

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIELLY PROTASIO MARTINS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE CAPEAMENTO DE CORPOS
DE PROVA DE CONCRETO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL**

CAMPO MOURÃO

2023

MARIELLY PROTASIO MARTINS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE CAPEAMENTO DE CORPOS
DE PROVA DE CONCRETO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL**

**Comparative Study Between Methods of Capping Concrete Specimens for
Axial Compression Tests**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador (a): Dr. Douglas Fukunaga Surco

Coorientador (a): Dr^a. Thelma Pretel Brandão Vecchi

CAMPO MOURÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARIELLY PROTASIO MARTINS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE CAPEAMENTO DE CORPOS
DE PROVA DE CONCRETO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 20 de novembro de 2023

Douglas Fukunaga Surco
Mestre em Métodos numéricos e doutor em engenharia química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Valdomiro Lubachevski Kurta
Mestre em engenharia de produção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adalberto Luiz Rodrigues de Oliveira
Mestre em métodos numéricos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2023

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Eu denomino meu campo de Gestão do Conhecimento, mas você não pode gerenciar conhecimento. Ninguém pode. O que você pode fazer, o que a empresa pode fazer é gerenciar o ambiente que otimize o conhecimento.
(DAVENPORT; PRUSAK, 2012).

RESUMO

O concreto como elemento estrutural apresenta inúmeras características, sendo a resistência à compressão a propriedade mais importante na avaliação do desempenho e também a que mais influencia no dimensionamento. Para a classificação e verificação da qualidade, é realizado o ensaio de resistência à compressão axial, com corpos de prova cilíndricos. Entretanto, os resultados dos ensaios podem sofrer influência de diversos fatores, como o tipo de regularização das faces das amostras, o que requer algum tipo de preparação nas superfícies destas, como o capeamento. O objetivo do presente estudo foi comparar, por meio de experimentos e análise de dados, as resistências de corpos de prova capeados com argamassa de enxofre fundido, desgaste mecânico em retífica, e com almofadas de neoprene confinadas, bem como a possível influência destes métodos nos resultados dos ensaios. Foram confeccionados 20 corpos de prova, com a mesma dosagem e traço. A moldagem, cura e o ensaio de resistência seguiram as orientações das respectivas normas regulamentadoras. A partir do ensaio realizado, observou-se que a resistência obtida nos corpos de prova sem regularização e com capeamento por enxofre foram inferiores à resistência obtida nas demais amostras. Os corpos de prova capeados por meio da retificação e com almofadas de neoprene alcançaram valores de resistência mais satisfatórios, especialmente as amostras com neoprene, que registraram os maiores valores de resistência característica. Analisando os resultados, percebe-se que o tipo de nivelamento dos corpos de prova influencia diretamente na resistência à compressão axial, uma vez que o uso da almofada de neoprene se apresentou como a técnica mais indicada.

Palavras-chave: capeamento; enxofre; neoprene; resistência à compressão.

ABSTRACT

Concrete as a structural element presents numerous characteristics, with compressive strength being the most important property in performance assessment and also the one that most influences the sizing. For classification and quality verification, the axial compressive strength test is performed using cylindrical specimens. However, the test results can be influenced by various factors, such as the type of surface preparation of the samples, which may require some form of surface treatment, such as capping. The objective of this study was to compare, through experiments and data analysis, the strengths of specimens capped with molten sulfur mortar, mechanical wear by grinding, and with confined neoprene pads, as well as the potential influence of these methods on the test results. Twenty specimens were prepared with the same dosage and trace. The molding, curing, and strength testing followed the guidelines of their respective regulatory standards. From the conducted test, it was observed that the strength obtained in the specimens without surface preparation and capped with sulfur was lower compared to the strength obtained in the other samples. The specimens capped through grinding and with neoprene pads achieved more satisfactory strength values, especially the samples with neoprene, which recorded the highest characteristic strength values. Analyzing the results, it is evident that the type of leveling of the test specimens directly influences the axial compressive strength, as the use of neoprene pad emerged as the most recommended technique.

Keywords: capping; sulfur; neoprene; compressive strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Influência da dimensão do agregado e relação água/cimento na resistência do concreto	22
Figura 2 - Aplicação das cargas no ensaio de compressão diametral	29
Figura 3 - Ensaio de tração direta	29
Figura 4 - Influência do teor de agregado no concreto (em volume) sobre a relação entre a retração do concreto e a retração da pasta de cimento pura	30
Figura 5 - Relação entre a retração e o tempo para concretos mantidos em diferentes umidades relativas.	31
Figura 6 - Relação entre a resistência do concreto e sua relação água/cimento	37
Figura 7 - Resistência média do concreto em função da relação a/c com o emprego dos diferentes tipos de cimentos	38
Figura 8 - Influência da relação água/cimento, ar incorporado e consumo de cimento na resistência à compressão do concreto	38
Figura 9 - Molde para corpo de prova cilíndrico	42
Figura 10 - Exemplos de materiais utilizados no capeamento não colado	47
Figura 11 - Capeamento com almofada de neoprene	48
Figura 12 - Base metálica com anel de retenção e almofadas de neoprene confinadas	49
Figura 13 - Ilustração da máquina betoneira estacionária utilizada no preparo do concreto	55
Fotografia 1 - Ensaio de Abatimento de tronco de cone (Slump Test)	25
Fotografia 2 – Argamassa de enxofre fundido	53
Fotografia 3 - Capeador com base metálica e almofadas de neoprene confinadas	54
Fotografia 4 - Retificação com lâmina adiamantada	54
Fotografia 5 - Máquina Retificadora com disco adiamantado fixo e movimentação do corpo de prova em mesa coordenada	55
Fotografia 6 - Prensa eletro-hidráulica com capacidade de carga de 2000 kN	56
Fotografia 7 - Ensaio de consistência pelo abatimento de tronco de cone (slump test)	57
Fotografia 8 - Adensamento mecânico com utilização de mesa vibratória	57
Fotografia 9 - Corpos de prova imersos em tanque de cura úmida	58
Fotografia 10 - Determinação do diâmetro dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro	59
Fotografia 11 - Corpos de prova prontos para o ensaio	60
Fotografia 12 - Retificação com fixação do corpo de prova e com disco rotativo adiamantado móvel	61
Fotografia 13 - Corpo de prova retificado	61
Fotografia 14 - Bases metálicas com talco para facilitar a colocação dos discos	62
Fotografia 15 - Corpo de prova com capeamento de neoprene posicionado na prensa	63
Fotografia 16 - Enxofre em pedra, reutilizado	64

Fotografia 17 - Argamassa de enxofre fundido	64
Fotografia 18 - Prato do capeador untado com óleo	65
Fotografia 19 - Argamassa de enxofre pronta no capeador	65
Fotografia 20 - Corpo de prova com uma das faces mergulhada na argamassa de enxofre	66
Fotografia 21 - Corpo de prova mergulhado na argamassa de enxofre	66
Fotografia 22 - Corpos de prova com capeamento de enxofre	67
Fotografia 23 - Ensaio de compressão em corpo de prova sem capeamento	68
Fotografia 24 - Ensaio de compressão em corpo de prova com capeamento por retífica	68
Fotografia 25 - Ensaio de compressão em corpo de prova com capeamento por almofadas de neoprene	69
Fotografia 26 - Ensaio de compressão em corpo de prova com capeamento de argamassa de enxofre fundido	69
Fotografia 27 - Tipos de ruptura dos corpos de prova após ensaio de compressão	73
Gráfico 1 - Apresentação dos resultados do ensaio de compressão aos 28 dias	74
Gráfico 2 - Apresentação dos resultados do ensaio de compressão aos 28 dias	74
Gráfico 3 - Apresentação dos valores de Desvio Padrão	75
Quadro 1 - Tipos de cimento, sigla e classe de resistência	20
Quadro 2 - Classes de Consistência	25
Quadro 3 - Relação entre as etapas e ensaios experimentais e as normas regulamentadoras	52
Quadro 4 - Fator de correção h/d	59
Quadro 5 - Valores de Ψ_6	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de conformidade para classe de resistência	21
Tabela 2 - Recomendação de consistência de acordo com o tipo de construção	25
Tabela 3 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o granito como agregado)	33
Tabela 4 - Classes de resistência de concretos estruturais	35
Tabela 5 - Condições para o uso da almofada de neoprene	49
Tabela 6 - Idades do ensaio de compressão e suas tolerâncias permitidas	67
Tabela 7 - Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão axial	71
Tabela 8 - Valores obtidos de f_{ck} e S.d.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society For Testing and Materials
Cm	Centímetros
CMN	Comitê Mercosul de Normalização
CP	Cimento Portland
kN	quilonewton
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
NBR	Normas Brasileiras
NM	Norma Mercosul
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
D	Diâmetro do corpo de prova
E_c	Deformação específica do concreto
f_{ck}	Resistência Característica do Concreto
$f_{ck,est}$	Resistência Característica do Concreto Estimada
h	Altura do corpo de prova
h/d	Relação altura/diâmetro do corpo de prova
F	Força
N	Newtons

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	CONCRETO	18
2.1	Composição	19
2.1.1	Cimento	19
2.1.2	Agregados	21
2.1.3	Aditivos	23
2.2	Propriedades	24
2.2.1	Estado Fresco	24
2.2.2	Estado Endurecido	26
2.3	Resistência do Concreto	26
2.3.1	Resistência à Tração	26
2.3.1.1	Tração na flexão	27
2.3.1.2	Tração por compressão diametral	28
2.3.1.3	Tração direta	29
2.3.2	Retração Hidráulica	30
2.3.3	Absorção de Água	32
2.3.4	Módulo de Elasticidade	32
2.4	Resistência à Compressão	34
2.4.1	Fatores que afetam a Resistência	36
2.4.2	Relação água/cimento	36
2.4.3	Porosidade e Ar Incorporado	38
2.4.4	Água de Amassamento	39
2.4.5	Relação entre Cimento e o Agregado	39
2.4.6	Condições e Velocidade de Carregamento	40
2.5	Controle Tecnológico e Ensaio de Resistência à Compressão	40
2.6	Corpos de prova cilíndricos	41
2.6.1	Moldagem	42
2.6.2	Cura	43
2.7	Regularização dos topos dos corpos de prova	44
2.7.1	Sistema de capeamento colado	44
2.7.1.1	Capeamento com argamassa de enxofre	45

2.7.2	Sistema de capeamento não colado	47
2.7.2.1	Capeamento com almofada de neoprene	48
2.7.3	Sistema de capeamento por desgaste mecânico	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	Caracterização dos Materiais e Equipamentos	53
3.1.1	Materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de concreto	53
3.1.2	Materiais utilizados no capeamento	53
3.1.3	Máquinas e equipamentos utilizados no procedimento experimental	54
3.2	Métodos e ensaios	56
3.2.1	Moldagem e cura dos corpos de prova	56
3.2.2	Regularização das superfícies dos corpos de prova	58
3.2.2.1	Capeamento por Retificação	60
3.2.2.2	Capeamento com almofadas de neoprene confinadas	62
3.2.2.3	Capeamento com argamassa de enxofre fundido	63
3.2.2	Ensaio de resistência à compressão axial	67
4	RESULTADOS	71
5	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais importante e mais utilizado na construção civil atualmente. Obtido a partir da mistura, em proporção adequada, de aglomerantes, agregados e água, sua utilização se intensificou no século XX, com os grandes avanços tecnológicos na área da construção civil e o advento de novos materiais. Tais avanços permitiram uma melhora significativa na qualidade do concreto empregado nas estruturas, e garantiram o aumento da sua resistência mecânica, proporcionando o surgimento de concretos com alta resistência e alto desempenho que diferem, portanto, dos concretos convencionais (MACHADO; SCHLOSER; VILLATORE, 2012).

Com a fabricação e empregabilidade cada vez maior de concretos que possuem diferentes materiais na sua composição, faz-se necessária a realização de ensaios de resistência, para avaliação da qualidade e desempenho destes e para verificar e comparar a influência desses materiais (BEZERRA, 2007). Para tanto, a resistência mecânica do concreto é determinada através do ensaio de compressão

axial, no qual são confeccionados corpos de prova, de acordo com as normas regulamentadoras vigentes, moldados exclusivamente para essa finalidade.

Alguns estudos realizados têm mostrado uma grande dispersão nos resultados obtidos através desse tipo de ensaio, e as causas podem estar relacionadas a diversos fatores como, por exemplo, o preparo do topo dos corpos de prova (FERNANDES, 2011).

Segundo Bezerra (2007, p. 25), para a execução do ensaio de compressão axial em corpos de prova de concreto, a superfície de aplicação de cargas deve ser plana, paralela, lisa e perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova, de modo que a carga seja distribuída uniformemente e evite a concentração de tensões.

A norma brasileira NBR 5738 (ABNT, 2016) que dita as condições para a realização do ensaio de compressão axial, cita três técnicas e materiais necessários para o nivelamento das superfícies: o arremate com pasta de cimento, o capeamento e a retificação. Segundo a norma, outros procedimentos de nivelamento podem ser adotados, desde que os resultados obtidos após os ensaios sejam avaliados e comparados estatisticamente e compatíveis com os mesmos obtidos com corpos de prova capeados pelos processos tradicionais.

Atualmente os procedimentos mais utilizados para a regularizações das bases são: capeamentos colados, com argamassa de enxofre ou de cimento; não colados, pratos metálicos revestidos com uma almofada de borracha (neoprene), ou placas de madeira; e o sistema com desgaste mecânico, utilizando retíficas ou serras circulares (BEZERRA, 2007).

Ainda segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016), o revestimento dos topos dos corpos de prova com o material apropriado, que adere física ou quimicamente ao mesmo, deve manter características como: aderência; compatibilidade química com o concreto; fluidez, no momento de sua aplicação; acabamento liso e plano após endurecimento; e resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em ensaios de compressão axial.

Sendo assim, através de pesquisas bibliográficas e procedimentos experimentais, o presente trabalho visa realizar um estudo comparativo entre os diferentes tipos de nivelamento de topo de corpos de prova de concreto, a partir da moldagem e ensaios de compressão axial em corpos de prova sem capeamento; com a técnica do capeamento colado, utilizando enxofre como material aderente; do capeamento não colado, utilizando a almofada de neoprene; e com a técnica do

desgaste mecânico, por meio da retificação do topo. Visa avaliar também as influências das técnicas de regularização das bases dos corpos de prova na determinação da resistência à compressão do concreto.

1.1 Objetivos

Os objetivos do presente estudo dividem-se em Objetivo Geral e Objetivos Específicos, descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo comparativo entre o capeamento de corpos de prova de concreto com a utilização de argamassa de enxofre fundido, almofada de neoprene, desgaste por retífica e com amostras sem capeamento, bem como ensaio de resistência à compressão segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), e analisar a influência destes métodos nos resultados obtidos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Revisar as normas regulamentadoras pertinentes ao presente estudo e referentes aos ensaios que serão realizados;
- Realizar a moldagem de 20 corpos de prova de concreto, com a mesma dosagem do traço, para uma mesma classificação de resistência, destinados às análises laboratoriais;
- Realizar o ensaio dos rompimentos dos corpos de prova, para cada tipo de capeamento indicado;
- Analisar os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova sem capeamento, com capeamento com argamassa de enxofre fundido, com almofada de neoprene; e com desgaste mecânico por meio de retificação;
- Avaliar a compatibilidade dos resultados com os mesmos obtidos com corpos de prova capeados pelos processos tradicionais;

- Determinar, por meios dos experimentos, a influência da regularização das bases dos corpos de prova de concreto com a utilização das diferentes técnicas de nivelamento.

2 CONCRETO

O concreto é sem dúvidas o material estrutural mais utilizado pelo homem. Considerado como uma das maiores descobertas da história do desenvolvimento da humanidade (ISAIA, 2011, p. 1). Seu aperfeiçoamento dependeu, em grande parte, do nível de conhecimento de cada época da história, e com a intensificação da sua utilização no século XX, o emprego do concreto revolucionou a indústria da construção civil (HELENE; ANDRADE, 2010, p. 906), onde bilhões de toneladas são consumidas anualmente no mundo.

Sua grande utilização se deve ao fato da sua constituição como material cerâmico, cuja matéria-prima existe em praticamente todo o mundo, e também por características relevantes como fácil adaptação, propriedades como versatilidade, resistência à compressão, durabilidade e desempenho, que proporcionam uma vida útil considerada adequada às construções (ISAIA, 2011). Além disso, seu custo é altamente competitivo se comparado com outros materiais estruturais, uma vez que se trata de um material mais barato, e de fácil manuseio e aplicação no canteiro de obras, não requerendo mão-de-obra especializada.

O concreto é composto pela mistura, em proporções adequadas, de aglomerantes, agregados e água, podendo também conter algum tipo de aditivo. Embora apresente muitas características relevantes como a resistência à compressão e durabilidade, vale ressaltar que se trata de um material frágil, que não confere uma boa resistência a esforços de tração. Assim, surgiu a necessidade da inserção do aço no concreto, material este que atende as exigências estruturais e garante a resistência a esforços de tração.

Dentre todas as características presentes no concreto, a resistência à compressão tornou-se a propriedade mais importante na avaliação do desempenho, visto que esta apresenta um bom comportamento mecânico quando submetida a esforços de compressão e é também um dos principais fatores que influencia no dimensionamento estrutural (QUIRINO, 2018, p. 14).

O ensaio de resistência à compressão axial é o método mais utilizado para a tal avaliação, sendo aceito mundialmente como um índice geral de resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 50). Além disso, acredita-se que muitas das suas propriedades, como módulo de elasticidade, estanqueidade ou impermeabilidade, e

resistência a intempéries, estão ligadas à resistência e, por isso podem ser deduzidas a partir dos dados da resistência.

Segundo Quirino (2018), em um concreto moldado, hidratado e ensaiado sob as mesmas condições, fatores como a geometria e o tipo de regularização empregados nas superfícies das amostras também influenciam nos valores obtidos no ensaio de resistência do concreto. Com isso, se faz necessário conhecer ao máximo essas variáveis relacionadas a forma e o método de regularização de topo das amostras retiradas para ensaio.

2.1 Composição

Por definição, o concreto é composto pela mistura, em proporções adequadas, de aglomerantes, agregados e água (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004, p. 2). O aglomerante comumente utilizado que mais influi na qualidade do concreto é o cimento, especificamente o Cimento Portland, que desde sua introdução nas últimas décadas, confere ao concreto convencional um excelente desempenho estrutural, pois na mistura do concreto com o cimento e a água obtém-se uma pasta homogênea, que envolve as partículas de agregados, e com o tempo, a mistura endurece e adquire uma grande resistência mecânica, apresentando um excelente desempenho sob os mais diversos ambientes em que é exposto (HELENE; ANDRADE, 2010, p. 920).

2.1.1 Cimento

Mehta e Monteiro (2008, p. 27) definem o cimento como um material finamente pulverizado, que ao ser hidratado desenvolve propriedades ligantes capazes de unir pequenos fragmentos de um material sólido e compactá-los. Basicamente, o cimento é formado por compostos à base de argila e calcário, que são levados a um forno e posteriormente moagem (CHIES, 2011, p. 21).

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento Portland, frequentemente utilizado no Brasil, é um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland e adição de uma ou mais substâncias como escória granulada, materiais carbonáticos e/ou pozolânicos durante sua fabricação. Estas quando misturadas e submetidas ao forno, reagem, originando produtos mais complexos, alcançando um estado de equilíbrio químico e conferindo uma melhora na qualidade do cimento.

São designados pelo tipo, que correspondem a adições e propriedades especiais, e são classificados de acordo com a sigla (prefixo CP) e em seguida um algarismo romano ou letra, e classe de resistência (em megapascal (MPa)), que corresponde ao menor valor de resistência à compressão admissível garantida pelo fabricante após 28 dias de cura, conforme demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1: Tipos de cimento, sigla e classe de resistência

Designação (Tipo de Cimento)	Sigla	Classe de resistência (MPa)
Cimento Portland comum (sem adição)	CP I	25, 32, ou 40
Cimento Portland comum (com adição)	CP I-S	
Cimento composto com escória granulada	CP II-E	
Cimento composto com material carbonático	CP II-F	
Cimento composto com material pozolânico	CP II-Z	
Cimento Portland de alto forno	CP III	
Cimento Portland pozolânico	CP IV	ARI
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	
Cimento Portland branco Estrutural	CPB	25, 32 ou 40
Cimento Portland branco Não estrutural	CPB	-

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018)

O cimento é sem dúvidas o aglomerante que mais influencia na qualidade do concreto. Juntamente com a água, ele une-se aos agregados e forma uma pasta cimentante, e quando endurecida, confere ao concreto a resistência e durabilidade necessárias à estrutura (MENEZES, 2011, p. 5).

Ao tratar-se da resistência à compressão, o principal fator é a resistência da pasta, que depende da sua porosidade, que por sua vez depende da relação água/cimento. (...) Para um mesmo tipo de cimento, a

resistência da pasta depende quase que exclusivamente da relação água/cimento. Quanto maior a relação a/c, maior a porosidade e menor a resistência (...)(FERNANDES, 2011, p. 21).

Uma vez que a resistência do concreto está vinculada à resistência da pasta de cimento, a NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece os requisitos para a verificação da conformidade do cimento com base na resistência à compressão, em função do tipo e classe do cimento Portland, que deve ser verificada por meio dos ensaios realizados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). Os resultados obtidos nos ensaios devem ser objeto de controle estatístico, assegurando-se os limites indicados conforme a norma, e expressos na Tabela 1.

Tabela 1: Critérios de conformidade para classe de resistência

Tipos de cimento	Classes de resistência (MPa)	Resistência à compressão (MPa)		
		Limite inferior a 7 dias	Limite inferior aos 28 dias	Limite superior aos 28 dias
CP I CP I-S	25	-	25,0	42,0
CP II-E CP II-F CP II-Z	32	-	32,0	49,0
CP III CP IV CPB Estrutural	40	-	40,0	-
CP V	ARI	34,0	-	-

Fonte: NBR 7215 (ABNT, 2018).

O cimento Portland possui componentes que hidratam em velocidades diferentes, e segundo Kihara e Centurione (2005) a hidratação do cimento Portland não depende somente dos componentes do clínquer e dos adicionais do cimento, como por exemplo, as escórias granuladas de alto-forno e os materiais pozolânicos, mas também, está ligada a fatores como a finura, relação água-cimento (a/c), temperatura e processo de cura.

2.1.2 Agregados

Os autores Pinheiro, Muzardo e Santos (2004, p. 2) definem agregados como “partículas minerais que aumentam o volume da mistura, reduzindo seu custo.

Dependendo das dimensões características, dividem-se em agregados miúdos (como exemplo areias) e agregados graúdos (pedras)”.

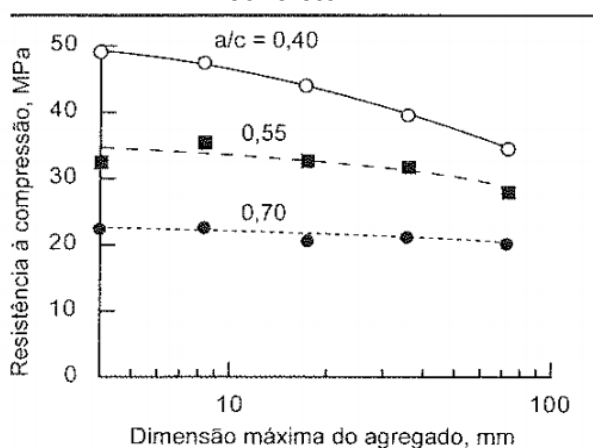
Basicamente, os agregados são materiais granulares, empregados na pasta cimentante para produção da argamassa de concreto, e estes materiais diferenciam-se por sua origem e dimensão, e denominam-se de acordo com sua granulometria (CHIES, 2011, p. 20).

A distribuição granulométrica consiste nas proporções relativas a cada tamanho de partícula presente na amostra. A graduação dos agregados miúdos influencia na demanda de água do concreto, interferindo conseqüentemente na relação a/c. Nos agregados graúdos, as principais características que influenciam o desempenho final do concreto são: a mineralogia, a absorção, o tamanho e a forma dos agregados (SLOSASKI et al., 2010).

Para Neville (2016, p. 121), as propriedades do agregado graúdo influenciam muito no surgimento de tensões e conseqüentes fissuras no concreto. Ele afirma que “os seixos lisos conduzem a uma fissuração causada pela tensão menor do que as britas ásperas e angulosas, pelo fato da aderência mecânica ser influenciada pelas características da superfície e forma do agregado”.

A Figura 1 mostra a influência do tamanho do agregado e a relação a/c na resistência do concreto.

Figura 1: Influência da dimensão do agregado e relação água/cimento na resistência do concreto



Fonte: Mehta, Monteiro (2008)

A norma NBR 7211 (ABNT, 2022) determina que a dimensão máxima característica do agregado é convencionalmente designada pela grandeza associada à abertura nominal da peneira utilizada no ensaio de granulometria, expressa em

milímetros (mm), na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume que deve ser coberta pela pasta de cimento para uma dada relação água/cimento.

O efeito do diâmetro máximo do agregado é mais pronunciado em concretos de resistência alta e média, pois nestas o valor da relação água/cimento é menor e a porosidade reduzida da zona de transição começa a ter importância na resistência dos mesmos. Logo, delimita-se a dimensão máxima do agregado em 19 mm nestes concretos (FERNANDES, 2011, p. 26).

2.1.3 Aditivos

Andolfato (2002, p. 10) denomina aditivo como sendo os materiais que podem ser adicionados à mistura na produção da argamassa de concreto, para obter propriedades desejáveis, como: aumento da plasticidade, controle do tempo de pega e do aumento da resistência, redução do calor de hidratação, etc.

Para Mehta e Monteiro (2008, p. 61), os aditivos incorporadores de ar têm efeito negativo na resistência do concreto, pois aumentam o grau de porosidade, e os aditivos redutores de água são benéficos uma vez que podem contribuir para a taxa de hidratação do cimento e elevar tanto a resistência inicial como a resistência final do concreto.

Os aditivos plastificantes permitem reduzir a quantidade de água necessária para se obter a plastificação desejada. Estes aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, que agem na pasta cimentante tornando-a mais fluída, possibilitam também a redução do volume desta pasta no concreto, mantendo o mesmo abatimento (HELENE; ANDRADE, 2010 p. 927).

Machado, Schloser e Villatore, (2012, p, 33) sugerem uma substituição parcial do cimento, a fim de contribuir ecologicamente e no desempenho do concreto, com adições minerais na fabricação, onde afirmam que esta retardaria a resistência inicial, reduzindo a porosidade da matriz e da zona de transição na interface pasta/agregado, e conseqüentemente melhoraria de forma considerável a resistência final e estanqueidade do concreto.

Deve-se considerar que especialmente as adições minerais contribuem efetivamente na resistência à tração do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 61).

2.2 Propriedades

O controle das propriedades do concreto é imprescindível para garantir a qualidade do material, tanto no seu estado fresco quanto estando endurecido.

Assim, o ensaio de resistência à compressão torna-se a principal alternativa para o controle tecnológico do concreto, uma vez que, mesmo o concreto apresentando uma boa resistência característica, não é possível garantir sua qualidade final, pois este pode não apresentar as propriedades importantes para conferir o desempenho estrutural e durabilidade necessários (DURAN; FRACARO, 2011, p. 27).

2.2.1 Estado Fresco

O concreto em seu estado fresco é preparado manual ou mecanicamente, com o uso de betoneiras, e consiste na mistura dos seus componentes para sua posterior utilização (ANDOLFATO, 2002, p. 11).

A fase do concreto fresco compreende um curto período de tempo, em geral entre 1h e 5h, tempo este necessário para que o concreto possa ser misturado, transportado, lançado e adensado (HELENE; ANDRADE, 2010, p. 928).

Uma das características fundamentais do concreto que determina a sua aptidão e trabalhabilidade é a consistência, definida como a facilidade de manuseio e de ser colocado em fôrmas, sem que ocorra segregação ou deformação.

Para determinação da consistência do concreto fresco, faz-se necessário o ensaio de abatimento de tronco de cone (ou slump test), que segundo a NBR 16889 (ABNT, 2020), consiste em compactar o concreto fresco na fôrma tronco-cônica, de altura 30 cm. Ao retirar a fôrma, o concreto sofre um abatimento, e a diferença em centímetros, entre a altura do molde e a altura da massa de concreto depois de assentada, é usada como valor comparativo de consistência.

A Fotografia 1 apresenta a realização do ensaio de abatimento para o presente estudo, verificando-se o quanto o concreto deformou-se após a retirada da fôrma.

Fotografia 1 - Ensaio de Abatimento de tronco de cone (Slump Test)



Fonte: Autoria própria (2023)

As tolerâncias admissíveis no ensaio de abatimento, segundo a NBR 16889 (ABNT, 2020), são especificadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Classes de Consistência

	Classe	Abatimento
ABNT (2020)	S10	$10 \leq A < 50$
	S50	$50 \leq A < 100$
Andolfato	S100	$100 \leq A < 160$
	S160	$160 \leq A < 220$
	S220	≥ 220

Fonte: Adaptado de

Segundo (2002, p. 12), “a consistência e a trabalhabilidade

dependem da composição do concreto, e, em particular, da quantidade de água, granulometria dos agregados, presença de aditivos, etc.”, e a dosagem do mesmo deve considerar a consistência necessária para determinado tipo de construção, conforme apresentam as recomendações na Tabela 2.

Tabela 2: Recomendação de consistência de acordo com o tipo de construção

Tipo de Construção	Abatimento (cm)
Fundações, tubulões, paredes grossas	3 a 10
Vigas, lajes, paredes finas	5 a 10
Pavimentos	3 a 5
Obras maciças	2 a 5

Fonte: Andolfato (2002)

2.2.2 Estado Endurecido

As principais propriedades mecânicas do concreto são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios, executados em condições específicas. Geralmente, os ensaios são realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004, p. 11).

O concreto no estado endurecido possui diversas outras características além da resistência, como durabilidade, impermeabilidade e aparência.

Tais características, que serão discutidas a seguir, dependem de fatores como o emprego de materiais de boa qualidade, dosagem proporcionalmente adequada, considerando a relação água/cimento, e lançamento e adensamento corretos, evitando a segregação do concreto (ANDOLFATO, 2002, p. 13).

2.3 Resistência do Concreto

Para Neville (2016, p. 285), a resistência do concreto fornece uma ideia geral da qualidade do material, pois está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento hidratada. Além do mais, a resistência é praticamente um elemento fundamental no projeto estrutural, e é especificada para fins de controle.

Embora existam diversos parâmetros de análise e determinação da qualidade do concreto, como a resistência à tração, retração hidráulica, a absorção de água e módulo de elasticidade, a resistência à compressão é a melhor e principal medida adotada para averiguação da qualidade, realizado por meio de ensaio de compressão axial (HELENE; TERZIAN, 1993).

2.3.1 Resistência à Tração

O concreto não é um material muito resistente a esforços de tração, apresentando cerca de 8% a 15% da resistência à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 2008 p. 77). Por esse motivo, para se desenvolver um concreto que atendessem às exigências estruturais, garantindo a resistência a esforços de tração, surgiu a necessidade da inserção do aço no material, denominando-se o concreto armado, mais precisamente armações metálicas, que combinadas ao concreto, absorve as solicitações de tração, (ANDOLFATO, 2002, p. 1).

Embora o concreto armado apresente muitas vantagens, como disponibilidade, economia e grande resistência, as tensões de tração podem causar fissuras, permitindo a entrada de água e ar nas armaduras, o que diminui a proteção e pode causar a corrosão destas e comprometer a estabilidade e segurança da estrutura.

Os problemas de fissuração surgem quando se desenvolve tração diagonal em função das tensões de cisalhamento, mas o caso mais frequente de fissuração decorre da retração restringida e de gradientes de temperatura. A estimativa da resistência à tração do concreto contribui para o entendimento do comportamento do concreto armado, ainda que os projetos estruturais não considerem explicitamente a resistência à tração (NEVILLE, 2016, p. 620).

Assim, segundo Neville (2016, p. 621), para a determinação da tração do concreto, existem três tipos básicos de ensaios: tração na flexão, tração por compressão diametral e tração direta.

2.3.1.1 Tração na flexão

Segundo Menezes (2011, p. 8), para determinação da tração na flexão, é realizado um ensaio denominado *ensaio de carregamento nos terços*, onde um prisma de concreto, apoiado em um vão, é submetido a um carregamento em dois pontos simétricos, posicionados a 1/3 do vão, até sua ruptura, e a tensão de tração máxima atingida na face inferior do prisma é chamada *módulo de ruptura*.

Neville (2016, p. 622) explica que se a ruptura ocorrer dentro do terço médio do prisma, a determinação da resistência à tração é calculado com base na teoria da elasticidade, sendo igual a:

$$f_{ctm} = \frac{PL}{bd^2} \quad (\text{Equação 1})$$

onde P é a carga aplicada no prisma, L é a largura do vão, e b e d correspondem à largura e altura do prisma, respectivamente.

Entretanto se a ruptura ocorrer fora do terço médio, a uma distância *a* do apoio mais próximo, não maior do que 5% do vão, o módulo de ruptura é dado por:

$$f_{ctm} = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (\text{Equação 2})$$

sendo *a* a distância média entre a face tracionada do prisma e o apoio mais próximo.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), a resistência à tração direta f_{ct} (em MPa) pode ser considerada igual a $0,9 f_{ct,sp}$ ou $0,7 f_{ct,f}$, ou, na falta de ensaios para obtenção de $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$, pode ser avaliado o seu valor médio ou característico por meio das equações:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm} \quad (\text{Equação 3})$$

e

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ctm} \quad (\text{Equação 4})$$

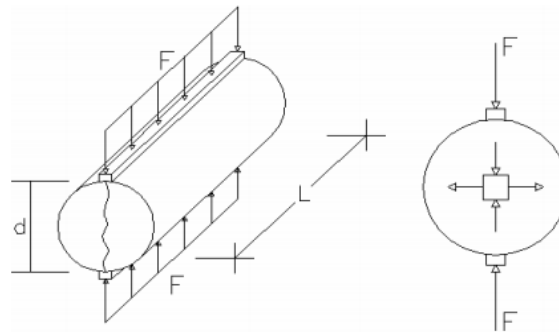
sendo que para concretos de classes até C50, que são mais comuns, usa-se $f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$.

Vale ressaltar que este ensaio à flexão não é o mais adequado para fins de controle ou de aceitação do concreto, uma vez que os corpos de prova podem ser pesados e facilmente danificados, e os resultados dos ensaios podem também ser influenciados pelas condições de umidade dos corpos de prova, de modo que a variabilidade do módulo de ruptura seja grande. Como solução, deve-se estabelecer uma relação entre o módulo de ruptura e a resistência à compressão nos corpos de prova de concreto que são utilizados rotineiramente (NEVILLE, 2016, p. 623).

2.3.1.2 Tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral é obtida através do ensaio com um corpo de prova cilíndrico, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), com dimensões 10x20 cm, onde o mesmo é posicionado horizontalmente na máquina de ensaio, é submetido a uma carga aplicada ao longo da sua geratriz, e esta carga é aumentada até ocorrer a ruptura por tração indireta. É permitida a utilização de um dispositivo auxiliar que possa facilitar o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio, como por exemplo, tiras de chapa dura de fibra de madeira, conforme especificações da NBR 10024 (ABNT, 2012). A Figura 2 mostra o modo de aplicação das cargas no ensaio descrito.

Figura 2: Aplicação das cargas no ensaio de compressão diametral.



Fonte: Menezes (2011).

A NBR 7222 (ABNT, 2011) determina que a resistência à tração por compressão diametral seja calculada através da equação 5:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d L} \quad (\text{Equação 5})$$

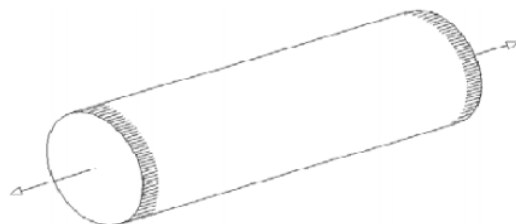
em que $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral (em MPa), F é a força máxima obtida no ensaio, em newtons (N), d é o diâmetro do corpo-de-prova, em mm, e L é o comprimento do corpo-de-prova (em mm).

Para Neville (2016, p. 626), os valores obtidos no ensaio à tração por compressão diametral são mais uniformes do que os resultados dos demais ensaios, em se tratando de um ensaio relativamente mais fácil de se realizar, e a resistência obtida é de 5 a 12% mais alta, considerada mais próxima à resistência à tração direta do concreto.

2.3.1.3 Tração direta

Menezes (2011, p. 10), afirma que o ensaio de tração direta apresenta dificuldades de realização devido à forma de aplicação das cargas, que são executadas nas extremidades do corpo de prova até a ruptura do mesmo, conforme exemplifica a Figura 3.

Figura 3: Ensaio de tração direta



Fonte: Menezes (2011)

O ensaio torna-se então menos aplicável, devido ao fato de um possível desgaste excessivo das bases do corpo de prova onde são aplicadas as tensões, comprometendo sua execução e conseqüentemente os resultados.

O resultado do ensaio de tração direta é dado pela divisão da força de rompimento do corpo de prova pela área de sua base.

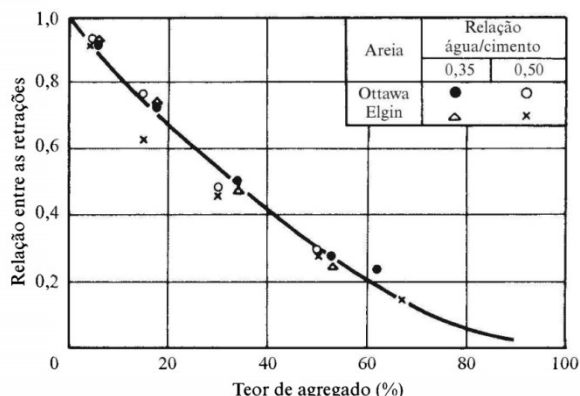
2.3.2 Retração Hidráulica

A retração hidráulica consiste na perda de água e conseqüente deformação volumétrica do concreto. Segundo Neville (2016, p. 446) quanto maior for a relação água/cimento, maior será a retração da pasta de cimento hidratada, devido a relação a/c determinar a quantidade de água evaporável existente na pasta e a velocidade com que a água pode se mover em direção à superfície do elemento.

Segundo Giongo (2006, p. 53) os fatores que mais influenciam na retração do concreto são: umidade relativa do ambiente, consistência do concreto no lançamento e espessura fictícia do elemento.

Neville (2016, p. 446) explica que as dimensões e a granulometria dos agregados não influenciam de forma tão significativa na retração, embora o emprego de agregados maiores possibilite a produção de misturas com menor consumo de cimento, resultando assim em menores índices de retração. Ele afirma ainda que “para uma determinada resistência, concretos de baixa trabalhabilidade contém mais agregado do que os de alta trabalhabilidade, com agregados de mesma dimensão, por isso o primeiro apresenta menor retração” (Neville, 2016, p. 447), conforme a Figura 4.

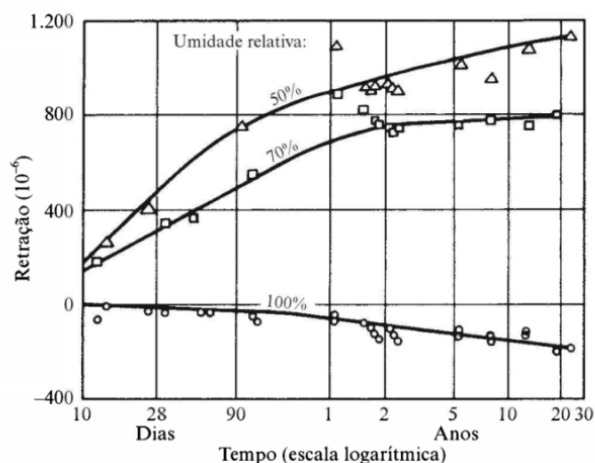
Figura 4: Influência do teor de agregado no concreto (em volume) sobre a relação entre a retração do concreto e a retração da pasta de cimento pura



Fonte: Neville (2016)

A umidade do ar é um fator que influencia naturalmente na evaporação da água, pois quanto menor seu índice, maior será a perda de água por evaporação, conforme demonstra a Figura 5, considerando o término do tempo de cura úmida aos 28 dias.

Figura 5: Relação entre a retração e o tempo para concretos mantidos em diferentes umidades relativas.



Fonte: Neville (2016)

Machado; Schloser e Villatoreo (2012, p. 40), explicam que nem sempre é um processo simples determinar as causas da retração no concreto, especialmente porque os diferentes tipos costumam ocorrer simultaneamente e a retração final acaba sendo uma somatória de cada um dos efeitos. Estudando o assunto mais profundamente é possível estimar as proporções da retração total e com isso dosar e executar o concreto de maneira a inibir as fissurações.

Assim, a importância do estudo sobre a retração e formas de prevenção em estruturas de concreto está, em grande parte, relacionada à fissuração, embora a ocorrência de fissuras não dependa somente da retração, pois a extensibilidade do concreto, sua resistência e seu grau de restrição à deformação também podem ocasionar o surgimento desse tipo de falha, bem como a relação a/c, o alto consumo de cimento, uso de aditivos e a temperatura de lançamento.

Menezes (2011, p. 11) reitera que o cuidado com a retração hidráulica deve sempre existir, pois ocasionando o aparecimento de fissuras, estas podem danificar e comprometer a estrutura de concreto.

2.3.3 Absorção de Água

A absorção de água no concreto é a medida para se estimar o volume de vazios no interior da estrutura, obtida através de ensaio padronizado pela NBR 9778 (ABNT, 2009), que consiste na secagem do corpo-de-prova até a estabilização da sua massa, e posterior saturação por imersão do mesmo em água. A diferença entre as massas antes e depois da saturação é a quantidade de água absorvida.

Segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009), que determina também da massa específica de argamassa de concreto, a absorção de água por imersão é definida pela expressão:

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

onde M_{sat} é a massa do corpo-de-prova saturado e M_s é a massa do corpo-de-prova seco em estufa.

Para Neville (2016, p. 451), a absorção de água não deve ser usada como uma medida de referência para verificação da qualidade do concreto, entretanto, este também afirma que a maioria dos bons concretos apresentam uma absorção bem inferior à 10%, em massa.

2.3.4 Módulo de Elasticidade

Segundo Pacheco *et al.* (2014, p. 1), por definição, o módulo de elasticidade é a razão entre uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação específica imediatamente nele verificada. No concreto, diferentemente de outros materiais, não se verifica a proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação sofrida, pela própria natureza do material, sendo que esta última é variável segundo o nível da carga aplicada.

Para fins de cálculo, a NBR 8522-1 (ABNT, 2021) descreve duas metodologias estáticas para a determinação dos módulos de elasticidade do concreto. A primeira define o módulo de deformação secante (E_{cs}), e a segunda determina o módulo de deformação tangente à origem (E_{ci}). Tais metodologias podem ser obtidas através das relações estáticas, segundo a norma citada, e também através de métodos dinâmicos, por meio de ensaio destrutivo com corpos-de-prova cilíndricos, que utiliza as frequências naturais de vibração do concreto, segundo a NBR 8522-2 (ABNT, 2021).

Usualmente, o módulo de elasticidade E_{ci} é determinado, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), para concretos com f_{ck} entre 20 MPa e 50 MPa, pela seguinte expressão:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 7})$$

em que α_E é o parâmetro em função da natureza do agregado (variável de 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaiss; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito), e E_{ci} e f_{ck} são geralmente dados em MPa.

Já o módulo de deformação secante E_{cs} é obtido pela expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (\text{Equação 8})$$

sendo $\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$.

A Tabela 3, com base na NBR 6118 (ABNT, 2023), apresenta os valores estimados dos módulos de elasticidade E_{ci} e E_{cs} , expressos em Gigapascal (GPa), em função de f_{ck} .

Tabela 3: Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o granito como agregado)

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci}	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs}	21	24	27	29	32	24	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

Fonte: ABNT (2023)

O procedimento experimental necessita de um prévio tratamento das bases dos corpos-de-prova, e após esse tratamento, eles são submetidos a sucessivas fases de carregamento e descarregamento para que seja possível medir o nível de deformação que este suporta e, conseqüentemente, determinar seu módulo de elasticidade.

2.4 Resistência à Compressão

Para Mehta e Monteiro (2008) a resistência é a capacidade de um material resistir a esforços de tensão sem se romper, sendo inversamente proporcional a fração de volume de vazios.

A resistência à compressão simples, denominada pela sigla f_c , é a característica mecânica mais importante do concreto. Para determiná-la, é necessária a realização do ensaio de compressão, onde são confeccionados corpos-de-prova segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016) e posteriormente, após o período de cura de 28 dias, são submetidos ao ensaio, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018).

A NBR 5739 (ABNT, 2018) determina que a resistência à compressão deve ser calculada pela expressão:

$$f_c = \frac{4 F}{\pi \times D^2} \quad (\text{Equação 9})$$

em que f_c é a resistência à compressão, em MPa; F é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N) e D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), denomina-se *resistência característica à compressão do concreto estimada* ($f_{ck,est}$), o valor obtido estatisticamente a partir de ensaios para estimar a resistência característica do concreto estabelecida no projeto estrutural. É determinado no controle de 100% da amostragem de concreto, no qual todas as betonadas são amostradas e representadas por um exemplar que define a resistência à compressão daquele concreto naquela betonada, sendo que $f_{ck,est}$ é o valor mínimo acima do qual situam-se 95% dos resultados. Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022), para lotes representados por amostra com número de exemplares $n \geq 20$, conforme adotado no presente estudo, o $f_{ck,est}$ é dado por:

$$f_{ck,est} = f_{cm} - 1,65 sd \quad (\text{Equação 10})$$

onde f_{cm} é o valor médio de resistência obtido, s corresponde ao desvio-padrão, determinado pela distância entre a abscissa de f_{cm} e o ponto de inflexão da curva, e o valor 1,65 corresponde ao *quantil* de 5% dos corpos de prova, que possuem $f_c < f_{ck}$.

Para o controle e aceitação do concreto em pequenas proporções e lotes (menor que 10 m³), conforme adotado no presente estudo, a NBR 12655 (ABNT, 2022)

determina que a resistência característica estimada deve ser maior que o f_{ck} , e para o cálculo ela propõe a Equação 11:

$$f_{ck,est} = \Psi_6 \times f_1 \quad (\text{Equação 11})$$

em que o $f_{ck,est}$ é a resistência à compressão característica estimada (em MPa); Ψ_6 , segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022), nesse caso, é igual à 0,91 e f_1 é o valor da menor resistência obtida entre as amostras (em MPa).

Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), as classes de resistência do concreto são definidas em função da resistência característica à compressão (f_{ck}), expressa em MPa, conforme a Tabela 4 que demonstra as classes de resistência dos concretos mais usuais (C20 ao C50). Um concreto classe C30, por exemplo, corresponde a um concreto com $f_{ck} = 30$ MPa.

Tabela 4: Classes de resistência de concretos estruturais

2015)	Classe de resistência	Resistência característica à compressão MPa	Fonte: NBR 8953 (ABNT,
É			sabido que existem
diversos	C20	20	fatores que podem
influenciar nos	C25	25	resultados do ensaio de
compressão	C30	30	axial e como
consequência,	C35	35	mascarar a resistência
do concreto,	C40	40	uma vez que, como visto,
a resposta do	C45	45	concreto às tensões
aplicadas não	C50	50	dependem somente do
tipo de			solicitação, mas também
de como a			combinação de vários
fatores afeta a			porosidade dos

diferentes componentes estruturais do concreto (MENEZES, 2011, p.12).

Assim, Mehta e Monteiro (2008) concluem que muitas das propriedades do concreto ligadas à resistência podem ser reduzidas a partir dos dados obtidos pelo ensaio de compressão axial, sendo este aceito universalmente como índice geral de resistência do concreto.

2.4.1 Fatores que afetam a Resistência

Como já visto anteriormente, alguns fatores como a relação água/cimento, porosidade, adensamento e cura (hidratação do cimento), dimensão dos agregados (mineralogia), tipos de aditivos e adições, geometria dos corpos de prova, velocidade de carregamento e tipos de tensão no momento do ensaio podem influenciar na resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 49).

Pinheiro e Giongo (1986, p. 56) também descrevem fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do concreto, e destacam a conservação dos materiais componentes e a qualidade da execução, desde a dosagem, transporte, lançamento, procedimento de cura e idade como sendo de suma importância no controle tecnológico e de qualidade do concreto.

Adiante serão abordadas considerações a respeito da padronização e execução do ensaio de resistência à compressão, realizados com corpos de prova cilíndricos de concreto, bem como a preparação dos topos e regularização destes, a fim de submetê-los ao ensaio e avaliar os valores de resistência obtidos nos resultados.

2.4.2 Relação água/cimento

A resistência do concreto é considerada inversamente proporcional à relação água/cimento, sendo o primeiro fortemente influenciado pela consequência natural do enfraquecimento progressivo da matriz causada pelo aumento da porosidade com o aumento da relação a/c (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 54)

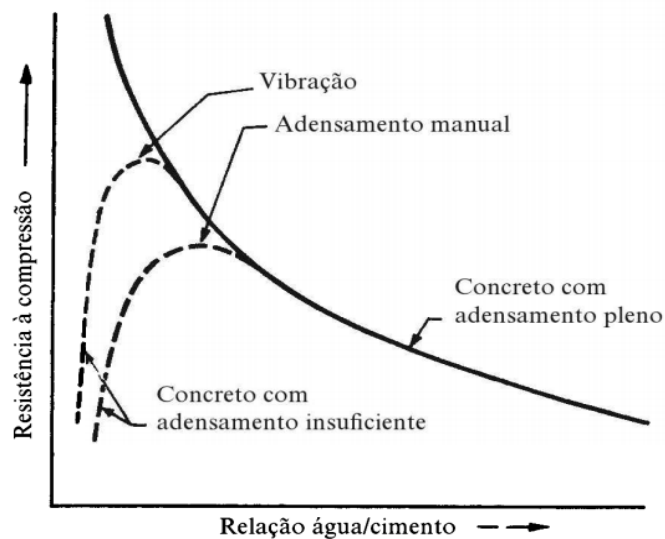
Essa relação inversa é representada pela *Lei de Abrams da relação água/cimento*, expressa pela equação:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (\text{Equação 12})$$

onde k_1 e k_2 são constantes empíricas e a/c representa a relação água/cimento.

Neville (2016, p. 286) reforça que a relação água/cimento determina a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio de hidratação. A forma geral da variação da resistência com a relação a/c é apresentada na Figura 6.

Figura 6: Relação entre a resistência do concreto e sua relação água/cimento



Fonte: Neville (2016)

A qualidade potencial do concreto depende da relação a/c e do grau de hidratação. São esses os dois principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar da água, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusividade da água ou dos gases, de migração elétrica de íons, assim como, todas as propriedades mecânicas, tais como: módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão e outras (HELENE; ANDRADE, 2010, p. 931)

Helene e Andrade (2010, p. 932) ressaltam que um concreto com resistência mais alta é, na maioria das vezes, considerado potencialmente mais durável do que um concreto de resistência mais baixa, obtido com os mesmos materiais, embora, como já mencionado anteriormente, a resistência à compressão nem sempre seja, por si só, uma medida suficiente de determinação da durabilidade do concreto. A Figura 7 exemplifica a variação da resistência do concreto em função da relação a/c com a mudança do tipo de cimento empregado.

Figura 7: Resistência média do concreto em função da relação a/c com o emprego dos diferentes tipos de cimentos.

Tipo e classe de cimento	Relação a/c				
	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
CP I 32	28	32	37	41	47
CP II 32	24	28	31	35	39
CP II 40	28	32	36	41	46
CP III 32	23	27	31	36	41
CP III 40	27	32	37	42	49
CP IV 32	24	28	32	36	41
CP V ARI.RS	30	33	38	42	46
CP V ARI	33	38	42	47	53

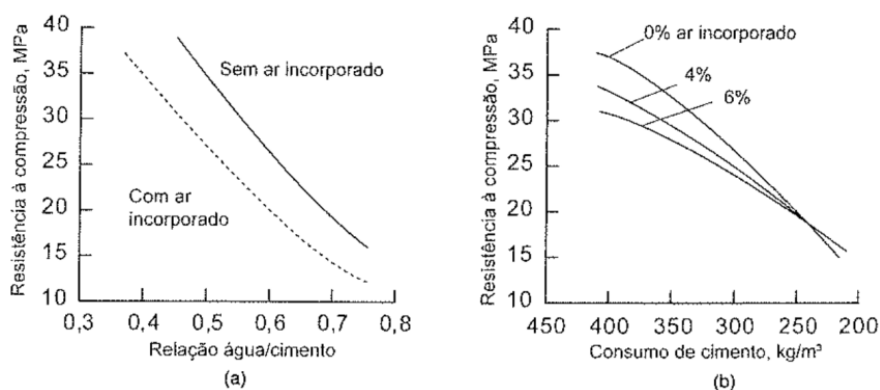
Fonte: Helene e Andrade (2010)

2.4.3 Porosidade e Ar Incorporado

Além da relação a/c ser determinante na porosidade das estruturas de concreto, em um dado grau de hidratação, outro fator importante que interfere no aumento significativo no grau de porosidade e consequente diminuição da resistência é a presença de vazios de ar incorporado ao sistema, derivados de um adensamento mal executado, ou até mesmo uso de aditivos incorporadores de ar (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 55).

O nível de perda de resistência, observado por MEHTA e MONTEIRO (2008) não dependem somente da relação a/c, mas também do consumo de cimento, uma vez que concretos de alta resistência, que contêm alta quantidade de cimento na composição, tendem a sofrer uma considerável perda da resistência devido à porosidade, enquanto concretos de baixa resistência, com menor quantidade de cimento, sofrem uma pequena perda ou até mesmo podem ganhar resistência, nas mesmas condições, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8: Influência da relação água/cimento, ar incorporado e consumo de cimento na resistência à compressão do concreto



Fonte: Mehta; Monteiro (2008)

Assim sendo, Helene e Andrade (2010, p. 924) enfatizam que, para concretos produzidos com o mesmo cimento e agregados, fixando a relação água/cimento, quanto maior o abatimento (mais fluido), maior será o consumo de cimento do concreto. Entretanto, quanto menor essa relação, mais difícil será obter concretos plásticos, mesmo com o aumento sensível do volume de pasta no concreto, uma vez que para obtenção de um concreto plástico é preciso utilizar aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, que são empregados principalmente em concretos de alta resistência, garantindo uma baixa relação água/cimento e um elevado abatimento, bem como uma redução no volume de pasta no concreto (HELENE; ANDRADE, 2010, p. 925).

2.4.4 Água de Amassamento

Segundo Neville (2016), geralmente a água de amassamento não se torna um fator relevante na resistência dos concretos pelo fato de que as especificações recomendam o preparo do concreto com água potável, onde dificilmente esta água possui sólidos dissolvidos acima de 1000 ppm (partes por milhão). Porém as impurezas, sólidos químicos e orgânicos dissolvidos quando em excesso afetam a resistência, tempo de pega e geram eflorescência, gerando a corrosão da armadura.

2.4.5 Relação entre Cimento e o Agregado

Segundo Fernandes (2011, p. 24), a relação entre o cimento e o agregado é um fator secundário da resistência do concreto. Contudo, a razão agregado/cimento resulta em uma resistência maior se comparado à relação a/c. Isso se deve pelo fato de que, em alguns casos, os agregados podem absorver a água e, dessa forma, reduzir a relação água/cimento. Já em outros casos, uma maior quantidade de agregados resultaria na menor retração e menos exsudação e, portanto, menor dano na aderência entre o agregado e a pasta de cimento, bem como menor variação térmica devido à hidratação do cimento (NEVILLE, 2016, p. 137)

No tocante às funções técnicas dos agregados no concreto, apesar da sua pequena influência no desempenho mecânico dos concretos de baixa e média resistência, os mesmos têm papel importante no controle da estabilidade volumétrica do concreto endurecido e de sua tendência à fissuração, justamente em função de ocupar um volume elevado de

aproximadamente de 65% a 70% no concreto. (HELENE: ANDRADE, 2010, p. 926)

De acordo com Mehta e Monteiro (2008, p. 57), os limites granulométricos e a dimensão máxima dos agregados são definidos por diferentes motivos, sendo o mais importante deles a sua influência sobre a trabalhabilidade e o custo. Areias muito grossas produzem uma argamassa de concreto áspera e de difícil manuseio, enquanto que areias muito finas aumentam a demanda de água, sendo economicamente inviáveis. Assim, compreende-se que agregados de granulometria contínua, ou seja, que não apresentam deficiências relevantes ou excessos em relação à dimensão das partículas, contribuem para a produção de concretos mais trabalháveis e econômicos.

2.4.6 Condições e Velocidade de Carregamento

Para Giongo (2007), os ensaios para determinação da resistência do concreto são feitos com velocidade constante de aplicação da força na máquina de ensaio, com isso o ensaio é realizado em poucos minutos. O resultado tem a finalidade de, portanto, controlar a resistência do concreto.

2.5 Controle Tecnológico e Ensaio de Resistência à Compressão

Cada vez mais verifica-se o aumento significativo das cargas das estruturas, associadas às grandes edificações e a necessidade de redução de seção de pilares e vigas para melhor aproveitamento do espaço, o que ocasiona o aumento nas especificações de resistência dos projetos, sendo muito comum atualmente, engenheiros projetistas se depararem com resistências à compressão de 40 ou 50 MPa nos projetos.

Assim, deve-se ter um maior cuidado, com o preparo e controle destes concretos de maiores resistências, visto que o controle de produção é imprescindível para garantir a correta execução de todo o processo construtivo, com o objetivo de assegurar a construção da obra, conforme o projeto estabelecido (FERNANDES, 2010, p. 28).

Em se tratando do concreto, o controle de desempenho e qualidade é verificado principalmente através da sua resistência, mais precisamente a resistência à compressão, que por sua vez é a característica mecânica obtida através do

procedimento experimental de ensaio de resistência à compressão axial, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018) já citada anteriormente, e que tem sua importância reconhecida pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023).

A uniformidade do concreto é decorrente da uniformidade de seus materiais constituintes. Entretanto, dispersões na coleta de exemplares, moldagem, cura, tratamento do topo e ruptura dos corpos-de-prova, podem inserir variações na resistência, que não estão presentes no concreto da estrutura. Logo, as operações de controle devem ser rigorosamente constantes para que seja possível a observação da variabilidade presente na estrutura e não uma variação do ensaio (HELENE; TERZIAN, 1993, *apud* Fernandes 2011, p. 29).

Os resultados obtidos por meio do ensaio de compressão, segundo a norma, serão determinantes para aceitação ou rejeição das amostras de concreto submetidas à análise.

Com relação à moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos de concreto para posterior execução do ensaio de rompimento, algumas considerações e itens descritos na respectiva norma serão destacados a seguir, bem como a aplicação da carga.

2.6 Corpos de prova cilíndricos

A confecção dos corpos de prova cilíndricos de concreto deve seguir as orientações da norma NBR 5738 (ABNT, 2016), que dita o procedimento de moldagem e cura destes.

Existem alguns termos e definições importantes destacados na norma e que devem ser considerados antes do procedimento. São eles:

- a dimensão básica utilizada como referência para os corpos-de-prova cilíndricos deve ser o diâmetro;
- o molde deve ter altura igual ao dobro do diâmetro, que deve ser de 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm ou 45cm;
- as laterais e a base do molde devem ser de aço ou outro material não absorvente, que não reaja com o cimento Portland, e suficientemente rígido para manter sua forma durante a operação de moldagem;
- o molde deve ser aberto na parte superior e permitir fácil desmoldagem, sem danificar os corpos de prova. A base, colocada no extremo inferior

do molde, deve ser rígida e plana, com tolerância de nivelamento plano de 0,05mm;

- o conjunto constituído pelo molde e sua base deve ser estanque, ou vedados com um material adequado que não reaja com o cimento para evitar perda de água;
- não devem ser aceitos moldes com geratrizes abertas desencontradas;
- periodicamente deve ser realizado um controle geométrico, sendo verificadas as dimensões, com exatidão de 0,1mm, e as condições de perpendicularidade e planeza das laterais e bases dos moldes, respectivamente, com exatidão de 0,05mm.

A Figura 9 exemplifica o modelo de molde cilíndrico indicado para corpos-de-prova, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016).

Figura 9: Molde para corpo de prova cilíndrico



Fonte: Halmem (website, 2023)

2.6.1 Moldagem

O procedimento de moldagem inicia-se, segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016), com a preparação dos moldes, que devem ser revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral ou outro lubrificante que não reaja com o cimento. A superfície de apoio dos moldes deve ser rígida e livre de vibrações ou outras perturbações que possam influenciar na forma e propriedades do concreto durante sua moldagem e início de pega.

O método de adensamento deve ser escolhido em função do abatimento do concreto, seguindo as classes de consistência apresentadas anteriormente e descritas na norma vigente, podendo ser manual ou mecânico. Para execução do método de adensamento manual, o número de camadas, assim como, o número de

golpes por camada, é determinado a partir das dimensões do corpo de prova, conforme consta na NBR 5738 (ABNT, 2016). Já o método de adensamento mecânico, segundo a mesma norma, é executado com a utilização de vibradores (no caso da vibração externa, é utilizada uma mesa vibratória) e para cada classe de concreto, tipo de vibrador e molde, é requerido um tempo particular de vibração, que deve ser uniforme, visto que o excesso de vibração pode ocasionar a segregação do agregado. A vibração é finalizada quando a superfície do concreto apresentar um aspecto liso, sem bolhas de ar aparentes.

Com relação ao rasamento da superfície do concreto, a norma NBR 5738 (ABNT, 2016) prescreve que, independentemente do tipo de adensamento escolhido, ele deve ser feito uniformizando com a borda do molde, com o auxílio de uma régua metálica ou colher de pedreiro adequada.

Se possível, os corpos de prova devem ser moldados no local onde serão armazenados. Caso não seja possível, a norma orienta que sejam transportados imediatamente após o rasamento até o local onde devem permanecer durante a cura inicial, de modo que sejam evitadas trepidações, golpes e/ou inclinações que possam perturbar o concreto. Após o endurecimento do concreto, os corpos de prova devem ser transportados dentro das respectivas fôrmas.

2.6.2 Cura

A cura do concreto tem por finalidade impedir a evaporação da água empregada no traço, durante o período inicial de hidratação (ANDOLFATO, 2002, p. 13).

O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível disso, até que os espaços originalmente preenchidos com água na pasta de cimento fresca tenham sido preenchidos pela quantidade requerida de produtos de hidratação do cimento. No caso de concreto nas obras, a cura quase sempre é interrompida bem antes de a máxima hidratação ter ocorrido (NEVILLE, 2016, p. 334).

A NBR 5738 (ABNT, 2016) orienta que, após a moldagem, os corpos de prova devem ser colocados sobre uma superfície lisa, rígida e livre de vibrações ou qualquer ação que possa perturbar o concreto. Devem estar livres também de qualquer intempérie durante as primeiras 24 horas de cura, sendo cobertos com material não absorvente e não reativo, evitando a perda de água do concreto.

Com a finalidade de verificar a qualidade e uniformidade do concreto, a NBR 7215 (ABNT, 2019) define que, terminado o período inicial de cura, os corpos de prova que serão ensaiados devem ser retirados das fôrmas, identificados e imersos, separados entre si, no tanque de cura com água (não corrente) saturada de cal, onde devem permanecer até o momento da ruptura.

Desde quando são retirados do tanque de cura e até o instante do ensaio de compressão, os corpos de prova devem ser protegidos de maneira que toda a superfície exterior permaneça úmida.

Neville (2016) ressalta que a perda de água do concreto deve ser evitada por influenciar não somente no desenvolvimento da resistência, mas também porque resulta em retração plástica, aumento da permeabilidade e redução da resistência à abrasão, uma vez que as propriedades externas do concreto são altamente afetadas pela cura, pois estão mais sujeitas a intempéries, carbonatação e abrasão.

2.7 Regularização dos topos dos corpos de prova

Segundo Neville (2016), os corpos de prova cilíndricos que serão submetidos ao ensaio de compressão e que são colocadas em contato com os pratos da máquina de ensaio tendem a ter a superfície das bases um tanto rugosas e imperfeitas, o que pode gerar uma alta concentração de tensões, e conseqüente diminuição da resistência aparente do concreto.

Para evitar essa redução na resistência, é importante que as superfícies das bases sejam planas, isentas de grãos de areia ou outros detritos que possam resultar em ruptura prematura ou, em casos extremos, em fendimento brusco.

A norma NBR 5738 (ABNT, 2016) determina então a preparação das bases dos corpos de prova cilíndricos, de modo que se tornem superfícies planas e adequadas para a realização dos ensaios de compressão.

Essa preparação pode ser feita de duas maneiras, por retificação ou capeamento. Tais procedimentos serão descritos a seguir.

2.7.1 Sistema de capeamento colado

Por definição, os sistemas de capeamento colados ou aderente consistem no uso de materiais que formam uma fina camada regular que adere física ou quimicamente, à superfície da base do corpo de prova (BEZERRA, 2007, p. 38).

Segundo a NBR 5738 (2016), o capeamento consiste no revestimento dos topos dos corpos de prova com uma fina camada de material apropriado, que atenda características como: aderência ao corpo de prova; compatibilidade química com o concreto; fluidez, no momento de sua aplicação; acabamento liso e plano após endurecimento e resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em concreto.

A norma destaca que outros processos podem ser adotados, desde que sejam avaliados previamente por comparação estatística, com resultados obtidos de corpos de prova capeados por processo tradicional, e os resultados obtidos apresentem valores compatíveis com este processo.

Para o capeamento, deve ser utilizado um dispositivo auxiliar, denominado capeador, que garanta a perpendicularidade da superfície obtida com a geratriz do corpo de prova. A superfície resultante deve ser lisa, isenta de riscos ou vazios e não ter falhas de planicidade superiores a 0,05 mm em qualquer ponto. A NBR 5738 (ABNT, 2016) dita que a espessura da camada de capeamento não deve exceder 3 mm em cada topo.

Ainda segundo a norma, a preparação das bases utilizando o método de capeamento colado, deve ser realizada com pasta ou argamassa de cimento ou com argamassas de enxofre fundido, em que esta última foi escolhida como um dos métodos a ser realizado no presente estudo.

2.7.1.1 Capeamento com argamassa de enxofre

Os autores BUCHER e RODRIGUES FILHO (1983 *apud* BEZERRA, 2007) descrevem que, desde o final da década de 20, tem-se utilizado no capeamento uma mistura de enxofre e filler inerte, que submetidos ao processo de fundição, apresentam grande facilidade de aplicação e aderência, embora seu manuseio seja perigoso e prejudicial à saúde.

Atualmente, para o procedimento de capeamento das bases tem-se utilizado o enxofre em seu estado líquido (fundido), sem adições. O enxofre como material de capeamento possui inúmeras vantagens, dentre as quais destacam-se: o endurecimento rápido, alta produtividade (pela grande quantidade de corpos de prova capeados num determinado período de tempo), boa aderência e elevada resistência à compressão durante as primeiras horas de idade (BUCHER; RODRIGUES FILHO, 1983 *apud* BEZERRA, 2007).

A norma Mercosul NM 77 (CMN, 1996) determina que o capeamento dos corpos de prova de concreto endurecido em cura úmida deve ser feito com argamassa de enxofre. Define também que o material de capeamento não deve fluir nem fraturar durante experimento, e deve apresentar resistência à compressão e módulo de elasticidade superiores ao do concreto a ser ensaiado.

A norma recomenda a seguinte dosagem aproximada em massa para a argamassa de enxofre:

- 75% de enxofre;
- 5% de grafite;
- 20% de material inerte.

Recomenda-se ainda que a resistência à compressão da argamassa de enxofre deve ser superior a 34,5 MPa 2h após a sua moldagem, e permite que qualquer material seja utilizado para preparar as bases, desde que a espessura da camada seja no mínimo 3mm e em nenhum ponto da superfície exceda a 8 mm (BEZERRA, 2007, p. 42).

Segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019), o material para capeamento deve ser preparado fundindo-se enxofre com caulim, pozolanas, quartzo em pó ou outras substâncias, em quantidades proporcionais, de modo que não interfiram no resultado do ensaio. As bases dos corpos de prova devem ser capeadas com a mistura de enxofre à quente, de maneira que a camada formada em cada extremidade satisfaça as condições geométricas e apresente espessura máxima de 2 mm.

Segundo Bezerra (2007, p. 45), o capeamento com enxofre possui uma grande desvantagem que é a liberação do gás sulfídrico (H_2S) durante a fusão do material, gerado em temperaturas acima de $120^{\circ}C$, pois ao ser contaminado com materiais orgânicos como parafina ou óleo, e devido às impurezas dos hidrocarbonetos, em baixas concentrações é tóxico, e em altas concentrações inibe o olfato e pode ser letal.

Há também o risco de inalação do gás dióxido de enxofre (SO_2), produto da combustão, que é altamente tóxico e irritante para as mucosas das vias respiratórias, podendo levar à morte. Esse gás torna-se ainda mais perigoso se combinado com água e o oxigênio, pois origina o ácido sulfúrico (H_2SO_4), mesma reação química que acontece na formação da chuva ácida.

Como medidas de prevenção a acidentes e a inalação destes gases tóxicos, a norma ASTM C 617 (ASTM, 1998) aconselha que o recipiente de derretimento esteja

dentro de uma capela de exaustão com as emanções esgotadas para fora do ambiente para impedir o acúmulo do gás.

A norma NM 77 (CMN, 1996) também orienta que o local de trabalho onde se realizará a manipulação e mistura do enxofre deve ser bem ventilado, o recipiente de aquecimento da mistura deve ficar sob capela ou outro dispositivo com exaustão forçada, que assegure a eliminação do efluente gasoso para o exterior.

2.7.2 Sistema de capeamento não colado

O capeamento de bases de corpos de prova não colados, ou não aderentes, como o próprio nome diz, não adere ao concreto, e consiste no uso de uma espécie de almofada para bases do corpo de prova, podendo ser um material confinado ou não (BEZERRA, 2007, p. 46). Atualmente, os materiais mais utilizados nesse tipo de capeamento são os elastômeros de borracha, principalmente de neoprene, em forma de disco, mas existem outros materiais que também podem ser empregados nessa técnica, como a areia e o papelão. A Figura 10 demonstra como é feito o capeamento com elastômero e com areia.

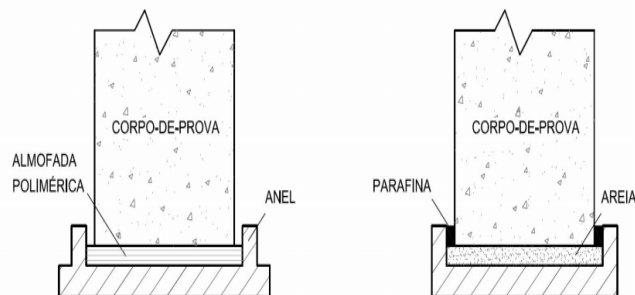
Figura 10: Exemplos de materiais utilizados no capeamento não colado

Fonte: BEZERRA

(2007)

(a) SISTEMA DE CAPEAMENTO POLIMÉRICO

(b) SISTEMA COM CAIXA DE AREIA



Uma maneira de evitar a execução dos capeamentos colados foi idealizada mediante o uso de lâminas de chumbo ou

maneira de execução dos colados foi mediante o uso de papelão, borracha,

interpostas entre os pratos da máquina e as faces dos corpos de prova, que foram utilizadas durante certa época (BUCHER; RODRIGUES FILHO, 1983).

As lâminas de papelão, chumbo ou borracha possuem baixa resistência ou escoam sob carga, produzindo tensões de tração tangenciais que fazem com que os corpos-de-prova rompam pela combinação de tração e compressão com a conseqüente queda acentuada da resistência à compressão, e por esse motivo, estas deixaram de ser usadas (BEZERRA, 2007, p.46).

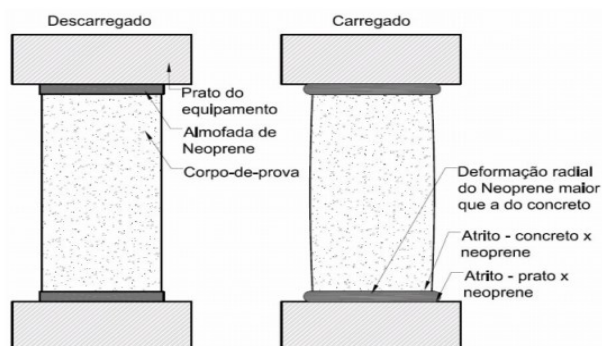
Para Ruduit (2006) e Menezes (2011), a utilização de neoprene com reforço metálico nos ensaios de compressão axial apresenta resultados muito semelhantes aos obtidos nos ensaios com capeamento de enxofre. Entretanto esse tipo de capeamento nem sempre é viável, e pouco utilizado, pelo fato dos elastômeros apresentarem um alto valor, e também pelo cuidado que se deve ter com a conservação deste tipo de material.

2.7.2.1 Capeamento com almofada de neoprene

A almofada de borracha de neoprene é a principal e mais difundido material utilizado no capeamento não colado para os ensaios de resistência à compressão.

Segundo o autor Ruduit (2006) e alguns outros estudiosos, este tipo de técnica de capeamento, quando confinado, apresenta algumas discrepâncias e inconsistências se comparado aos resultados obtidos com o capeamento com argamassa de enxofre, isto porque a almofada de neoprene deforma-se radialmente mais que o corpo de prova ensaiado, gerando forças de tração na base, conforme demonstra a Figura 11.

Figura 11: Capeamento com almofada de neoprene



Fonte: Bezerra (2007)

Já o capeamento com neoprene confinado, isto é, utilizando uma base metálica como reforço (ou anel de retenção), cuja função é restringir a deformação lateral da borracha, segundo a ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2015), garante uma distribuição uniforme da carga aplicada pelo equipamento de ensaio, uma vez que as almofadas sofrem uma deformação no carregamento inicial e conformam-se às extremidades do corpo de prova.

Ainda segundo a norma, este tipo de capeamento somente é previsto para ensaios de aceitação de concretos com resistências entre 10 MPa e 85 MPa, embora pesquisas apontem que sistemas de capeamento com almofadas poliméricas

confinadas obtiveram resultados expressivos em concretos de alta resistência, com até 130 MPa (BEZERRA, 2007, p. 48).

O capeamento com neoprene confinado é composto por um par de elastômeros e um par de bases metálicas com anel que envolve a almofada de neoprene, conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12: Base metálica com anel de retenção e almofadas de neoprene confinadas



Fonte: Petroonline (website, 2023)

Segundo a norma ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2015), este conjunto, chamado capeador elastomérico é reutilizável, sendo que a borracha de neoprene pode ser utilizada por até mil vezes e posteriormente deve ser descartada, mas caso a borracha apresente desgastes excessivos nas bordas, deve ser imediatamente substituída.

As condições de uso da almofada de neoprene, em razão da resistência à compressão recomendada, previstas pela ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2015), estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Condições para o uso da almofada de neoprene

Resistência à compressão do corpo-de-prova (MPa)	Dureza Shore A	Teste de qualificação	Número máximo de reuso
10 a 40	50	Não	100
17 a 50	60	Não	100
28 a 50	70	Não	100
50 a 80	70	Necessário	50
Acima de 80	-	Não permitido	-

Fonte: ASTM (2015)

É válido ressaltar que, segundo a norma, o corpo de prova deve ter pelo menos 5 mm de espessura para determinação da dureza Shore A, e pelo menos 3 mm para a determinação da dureza Shore D.

A norma ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2015) ressalta também que os desníveis transversais ao diâmetro das bases dos corpos de prova não devem exceder 5 mm, e se as extremidades do cilindro não se enquadrarem nesta tolerância, o corpo de prova não deve ser submetido ao ensaio, a não ser que as irregularidades sejam corrigidas por meio de corte ou retífica.

Bezerra (2007, p. 51) orienta para o cuidado com o ensaio com capeamentos utilizando borrachas de neoprene, pois a ruptura é mais violenta se comparada com os ensaios com capeamentos colados e devem ser tomadas precauções para evitar ferimentos devido ao fato de o capeamento absorver mais energia de deformação.

2.7.3 Sistema de capeamento por desgaste mecânico

O processo de desgaste mecânico para regularização das bases dos corpos de prova consiste na remoção de uma fina camada nas extremidades da peça, de forma a garantir a integridade estrutural das camadas adjacentes, e proporcione uma superfície lisa e livre de abaulamentos e ondulações.

A norma NM 77 (CMN, 1996), determina a realização deste procedimento de corte por retífica quando os corpos de prova apresentam uma base muito irregular e não é possível a realização do capeamento com argamassa de enxofre.

A retificação é realizada com a utilização de ferramentas abrasivas como lâminas diamantadas, em uma retificadora, máquina especialmente adaptada para essa finalidade.

Em geral, a fixação do corpo de prova é feita com um perfil metálico, tipo cantoneira, longitudinal ao mesmo, sobre uma mesa coordenada, a posição do corpo de prova é perpendicular ao sentido de desbaste do disco diamantado da máquina retificadora utilizada no presente estudo. Há um sistema de refrigeração automática por bomba submersa, onde o fluxo de água é contínuo junto ao disco, com reaproveitamento da mesma, e o avanço do corpo de prova é manual em dois sentidos perpendiculares, através da mesa coordenada.

O investimento inicial e o custo de operação dos equipamentos de retifica geralmente são muito mais altos comparados aos demais sistemas de capeamento, o que torna o procedimento muitas vezes inviável (MACHADO; SCHLOSER; VILLATOREO, 2012, p. 30).

Segundo Quirino (2018, p. 25), o método de desgaste das superfícies é teoricamente o que fornece resultados mais confiáveis, uma vez que o corpo de prova

entra em contato diretamente com os pratos da prensa hidráulica durante o ensaio de compressão, sem a interferência de nenhum outro material, o que não acontece nos capeamentos por enxofre e neoprene. No entanto, por produzir grande quantidade de pó devido ao desgaste da peça, e elevado ruído, além do alto custo da máquina retificadora, este procedimento é pouco utilizado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento realizado no presente estudo pretende avaliar a influência da regularização da superfície dos topos de corpos de prova de concreto, através dos métodos de capeamento com argamassa de enxofre, almofada de neoprene e pelo processo de retificação, bem como corpos de prova sem regularização de topo, e posteriormente analisar os resultados obtidos mediante ensaio segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para tanto, a metodologia adotada nessa pesquisa é composta pela revisão bibliográfica, estudo experimental e análise dos resultados. O levantamento bibliográfico baseou-se em pesquisas e coleta de dados disponíveis em artigos científicos e dissertações, normas brasileiras e americanas, e na literatura, determinando os métodos que seriam utilizados no programa experimental do ensaio de compressão axial e as variáveis que influenciam no resultado final deste.

Foram moldados 20 corpos de prova, os quais sofreriam processos de regularização de topo distintos. Inicialmente foram definidos os procedimentos de ensaio a serem adotados, e foram destinados 5 corpos de prova para cada tipo de capeamento, totalizando as 20 unidades a serem rompidas. Os corpos de prova foram moldados com a utilização de moldes metálicos cilíndricos, medindo 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (10 x 20 cm).

O quadro 3 descreve as etapas e ensaios do experimento em questão, realizados seguindo as respectivas normas vigentes, brasileiras e americanas.

Quadro 3: Relação entre as etapas e ensaios experimentais e as normas regulamentadoras

Etapas/ensaio experimental	Norma Regulamentadora
Procedimentos de preparação, controle e aceitação do concreto	NBR 12655 (ABNT, 2015)
Classificação, consistência e grupos de resistência	NBR 8953 (ABNT, 2015)
Moldagem e Cura dos corpos de prova	NBR 5738 (ABNT, 2015)
Abatimento do tronco de cone	NBR 16889 (ABNT, 2020)
Capeamento com argamassa de enxofre	NM 77 (CMN, 1996) NBR 7215 (ABNT, 2019) ASTM C 617 (ASTM, 1998)
Capeamento com almofada de neoprene	ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2015)
Capeamento por retífica	NM 77 (CMN, 1996)
Ensaio de resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)

Fonte: Autoria própria (2023)

Os ensaios pertinentes ao estudo foram realizados nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus de Campo Mourão.

3.1 Caracterização dos Materiais e Equipamentos

3.1.1 Materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de concreto

O concreto foi preparado com materiais já existentes no laboratório, separados e pesados corretamente antes da mistura, segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022). Inicialmente, foram utilizados os seguintes materiais:

- cimento Portland do tipo CP-II Z 32, da marca Votoran;
- areia natural média;
- brita basáltica n° 1, com dimensão máxima de 19 mm;
- água potável da rede de abastecimento local.

3.1.2 Materiais utilizados no capeamento

Os ensaios de resistência à compressão para o traço de concreto foram realizados com diferentes tipos de capeamento. Basicamente, foi utilizada a argamassa de enxofre fundido, almofadas de neoprene, e o processo de retificação, conforme demonstra as Fotografias 2, 3 e 4, respectivamente.

Fotografia 2: Argamassa de enxofre fundido



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 3: Capeador com base metálica e almofadas de neoprene confinadas



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 4: Retificação com lâmina adiamantada



Fonte: Autoria própria (2023)

Todos estes materiais citados para os procedimentos de capeamento se encontraram disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR.

3.1.3 Máquinas e equipamentos utilizados no procedimento experimental

Inicialmente, para a mistura dos materiais, foi utilizada uma máquina betoneira, estacionária, do tipo eixo inclinado, semelhante à máquina ilustrada na Figura 13, com capacidade para 200L.

Figura 13: Ilustração da máquina betoneira estacionária utilizada no preparo do concreto



Fonte: Leroy Merlin (website, 2023)

Para a regularização das superfícies dos corpos de prova por meio da retificação, foi utilizada a máquina retificadora com lâmina adiamantada fixa e mesa coordenada, como mostra a Fotografia 5.

Fotografia 5: Máquina Retificadora com disco adiamantado fixo e movimentação do corpo-de-prova em mesa coordenada



Fonte: Autoria própria (2023)

Já o rompimento dos corpos de prova para determinação da resistência à compressão foi executado com a utilização de uma prensa eletro-hidráulica informatizada, conforme demonstra a Fotografia 6, com capacidade máxima de 2000 kN e controle manual de velocidade de aplicação de carga.

Fotografia 6: Prensa eletro-hidráulica com capacidade de carga de 2000 kN



Fonte: Aúoria própria (2023)

3.2 Métodos e ensaios

3.2.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

A fase experimental do presente estudo contou com as etapas de confecção, moldagem, cura, nivelamento dos topos por diferentes tipos de capeamento, e ensaios laboratoriais de um total de 20 corpos de prova de concreto.

Inicialmente, o concreto foi dosado determinando-se o traço em volume, de 1:2:3 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), e a relação água/cimento em 0,5. Foi utilizado 12,89Kg de cimento; 25,76Kg de areia média; 38,64Kg de brita 1 e 5,950L de água, conforme determina a NBR 8953 (ABNT, 2015). Os materiais foram colocados um a um na betoneira com capacidade de 200L, seguindo a ordem de mistura:

- 1° - agregado graúdo (brita1);
- 2° - agregado miúdo (areia média);
- 3° - cimento;
- 4° - água

até formar uma massa homogênea, seguindo as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2016) e NBR 12655 (ABNT, 2022), e obedecendo as especificações do fabricante.

Para o controle de recebimento e aceitação, foi retirada uma amostra da betonada e realizado o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone,

conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020), onde constatou-se que o concreto fresco sofreu um abatimento de 9 cm, conforme mostra a Fotografia 7.

Fotografia 7: Ensaio de consistência pelo abatimento de tronco de cone (*slump test*)



Fonte: Autoria própria (2023)

Após o ensaio de consistência, os corpos de prova foram colocados nos moldes cilíndricos, e em seguida realizou-se o adensamento mecânico, seguindo as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2016), no qual foi utilizada uma mesa vibratória, conforme a Fotografia 8. Foi necessário um tempo particular de vibração, no qual a norma orienta o seu término no momento em que a superfície apresenta um aspecto relativamente liso e livre de bolhas.

Fotografia 8: Adensamento mecânico com utilização de mesa vibratória



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a moldagem, foram mantidos no mesmo ambiente de laboratório, conforme determina a NBR 5738 (ABNT, 2016), sobre uma superfície lisa, rígida e livre de vibrações, durante as primeiras 24 horas de cura. Terminado este período inicial de cura, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e imersos, separados entre si, em um tanque de cura com água (não corrente) saturada de cal, conforme mostrado na Fotografia 9, onde permaneceram por 28 dias (tempo de cura úmida), até o momento da ruptura.

Vale ressaltar que todas as amostras de corpos de prova foram confeccionadas com o mesmo traço de concreto e submetidas às mesmas condições de cura.

Fotografia 9: Corpos de prova imersos em tanque de cura úmida



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.2 Regularização das superfícies dos corpos de prova

Decorridos os 28 dias de cura, conforme determina a NBR 5738 (ABNT, 2016), os corpos de prova foram retirados da solução saturada de cal onde estavam imersos. Realizou-se então a medição do diâmetro das amostras, como mostra a Fotografia 10, para que posteriormente fosse possível calcular a real resistência à compressão das amostras a partir da divisão da carga máxima suportada até a ruptura pela área obtida. Estas medidas foram realizadas com a utilização de um paquímetro.

Fotografia 10: Determinação do diâmetro dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro



Fonte: Autoria própria (2023)

As medidas da altura e do diâmetro dos corpos de prova foram realizadas, também, para possível necessidade do cálculo do fator de correção, uma vez que, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), se a relação altura/diâmetro (h/d) for menor que 1,94, devem ser feitas as devidas correções, multiplicando-se a força F obtida, pelo fator de correção correspondente ao h/d encontrado, conforme o Quadro 4.

Quadro 4: Fator de correção h/d

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2018)

Após as devidas medições, iniciou-se a preparação dos tops dos corpos de prova, onde ficou determinada a divisão igualitária das amostras pelos tipos de capeamento realizados, em que 5 amostras foram regularizadas por retificação, em outras 5 amostras foi realizado o capeamento com argamassa de enxofre fundido, outras 5 foram utilizadas as almofadas de neoprene confinado, e nas últimas 5 amostras não foi realizado nenhum tipo de capeamento. A Fotografia 11 ilustra os 20 corpos de prova prontos para o ensaio de resistência à compressão.

Fotografia 11: Corpos de prova prontos para o ensaio



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.2.1 Capeamento por Retificação

Como já mencionado, a retificação consiste na remoção de uma fina camada de material do topo do corpo de prova, com a utilização de uma máquina retificadora, adaptada para este fim.

Para execução deste tipo de capeamento, o laboratório da UTFPR dispõe de uma retificadora horizontal, com disco rotativo adiamantado móvel, destinada à regularização de amostras de concreto.

Assim, os corpos de prova identificados com os números de 1 a 5 foram submetidos à retificação, posicionados um por vez no perfil metálico tipo cantoneira, sobre uma mesa coordenada, na posição perpendicular ao sentido de desbaste da lâmina adiamantada, como mostra a Fotografia 12. O avanço do corpo de prova é manual em dois sentidos perpendiculares, através da mesa coordenada.

Fotografia 12: Retificação com fixação do corpo de prova e com disco rotativo adiamantado móvel



Fonte: Autoria própria (2023)

As falhas de planicidade em qualquer ponto da superfície obtida, não devem ser superiores a 0,05 mm. Assim sendo, após o procedimento de desgaste mecânico, o acabamento das superfícies das amostras se mostrou satisfatório, como mostra a Fotografia 13, deixando o corpo de prova apto para o ensaio de resistência à compressão.

Fotografia 13: Corpo de prova retificado



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.2.2 Capeamento com almofadas de neoprene confinadas

O capeamento com almofadas de neoprene não é muito difundido, e não se tem estudos muito relevantes acerca do seu uso, tanto que a norma que orienta e dá recomendações para a execução do ensaio é americana, a ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2015), norma esta que serviu de base para o estudo e execução do capeamento com almofadas de neoprene confinadas.

Para o ensaio, foi utilizado um conjunto de capeador elastomérico, com um par de almofadas de neoprene e um par de bases metálicas com anel que envolve a almofada, e estas possuem dureza nominal de 60 Shore, conforme mostrado anteriormente.

A base metálica deve estar limpa antes da colocação do disco no seu interior, e em caso de dificuldade, pode ser utilizado talco para auxiliar o encaixe, conforme mostra a Fotografia 14.

Fotografia 14: Bases metálicas com talco para facilitar a colocação dos discos



Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida, as cinco amostras de concreto foram posicionadas nas bases metálicas, e uma a uma foram colocadas na prensa, conforme o corpo de prova mostrado na Fotografia 15, para em seguida serem submetidas ao ensaio de compressão.

Fotografia 15: Corpo de prova com capeamento de neoprene posicionado na prensa



Fonte: Autoria própria (2023)

De todos os métodos de capeamento, é possível perceber que este utilizando discos de neoprene confinados é o mais prático, de execução simples, e que menos sofre influência externa, como por exemplo, do operador, desde que dada a devida atenção ao procedimento e executada corretamente cada etapa prevista pela respectiva norma regulamentadora.

3.2.2.3 Capeamento com argamassa de enxofre fundido

Para a execução deste experimento, o enxofre utilizado foi reaproveitado de outros experimentos, sem nenhuma adição à mistura, mostrado na Fotografia 16, com o propósito de avaliar a influência deste na resistência à compressão. Os cinco corpos de prova foram submetidos ao capeamento com argamassa de enxofre, no qual o material foi fundido com auxílio de uma panela de ferro, aquecida em um fogão de alta pressão, a aproximadamente 120 °C, de acordo com especificado na norma NM 77 (CMN, 1996). Nessas temperaturas a argamassa de enxofre apresentou uma boa consistência, homogeneidade e viscosidade, conforme mostra a Fotografia 17.

Fotografia 16: Enxofre em pedra, reutilizado



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 17: Argamassa de enxofre fundido



Fonte: Autoria própria (2023)

É importante ressaltar que o operador utilizou equipamentos de proteção como luvas e óculos, pois o enxofre em estado derretido pode provocar graves queimaduras. O prato do capeador, estando isento de sujeira e impurezas, foi untado com óleo, para facilitar a desmoldagem do corpo de prova após o capeamento, conforme ilustra a Fotografia 18.

Fotografia 18: prato do capeador untado com óleo



Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida, a argamassa de enxofre foi depositada no prato do capeador, como mostrada na Fotografia 19.

Fotografia 19: Argamassa de enxofre pronta no capeador



Fonte: Autoria própria (2023)

Depois da argamassa depositada, imediatamente foi colocado o corpo de prova no capeador com enxofre, de forma paralela à cantoneira na parte de trás do capeador, onde a amostra fica encostada, conforme a Fotografia 20. O operador exerceu uma pequena força, pressionando o corpo de prova para que este ficasse

livre de bolhas sob a camada de capeamento, até que ela iniciasse o processo de secagem.

Fotografia 20: Corpo de prova com uma das faces mergulhada na argamassa de enxofre



Fonte: Autoria própria (2023)

As duas faces foram completamente mergulhadas na argamassa de enxofre fundido, conforme mostra a Fotografia 21.

Fotografia 21: Corpo de prova mergulhado na argamassa de enxofre



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a execução dos capeamentos das duas faces das amostras, conforme orienta a norma, estas foram colocadas em uma superfície limpa e rígida, ilustradas na Fotografia 22, onde permaneceram pelo período de aproximadamente duas horas,

desde a execução do ensaio até serem submetidos à ruptura, no ensaio de resistência à compressão.

Fotografia 22: Corpos de prova com capeamento de enxofre



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.2 Ensaio de resistência à compressão axial

Após realizados todos os capeamentos, e para o cálculo do f_{ck} do concreto, posteriormente os corpos de prova foram submetidos aos ensaios destrutivos de compressão axial, respeitando a idade específica de 28 dias e as tolerâncias de tempo, ambas determinadas pela NBR 5739 (ABNT, 2018), e descritas na Tabela 6.

Tabela 6: Idades do ensaio de compressão e suas tolerâncias permitidas.

Idade de ensaio	Tolerância permitida (h)
24 horas	0,5
3 dias	2
7 dias	6
28 dias	24
63 dias	36
91 dias	48

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2018)

As Fotografias 23, 24, 25 e 26 ilustram cada corpo de prova com um tipo de capeamento diferente. No total, 20 amostras foram ensaiadas, nos quais 5 foram mantidas sem nivelamento, 5 foram niveladas com argamassa de enxofre fundido, 5 com almofadas de neoprene e outras 5 foram retificadas. Todos os ensaios foram realizados em corpos de prova com 28 dias de idade.

Fotografia 23: Ensaio de compressão em corpo de prova sem capeamento



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 24: Ensaio de compressão em corpo de prova com capeamento por retífica



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 25: Ensaio de compressão em corpo de prova com capeamento por almofadas de neoprene



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 26: Ensaio de compressão em corpo de prova com capeamento com argamassa de enxofre fundido



Fonte: Autoria própria (2023)

O carregamento do ensaio foi aplicado continuamente, sem choques, com a velocidade de carregamento constante durante todo o ensaio, que cessou quando se constatou uma queda na força aplicada, indicando a ruptura do corpo de prova, conforme orienta a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Todo o ensaio de compressão axial foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UTFPR.

Após os ensaios, foram realizadas análises estatísticas para que fosse possível avaliar o quanto cada método influenciou nos resultados dos ensaios.

4 RESULTADOS

Com base no ensaio de resistência à compressão axial, realizado com os corpos de prova de concreto após 28 dias, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), cujas superfícies das bases foram preparadas com capeamentos diversos, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para cada grupo de capeamento.

Tabela 7: Valores obtidos no ensaio de resistência à compressão axial

Tipo de regularização das bases	Amostr a	Área dos corpos de prova (cm ²)	Força Normal (kN)	Tensão Normal (MPa)
Sem regularização	1	78,57	184,2	23,44
	2		214,6	27,31
	3		155,5	19,79
	4		224,4	28,56
	5		153,3	19,51
Retificado	1	78,41	261,4	33,3
	2		259,8	33,13
	3		255,5	32,58
	4		252	32,13
	5		254,3	32,43
Enxofre	1	78,54	227,2	28,92
	2		243,3	31,0
	3		255,7	32,6
	4		247,1	31,46
	5		248	31,6
Neoprene	1	78,68	266,9	33,92
	2		273,9	34,81
	3		279,3	35,5
	4		266,7	33,9
	5		264,4	33,6

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022), encontra-se o f_{ck} de betonadas de pequeno volume (menor que 10 m³) pela Equação 13:

$$f_{ck} = \Psi_6 \times f_1 \quad (\text{Equação 13})$$

onde Ψ_6 é dado pelo Quadro 5, para valores de 2 a 5, e f_1 é o valor da menor resistência.

Quadro 5: Valores de Ψ_6

Condição de preparo	Número de exemplares (n)										
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	≥ 16
A	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
B ou C	0,75	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02

Fonte: Adaptado da NBR 12655 (ABNT, 2022)

A partir dos dados do Quadro 5, tem-se o exemplo do seguinte cálculo da resistência à compressão das amostras sem regularização de topo:

$$f_{ck,est} = \Psi_6 \times f_1$$

$$f_{ck,est} = 0,91 \times 19,51$$

$$f_{ck,est} = 17,75 \text{ MPa.}$$

Mediante os cálculos realizados, a Tabela 8 apresenta os valores de resistência característica do concreto (f_{ck}), obtidos no ensaio, para cada grupo de capeamento, bem como o valor do desvio padrão (Sd).

Tabela 8: Valores obtidos de f_{ck} e Sd

Tipo de regularização das bases	f_{ck} (MPa)	Sd
Sem regularização	17,75	4,17
Retificado	29,24	0,49
Enxofre	26,32	1,36
Neoprene	30,58	0,79

Fonte: Autoria própria (2023)

A Fotografia 27 apresenta os tipos de ruptura de quatro corpos de prova após o ensaio de compressão axial, no qual cada um recebeu um tipo de tratamento de topo diferente. É possível perceber que para cada tipo de capeamento, as amostras sofreram diferentes tipos de tensões de ruptura, em diferentes pontos do corpo de prova, sendo que a amostra com nivelamento por neoprene apresenta uma ruptura por cisalhamento, e a maior média de resistência obtida no ensaio de compressão.

Fotografia 27: tipos de ruptura dos corpos-de-prova após ensaio de compressão
a) Retificado; b) Sem capeamento; c) Neoprene; d) Enxofre.



Fonte: Autoria própria (2023)

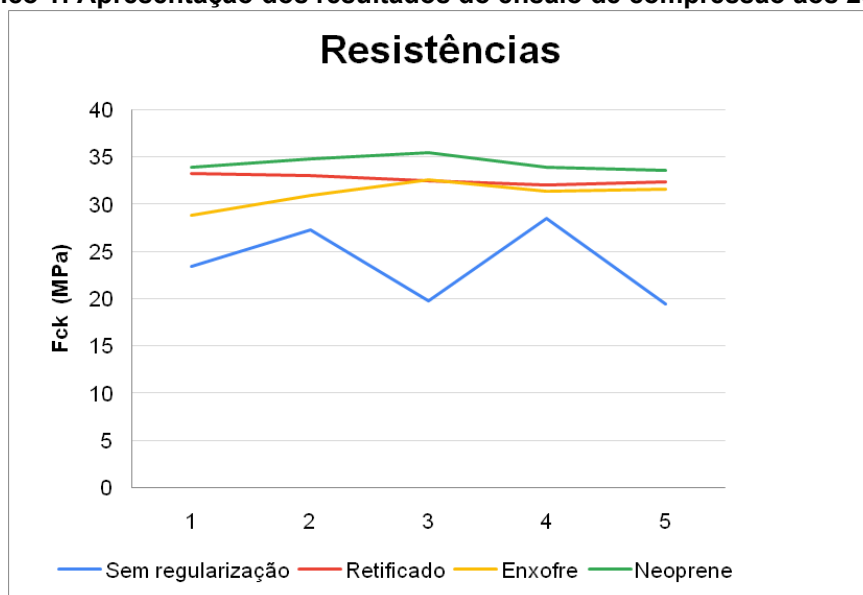
Nota-se que, de acordo com os dados da Tabela 8, com base no valor obtido da resistência à compressão do concreto sendo 17,75 Mpa para o grupo em que não foi realizado nenhum tipo de capeamento e de 26,32 MPa no grupo com capeamento por enxofre, estas são inferiores às resistências obtidas nos capeamentos por retificação e com almofada de neoprene. Estes baixos valores de resistência podem ser atribuídos a diversos fatores já mencionados, que influenciam significativamente nos resultados experimentais, como o traço e a dosagem do concreto, condições de cura, a relação água/cimento, moldagem, e a própria preparação e regularização das superfícies das bases com os diferentes capeamentos.

O enxofre, por exemplo, foi reaproveitado de outros experimentos, pois estando resfriado encontra-se em pequenos fragmentos, podendo ser submetido novamente à fusão para execução de um novo capeamento, o que pode afetar sua composição e características, influenciando nos resultados de resistência.

Com os resultados apresentados, as técnicas que se mostraram mais eficientes e que se destacam são as realizadas com nivelamento por retífica e com as

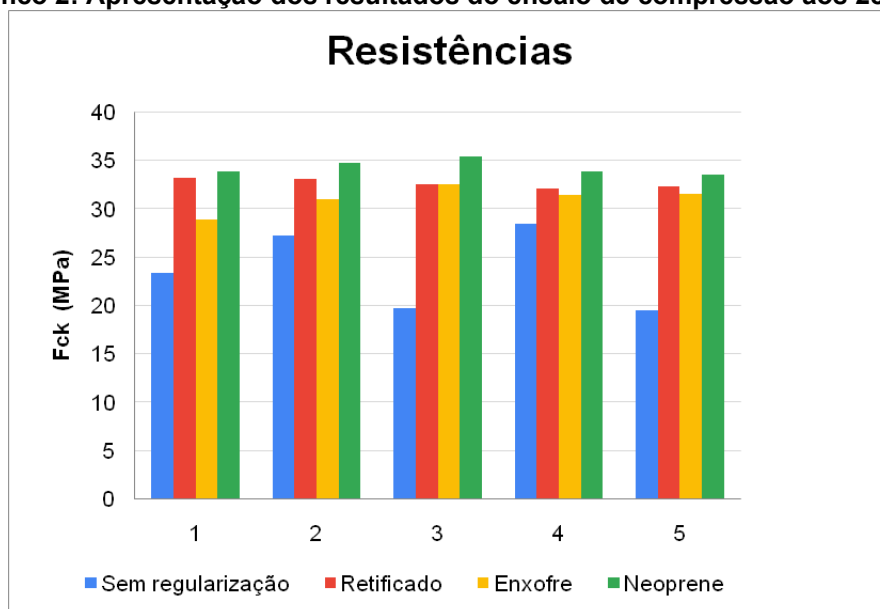
almofadas de neoprene, pois estas apresentam uma resistência superior às demais, sendo 29,24 MPa e 30,58 MPa respectivamente, conforme apresentados no Gráfico 1 e 2, e apresentaram também as menores variações.

Gráfico 1: Apresentação dos resultados do ensaio de compressão aos 28 dias



Fonte: Autoria própria (2023)

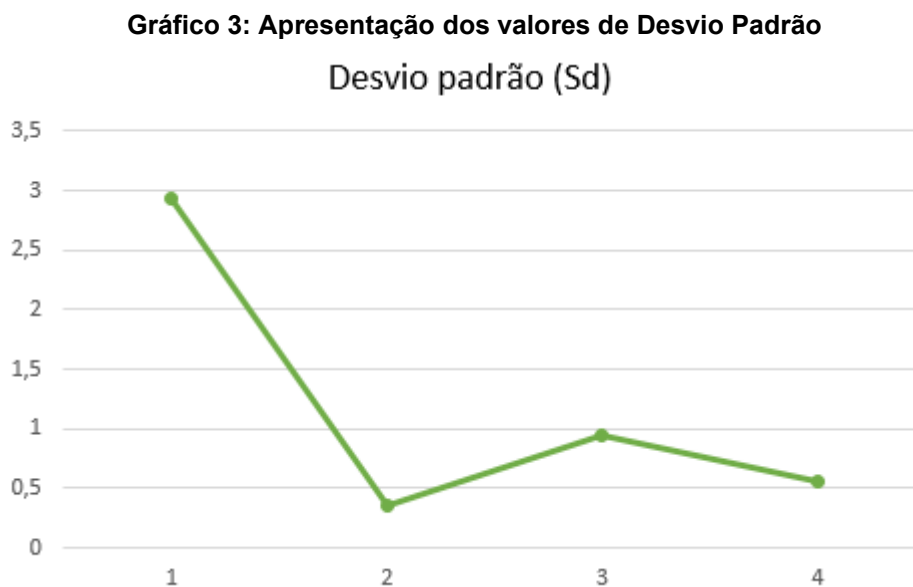
Gráfico 2: Apresentação dos resultados do ensaio de compressão aos 28 dias



Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 3 apresenta o Desvio Padrão (Sd) para os resultados de tensões de ruptura das amostras de concreto com o ensaio de resistência à compressão,

sendo que os corpos de prova sem regularização apresentam a maior taxa de desvio padrão, e os que foram regularizados na retífica, o menor desvio padrão.



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir do exposto, pode-se afirmar que os valores de resistência à compressão encontrados são estatisticamente diferentes para cada grupo de amostras com os diferentes tipos de capeamento, e a técnica de nivelamento executada influencia diretamente nos resultados dos ensaios.

5 CONCLUSÃO

Com base nas pesquisas e experimentos realizados e resultados obtidos através dos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova de concreto, conclui-se que fatores como dosagem, moldagem, cura, e preparação das superfícies de corpos de prova são determinantes para garantir a qualidade e resistência do concreto, influenciando no resultado final.

Os diferentes tipos e materiais de capeamento adotados na regularização das bases dos corpos de prova influenciam diretamente nos resultados dos ensaios de compressão do concreto.

As amostras que não receberam nenhum tipo de regularização na superfície dos topos apresentaram resultados muito baixos de resistência, comparadas às demais. A norma regulamentadora do ensaio de compressão dita que a superfície de aplicação de cargas deve ser plana, paralela e lisa, de modo que a carga seja distribuída uniformemente e evite a concentração de tensões, o que não ocorreu nas amostras sem nivelamento, pois apresentaram irregularidades nas bases, contribuindo para o surgimento destas tensões e valores de resistência inferiores.

No capeamento por argamassa de enxofre fundido, as resistências à compressão foram inferiores às resistências obtidas nos capeamentos por retificação e com almofada de neoprene, sendo o método menos indicado também pelo fato de ser altamente tóxico e prejudicial à saúde, se manipulado incorretamente e sem as devidas precauções.

O nivelamento por retificação demonstrou ser eficiente, garantindo o valor de resistência significativo de 29,24 MPa, embora a presença de ranhuras na retífica possa provocar um aumento de tensões na superfície devido diminuição da área de contato no momento de aplicação da carga pela prensa, além de ocasionar o acúmulo das tensões.

Já a regularização das superfícies com almofadas de neoprene confinadas em bases metálicas também apresentou valores de resistência satisfatórios, sendo estes os maiores registrados nos ensaios, e com desvio padrão relativamente baixo, contribuindo para que este método fosse o mais indicado.

Como sugestão para trabalhos futuros, é interessante a confecção de dois ou mais traços diferentes de concreto, para o estudo do capeamento e ensaio de compressão em corpos de prova com classes de resistência maiores e com um

número maior de amostras moldadas. Com base nas pesquisas bibliográficas, experimentos realizados com duas ou mais classes, até mesmo em concretos de alta resistência, e com maior quantidade corpos de prova, podem aumentar os valores médios de resistência, demonstrando resultados ainda mais satisfatórios e que também atendem aos parâmetros de aceitação impostos pelas normas regulamentadoras.

Sugere-se também que o nivelamento com argamassa de enxofre fundido seja executado utilizando o material em pó, uma vez que apresenta suas propriedades naturais e suas características após a fusão são preservadas, podendo não interferir de forma muito negativa nos resultados e garantir valores mais compatíveis de resistência. E para o capeamento com almofadas de neoprene, o ideal é que se explore e amplie o campo de estudo, e desenvolvam-se normas regulamentadoras que orientem quanto à execução deste procedimento, pois no presente estudo foi utilizada uma norma americana como base, visto que este tipo de capeamento garantiu valores médios de resistência maiores que os demais métodos, considerados satisfatórios.

Por fim, comparando os diferentes tipos de capeamento, com a finalidade de avaliar as influências destes na determinação da resistência à compressão obtida através dos ensaios realizados no presente estudo, conclui-se que o capeamento pelo processo de desgaste mecânico por retífica e com almofadas de neoprene são os mais indicados.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, R. P. **Controle Tecnológico Básico do Concreto**. Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural, Faculdade de Engenharia – Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 617** - Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1231/C 1231M** - Standard practice for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7680-1**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-1**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-2**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulos de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16886**: Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **ABNT NM 77**: Concreto - Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaio de compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

BEZERRA, A. C. S. **Influência das Variáveis de Ensaio nos Resultados de Resistência à Compressão de Concretos**: Uma Análise Experimental e Computacional. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ISMS-74UPHH>. Acesso em 15 nov. 2023.

BUCHER, H. R.; RODRIGUES FILHO, H. C. - **Argamassas de enxofre para capeamento de corpos de prova**. Seminário sobre controle de resistência do concreto, IBRACON, São Paulo, 1983.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao Estudo da Influência do Agregado nas Propriedades de Argamassas Compostas a Partir de Curvas Granulométricas**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001031238>. Acesso em: 20 nov. 2023

CASTRO, S. B.; ARAÚJO, R. C.; CARASEK, H. **Influência da técnica de capeamento na resistência à compressão do concreto permeável**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 19., 2022, Canela. Anais [...] Porto Alegre: ENTAC, 2022. p. 1-9.

CHIES, J. A. **Corpos de prova submetidos à compressão: influência do tipo de preparação das faces para diferentes níveis de resistência do concreto**. 2011. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011. Disponível em:

http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9330/2/CT_TCC_2012_1_01. Acesso em: 18 nov. 2023

DURAN, A. P.; FRACARO, D. **Verificação das Propriedades Básicas do Concreto Industrializado Fornecido em Embalagens de 30kg**. 2011. Trabalho de Diplomação (Tecnologia em Concreto) - Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2011. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9321>. Acesso em: 20 nov. 2023

FERNANDES, M. C. **Influência da Retificação de Superfícies de Corpos de Prova na Variabilidade da Resistência à Compressão no Controle Tecnológico do Concreto**. 2011. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/39144>. Acesso em: 21 nov. 2023

GIONGO, J. S. **Concreto Armado**: Projeto Estrutural de Edifícios. São Carlos, EESC - USP, 2007.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (ed). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland**. São Paulo: PINI, 1993.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Rio Grande do Sul: IBRACON, 2011.

KIAHARA, Y., CENTURIONE, S. L. **O cimento Portland**. In: ISAIA G. C. (ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.1, p. 295-322.

MACHADO, A. M.; SCHLOSER, J. D.; VILLATORE, M. **Comparativo entre Retíficas de Corpos de Prova De Concreto**. 2012. Trabalho de Diplomação (Tecnologia em Concreto) - Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2012. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9330>. Acesso em: 15 nov. 2023

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENEZES, A. J. R. **Estudo Comparativo entre Capeamento de Corpos de prova de Concreto com Enxofre, uso de Neoprene e Retificação de Topo para Ensaio de Resistência à Compressão Axial**. 2011. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2011. Disponível em: DEECC: <http://www.deecc.ufc.br> > Al...PDF DEECC - Universidade Federal do Ceará. Acesso em: 20 nov. 2023.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PACHECO, J.; *et al.* **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. Anais [...] São Paulo: Ibracon, 2014. p. 1-12.

PINHEIRO, L. M.; GIONGO, J. S. **Concreto Armado: Propriedades dos Materiais**. Trabalho apresentado ao Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em:

http://repositorio.eesc.usp.br/server/api/core/bitstreams/9ee4780d-37d1-441e-a561-45a1cc11a5a0/content&ved=2ahUKEwix_Lom_mCAXW9JrkGHbVhBT8QFnoECCIQAQ&usg=AOvVaw3ZXm-dC1lcBs05UZWgH4Cj. Acesso em: 18 nov. 2023

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Trabalho apresentado ao Departamento de Estruturas, EESC - Universidade de São Paulo, 2007.

QUIRINO, L. M. O. **Análise comparativa da influência das variáveis: geometria e tipos de regularização de faces, nos resultados dos ensaios de compressão axial**. 2018. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Áreas Acadêmicas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Aparecida de Goiânia. 2018. Disponível em:

<https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/200>. Acesso em: 18 nov. 2023

RODRIGUES, R. **Avaliação de Diferentes Traços de Resistência em Função do Tipo de Capeamento de Corpos de Prova de Concreto Usinado Submetidos a Ensaio de Compressão Axial**. 2020. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Inovação, Centro Universitário da Serra Gaúcha, Caxias do Sul. 2020. Disponível em:

<https://repositorio.unicid.edu.br/jspui/handle/123456789/4636>. Acesso em: 15 nov. 2023

RUDUIT, F. R. **Resistência à Compressão de Amostras de Concreto: Comparação dos Resultados entre a Preparação de Topos com Capeamento de Enxofre Derretido e Retificação**. 2006. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006.

SILVA, M. J; *et al.* **Influência de dois tipos de capeamento de corpos-de-prova de concreto**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. Anais [...] São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1-12.

SLOSASKI, R. *et al.* **Estudo da Influência da Distribuição Granulométrica Controlada de Agregados de Britagem nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco e Endurecido.** *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais [...]** São Paulo: Ibracon, 2010. p. 2-8.

TERZIAN, P. R. **Exigências Básicas na Produção e Aplicação do Concreto em Estruturas.** 2. ed. São Paulo: ABCP, 1999.