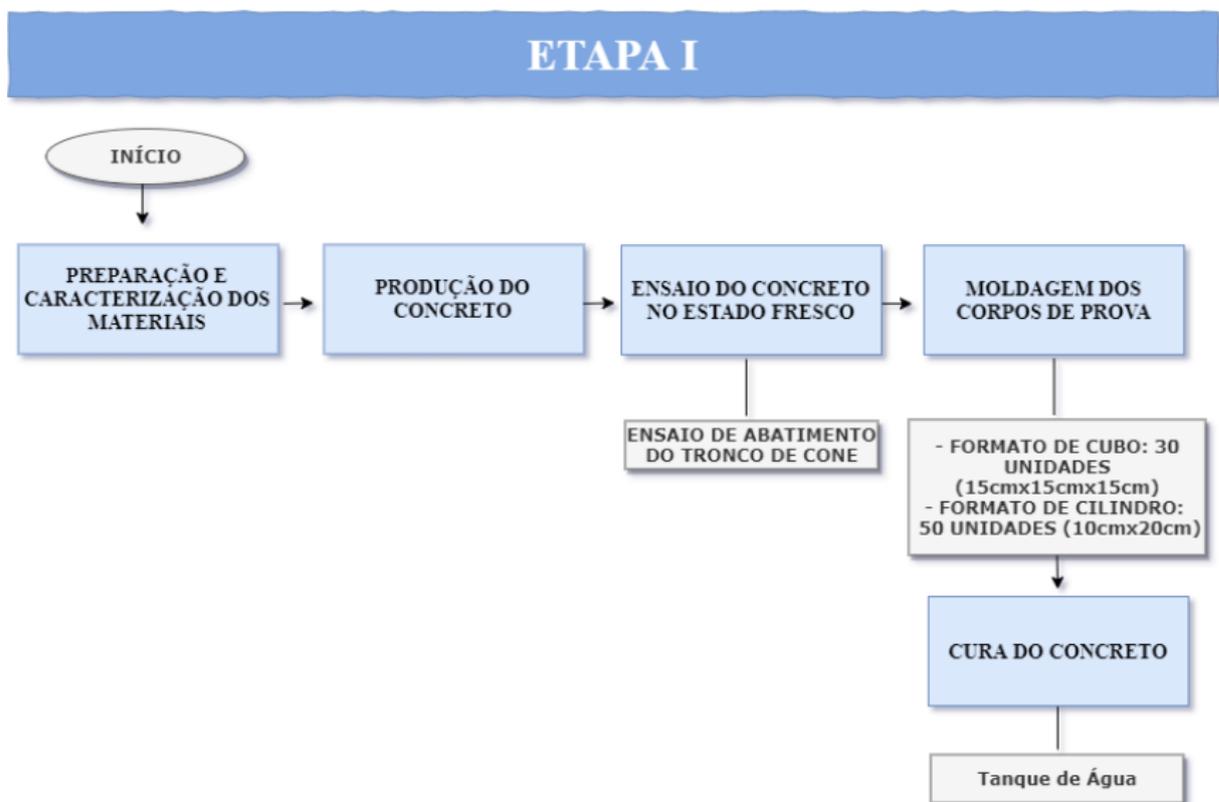
De acordo com Nunes (2005) a resistência à tração no concreto é influenciada pela forma e pela textura superficial do agregado. Isto foi observado por Silva e Geyer (2018) ao estudar a influência da forma do agregado gráudo nas propriedades mecânicas do concreto. Segundo eles, agregados lamelares e com forma alongada lamelar conferem ao concreto um melhor desempenho mecânico. Como as partículas são planas e chatas, elas apresentam uma maior área superficial, e como consequência, maior aderência entre agregado e pasta de cimento hidratada.

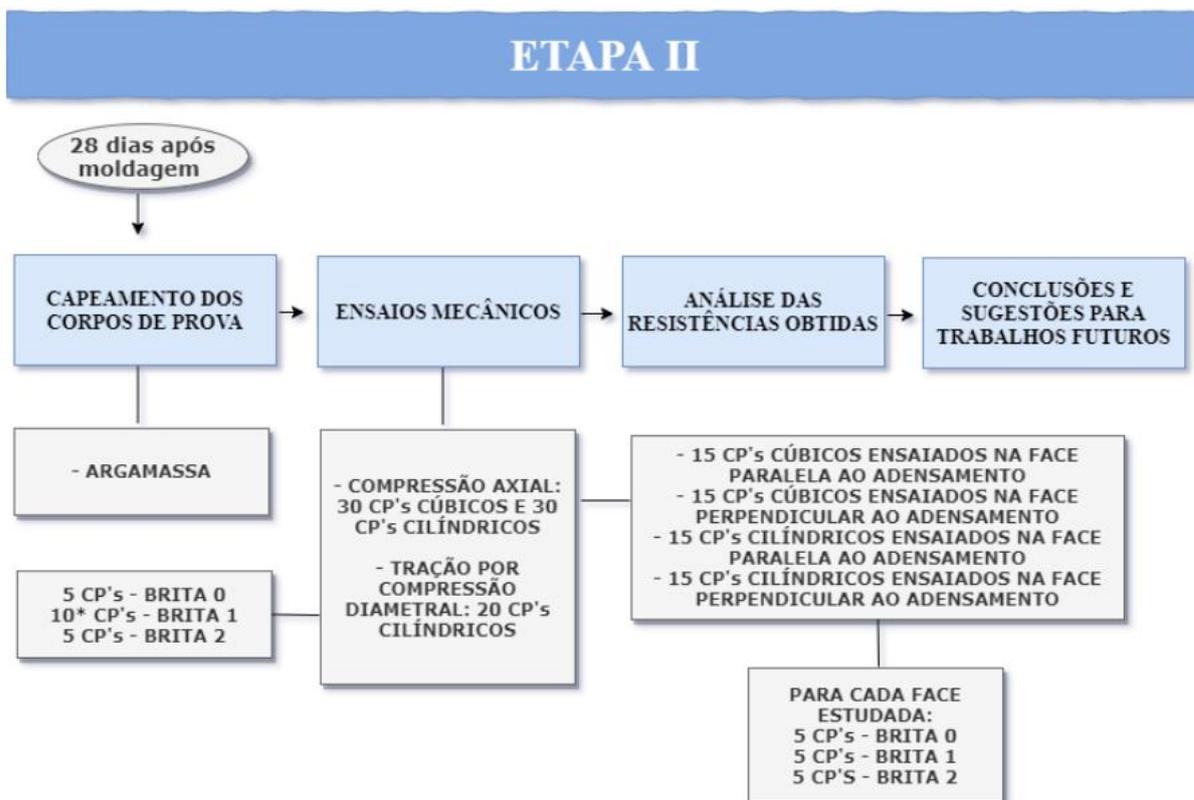
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo está dividido em dois itens, na qual o primeiro consiste na apresentação dos materiais, abordando como foram realizadas a preparação e a caracterização dos mesmos. O segundo item aborda os métodos utilizados neste estudo, descrevendo os procedimentos necessários para a sua execução.

De maneira geral, a metodologia do estudo foi dividida nas duas etapas representadas pelo esquema da Figura 15 nas quais estão resumidos de forma sequencial os procedimentos que as compõem.

Figura 15 - Etapas do programa experimental





\* Essa quantidade se refere à 5 corpos de prova extraídos de um tubo de PVC. O tubo de PVC de 100mm de diâmetro e 1300mm de comprimento, foi moldado e adensado com inclinação vertical de aproximadamente 45° em relação a superfície de apoio. Posteriormente o tubo foi colocado na posição horizontal durante o processo de cura. Os outros 5 CPs foram moldados, adensados e curados na direção horizontal, conforme Kosteski, Marangon e Riera (2019).

Fonte: Elaboração própria (2021).

### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: cimento Portland, água, agregado miúdo, agregados graúdos e aditivo químico superplastificante.

#### 3.1.1 Cimento Portland

O concreto foi produzido com o cimento Portland CPV-ARI. Sabe-se que este tipo de cimento tem a capacidade de fornecer respostas mais rápidas quanto ao ganho de resistência, sendo largamente utilizado quando são necessárias desformas rápidas de peças concretadas, caso da indústria de pré-moldados.

Como aglomerantes hidráulicos, as propriedades dos cimentos são determinantes para as características do concreto (LEONHARDT; MÖNNING, 2008). As características do cimento utilizado neste estudo foram determinadas através de ensaios laboratoriais.

A definição da composição granulométrica do CPV-ARI foi obtida através da média de três amostras do material, ensaiadas através da técnica de difração de raios laser associada a um analisador de partículas (Malvern Mastersizer 200 TM). A Figura 16 mostra o equipamento utilizado.

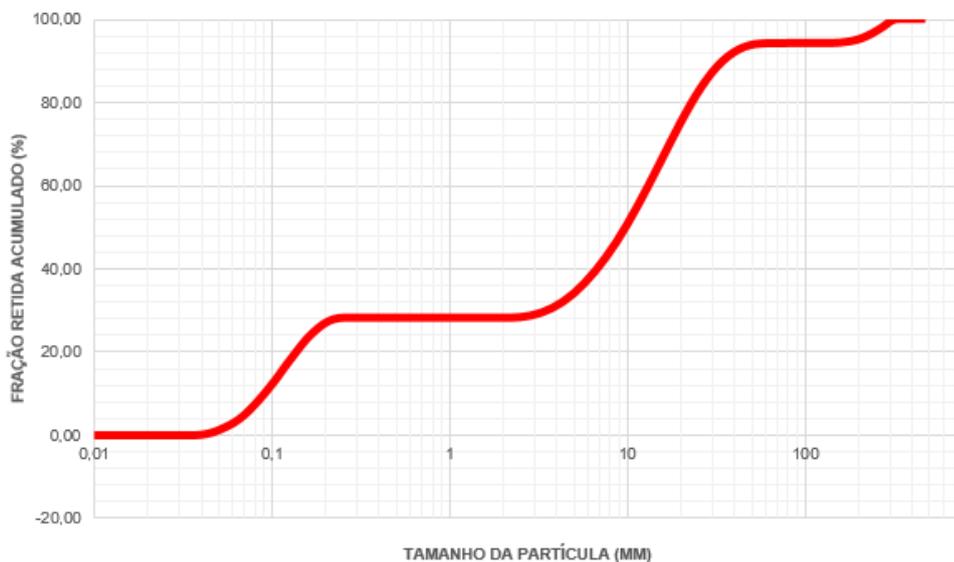
Figura 16 - Analisador de partículas



Fonte: Elaboração própria (2019).

A curva da composição do cimento CPV-ARI está representada pelo Gráfico 1.

Gráfico 1– Curva granulométrica do cimento CPV-ARI



Fonte: Elaboração própria (2021).

### 3.1.2 Aditivo Superplastificante (SP)

O aditivo químico utilizado foi o superplastificante Silicon ns HIGH 210 da empresa Tecnosil (Figura 17).

Figura 17 – Aditivo superplastificante utilizado



Fonte: Elaboração própria (2020).

O SP foi dosado durante execuções de ensaios de abatimento do tronco de cone. Uma quantidade de aditivo químico foi adicionada aos poucos aos concretos estudados afim de se obter um determinado valor de abatimento. Inicialmente foi utilizada uma quantidade com o objetivo de se obter aproximadamente um abatimento de 10 cm, porém verificou-se após fazer a primeira concretagem, que este abatimento dificultava o preenchimento dos tubos de PVC. Esta concretagem foi então descartada deste estudo, pois verificou-se muitas regiões não preenchidas nos tubos. Buscando não haver este tipo de problema novamente, determinou-se que todos os concretos deveriam ter abatimento superior a 10 cm. O novo valor determinado foi de aproximadamente 18 cm, porém, ao produzir o concreto C1 e realizar ensaios de abatimento para o concreto, chegou-se a um valor de 23 cm. Ficou definido assim, que os outros concretos, C0 e C2, deveriam ter abatimentos aproximadamente iguais.

A Tabela 1 mostra a quantidade final de SP utilizada e o abatimento do tronco de cone obtido para cada concreto estudado.

Tabela 1– Quantidade de superplastificante utilizada

Concreto	Abatimento (cm)	Massa (g)
C0	22	48
C1	23	45
C2	23	30

Fonte: Elaboração própria (2021).

A Figura 18 mostra como foi realizada a análise do abatimento do tronco de cone para os concretos.

Figura 18 - Análise do abatimento dos concretos C0 (a), C1 (b) e C2 (c)



(a)

(b)



(c)

Fonte: Elaboração própria (2020).

### 3.1.3 Agregados

Esta seção trata das partículas granulares utilizadas neste estudo, apresentando os resultados obtidos na determinação de suas características através de ensaios normativos.

#### 3.1.3.1 Agregado Graúdo

De acordo com a distribuição granulométrica, os agregados são classificados conforme a dimensão máxima característica (DMC) do grão, uma grandeza que corresponde a uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa na peneira de malha quadrada. As diferentes faixas nas quais os agregados são classificados podem ser associadas às suas aplicações na engenharia civil.

Conforme suas aplicações usuais, os agregados graúdos utilizados para a produção dos concretos deste estudo foram as britas comercializadas como 0, 1 e 2 de DMC 12,5 mm, 19 mm e 25 mm, respectivamente.

As amostras representativas foram coletadas de acordo com a NM 26 (ABNT, 2009) e reduzidas conforme a NBR NM 27 (ABNT, 2001). A partir da NM 53 (ABNT, 2009) foram determinadas as massas específicas do agregado seco, saturado com superfície seca, aparente e absorção de água dos agregados que podem ser verificadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Massas específicas e absorção de água dos agregados graúdos

Propriedade	Brita 0	Brita 1	Brita 2
Massa Específica do Agregado Seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,71	2,71	2,78
Massa Esp. do Agreg. Saturado com Superfície Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,77	2,74	2,82
Massa Específica do Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,87	2,87	2,91
Absorção de Água (%)	2,05	2,02	1,61

Fonte: Elaboração própria (2021).

As composições granulométricas das amostras foram determinadas seguindo os procedimentos descritos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A distribuição granulométrica e seus limites granulométricos para a brita 0 estão apresentados na Tabela 3. Os valores da zona granulométrica foram obtidos através da NBR 7211 (ABNT, 2009 versão corrigida 2009). A tabela ainda mostra os valores de diâmetro máximo do agregado (DMC) e o módulo de finura obtidos por meio da granulometria das amostras.

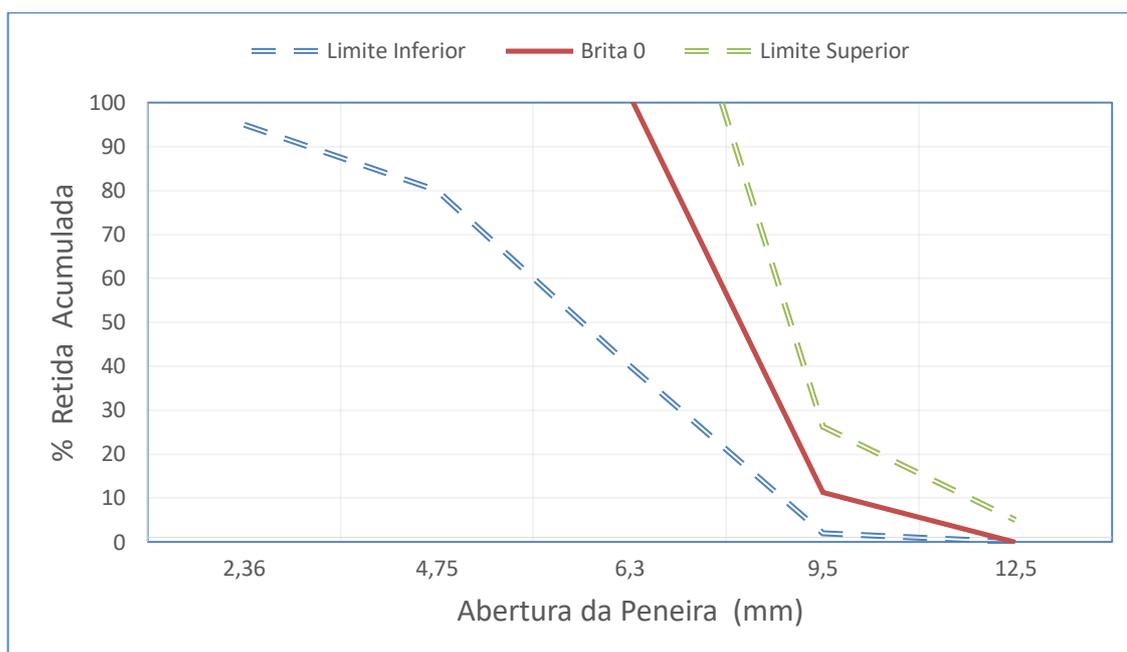
Tabela 3 – Caracterização da brita 0

<b>Peneira (mm)</b>	<b>% Retida Acumulada</b>	<b>Zona Granulométrica</b>	
		<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>
<b>12,5</b>	0	0	5
<b>9,5</b>	9,23	2	15
<b>6,3</b>	61,62	40	65
<b>4,75</b>	86,21	80	100
<b>2,36</b>	96,56	95	100
<b>Fundo</b>	100	-	-
<b>Módulo de Finura</b>			5,85
<b>DMC (mm)</b>			12,5

Fonte: Elaboração própria (2021).

O Gráfico 2 representa a curva granulométrica da brita 0.

Gráfico 2 – Distribuição granulométrica da brita 0



Fonte: Elaboração própria (2021).

A caracterização da brita 1 está apresentada na Tabela 4.

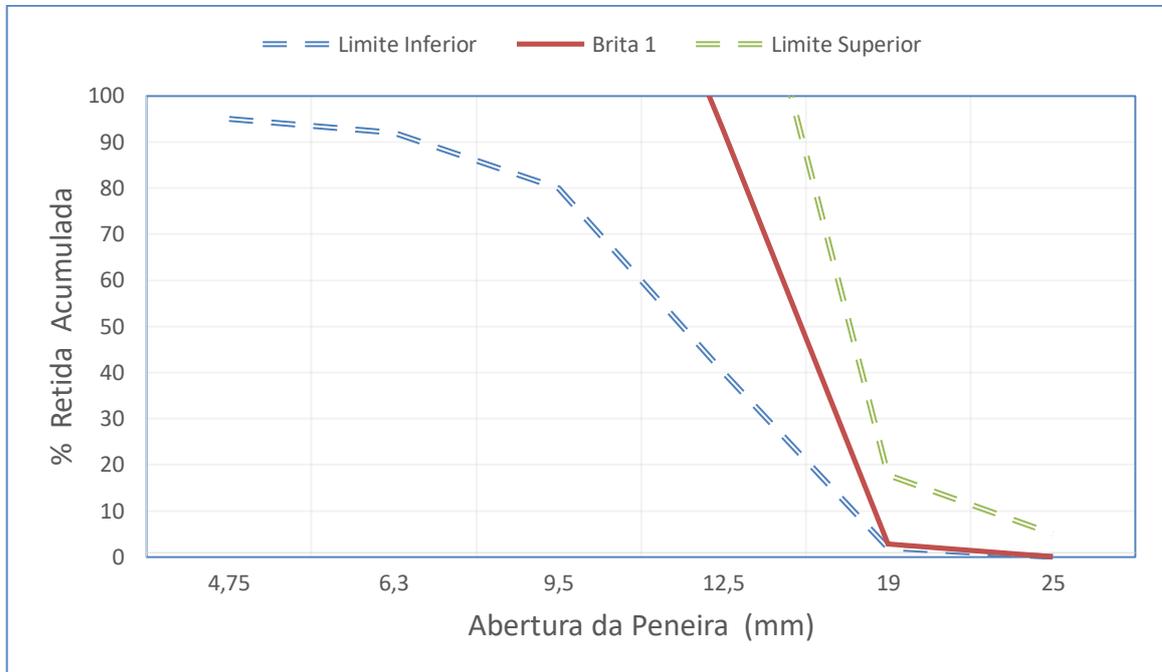
Tabela 4 – Caracterização da brita 1

Peneira (mm)	% Retida Acumulada	Zona Granulométrica	
		Limite Inferior	Limite Superior
25	0	0	5
19	0,75	2	15
12,5	52,59	40	65
9,5	99,14	80	100
6,3	99,60	92	100
4,75	99,65	95	100
Fundo	100	-	-
Módulo de Finura			7,1
DMC (mm)			19,0

Fonte: Elaboração própria (2021).

O Gráfico 3 representa a distribuição granulométrica da brita 1.

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da brita 1



Fonte: Elaboração própria (2021).

O resultado do ensaio de granulometria para a brita 2 está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização da brita 2

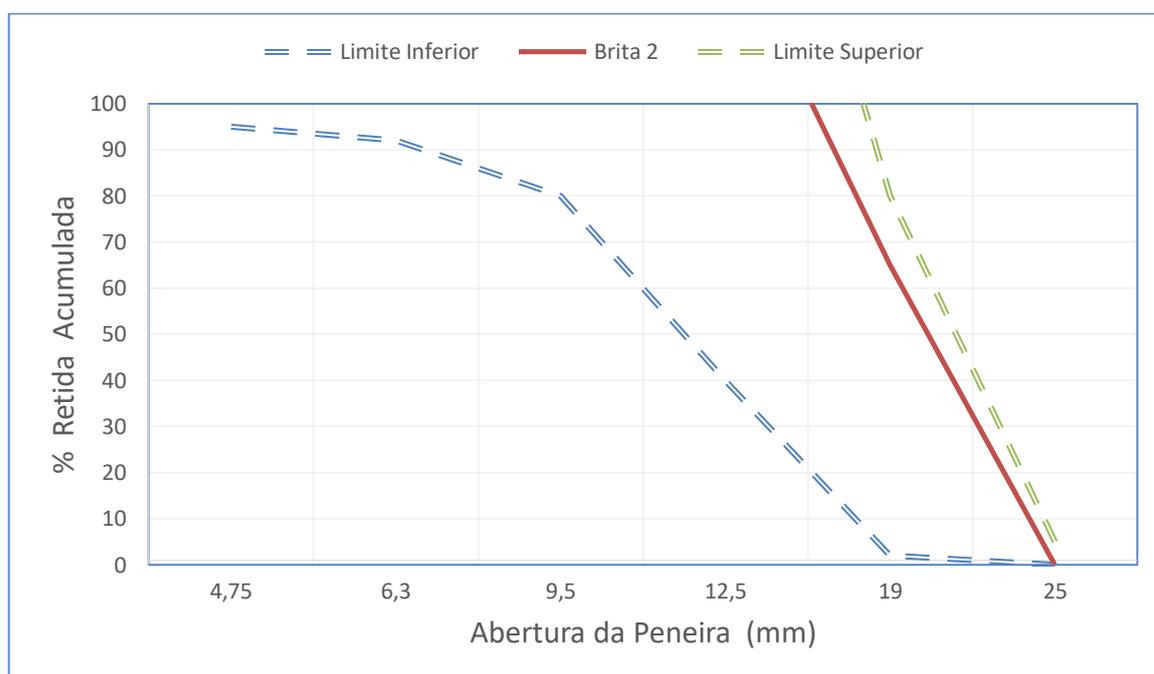
Peneira (mm)	% Retida Acumulada	Zona Granulométrica	
		Limite Inferior	Limite Superior
25	0	0	5
19	63,04	2	15
12,5	98,60	40	65
9,5	99,77	80	100
6,3	99,81	92	100
4,75	99,81	95	100

<b>Fundo</b>	100	-	-
<b>Módulo de Finura</b>			7,62
<b>DMC (mm)</b>			25

Fonte: Elaboração própria (2021).

O Gráfico 4 é uma representação da distribuição granulométrica da brita 2.

Gráfico 4 – Distribuição granulométrica da brita 2



Fonte: Elaboração própria (2021).

### 3.1.3.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado é proveniente do leito do rio Ibicuí, no município de Manoel Viana/RS. A DMC e o módulo de finura da areia foram determinados conforme os procedimentos descritos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa específica do agregado foi obtida à partir da NM 52 (ABNT, 2009). Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do agregado miúdo

<b>Módulo de Finura</b>	2,06
<b>DMC (mm)</b>	4,75
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,69

Fonte: Elaboração própria (2021).

A distribuição granulométrica e os limites granulométricos da areia estão na Tabela 7. Os valores da zona granulométrica foram obtidos através da NBR 7211 (ABNT, 2009 versão corrigida 2009).

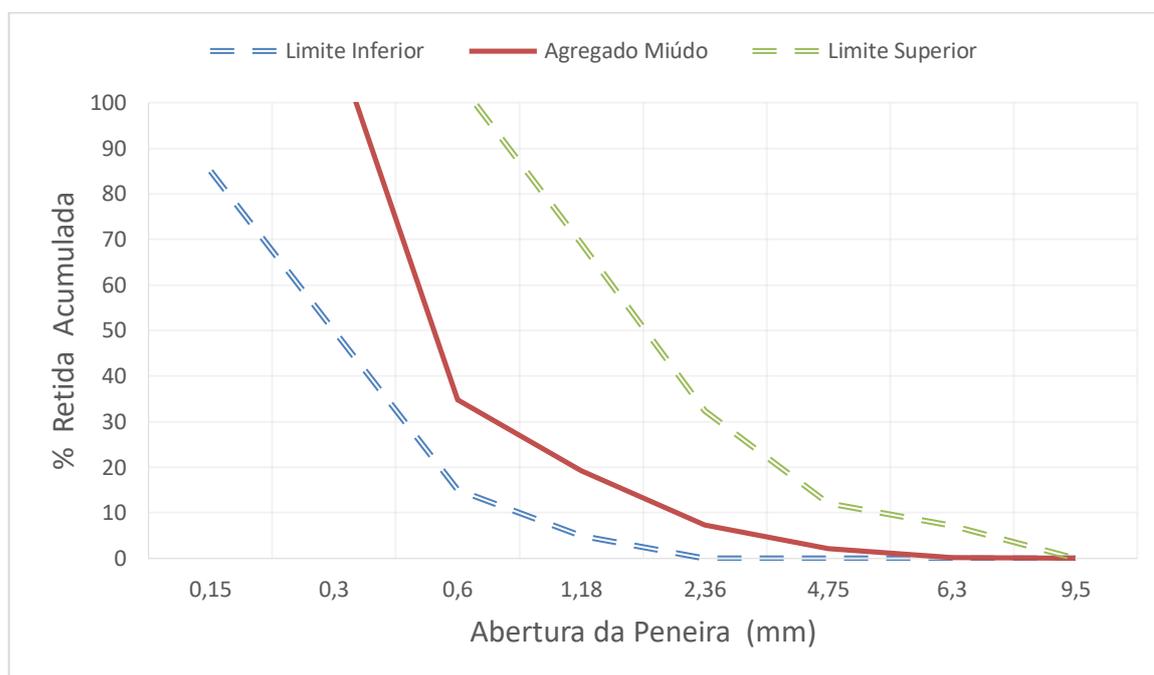
Tabela 7 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo e seus limites

<b>Peneira (mm)</b>	<b>% Retida Acumulada</b>	<b>Zona Ótima</b>		<b>Zona Utilizável</b>	
		<b>Lim. Inf.</b>	<b>Lim. Sup.</b>	<b>Lim. Inf.</b>	<b>Lim. Sup.</b>
<b>9,5</b>	-	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0,14	0	0	0	7
<b>4,75</b>	2,16	0	5	0	10
<b>2,36</b>	7,36	10	20	0	25
<b>1,18</b>	14,18	20	30	5	50
<b>0,6</b>	19,82	35	55	15	70
<b>0,3</b>	64,12	65	85	50	95
<b>0,15</b>	98,12	90	95	85	100
<b>Fundo</b>	100	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria (2021).

A partir dos dados da Tabela 7, pode-se gerar o Gráfico 5, onde é possível observar o agregado miúdo dentro dos limites da zona utilizável.

Gráfico 5 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaboração própria (2021).

### 3.2 Métodos

A pesquisa ocorreu da seguinte maneira: para cada tipo de brita foi executado um concreto de mesmo traço em massa (Tabela 8) com teor de argamassa igual a 53,83% e relação a/c de 0,44.

Tabela 8 - Traço dos concretos de estudo

Traço	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Brita 2	SP (g)
<b>C0</b>	1	1,69	2,31	-	-	48
<b>C1</b>	1	1,69	-	2,31	-	45
<b>C2</b>	1	1,69	-	-	2,31	30

Fonte: Elaboração própria (2021).

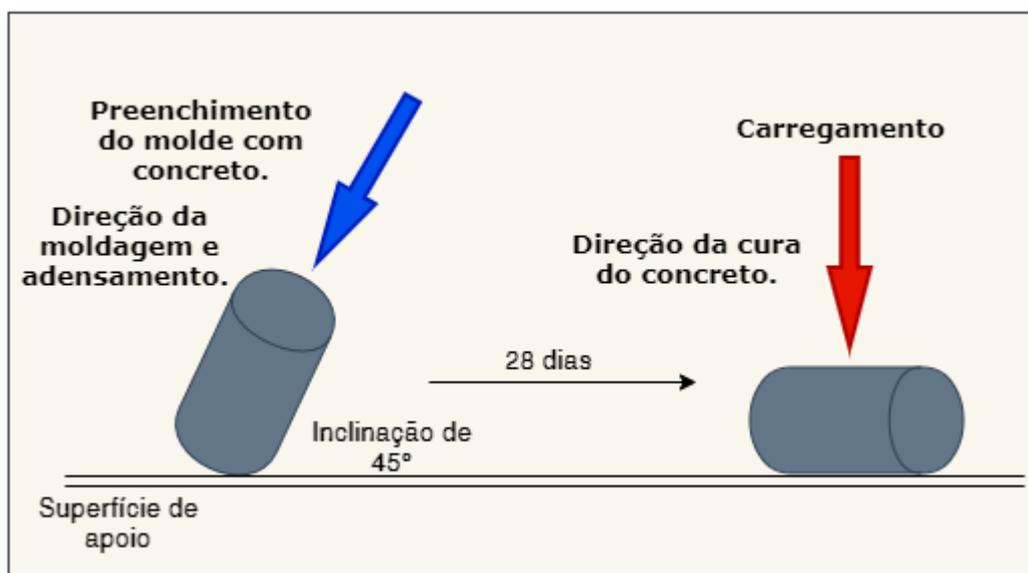
Para cada concreto foram moldados 10 (dez) corpos de prova (CPs) cúbicos 15cmx15cmx15cm e ensaiados à compressão axial nas condições perpendicular (representada neste estudo pelo símbolo “⊥”) e paralela (representada pelo símbolo “||”).

Desses corpos de prova, 5 (cinco) CPs receberam carregamento  $\perp$  em relação à moldagem e adensamento e nos outros 5 (cinco) foram aplicados um carregamento na face II.

Ainda, foram moldados para cada concreto estudado, 15 (quinze) corpos de prova cilíndricos 10cmx20cm. Desses CPs, 10 (dez) foram ensaiados à compressão axial e 5 (cinco) à compressão diametral.

Adicionalmente, 5 (cinco) corpos de prova em formato cilíndrico do concreto C1 foram moldados para avaliação do seu desempenho mecânico quando lançado no molde à uma inclinação de aproximadamente  $45^\circ$  em relação a superfície de apoio e curado na direção horizontal. Por fim, ensaiado à compressão diametral (Figura 19).

Figura 19 – Estudo adicional do concreto C1



Fonte: Elaboração própria (2021).

### 3.2.1 Produção do Concreto e Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone

A produção dos concretos C0, C1 e C2 foi realizada no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete. A mistura ocorreu em uma betoneira de eixo inclinado disponibilizada pelo laboratório (Figura 20). O preparo mecanizado foi realizado com as respectivas proporções de materiais já especificados para cada traço (Tabela 8). A execução dos concretos ocorreu conforme as recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2015 versão corrigida 2015).

Após, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone para verificação da consistência dos concretos. O ensaio foi executado seguindo as orientações da

NBR NM 67 (ABNT, 1998). O procedimento de ensaio consiste em umedecer e preencher um molde metálico em formato tronco cônico (de dimensões e características especificadas) em três camadas sobre uma placa base. Cada camada recebe 25 golpes bem distribuídos com uma haste de adensamento. Após o preenchimento do cone, este é retirado e é medido o abatimento do concreto. A Figura 18 mostra como foi realizada a análise do abatimento do tronco de cone para os concretos.

Figura 20 - Betoneira utilizada para a produção dos concretos



Fonte: Elaboração própria (2020).

### 3.2.2 Moldagem dos Corpos de Prova e Cura do Concreto

A moldagem dos CP's cúbicos e cilíndricos padrão ocorreu de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015 versão corrigida 2016). Os moldes foram previamente revestidos internamente com uma fina camada de óleo. Após, foram preenchidos e posteriormente adensados (Figura 21).

Figura 21 – (a) Moldes prontos para a moldagem; (b) Moldes preenchidos com concreto



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

O método de adensamento utilizado foi determinado a partir do valor de abatimento estabelecido. Visualizando na Tabela 9 disponibilizada pela NBR 5738 (ABNT, 2015 versão corrigida 2016), foi determinado o tipo de adensamento ideal para o abatimento maior ou igual a 220mm.

Tabela 9 – Método de adensamento

Classe	Abatimento (mm)	Método de Adensamento
<b>S10</b>	$10 \leq A < 50$	Mecânico
<b>S50</b>	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou Manual
<b>S100</b>	$100 \leq A < 160$	
<b>S160</b>	$160 \leq A < 220$	Manual
<b>S220</b>	$A \geq 220$	

Fonte: Elaboração própria (2021).

De acordo com a Tabela 9, o adensamento foi realizado de forma manual. A NBR 5738 (ABNT, 2015 versão corrigida 2016) orienta para o adensamento manual feito em 2 (duas) camadas de moldagem para os corpos de prova cilíndricos. Cada camada recebeu 12 (doze) golpes com haste de adensamento. O número de camadas e número de golpes por camada para os moldes cúbicos foi de 2 (duas) camadas e 25 golpes. Após o adensamento, com o auxílio de uma colher de pedreiro, foi realizado o rasamento e regularização da superfície dos corpos de prova para seu nivelamento.

A seguir, os corpos de prova permaneceram nos moldes durante um período de 48 a 72 horas em local protegido da ação de intempéries. Após o período de cura inicial, os CPs foram desmoldados, identificados e submersos em tanque de água saturada de cal de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006) até a idade de 28 dias (Figura 22). Após este período, as resistências dos concretos foram verificadas através de ensaios mecânicos.

Figura 22 – Cura dos corpos de prova em tanque de água saturada de cal – (a) e (b)



(a)



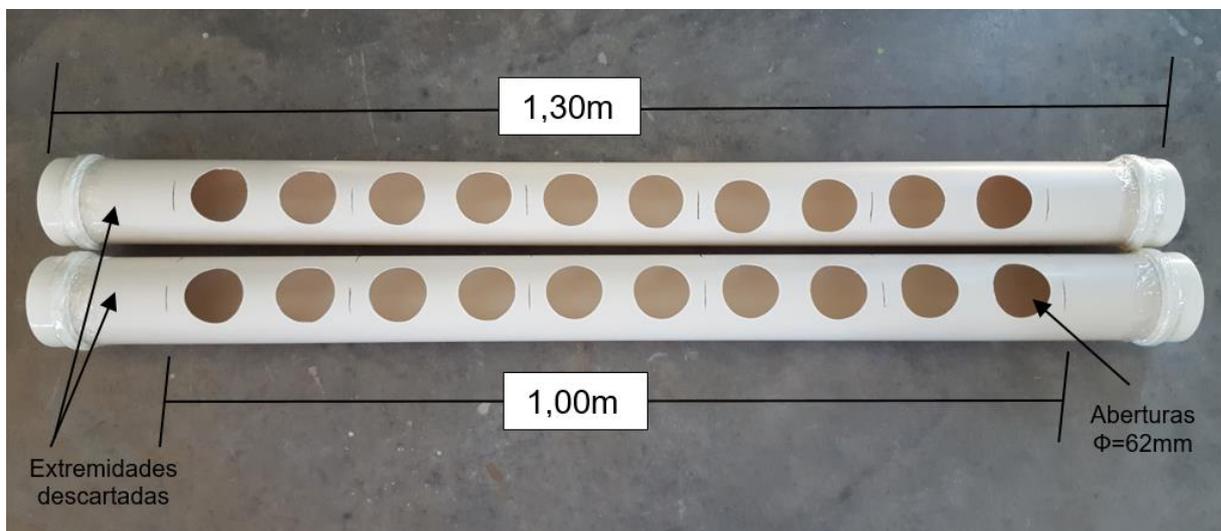
(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

### 3.2.2.1 Corpos de Prova Cilíndricos em moldes de PVC

Para a moldagem dos corpos cilíndricos os moldes foram dispostos na direção horizontal em relação à superfície de apoio. Para tal, foram utilizados como formas, tubulações de PVC com diâmetro nominal de 100mm e comprimento estimado de 1,30 metros. Aberturas em formato circular de diâmetro de 62mm foram realizadas no tubo para a colocação do material de estudo nos moldes. A imagem geral das formas cilíndricas está demonstrada na Figura 23.

Figura 23 – Configuração dos moldes de PVC utilizados



Fonte: Elaboração própria (2020).

Durante o preenchimento dos moldes observou-se a dificuldade de lançamento do concreto devido ao tamanho das aberturas. A Figura 24 mostra como ficaram os moldes após serem preenchidos com concreto.

Figura 24 – Moldes preenchidos com concreto



Fonte: Elaboração própria (2020).

Após a cura inicial do concreto, os moldes foram cortados com máquina de corte com disco diamantado em 5 (cinco) partes iguais de dimensão 100mmx200mm como demonstrado na Figura 25. As regiões de extremidades foram descartadas. O comprimento de descarte foi de 15cm em cada extremidade dos tubos. Observou-se que em algumas extremidades ocorreram regiões que não foram preenchidas com concreto. Isto pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 – Cortes dos Tubos de PVC



Fonte: Elaboração própria (2020).

Em seguida, os corpos de prova foram removidos do molde, identificados e acondicionados no tanque de água saturada de cal até a idade de 28 dias. Após a retirada dos CPs dos moldes de PVC, foram observados vazios de concretagem em corpos de prova do concreto C0 como demonstrado na Figura 26. Acredita-se que estas falhas na concretagem tenham ocorrido devido a trabalhabilidade do concreto ser inadequada para às dimensões dos moldes, dificultando o preenchimento dos espaços da peça. Posteriormente os corpos de prova da Figura 26 foram usados no ensaio à tração por compressão diametral.

Figura 26 – Falhas de concretagem no concreto C0 – (a) e (b)



(a)

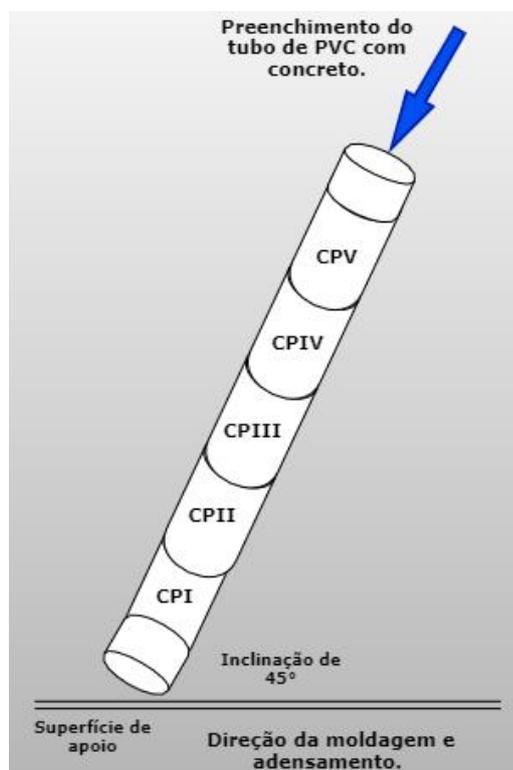


(b)

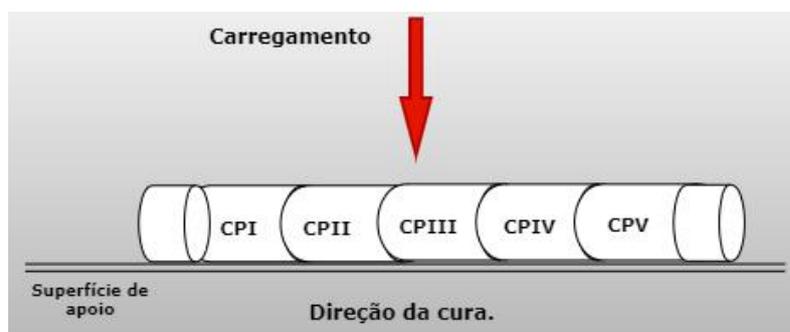
Fonte: Elaboração própria (2020).

No caso adicional dos 5 (cinco) CPs do concreto C1, como já mencionado, estes foram moldados e adensados com uma inclinação aproximadamente igual a  $45^\circ$  em relação à superfície de apoio. A seguir, foram colocados horizontalmente para o processo de cura até a idade de 28 dias. As dimensões do molde de PVC foram as mesmas descritas anteriormente e mostradas na Figura 23, porém, as aberturas circulares ao longo do tubo não foram necessárias, visto que o preenchimento do tubo se deu por uma de suas extremidades. A Figura 27 mostra um esquema de como ocorreu a execução da moldagem desses corpos de prova.

Figura 27 – (a) Moldagem dos CPs na direção vertical inclinada; (b) Cura na direção horizontal



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2021).

Após a moldagem e o tempo de cura inicial de 48 horas, o tubo foi cortado em 5 (cinco) partes iguais de dimensão 100mmx200mm como mostrado na Figura 25As extremidades foram descartadas.

Figura 28 – Cortes dos Tubos de PVC.



Fonte: Elaboração própria (2020).

A seguir, os moldes foram retirados e os corpos de prova foram identificados e acondicionados em tanque de água saturada de cal até a idade de serem ensaiados.

Importante dizer que após desmoldados, constatou-se que os corpos de prova cilíndricos moldados pelo método do PVC possuíam diâmetro aproximado de 96,4mm, valor já esperado, pois de acordo com o fabricante a espessura das paredes dos tubos era de 1,8mm.

Aos 28 dias de idade, todos os corpos de prova para os três traços de concreto, foram preparados e submetidos aos ensaios mecânicos de compressão axial e compressão diametral.

### **3.2.3 Ensaios Mecânicos**

Para a etapa de ensaios os corpos de prova devem estar com a superfície regularizada para que seja garantido o contato entre os pratos da máquina e a superfície dos CPs. A regularização da superfície dos corpos de prova neste estudo foi realizada por meio da aplicação de argamassa de traço 1:1 e relação água/cimento de 0,50. Somente os corpos cúbicos submetidos à compressão axial na face II à moldagem foram capeados (Figura 29).

Figura 29 – Capeamento dos CPs cúbicos – concreto C0



Fonte: Elaboração própria (2020).

Após o capeamento dos corpos de prova, estes foram separados e identificados para serem submetidos aos ensaios mecânicos (Figura 30).

Figura 30 – Corpos de prova (C0) prontos para ensaio à compressão axial – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

### 3.2.3.1 Ensaios à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos seguindo os procedimentos normativos da NBR 7222 (ABNT, 2011). Foram ensaiados 20 (vinte) CPs, sendo 5 (cinco) corpos de prova para cada concreto estudado e 5 (cinco) CPs para o caso adicional do concreto C1. A Figura 31 é uma imagem da máquina de ensaios universal utilizada na execução dos ensaios à tração por compressão diametral (marca EMiC séries, DL-20000).

Figura 31 – Equipamento usado para o ensaio



Fonte: Elaboração própria (2020).

Conforme NBR 7222 (ABNT, 2011) a velocidade de carregamento dos ensaios foi de 0,05 MPa/s. Para dar condições da ocorrência do efeito da anisotropia do concreto, os corpos de prova foram posicionados na máquina de maneira que o carregamento aplicado estivesse a aproximadamente 90° das aberturas do molde, ou seja, da direção em que o molde foi preenchido. A Figura 32 facilita o entendimento.

Figura 32 – Posição do corpo de prova na prensa



Fonte: Elaboração própria (2020).

### 3.2.3.2 Ensaios à Compressão Axial

Foram submetidos a este ensaio corpos de prova cúbicos e cilíndricos. No Brasil não há um procedimento normativo para ensaios de compressão axial em corpos cúbicos. Como referência, foi utilizada a NBR 5739 (ABNT, 2018) que define os procedimentos necessários para o ensaio de compressão axial em corpos cilíndricos. A Figura 33 mostra o equipamento usado para a execução dos ensaios.

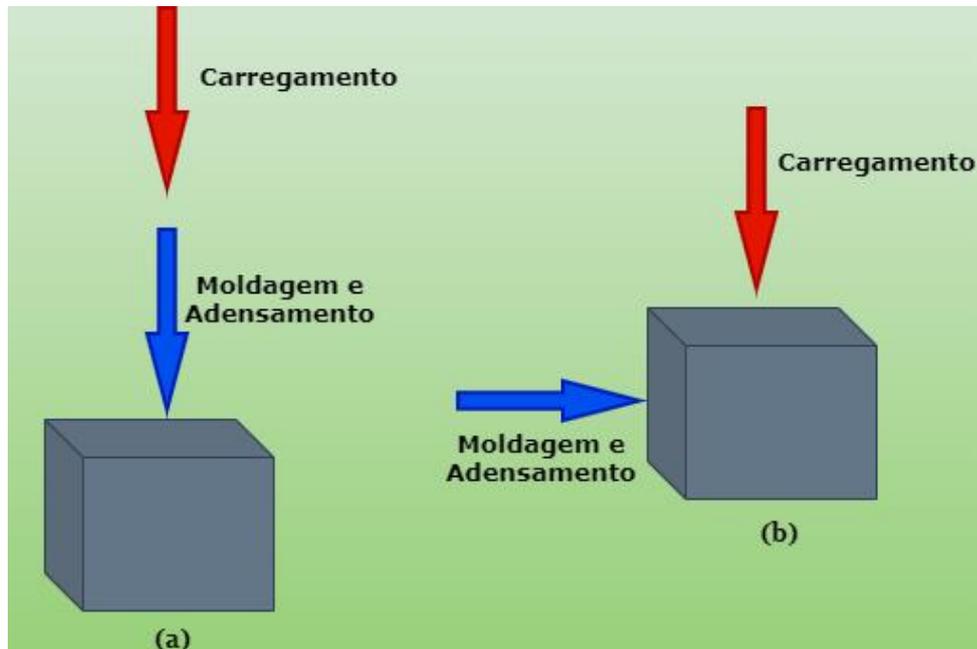
Figura 33 – Máquina de ensaios universal usada para ensaio de compressão axial (INSTRON SATEC 1500kN)



Fonte: Elaboração própria (2020).

No total foram ensaiados 30 (trinta) CPs cúbicos, sendo 10 (dez) corpos de prova para cada um dos concretos estudados C0, C1 e C2. Dentre esses CPs, 5 (cinco) receberam um carregamento II ao adensamento e os outros 5 (cinco) receberam um carregamento I. Para um melhor entendimento a Figura 34 mostra como foi aplicado o esforço de compressão nos corpos cúbicos.

Figura 34 - (a) carregamento  $\parallel$  em relação ao adensamento; (b) carregamento  $\perp$  em relação ao adensamento.



Fonte: Elaboração própria (2021).

Quanto aos corpos cilíndricos, foram ensaiados 15 (quinze) CPs, produzidos pelo método convencional, sendo 5 (cinco) para cada concreto de estudo (C0, C1 e C2). Ainda, foram ensaiados 15 (quinze) CPs para cada concreto, moldados e adensados na horizontal e ensaiados na vertical (Figura 35).

Figura 35 – Carregamento  $\perp$  à moldagem.



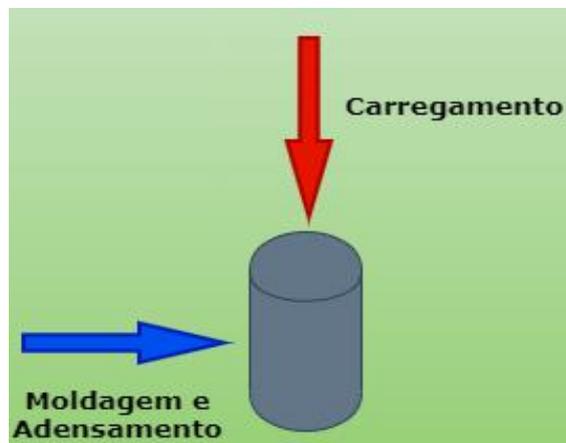
Fonte: Elaboração própria (2020).

Os corpos cilíndricos foram ensaiados como representado na Figura 36. A velocidade do ensaio foi de 0,03mm/min.

Figura 36 - Carregamento  $\parallel$  (a) e  $\perp$  (b) em relação ao adensamento



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2021).

Não foram aplicadas condições de contorno nos ensaios, ou seja, os corpos de prova foram ensaiados considerando a restrição normal existente entre a superfície de contato dos corpos de prova com os pratos da máquina. Os ensaios mecânicos ocorreram sem o uso de instrumentação, sendo seu único objetivo, a determinação das resistências à compressão dos concretos.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos nas resistências dos diferentes traços de concretos produzidos com agregados graúdos de diferentes dimensões máximas características.

### 4.1 Ensaio à Tração por Compressão Diametral

As resistências à tração indireta por compressão diametral obtidas dos corpos de prova cilíndricos para o grupo de controle moldados pelo método brasileiro (referenciado como “I”) e para os CPs moldados e curados na direção horizontal (II) são apresentados na Tabela 10 para o concreto C0.

Tabela 10 – Ensaio à tração por compressão diametral do concreto C0

<b>Corpo de Prova</b>	<b>I (MPa)</b>	<b>II (MPa)</b>
<b>1</b>	5,28	3,80
<b>2</b>	5,02	3,43
<b>3</b>	4,86	3,68
<b>4</b>	4,95	3,40
<b>5</b>	5,04	4,07
<b>Média (MPa)</b>	<b>5,03</b>	<b>3,68</b>
<b>Varição face II em relação a I</b>	<b>- 26,84%</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,16</b>	<b>0,28</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>3,14</b>	<b>7,54</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

A Figura 37 mostra os corpos de prova do concreto C0 após serem ensaiados à tração indireta. Pela imagem é possível observar os modos de ruptura do concreto.

Figura 37 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C0 – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

Na Tabela 11 estão apresentadas as resistências obtidas para o concreto C1.

Tabela 11 – Ensaio à tração por compressão diametral do concreto C1

Corpo de Prova	I (MPa)	II (MPa)
1	3,49	2,90
2	4,52	2,84

<b>3</b>	3,07	2,67
<b>4</b>	4,77	3,21
<b>5</b>	4,71	2,97
<b>Média (MPa)</b>	<b>4,11</b>	<b>2,92</b>
<b>Varição face II em relação a I</b>	<b>- 28,95%</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,78</b>	<b>0,20</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>18,90</b>	<b>6,81</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

A Figura 38 possibilita a observação do modo de falhas do concreto C1 submetido à tração indireta.

Figura 38 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C1 – (a), (b) e (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração própria (2020).

Os valores obtidos para o concreto C2 estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Ensaio à tração por compressão diametral do concreto C2.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>⊥ (MPa)</b>	<b>∥ (MPa)</b>
<b>1</b>	3,15	2,75
<b>2</b>	2,67	2,68
<b>3</b>	4,16	2,87
<b>4</b>	3,35	2,78
<b>5</b>	2,85	2,30
<b>Média (MPa)</b>	<b>3,24</b>	<b>2,68</b>
<b>Variação face ∥ em relação a ⊥</b>	<b>- 17,28%</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,58</b>	<b>0,22</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>17,86</b>	<b>8,17</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

A configuração dos modos de ruptura dos elementos de concreto C2 pode ser visualizada na Figura 39.

Figura 39 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C2 – (a), (b) e (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração própria (2020).

A Tabela 10 apresenta os resultados para os CPs cilíndricos moldados e adensados com inclinação de  $45^\circ$  em relação à superfície de apoio e, curados na direção horizontal. Estes corpos de prova estão referenciados na tabela como “//”. Os corpos

de prova convencionais estão denominados “Padrão”. Importante dizer que após a cura na posição horizontal do concreto, não foram identificadas as faces dos corpos de prova de acordo com sua direção de cura, ou seja, não se sabe, se ao serem ensaiados, os corpos de prova receberam carregamento perpendicular ou paralelo à sua cura.

Tabela 13 – Ensaio à tração por compressão diametral: caso adicional concreto C1.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>// (MPa)</b>	<b>Padrão (MPa)</b>
<b>1</b>	3,33	3,49
<b>2</b>	3,74	4,52
<b>3</b>	3,47	3,07
<b>4</b>	3,49	4,77
<b>5</b>	2,72	4,71
<b>Média (MPa)</b>	<b>3,35</b>	<b>4,11</b>
<b>// x Padrão</b>	<b>- 18,49%</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,38</b>	<b>0,78</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>11,39</b>	<b>18,90</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

Os modos de falhas do concreto C1 adicional podem ser visualizados na Figura 40.

Figura 40 – Ruptura à tração por compressão diametral no concreto C1 adicional – (a) e (b)



(a)

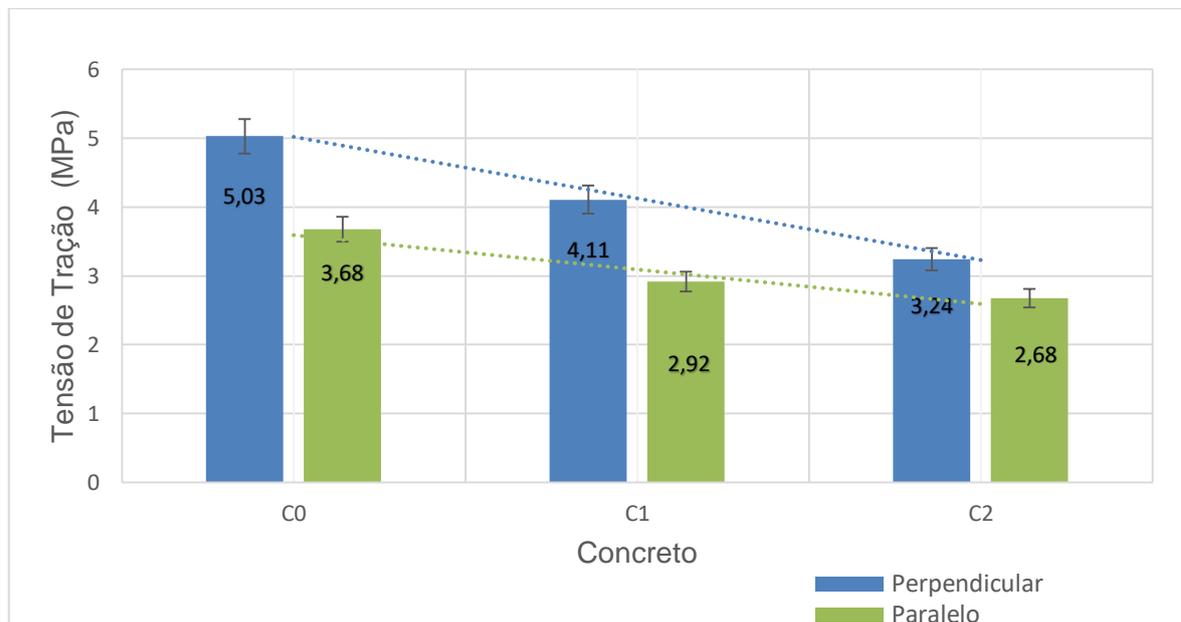


(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

A partir dos dados obtidos através do ensaio de tração por compressão diametral, pode-se produzir o Gráfico 6, que representa as resistências para os concretos C0, C1 e C2 conforme a direção de carregamento. Neste gráfico não estão presentes os valores obtidos para o concreto C1 adicional.

Gráfico 6 – Resistência média dos concretos de acordo com a direção do carregamento em relação à moldagem – tração



Fonte: Elaboração própria (2021).

No Gráfico 6 é possível observar que as resistências dos concretos diminuem à medida em que o diâmetro máximo do agregado (DMC) é aumentado. Este efeito é observado tanto para os corpos de prova ensaiados na face perpendicular como nos CPs ensaiados na face paralela. Quando analisadas as variações entre os concretos, obtêm-se uma variação máxima que chega à uma diminuição de até 21,16% para o caso dos concretos C1 x C2, ensaiados nas suas faces perpendiculares. A variação mínima também ocorre entre os concretos C1 x C2, porém nas suas faces paralelas, chegando à uma diminuição de 8,22% na resistência à tração indireta.

Ainda, analisando o Gráfico 6 e correlacionando com os valores apresentados anteriormente, observa-se para todos os concretos, uma variação nas resistências das amostras moldadas e ensaiadas na direção horizontal (Paralelo) em relação as resistências das amostras moldadas na vertical e ensaiadas na horizontal (Perpendicular). Esta variação chega a um valor máximo de até 26,84% de diminuição da resistência  $\parallel$  em relação a  $\perp$ , caso do concreto C0. Essa diminuição na resistência à tração indireta é esperada, pois sabe-se que as fissuras predominantes em CPs moldados verticalmente, são contidas em planos submetidos a baixas tensões normais quando ensaiados à tração por compressão diametral. No caso das amostras moldadas e ensaiadas no plano horizontal, as fissuras horizontais predominantes podem estar dispostas no plano vertical durante o ensaio, causando redução na resistência à tração.

A indicação da possível ocorrência do efeito da anisotropia também é observada através da análise dos modos de ruptura das amostras. Observando as imagens, conclui-se que as rupturas ocorrem principalmente na interface agregado x pasta hidratada, e isso pode ser visto com mais intensidade no concreto C2. Como esperado, quanto maior a dimensão do agregado, maior é a relação a/c na zona de transição. Neste caso, as falhas ocorreriam nas zonas de transição presentes nessas interfaces. Ainda, entende-se que quanto maior o agregado, maior será a água livre para a formação das zonas porosas nas interfaces dos agregados com a pasta. Quando o agregado é menor, no caso da mistura produzida com brita 0, mais água será necessária para molhar a superfície dos mesmos, “sobrando” menor quantidade de água livre. Também, observa-se que para os agregados maiores o efeito anisotrópico é menor, sendo esse fenômeno explicado pela alta quantidade de zona de interface, influenciando de maneira menos intensa que para os outros dois traços.

Pelo Gráfico 6 observa-se que as diferenças nas variações de resistência  $\parallel$  diminuem em relação a  $\perp$  a medida em que a dimensão máxima característica (DMC) do agregado aumenta. Isto, no entanto, não é o suficiente para concluir que o aumento na DMC do agregado influencie o grau de anisotropia. Vale destacar que o coeficiente de variação nos concretos C1 e C2 para o grupo de controle são de 18,90% e 17,86%, respectivamente, caracterizando as amostras como de média dispersão. Para o concreto C0 o coeficiente de variação para o grupo de controle é de 3,14%, dentro da faixa de amostras homogêneas, assim como os concretos de estudo na face  $\parallel$ .

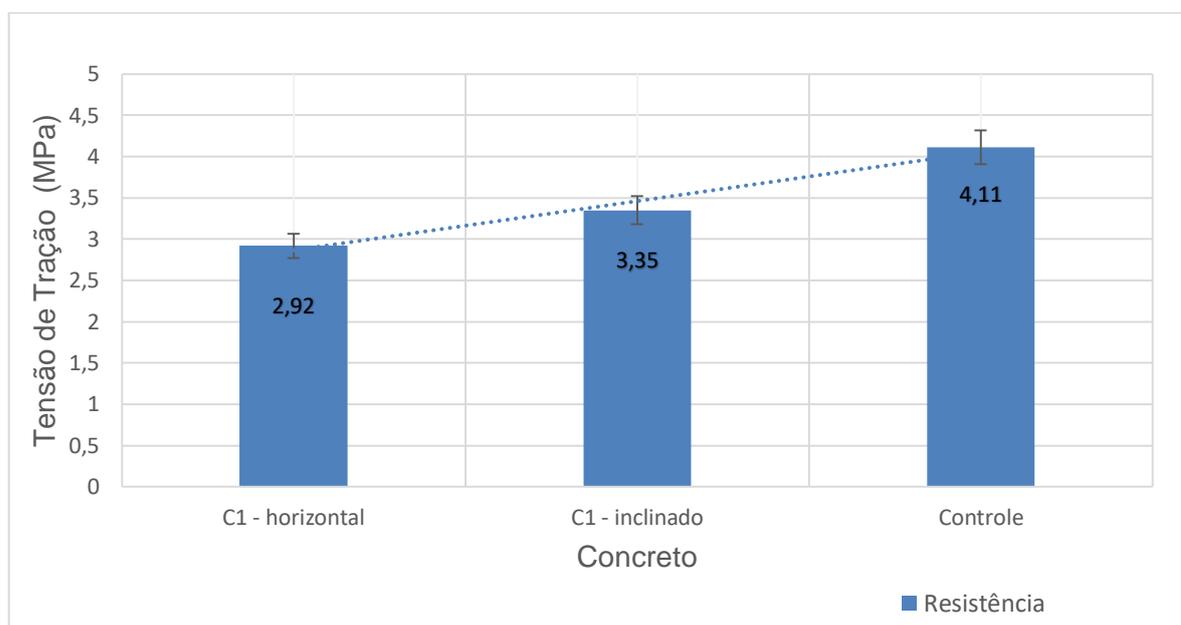
Os resultados obtidos foram lançados, individualmente para cada concreto, no programa computacional chamado PAST. Análises estatísticas das variâncias (ANOVA) e comparações múltiplas de médias pelo Método Tukey ou quando adequado, pelo Método de Kruskal-Wallis, com nível de confiança de 95% foram realizadas para os concretos C0, C1 e C2, entre suas faces paralelas e perpendiculares. As análises apontaram significância (valor-p < 0,05) entre os valores encontrados para os concretos C0 e C1. Os valores-p encontrados para os concretos foram de 1,233E-05 e 0,01053 para o concreto C0 e C1, respectivamente. Para o concreto C2, o valor-p encontrado foi de 0,0782.

Realizando análises estatísticas entre as faces perpendiculares dos concretos, o Método Tukey apontou significância entre os valores dos concretos C0 e C2, com um valor-p de 0,0008424. Nas faces paralelas, foi apontado significância entre os valores de C0 x C1 e C0 x C2, com valores-p entre eles de 0,0006888 e 5,633E-05,

respectivamente. Essas análises confirmam que a dimensão máxima do agregado pode influenciar nas resistências dos concretos de maneira significativa.

Semelhante ao caso do C2, as análises estatísticas apontaram que não ocorreu variação significativa entre os valores encontrados no caso do concreto C1 adicional. Apesar disso, pode-se comparar seus resultados (C1-inclinado) com os do concreto C1 (C1-horizontal). O Gráfico 7 representa os valores obtidos para cada concreto.

Gráfico 7 – Resistência média dos concretos C1 e C1 adicional – tração



Fonte: Elaboração própria (2021).

Por observação do Gráfico 7 e análise dos dados obtidos observa-se que ao mudar a forma como se preenche o molde de PVC (C1-inclinado) a resistência à tração média obtida se aproximou da resistência média do grupo controle para o concreto C1. Conseqüentemente, a variação que no concreto C1-horizontal, moldado, curado e ensaiado na direção paralela, era de -28,95%, passou a ser de -18,49%, representando uma variação de resistência de 36,13%. Essa variação pode ser considerada um indicativo de que o grau de anisotropia do concreto possa ser fortemente influenciado pela forma e direção de moldagem. Apesar disso, a análise estatística das variâncias (ANOVA) e comparações múltiplas de médias pelo Método Tukey dos dados obtidos para o C1-inclinado e C1-horizontal aponta para uma não significância entre seus valores, apresentando um valor-p igual a 0,05483.

Mais dados referentes às análises estatísticas usando o software PAST para todos os concretos podem ser encontrados no Anexo A deste trabalho.

## 4.2 Ensaio à Compressão Axial

Este item trata dos resultados obtidos através do ensaio à compressão axial em corpos de prova no formato cilíndrico e no formato cúbico.

### 4.2.1 Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cilíndricos

Os valores apresentados na Tabela 10 são referentes as resistências obtidas nos corpos cilíndricos para o concreto C0 nas faces perpendiculares (⊥) e paralelas (||).

Tabela 14 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C0.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>⊥ (MPa)</b>	<b>   (MPa)</b>
<b>1</b>	34,55	49,09
<b>2</b>	19,33	46,65
<b>3</b>	27,32	45,16
<b>4</b>	30,90	45,98
<b>5</b>	36,12	46,79
<b>Média (MPa)</b>	<b>32,22</b>	<b>46,74</b>
<b>Varição face ⊥ em relação a   </b>	<b>- 31,06%</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,93</b>	<b>1,47</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>12,20</b>	<b>3,14</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

Na Figura 41 é possível observar os modos de falha nos corpos cilíndricos do concreto C0, nas quais, quase não se observam à olho nu fissuras geradas durante suas rupturas.

Figura 41 – Ruptura à compressão axial no concreto C0, fissuras colunares sem formação de cones – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

Na Tabela 15 estão apresentadas as resistências obtidas nos corpos cilíndricos para o concreto C1.

Tabela 15 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C1.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>I (MPa)</b>	<b>II (MPa)</b>
<b>1</b>	32,43	32,47
<b>2</b>	24,96	41,96
<b>3</b>	24,41	28,52
<b>4</b>	24,79	44,29
<b>5</b>	26,23	43,75
<b>Média (MPa)</b>	<b>26,56</b>	<b>40,62</b>
<b>Varição face I em relação a II</b>	<b>- 34,61%</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,35</b>	<b>5,52</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>12,61</b>	<b>13,60</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

Os modos de falhas dos CPs do concreto C1 podem ser visualizados na Figura 42.

Figura 42 – Ruptura à compressão no concreto C1, fissuras colunares com formação de cones – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

A Tabela 10 apresenta as resistências obtidas nos corpos cilíndricos para o concreto C2. Os corpos de prova após o ensaio e a configuração dos seus modos de ruptura podem ser vistos através da

Figura 43.

Tabela 16 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C2.

Corpo de Prova	I (MPa)	II (MPa)
1	27,77	29,32

<b>2</b>	<b>34,23</b>	<b>24,85</b>
<b>3</b>	<b>24,05</b>	<b>38,64</b>
<b>4</b>	<b>21,38</b>	<b>31,11</b>
<b>5</b>	<b>32,51</b>	<b>26,46</b>
<b>Média (MPa)</b>	<b>27,99</b>	<b>30,07</b>
<b>Varição face I em relação a II</b>	<b>- 6,92%</b>	
<b>Desvio Padrão</b>	<b>5,45</b>	<b>5,37</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>19,46</b>	<b>17,86</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

Figura 43 – Ruptura à compressão no concreto C2, fissuras colunares com formação de cones – (a) e (b)



(a)



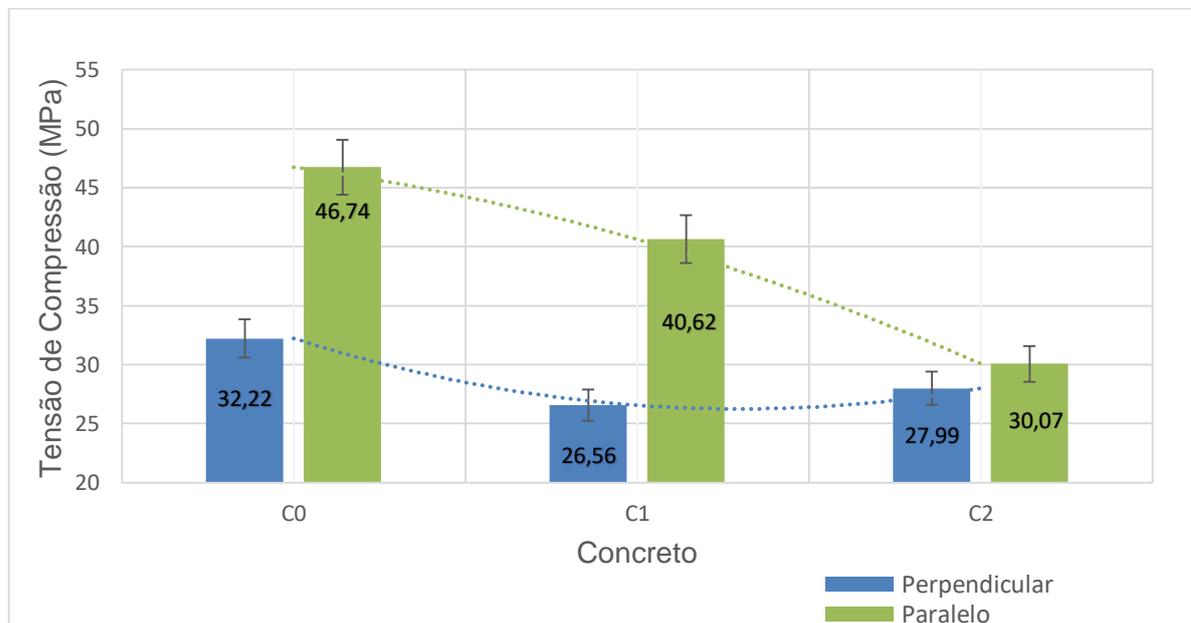
(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

De acordo com a Tabela 14 as amostras dos concretos C0 apresentam coeficiente de variação (CV) igual a 12,20 % para a face  $\perp$  e 3,14 % para a face  $\parallel$ . Apesar da diferença entre as faces, ambas as amostras podem ser consideradas de baixa dispersão ou homogêneas. Para o concreto C1, segundo a Tabela 15 as amostras também podem ser consideradas como sendo homogêneas, pois apresentam CV na face perpendicular igual a 12,61 % e na face paralela igual a 13,60 %. Para o concreto C2, as amostras podem ser consideradas como sendo de média dispersão, pois segundo a Tabela 16 seu CV na face  $\perp$  é igual a 19,46 % e na face  $\parallel$  é igual a 17,86 %.

Com as resistências obtidas para os concretos de estudo, pode-se gerar o Gráfico 8.

Gráfico 8 – Resistência média dos concretos de acordo com a direção do carregamento em relação à moldagem – CPs cilíndricos



Fonte: Elaboração própria (2021).

Analisando o Gráfico 8, observa-se que as resistências obtidas são influenciadas pela dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo. À medida em que a DMC do agregado graúdo aumenta, as resistências diminuem, chegando à uma variação máxima entre os concretos C1 x C2, ensaiados nas faces paralelas, com

uma diminuição de resistência de 25,97%. A queda nas resistências pode ser visualizada para todos os concretos, em todas as faces, exceto para o caso C1 x C2 ensaiados nas suas faces perpendiculares, em que são obtidos valores bem próximos uns dos outros, com o concreto C2 apresentando um valor ligeiramente superior ao do C1. Em porcentagem, esse aumento representa 5,38%. Uma possível causa para esta ocorrência pode ser pelo fato dos corpos de prova C2 terem diâmetro de 100 mm e o agregado ter DMC de 25 mm. O efeito parede e o diâmetro da amostra podem não serem adequados, afetando a resistência do concreto durante o ensaio mecânico.

No Gráfico 8, ainda é possível observar a ocorrência do fenômeno da anisotropia nos concretos C0, C1 e C2. Em todos os casos, as resistências médias à compressão axial obtidas na face perpendicular (⊥) se apresentaram menores quando comparadas as resistências obtidas na face paralela (∥) dos corpos de prova. Essa variação entre as resistências representa uma diminuição de 31,06% para o concreto C0, 34,61% para o concreto C1 e 6,92% para o concreto C2.

Realizando análises estatísticas das variâncias (ANOVA) e comparações múltiplas de médias pelo Método Tukey ou quando adequado, pelo Método de Kruskal-Wallis, com nível de confiança de 95% para os concretos C0, C1 e C2, nas suas faces perpendiculares e paralelas, os resultados apontaram significância entre os valores encontrados para os concretos C0 e C1. Para o C0 o valor-p encontrado foi de 0,0005256 (faces ⊥ x ∥) e para o concreto C1 foi de 0,01629 (faces ⊥ x ∥). Mais dados referentes às análises estatísticas usando o software PAST podem ser encontrados no Anexo B deste estudo.

Ainda, através do Gráfico 8 observa-se que o grau de anisotropia do concreto aumenta quando o agregado graúdo passa de brita 0 (C0) para brita 1 (C1), ou seja, quando o diâmetro do agregado é maior. Isto já é esperado, visto que agregados maiores tendem a apresentar aumento da relação a/c nas zonas de transição da interface agregado x pasta hidratada, acarretando na diminuição da resistência do concreto.

Por outro lado, quando o agregado graúdo passa de brita 1 (C1) para brita 2 (C2) a resistência média do concreto C2 na face ⊥ se apresenta relativamente maior do que a resistência média do concreto C1 na mesma face. A variação da resistência na face ⊥ em relação a face ∥ que antes era -34,61% passa a ser de -6,92%.

Considerando que todos os CPs submetidos ao carregamento na face ∥ (método convencional) foram concretados, moldados e ensaiados nos mesmos dias, sob

condições ambientais e metodologias semelhantes, e analisando o que já foi mencionado anteriormente a respeito de seus coeficientes de variação, as amostras do concreto C0, C1 e C2 apresentam significativa diferença entre seus coeficientes de variação, 3,14%, 13,60% e 17,86, respectivamente, o que pode ser um indicativo de erros no momento da execução dos ensaios mecânicos.

#### 4.2.2 Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cúbicos

Os resultados obtidos para os corpos cúbicos do concreto C0 submetidos à compressão axial estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C0.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>I (MPa)</b>	<b>II (MPa)</b>	<b>Controle (MPa)</b>
<b>1</b>	44,21	<del>28,27</del>	49,09
<b>2</b>	48,37	45,90	46,65
<b>3</b>	52,32	48,07	45,16
<b>4</b>	45,95	35,91	45,98
<b>5</b>	50,26	38,90	46,79
<b>Média (MPa)</b>	<b>48,22</b>	<b>42,20</b>	<b>46,74</b>
<b>Varição face I em relação a II</b>	<b>14,26%</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,25</b>	<b>5,73</b>	<b>1,47</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>6,74</b>	<b>13,58</b>	<b>3,14</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

Os corpos cúbicos do concreto C0 após serem submetidos à compressão axial na face perpendicular (I) estão mostrados na Figura 44.

Figura 44 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C0L, fissuras verticais – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

A Figura 45 é a imagem dos CPs cúbicos C0 submetidos a um carregamento de compressão axial na face paralela (II).

Figura 45 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C0II, fissuras verticais – (a) e (b)



(a)

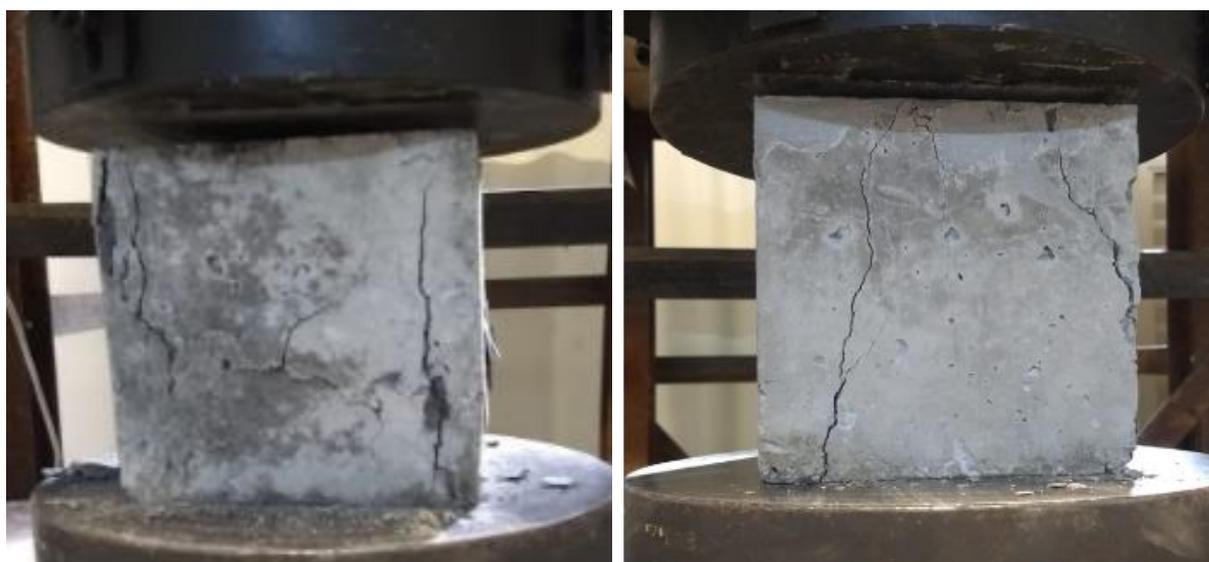


(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

A Figura 46 mostra corpos de prova cúbicos C0 submetidos à compressão axial nas faces I e II.

Figura 46 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto – (a) C0I; (b) C0II



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

Os valores obtidos para o ensaio à compressão axial nos CPs cúbicos C1 estão na Tabela 18.

Tabela 18 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C1.

Corpo de Prova	I (MPa)	II (MPa)	Controle (MPa)
1	48,68	31,28	32,47
2	47,48	46,39	41,96
3	50,68	43,65	<del>28,52</del>
4	52,32	41,56	44,29
5	45,28	45,60	43,75
<b>Média (MPa)</b>	<b>48,89</b>	<b>44,30</b>	<b>40,62</b>
<b>Varição face I em relação a II</b>	<b>10,36%</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,74</b>	<b>2,16</b>	<b>5,52</b>

<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>5,60</b>	<b>4,87</b>	<b>13,60</b>
-----------------------------	-------------	-------------	--------------

Fonte: Elaboração própria (2021).

Os corpos cúbicos do concreto C1 ensaiados à compressão axial na face perpendicular ( $\perp$ ) estão mostrados na Figura 47.

Figura 47 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C1 $\perp$ , fissuras verticais com formação de cones – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

Pela Figura 48 observa-se a configuração dos modos de falha dos CPs cúbicos C1 submetidos a um carregamento de compressão axial na face paralela (II).

Figura 48 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C1II, fissuras verticais – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

A Figura 49 mostra corpos de prova cúbicos do concreto C1 submetidos à compressão axial nas faces  $\perp$  e  $\parallel$ .

Figura 49 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto – (a) C1 $\perp$ ; (b) C1 $\parallel$



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

Os resultados do ensaio à compressão axial nos corpos de prova cúbicos do concreto C2 estão na Tabela 19.

Tabela 19 – Ensaio de Compressão Axial: concreto C2.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>I (MPa)</b>	<b>II (MPa)</b>	<b>Controle (MPa)</b>
<b>1</b>	46,46	38,82	29,32
<b>2</b>	49,14	46,05	24,85
<b>3</b>	46,13	43,87	38,64
<b>4</b>	47,57	41,76	31,11
<b>5</b>	42,44	40,84	26,46
<b>Média (MPa)</b>	<b>46,35</b>	<b>42,27</b>	<b>30,07</b>
<b>Variação face I em relação a II</b>	<b>9,65%</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,48</b>	<b>2,78</b>	<b>5,37</b>
<b>Coef.de Variação (%)</b>	<b>5,35</b>	<b>6,59</b>	<b>17,86</b>

Fonte: Elaboração própria (2021).

Na Figura 50 é possível observar os CPs cúbicos do concreto C2 ensaiados à compressão axial na face perpendicular (I).

Figura 50 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C2L, fissuras verticais com formação de cones – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

A Figura 51 CPs mostra os corpos de prova cúbicos C2 submetidos a um carregamento de compressão axial na face paralela (II).

Figura 51 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto C2II, fissuras verticais – (a) e (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2020).

Pela Figura 52 observa-se corpos de prova cúbicos do concreto C2 submetidos à compressão axial nas faces  $\perp$  e  $\parallel$ .

Figura 52 – Ruptura à compressão dos CPs cúbicos de concreto – (a) C2 $\perp$ ; (b) C2 $\parallel$



(a)

(b)

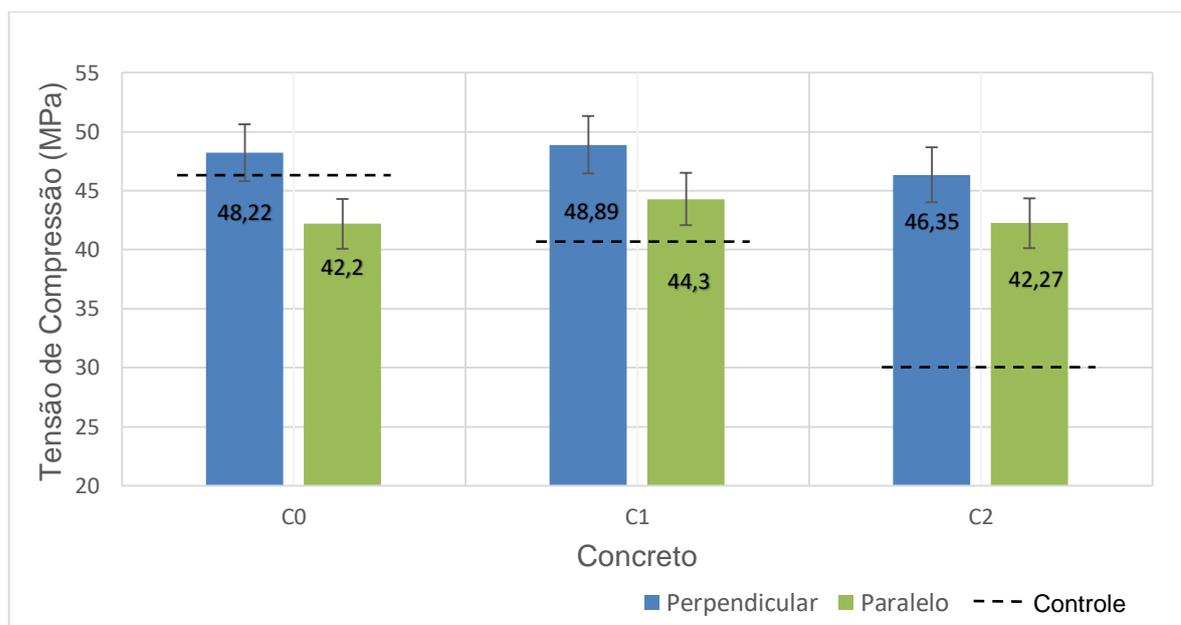
Fonte: Elaboração própria (2020).

Analisando as tabelas anteriores (Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19), observa-se que as amostras dos concretos C0, C1 e C2 podem ser consideradas como sendo de baixa dispersão, ficando os coeficientes de variação (CV) das resistências dos concretos entre 4,87 e 6,74 %, com exceção do concreto C0 II que chegou a 13,58 %, mas ainda podendo ser consideradas como homogêneas. De modo geral, ao contrário das amostras cilíndricas submetidas a um carregamento de compressão axial, as amostras cúbicas submetidas ao mesmo tipo de carregamento apresentaram valores de resistência mais homogêneos.

Análises estatísticas das variâncias (ANOVA) e comparações múltiplas de médias pelo Método Tukey ou quando adequado, pelo Método de Kruskal-Wallis, com nível de confiança de 95% foram realizadas para os concretos C0, C1 e C2, nas suas faces paralelas e perpendiculares. Os resultados apontaram significância entre os valores encontrados para as faces  $\perp$  x  $\parallel$  dos concretos C1 e C2. Para o concreto C1, o valor-p encontrado é de 0,01123 e para o concreto C2 é igual a 0,04023. Outros dados referentes às análises estatísticas usando o software PAST podem ser encontrados no Anexo C deste trabalho.

Com os valores obtidos através dos ensaios à compressão axial nos corpos de prova cúbicos pode-se criar o Gráfico 9 para melhor visualização e análise dos resultados.

Gráfico 9 – Resistência média dos concretos de acordo com a direção do carregamento em relação à moldagem – CPs cúbicos



Fonte: Elaboração própria (2021).

Ao contrário do esperado, o Gráfico 9 mostra um aumento da resistência média de compressão na face perpendicular ( $\perp$ ) em relação a face paralela ( $\parallel$ ), e isto ocorre para todos os concretos. Analisando este gráfico e correlacionando com as figuras dos corpos de prova após a ruptura (Figura 44 a Figura 52) acredita-se que isto tenha ocorrido devido ao maior atrito na interface pratos da máquina x faces do corpo de prova, o que acarretou em “falsos” resultados de resistências dos concretos submetidos ao carregamento na face  $\perp$ . No caso dos corpos de prova cilíndricos, a relação altura/diâmetro é de 2, enquanto para as amostras cúbicas esse valor é de 1. Como já mencionado, apenas os corpos de prova submetidos ao carregamento na face  $\parallel$  foram capeados em apenas uma das suas faces que foram colocadas em contato com a máquina. Esse capeamento pode ter influenciado nos resultados, sendo o ponto frágil para o início e evolução da fissuração.

Apesar dos resultados inesperados, também é possível observar no Gráfico 9 que a medida em que a dimensão do agregado graúdo é aumentada, sua resistência

obtida na face perpendicular diminui, se aproximando da resistência obtida na face paralela. Essa variação da face I em relação a face II para o concreto C0, C1 e C2 representa uma diferença de 14,26%, 10,36% e 9,65%, respectivamente, o que pode indicar que a resistência à compressão do concreto também está sendo influenciada pela dimensão máxima do agregado graúdo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de corpos de prova cilíndricos e cúbicos produzidos em concreto de mesmo traço, variando a dimensão máxima do agregado graúdo e a direção de aplicação do carregamento em relação ao lançamento do concreto no momento da moldagem.

Os resultados obtidos, levaram à conclusão de que:

- Fissuras predominantes em corpos de prova moldados verticalmente são contidas em planos submetidos a baixas tensões normais quando ensaiados à tração por compressão diametral. Em amostras moldadas e ensaiadas no plano horizontal ocorrem fissuras horizontais predominantes, podendo estas, estarem dispostas no plano vertical durante o ensaio, causando assim, redução na resistência à tração indireta;
- No ensaio à tração por compressão diametral ficou claro a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo (DMC) na resistência do concreto, quando ao aumentar o DMC, ocorreu uma diminuição das resistências, chegando a uma variação de até 21,16% para os concretos C1 x C2.
- O grau de anisotropia do concreto pode ser influenciado pela forma e direção de moldagem. Ao mudar a direção de preenchimento de um molde de PVC (C1-inclinado) a resistência à tração média obtida se aproximou da resistência média do grupo controle para o mesmo concreto (C1), porém ainda apresentou uma alta variação, sendo está cerca de 36,13% menor.
- Dos ensaios à compressão axial em corpos de prova cilíndricos, observa-se uma diminuição nas resistências ao aumentar o diâmetro do agregado graúdo. Essa variação chega a até 25,97% entre os concretos produzidos com brita 1 (C1) e brita 2 (C2). O efeito da anisotropia do concreto ocorre ao se obter resistências menores nas faces perpendiculares em relação às faces paralelas à direção de moldagem e adensamento do concreto. Essa queda nas resistências chega à 34,61% para o concreto C2.
- O grau de anisotropia do concreto aparentemente foi influenciado pelo tamanho do agregado graúdo, acarretando na diminuição da resistência

à compressão do concreto. A intensidade desta diminuição não pôde ser determinada visto que, de maneira geral, as amostras desta pesquisa se apresentaram com um certo grau de variabilidade entre si.

- Dos ensaios à compressão axial em corpos de prova cúbicos, observa-se que a medida em que a dimensão do agregado graúdo é aumentada, a resistência obtida na face perpendicular diminui. Essa variação da face  $\perp$  em relação a face  $\parallel$  para o concreto C0, C1 e C2 representa uma diferença de 14,26%, 10,36% e 9,65%, respectivamente, o que pode indicar que a resistência à compressão do concreto é influenciada pela dimensão máxima do agregado graúdo.

Fica como sugestões para futuros trabalhos de pesquisa:

- Para facilitar o preenchimento e compactação no molde em PVC, fazer uma única abertura em formato retangular que se estende entre as extremidades do tubo;
- Utilizar corpos de prova que tenham uma maior relação altura/diâmetro ou de lado, sendo essa relação de no mínimo igual a 2;
- Realizar este estudo em concretos com maior relação a/c.

## REFERÊNCIAS

AL-ORAIMI, S.K.; TAHA, R.; HASSAN, H. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 7, p. 499–503, 2006.

ALHADAS, M. F. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO DE DIFERENTES ORIGENS MINERALÓGICAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**. [s.l.] Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 27**: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5738 versão corrigida 2016**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

BANDEIRA, M. V. V. **Análise da variação da resistência à compressão axial do concreto com a direção da aplicação de carregamento e com as condições de contorno**. Alegrete. Universidade Federal do Pampa, 2017.

BAUER, L. A. F. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**. Volume 1. 5ª ed. Rio de Janeiro. LTC, 2008.

CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications. In: NOYES (Ed.). Norwich, New York, USA: [s.n.]. p. 429.

EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. São Paulo. EESC - USP, 2000.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio Não Destrutivos**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

FORMAGINI, S. Parte 1. In: **DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO**. [s.l.] UNIDERP, 2013. p. 58.

FUSCO, P. B. Mecanismos resistentes do concreto simples. In: **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995. p. 85–101.

GONÇALVES, J.P.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E. M. . Study of the hydration of Portland cement pastes containing ceramic waste by thermal analysis. **Ambiente Construído**, v. 6, n.4, n. 4, p. 83–94, 2006.

HANSEN, S. G.; LAURIDSEN, J. T.; HOANG, L. Experimental and statistical investigation of the compressive strength anisotropy in structural concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 107, n. Fevereiro, p. 304–316, 2018.

KANG, W.T.;BITTENCOURT, T. **Identificação de Processos de Fraturamento no Concreto Estrutural**. São Paulo. Caderno de Engenharia da Escola de Engenharia de São Carlos, 1999.

KOSTESKI, L.E.; MARANGON, E.; RIERA, J. Assessment of concrete anisotropy by means of compression and indirect tensile tests. **REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS**, v. 12, n. 5, p. 1148–1156, out. 2019.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. **Construções de Concreto**, Vol. 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. 2ª reimpressão. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J. **CONCRETO**. Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

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

NEVILLE, A. **Tecnologia do Concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: bookman, 2015.

NUNES, F. W. **Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

PETRUCCI, E. G. Hidratação do cimento. In: **CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998. p. 12–16.

ROSSIGNOLO, J. **Concreto Leve Estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: PINI, 2009.

SILVA, D. DE A.; GEYER, L. B. Influência da Forma do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 05, n. 12, p. 67–82, 2018.

VAN MIER, J. B. M. **Strain-softening of Concrete under Multiaxial Loading Conditions**. Eindhoven . Universidade de Tecnologia de Eindhoven, 1984.

VIDIGAL, I.A.; JARDIM, R.R.; DUÓ, D.;MARANGON, E.;KOSTESKI, L. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO NA ANISOTROPIA DO CONCRETO. v. 52, n. 2002, p. 6–10, nov. 2018.

VISHALAKSHI, K.P.; REVATHI, V.; REDDY, S. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 194, n. February, p. 52–60, 2018.

## ANEXOS

### Anexo A – Análises Estatísticas para Resultados de Ensaio à Tração por Compressão Diametral

#### Concreto C0 – face perpendicular x face paralela

#### ANOVA

##### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	4,58329	1	4,58329	90,46	1,232E-05
Within groups:	0,40532	8	0,050665		Permutation p (n=99999)
Total:	4,98861	9			0,00782

##### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,906525	Var(error):	0,050665	ICC:	0,947069
-------------	----------	-------------	----------	------	----------

*omega*<sup>2</sup>: 0,8995

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0,2351
Levene's test, from medians	p (same):	0,237

Welch F test in the case of unequal variances:  $F=90,46$ ,  $df=6,316$ ,  $p=5,656E-05$

#### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralelo
Perpendicular		1,233E-05
Paralelo	13,45	

## Concreto C1 – face perpendicular x face paralela

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
<b>Between groups:</b>	3,56409	1	3,56409	11,03	0,01053
<b>Within groups:</b>	2,58556	8	0,323195		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
<b>Total:</b>	6,14965	9			0,01602

#### Components of variance (only for random effects):

**Var(group):** 0,648179      **Var(error):** 0,323195      **ICC:** 0,667281

*omega*<sup>2</sup>: 0,5007

**Levene's test for homogeneity of variance, from means**      *p* (same): 0,002011

**Levene's test, from medians**      *p* (same): 0,153

**Welch *F* test in the case of unequal variances:** *F*=11,03, *df*=4,511, *p*=0,0245

### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralelo
Perpendicular		0,01053
Paralelo	4,696	

## Concreto C2 – face perpendicular x face paralela

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
Between groups:	0,784	1	0,784	4,076	0,0782
Within groups:	1,53884	8	0,192355		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
Total:	2,32284	9			0,07889

#### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,118329	Var(error):	0,192355	ICC:	0,380866
-------------	----------	-------------	----------	------	----------

*omega*<sup>2</sup>: 0,2352

Levene's test for homogeneity of variance, from means *p* (same): 0,1534

Levene's test, from medians *p* (same): 0,202

Welch *F* test in the case of unequal variances:  $F=4,076$ ,  $df=5,139$ ,  $p=0,09798$

### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralelo
Perpendicular		0,0782
Paralelo	2,855	

## Concreto C0 x C1 x C2 – faces perpendiculares

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
Between groups:	8,04756	2	4,02378	12,47	0,001174
Within groups:	3,8712	12	0,3226		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
Total:	11,9188	14			0,00409

#### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,740236	Var(error):	0,3226	ICC:	0,696472
<i>omega</i> <sup>2</sup> :	0,6047				

Levene's test for homogeneity of variance, from means	<i>p</i> (same):	0,01273
Levene's test, from medians	<i>p</i> (same):	0,2388

Welch *F* test in the case of unequal variances:  $F=22,31$ ,  $df=5,885$ ,  $p=0,001789$

### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	C0 perp	C1 perp	C2 perp
C0 perp		0,06086	0,0008424
C1 perp	3,614		0,07451
C2 perp	7,063	3,449	

## Concreto C0 x C1 x C2 – faces paralelas

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
Between groups:	2,72188	2	1,36094	24,8	5,465E-05
Within groups:	0,65852	12	0,0548767		Permutation <i>p</i> (n=99999)
Total:	3,3804	14			0,00011

#### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,261213	Var(error):	0,0548767	ICC:	0,826389
-------------	----------	-------------	-----------	------	----------

*omega*<sup>2</sup>: 0,7604

Levene's test for homogeneity of variance, from means *p* (same): 0,6975

Levene's test, from medians *p* (same): 0,6948

Welch *F* test in the case of unequal variances: *F*=19,06, *df*=7,864, *p*=0,0009646

### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	C0 paral	C1 paral	C2 paral
C0 paral		0,0006888	5,633E-05
C1 paral	7,235		0,2699
C2 paral	9,545	2,31	

## Concreto C1 Adicional – C1 horizontal x C1 inclinado

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
Between groups:	0,46656	1	0,46656	5,049	0,05483
Within groups:	0,73928	8	0,09241		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
Total:	1,20584	9			0,05563

#### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,07483	Var(error):	0,09241	ICC:	0,447441
-------------	---------	-------------	---------	------	----------

*omega*<sup>2</sup>: 0,2882

Levene's test for homogeneity of variance, from means *p* (same): 0,3518

Levene's test, from medians *p* (same): 0,5132

Welch *F* test in the case of unequal variances: *F*=5,049, *df*=5,995, *p*=0,06575

### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	C1 horizontal	C1 inclinado
C1 horizontal		0,05483
C1 inclinado	3,178	

## Anexo B – Análises Estatísticas para Resultados de Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cilíndricos

### Concreto C0 – face perpendicular x face paralela

#### ANOVA

##### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
<b>Between groups:</b>	730,17	1	730,17	31,08	0,0005256
<b>Within groups:</b>	187,971	8	23,4964		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
<b>Total:</b>	918,142	9			0,00839

##### Components of variance (only for random effects):

<b>Var(group):</b>	141,335	<b>Var(error):</b>	23,4964	<b>ICC:</b>	0,857452
--------------------	---------	--------------------	---------	-------------	----------

*omega*<sup>2</sup>: 0,7505

<b>Levene's test for homogeneity of variance, from means</b>	<b><i>p</i> (same):</b>	0,03966
<b>Levene's test, from medians</b>	<b><i>p</i> (same):</b>	0,08331

**Welch *F* test in the case of unequal variances:** *F*=31,08, *df*=4,383, *p*=0,003856

#### Tukey

Tukey's *Q* below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralela
Perpendicular		0,0005256
Paralela	7,884	

## Concreto C1 – face perpendicular x face paralela

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
<b>Between groups:</b>	338,375	1	338,375	10,68	0,01139
<b>Within groups:</b>	253,445	8	31,6806		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
<b>Total:</b>	591,819	9			0,01565

#### Components of variance (only for random effects):

**Var(group):** 61,3389      **Var(error):** 31,6806      **ICC:** 0,65942

***omega*<sup>2</sup>:** 0,4919

**Levene's test for homogeneity of variance, from means**      ***p* (same):** 0,02172

**Levene's test, from medians**      ***p* (same):** 0,2657

**Welch *F* test in the case of unequal variances:** *F*=10,68, *df*=5,645, *p*=0,01864

### Kruskal-Wallis

#### Kruskal-Wallis test for equal medians

***H* (*chi*<sup>2</sup>):** 5,771

***H<sub>c</sub>* (tie corrected):** 5,771

***p* (same):** 0,01629

There is a significant difference between sample medians

## Concreto C2 – face perpendicular x face paralela

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
<b>Between groups:</b>	10,8994	1	10,8994	0,3726	0,5585
<b>Within groups:</b>	234,001	8	29,2502		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
<b>Total:</b>	244,901	9			0,5547

#### Components of variance (only for random effects):

**Var(group):** -3,67016      **Var(error):** 29,2502      **ICC:** -0,143478

*omega*<sup>2</sup>: 0

**Levene's test for homogeneity of variance, from means**      *p* (same): 0,8062

**Levene's test, from medians**      *p* (same): 0,7791

**Welch *F* test in the case of unequal variances:** *F*=0,3726, *df*=7,998, *p*=0,5585

### Tukey

Tukey's *Q* below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralela
Perpendicular		0,5585
Paralela	0,8633	

## Anexo C – Análises Estatísticas para Resultados de Ensaio à Compressão Axial em Corpos de Prova Cúbicos

### Concreto C0 – face perpendicular x face paralela

#### ANOVA

##### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
Between groups:	194,128	1	194,128	5,248	0,0512
Within groups:	295,952	8	36,9941		Permutation <i>p</i> (n=99999)
Total:	490,081	9			0,04712

##### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	31,4269	Var(error):	36,9941	ICC:	0,459317
-------------	---------	-------------	---------	------	----------

*omega*<sup>2</sup>: 0,2981

Levene's test for homogeneity of variance, from means	<i>p</i> (same):	0,1156
Levene's test, from medians	<i>p</i> (same):	0,1383

Welch *F* test in the case of unequal variances:  $F=5,248$ ,  $df=5,296$ ,  $p=0,06766$

#### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralela
Perpendicular		0,0512
Paralela	3,24	

## Concreto C1 – face perpendicular x face paralela

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
Between groups:	129,312	1	129,312	5,759	0,04319
Within groups:	179,638	8	22,4547		<b>Permutation <i>p</i> (n=99999)</b>
Total:	308,95	9			0,02364

#### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	21,3715	Var(error):	22,4547	ICC:	0,487642
-------------	---------	-------------	---------	------	----------

*omega*<sup>2</sup>: 0,3224

Levene's test for homogeneity of variance, from means *p* (same): 0,2835

Levene's test, from medians *p* (same): 0,4583

Welch *F* test in the case of unequal variances:  $F=5,759$ ,  $df=5,544$ ,  $p=0,05672$

### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.

Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralela
Perpendicular		0,04319
Paralela	3,394	

## Concreto C2 – face perpendicular x face paralela

### ANOVA

#### Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	<i>F</i>	<i>p</i> (same)
Between groups:	41,616	1	41,616	5,98	0,04023
Within groups:	55,677	8	6,95962		Permutation <i>p</i> (n=99999)
Total:	97,293	9			0,03916

#### Components of variance (only for random effects):

Var(group):	6,93128	Var(error):	6,95962	ICC:	0,49898
-------------	---------	-------------	---------	------	---------

*omega*<sup>2</sup>: 0,3324

Levene's test for homogeneity of variance, from means	<i>p</i> (same):	0,6184
Levene's test, from medians	<i>p</i> (same):	0,7012

Welch *F* test in the case of unequal variances: *F*=5,98, *df*=7,895, *p*=0,04062

### Tukey

Tukey's Q below the diagonal, *p*(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

	Perpendicular	Paralela
Perpendicular		0,04023
Paralela	3,458	