

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO -
UEMASUL
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO**

VITOR DE SOUSA MACHADO

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MONOFILAMENTOS DE ALUMÍNIO COMPOSTO
REUTILIZADO PARA REFORÇO DE CONCRETO ESTRUTURAL**

Açailândia

2023

VITOR DE SOUSA MACHADO

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MONOFILAMENTOS DE ALUMÍNIO COMPOSTO
REAPROVEITADO PARA REFORÇO DE CONCRETO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão/Campus Açailândia, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Fernando Henrique Fernandes Sousa

Açailândia

2023

M149d

Machado, Vitor de Sousa

Desempenho mecânico de monofilamentos de alumínio composto reaproveitado para reforço de concreto estrutural - / Vitor de Sousa Machado. – Açailândia: UEMASUL, 2023.

106 f. : il.

Monografia (Curso de Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2023.

Orientador: Prof. Me. Fernando Henrique Fernandes Sousa

1. Fibras de alumínio composto. 2. Reaproveitamento. 3. Resistência mecânica. 4. Concreto reforçado com fibras. I. Título.

CDU 624.012.45

VITOR DE SOUSA MACHADO

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MONOFILAMENTOS DE ALUMÍNIO COMPOSTO
REAPROVEITADO PARA REFORÇO DE CONCRETO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão/Campus Açailândia, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: / /

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br FERNANDO HENRIQUE FERNANDES SOUSA
Data: 06/07/2023 16:32:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Fernando Henrique Fernandes Sousa (Orientador)

Mestre em Engenharia Civil

Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Documento assinado digitalmente
gov.br RAMON REIS RODRIGUES
Data: 04/07/2023 10:00:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ramon Reis Rodrigues

Especialista em Estruturas e Fundações

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Documento assinado digitalmente
gov.br CIGUIVON JOSE DE OLIVEIRA JUNIOR
Data: 04/07/2023 09:49:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ciguivon Jose de Oliveira Junior

Especialista em Projeto, Execução e desempenho de estruturas e fundações

Centro Universitário do Maranhão

Aos meus pais, Ivan Machado e Clésia Machado, a minha esposa
Agda Amaral, irmã Vitória Machado e ao meu avô paterno Vicente
Lopes (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus em toda sua bondade infinita me guiou e permitiu chegar até minha graduação, seja feita a tua vontade.

Segundamente, aos meus pais Francisca Maria Clésia de Sousa Machado e Ivan Machado, pela educação, amor, por me proporcionar bons princípios e persistência acreditando em mim.

Agradeço à minha irmã, Vitória Monique de Sousa Machado pela fé, alegria e amor incondicional em mim depositados.

A minha esposa Agda Vitória Silva Assunção do Amaral Machado, você esteve comigo em todos os meus momentos, neste longo percurso de minha graduação.

A meu orientador, Fernando Fernandes por acreditar em mim e me guiar ante as adversidades encontradas neste estudo, me demonstrando esperança, além de muita paciência.

Aos meus colegas de curso e amigos, Pedro Paulo, Raphael Duarte e Lucas Carvalho, por me auxiliar nos ensaios deste estudo da forma que puderam, de forma valorosa.

A toda minha turma, me causaram grandes momentos de alegria e euforia, além de grandes amizades que perduraram em minha vida.

Aos docentes Me. João Dias e Me. Lucas Manoel, por me receberem em seus ofícios e disponibilizarem-se a me ajudar e auxiliar grandemente.

Aos meus amigos Anderson Holanda e Gustavo Pinto, vocês não mediram esforços para comigo, sempre me demonstrando afeto e bons conselhos.

A toda minha família, em especial meu tio, Ivonildo Lopes Machado pelo grande auxílio, motivação e por acreditar nos meus talentos.

Agradeço as empresas Aquarela Comunicação Visual e ImperMIX Concreto, pela doação de materiais vitais para a realização deste estudo.

RESUMO

O Alumínio Composto é um produto comercializado para revestimentos, possui ductilidade e maleabilidade devido os materiais incorporados, dentre eles o Alumínio, é um metal com alto índice energético produzido a partir de um dos minérios mais abundante na crosta terrestre, a Bauxita. Assim como, o polietileno de baixa densidade, sua produção é realizada por uma reação exotérmica em altas pressões, é um termoplástico que pode sofrer altas deformações um material que se aquecido produz compostos tóxicos e nocivos aos seres humanos, dificultando sua reciclagem. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico, quanto a ductilidade, elasticidade e resistência do concreto reforçado com fibras de ACM em diferentes teores em comparação a fibra de aço normatizada. São realizados neste trabalho ensaio de ultrassom e tração na flexão em 16 corpos de prova prismáticos e resistência à compressão em 12 corpos de prova cilíndricos, os ensaios foram realizados afim da obtenção dos principais parâmetros de desempenho mecânico, que são resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade empírico e módulo de elasticidade dinâmico. O ensaio de ultrassom também pode ser utilizado para avaliar a qualidade do concreto principalmente influenciada pela porosidade e adensamento, conforme referências. As fibras são obtidas no processamento por fresagem em máquina CNC, reduzindo chapas residuais em monofilamentos. O concreto produzido sofreu estudo de dosagem por meio do método experimental IPT/EPUSP, realizado para cominuir as interferências dos materiais no desempenho das fibras, buscando assim, melhor desempenho do concreto-massa. Percebeu-se uma melhora de desempenho mecânico na redução do teor de fibras de ACM, evidenciando uma ligeira aproximação ao volume crítico de fibras no traço. Neste trabalho o desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras de Aço foi preponderante, corroborando sua qualidade. O concreto reforçado com fibras possui alta aplicabilidade para concreto estrutural, devido que seus principais benefícios são o baixo índice de fissuração e tenacidade pós-fissuração. Neste estudo será avaliada uma fibra com material reaproveitado, visando o possível desenvolvimento do material, atitude importante para a diversidade de materiais no mercado, que pode resultar na viabilidade econômica do Concreto reforçado com Fibras na construção civil.

Palavras-chave: Fibras de Alumínio Composto. Reaproveitamento. Resistência mecânica. Concreto Reforçado com Fibras. Desempenho mecânico.

ABSTRACT

Aluminum Composite is a product marketed for coatings, possessing ductility and malleability due to the incorporated materials, including Aluminum, a metal with high energy content produced from one of the most abundant minerals in the Earth's crust, Bauxite. Similarly, low-density polyethylene is produced through an exothermic reaction at high pressures. It is a thermoplastic material that can undergo significant deformation when heated, producing toxic and harmful compounds to humans, hindering its recycling. The objective of this work is to evaluate the mechanical behavior, specifically ductility, elasticity, and strength, of fiber-reinforced concrete with ACM fibers at different proportions compared to standardized steel fibers. Ultrasonic and flexural tensile strength tests were performed on 16 prismatic specimens, as well as compressive strength tests on 12 cylindrical specimens. These tests were carried out in order to obtain the main parameters of mechanical performance, including compressive strength, tensile strength, empirical modulus of elasticity, and dynamic modulus of elasticity. The ultrasonic test can also be used to assess concrete quality, primarily influenced by porosity and compaction, as referenced. The fibers are obtained through milling in a CNC machine, reducing residual sheets into monofilaments. The produced concrete underwent a dosage study using the experimental IPT/EPUSP method to minimize material interference on fiber performance, aiming for improved performance of the mass concrete. A mechanical performance improvement was observed with a reduction in ACM fiber content, indicating a slight approximation to the critical volume of fibers in the mix. In this study, the mechanical performance of steel fiber-reinforced concrete was predominant, confirming its quality. Fiber-reinforced concrete has high applicability in structural concrete due to its main benefits, such as low cracking tendency and post-crack toughness. This study will evaluate a fiber with reclaimed material, aiming for potential material development, an important step for diversifying materials in the market and potentially achieving economic feasibility of Fiber-Reinforced Concrete in the construction industry.

Keywords: Aluminum Composite Fibers, Reutilization, Mechanical Strength, Fiber-Reinforced Concrete, Mechanical Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva versus flecha para diferentes volumes de fibras	25
Figura 2: Diagrama de Dosagem	32
Figura 3: Esquema de Fissura em CRF	36
Figura 4: Brown & Sharpe's (Usinagem)	37
Figura 5: Fresa Router Espiral 4 cortes VONDER HSS 9.0	38
Figura 6: Interior da betoneira com traço de imprimação	40
Figura 7: Ordem de introdução dos materiais na betoneira.....	40
Figura 8: Acréscimos pesados em balança de precisão, postos em embalagem.....	41
Figura 9: Teste prático de acabamento para determinação do teor de argamassa ideal, realizado no interior da betoneira.....	42
Figura 10: Teste prático de coesão e desprendimento do concreto, realizado no interior da betoneira	43
Figura 11: Realização de acréscimos com proveta graduada e béquer	43
Figura 12: Realização do ensaio de Abatimento do concreto fresco (Slump test).....	44
Figura 13: Curva granulométrica do agregado graúdo	48
Figura 14: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	49
Figura 15: Fibra com ancoragens nas extremidades, representando o Tipo R.....	52
Figura 16: Fibras de aço.....	52
Figura 17: Fibra de ACM pós-processamento	54
Figura 18: Fresadora Rhino CNC RMC 5000 Plus	56
Figura 19: Traços definitivos incorporados no estudo.....	57
Figura 20: Molde de corpo de prova cilíndrico em polímero de alta densidade	58
Figura 21: Moldes e corpos de prova cilíndricos.....	59
Figura 22: Molde de corpo de prova prismáticos em compensado	59
Figura 23: Fibras incorporadas nos traços FAÇO2,19 e FACM2,19	60
Figura 24: Fibras incorporadas nos traços FAÇO2,19 e FACM0,45	60
Figura 25: Prensa Hidráulica Pavitest I.30001.C	61
Figura 26: Prensa Hidráulica INSTRON 23-100	62
Figura 27: Caracterização do terço médio.....	63
Figura 28: Aparelho de Ultrassom PROCEQ Pundit Lab+	65
Figura 29: Transmissão direta de UPV.....	65
Figura 30: Resultados de Slump test.....	68

Figura 31: Resultados de resistência à compressão (Gráfico de resistência-Teor de fibras).....	70
Figura 32: Resultados de estimativa de MOE empírico	71
Figura 33: CPPs do traço REF em estágio pós-ruptura.....	73
Figura 34: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe REF	73
Figura 35: CPPs do traço FAÇO2,19 em estágio pós-ruptura	74
Figura 36: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe FAÇO2,19.....	75
Figura 37: CPPs do traço FACM2,19 em estágio pós-ruptura	76
Figura 38: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe FACM2,19	76
Figura 39: CPPs do traço FACM0,45 no estágio pós-ruptura	77
Figura 40: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe FACM0,45.....	77
Figura 41: Diagrama de tensão-deslocamento de tração na flexão de todas as classes	77
Figura 42: Resultados de resistência à tração na flexão	78
Figura 43: Resultados do ensaio de UPV.....	80
Figura 44: Resultados de MOE dinâmico por transmissão direta.....	82
Figura 45: Módulo de elasticidade empírico em função do módulo de elasticidade dinâmico.....	84
Figura 46: Módulo de elasticidade empírico em função da resistência à tração na flexão.....	86
Figura 47: Módulo de elasticidade dinâmico em função da resistência à compressão.	88
Figura 48: Resistência à tração na flexão em função da resistência à compressão.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Desvio-padrão em função da condição de preparo do concreto.....	23
Tabela 2: Teor de argamassa por graduação da rocha britada	29
Tabela 3: Relação água/materiais secos (H)	29
Tabela 4: Parâmetros de Dosagem	46
Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas da Fibra referência	53
Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas da fibra de ACM.....	55
Tabela 7: Ensaio realizados e suas respectivas normas técnicas	57
Tabela 8: MOE e relações empíricas para estimativa.....	66
Tabela 9: Resultados dos ensaios de abatimento do tronco do cone de Abrams. (Talvez seja interessante adicionar Quantidade de Cimento).....	69
Tabela 10: ANOVA da resistência à compressão.....	70
Tabela 11: Teste de Tukey da resistência à compressão.....	71
Tabela 12: ANOVA do MOE empírico.....	72
Tabela 13: Teste Tukey de MOE Empírico.....	72
Tabela 14: ANOVA da resistência à tração na flexão	78
Tabela 15: Teste Tukey da resistência à tração na flexão	79
Tabela 16: ANOVA de UPV	80
Tabela 17: Teste Tukey de UPV.....	81
Tabela 18: Relação UPV e qualidade do concreto	81
Tabela 19: ANOVA de MOE dinâmico	82
Tabela 20: Teste Tukey de MOE dinâmico	82
Tabela 21: Regressão linear entre módulo de elasticidade empírico e dinâmico.	84
Tabela 22: Regressão linear entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão	85
Tabela 23: Regressão linear entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão.....	87
Tabela 24: Regressão linear entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Dosagem utilizada neste estudo	39
Quadro 2: Determinação do teor ideal de argamassa de traço 1:5,0	103
Quadro 3: Determinação do teor ideal de argamassa de traço 1:5,0	105
Quadro 4: Traços brutos para traço 1:5,0	106

LISTA DE SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEB-FIP	Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte
CP	Corpo de prova
CP II	Cimento Portland Composto
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CPC	Corpo de prova cilíndrico
CPP	Corpo de prova prismático
CNC	Controle Numérico Computacional
CV	Coefficiente de Variação
Ec	Módulo de Elasticidade
Ed	Módulo de Elasticidade Dinâmico
Ee	Módulo de Elasticidade Estático
ES	Efeito significativo
fc	Resistência à compressão
ft	Resistência à tração
FACM0,45	Traço de Concreto Reforçado com Fibras de ACM Reaproveita com teor de fibras de 0,45% SPC
FACM2,19	Traço de Concreto Reforçado com Fibras de ACM Reaproveita com teor de fibras de 2,19% SPC
FAÇO2,19	Traço de Concreto Reforçado com Fibras de Aço com teor de fibras de 2,19% SPC
GL	Grau de liberdade
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPT-EPUSP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
MOE	Módulo de Elasticidade
NBR	Normas Brasileiras de Regulação

NM	Norma Mercosul
PUNDIT	Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicator Tester
QM	Quadrado Médio
R ²	Coefficiente de determinação
REF	Referência
SQ	Soma quadrada
UPV	Velocidade de Pulso Ultrassônico

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	22
Equação 2.....	23
Equação 3.....	24
Equação 4.....	24
Equação 5.....	24
Equação 6.....	24
Equação 7.....	26
Equação 8.....	27
Equação 9.....	31
Equação 10.....	31
Equação 11.....	31
Equação 12.....	31
Equação 13.....	31
Equação 14.....	32
Equação 15.....	32
Equação 20.....	65
Equação 21.....	66
Equação 22.....	66

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	JUSTIFICATIVA	18
3.	PROBLEMA	20
4.	OBJETIVOS	21
4.1.1.	Objetivo Geral.....	21
4.1.2.	Objetivos Específicos.....	21
5.	REVISÃO DA LITERATURA	22
5.1.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ENDURECIDO	22
5.1.1.	Resistência à Compressão	22
5.1.2.	Resistência à Tração	23
5.1.3.	Tenacidade	25
5.1.4.	Módulo de Elasticidade Estático (MOE Estático)	26
5.1.5.	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOE Dinâmico)	26
5.1.6.	Módulo de Elasticidade Estático Estimado ou Empírico.....	27
5.2.	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO	28
5.2.2.	História das Dosagens.....	29
5.2.3.	Diagrama de Dosagem.....	32
5.3.	ALUMÍNIO COMPOSTO PROCESSADO	33
5.4.	REFORÇO DE CONCRETO ESTRUTURAL	34
5.5.	MÉTODO DE PROCESSAMENTO INDUSTRIAL	36
6.	MATERIAIS E MÉTODOS	38
6.1.	MÉTODO DE DOSAGEM EXPERIMENTAL	38
6.1.1.	Dosagem IPT/EPUSP.....	38
6.1.3.	Misturas experimentais.....	45
6.2.	MATERIAIS	46
6.2.1.	Cimento Portland.....	46
6.2.2.	Agregado Graúdo e Miúdo	47
6.2.3.	Aditivos.....	51
6.2.4.	Água de Amassamento	51
6.2.5.	Fibra de Referência.....	52
6.2.6.	Fibra Processada e Reciclada	54
6.3.	PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS	55
6.4.	MISTURA E MOLDAGEM DE AMOSTRAS	56
6.4.1.	Corpos-de-prova Cilíndricos e Prismáticos.....	58
6.5.	ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO-DESTRUTIVOS	60

6.5.1.	Ensaio de Compressão Axial	61
6.5.2.	Ensaio de Tração na Flexão	62
6.5.3.	Ensaio de Abatimento de Concreto.....	63
6.5.4.	Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico por Ultrassom de Concreto 64	
6.5.5.	Módulo de Elasticidade Estático Estimado ou Empírico.....	66
6.6.	TRATAMENTO DE DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA E REGRESSÃO LINEAR)	67
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
7.1.	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	68
7.1.1.	Ensaio de Abatimento do Tronco do Cone de Abrams (<i>Slump Test</i>).....	68
7.2.	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	69
7.2.1.	Ensaio de Resistência à Compressão Axial Concreto Reforçado com Fibras 69	
7.2.2.	Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	73
7.2.3.	Ensaio de Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas (UPV) ...	80
7.2.4.	Módulo de Elasticidade empírico em função do módulo de elasticidade dinâmico	83
7.2.5.	Módulo de Elasticidade dinâmico em função da resistência à tração na flexão 85	
7.2.6.	Módulo de Elasticidade dinâmico em função da resistência à compressão 87	
7.2.7.	Resistência à tração na flexão em função da resistência à compressão.	89
8.	CONCLUSÃO	91
	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	93
	ANEXOS 102	
	APÊNDICES.....	104

1. INTRODUÇÃO

A presente pesquisa irá explorar e analisar o tema concreto reforçado com fibras (CRF), com o intuito de compreender sua relevância e impacto na área de estudo da construção.

Gil (2008) destaca a importância da pesquisa científica na produção e organização do conhecimento. No contexto acadêmico, a elaboração de um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é um exemplo concreto desse processo de pesquisa e busca por respostas para questões relevantes em determinada área de estudo.

Ao longo das últimas décadas, tem-se observado um cenário de transformações significativas em diversas esferas da sociedade, impulsionado pelo avanço tecnológico e pelas mudanças socioeconômicas. Essas transformações têm impactado diretamente as organizações, exigindo adaptação e inovação para que possam se manter competitivas em um ambiente cada vez mais complexo e dinâmico.

Pensando nisso, neste estudo requer-se avaliar uma forma de reaproveitamento de resíduos do material Alumínio Composto (ACM). Segundo Silva (2022), suas principais utilidades na construção civil são para Revestimento de fachadas, Sinalização de letreiros, Coberturas e marquises e elementos decorativos e de design de interiores.

Além disso, a pesquisa pretende apresentar recomendações e perspectivas futuras para a área de estudo, levando em consideração as tendências e as demandas emergentes. Para tanto, serão utilizados métodos e técnicas de pesquisa adequados, tais como ensaios, discussões e análise de dados, de forma a garantir a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Dessa forma, a pesquisa está organizada da seguinte maneira: seção 1: Introdução; seção 2: Justificativa dos temas abordados; seção 3: Problema explorado; seção 4: Objetivos deste estudo.

Na seção 5, são apresentados os fundamentos teóricos relacionados ao tema Compósito de CRF de ACM reaproveitado; na seção 6, é descrita a metodologia adotada no estudo; na seção 7, são apresentados e discutidos os resultados obtidos; na seção 8, são apresentadas as conclusões e recomendações finais; e, por fim, na seção 9, são listadas as referências bibliográficas utilizadas.

2. JUSTIFICATIVA

O tema é de grande importância para a área de Engenharia Civil, tendo em vista que sua incorporação ao concreto, pode resultar na redução do consumo de cimento e aço, que hoje são os materiais mais comuns na indústria da construção civil e que mais tem peso sobre os custos de empreendimentos.

O alumínio juntamente com o polietileno de baixa densidade são materiais de alto índice de energia incorporada e altos índices de emissão de poluentes em sua industrialização, seu reaproveitamento é importante para seu ciclo de vida energético, a fim de, evitar descarte indevido, pois não possuem processo de reciclagem eficientemente definida (GOUVEA, 2017).

Portanto, o reaproveitamento do ACM pode reduzir a energia incorporada no ciclo de vida dos materiais utilizados nos painéis. Como indicado na NBR 15575 (2013), que trata do “Desempenho de Edifícios Habitacionais com até 5 pavimentos” em vigor, recomenda que compreende aos empreendimentos privilegiar os materiais que causem menor impacto ambiental, desde as fases de exploração dos recursos naturais até sua utilização final.

Os resíduos utilizados nesse trabalho são restos da aplicação de Alumínio Composto em fachadas de edificações comerciais nas etapas de confecção, instalação e montagem no município de Açailândia, Maranhão. É um material que consome altas taxas de energia incorporada para sua produção que emite grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2), de utilidade principal como revestimento (MORENO, 2012).

Com isso, cabe aos futuros projetistas e profissionais buscar e aderir materiais incorporados que sejam frutos de reaproveitamento e/ou reciclagem, ato que pode reduzir os impactos ambientais causados pela indústria da construção civil. Segundo relatório da ONU (2021) a construção civil é o setor responsável por 38% de todas as emissões de CO_2 no mundo relacionados à energia, o principal responsável pela ampliação do efeito estufa.

Segundo NBR 15446 (2006), painel de alumínio composto é um material em que seu núcleo de produto termoplástico extrudado livre de vazios e poros e sem espuma isolante. Com superfície externa em ligas de alumínio que podem ser pintadas ou anodizadas, pode ter espessura de 2 à 6 mm com tolerâncias dimensionais de 0,2 mm de espessura, comumente comercializado nas dimensões de 5000x1220x3mm. Seu limite de escoamento pode variar de acordo ao alumínio incorporado no painel de 85 à 130 MPa com alongamento mínimo de 2% pós-ruptura de 50mm.

O minério a que se obtém o alumínio é a bauxita, o terceiro minério mais abundante na crosta Terrestre. Segundo ABAL (2017) cerca de 5 a 7 toneladas de bauxita produzem 1 tonelada de alumínio, a produção mundial de Alumínio Primário em 2015 foi de 57,557 milhões de toneladas, com o Brasil como 10º maior produtor com o volume de 0,793 milhões de toneladas. Em 2021, o Brasil produziu 1,4 milhões de toneladas, segundo ABM (2021).

O segundo material incorporado ao Alumínio Composto (ACM), o Polietileno de Baixa Densidade por ser fruto de uma reação altamente exotérmica, em temperaturas de 100 a 300 °C em pressões de 1000 a 3000 atm como principais iniciadores peróxidos orgânicos, essa reação possui ineficácia de resfriamento que produz muitas ramificações que têm grande influência nas propriedades do material, resultando em um termoplástico parcialmente cristalino com temperatura de fusão sob pressão baixa (100 à 115 °C) com resistência à tração na ordem de 6,9 à 16 MPa e alongamento máximo de 100 a 800% (COUTINHO et al, 2003), mostrando-se um material com propriedades mecânicas de deformação interessantes para o CRF.

O reaproveitamento pode reduzir impacto ambiental e realizar grande economia já que o alumínio e o polietileno possuem custo relativamente elevado.

Segundo ABRAIN (2021), a indústria da construção civil relatou aumento de 9,7% em 2021, representando 7% do PIB brasileiro cotado em R\$ 2,4 trilhões de reais no segundo trimestre, segundo IBGE (2022).

3. PROBLEMA

O Alumínio Composto é um material compósito sem reciclagem facilitada devido a queima de polietileno de baixa densidade presente, produzir gases tóxicos nocivos. Além de necessário desassociar o alumínio anodizado ao polietileno. Um material sem reciclagem definida, com processamento industrial, pode ser reaproveitado para reforço de concreto estrutural?

4. OBJETIVOS

4.1.1. Objetivo Geral

Verificar o desempenho mecânico do concreto estrutural reforçado com adição de fibras reaproveitadas de Alumínio Composto.

4.1.2. Objetivos Específicos

- Examinar as proporções de Alumínio Composto como adição que influem nas propriedades mecânicas do concreto.
- Analisar as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de Alumínio Composto.
- Comparar a fibra de Alumínio Composto com a fibra de Aço incorporadas sob dosagem similar em massa e volume para concreto estrutural.

5. REVISÃO DA LITERATURA

5.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ENDURECIDO

As propriedades mecânicas é o comportamento do material ante cargas e forças que podem causar deformabilidades temporárias ou permanentes de acordo com as características do material, neste estudo serão avaliadas as seguintes propriedades mecânicas:

5.1.1. Resistência à Compressão

O concreto é uma material frágil, isso implica no seu comportamento ante tensões aplicadas, pois sua deformação tende a ocorre majoritariamente no regime elástico, e no regime plástico tende a ruptura brusca, ou seja, sem traços de ruptura iminente (FUSCO e ONISHI, 2017), esse é um problema recorrente em materiais frágeis, a resistência à compressão ocorre quando a deformação resultante é um encurtamento, para medição da carga axial por área resistente característica do concreto é necessário seguir a NBR 5739 (2016) que recomenda o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, juntamente a NBR 5738 (2016) recomenda a moldagem de corpos de prova cilíndricos.

A resistência de dosagem pode ser calculada de forma empírica, para atender condições de variabilidade durante a construção, conseguinte a NBR 12655 (2022) a variabilidade é medida pelo desvio-padrão (S_d), levado em conta na Equação 1 seguinte:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \cdot S_d \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

f_{cmj} = resistência média à compressão do concreto para idade de j dias;

f_{ckj} = resistência característica do concreto à compressão para idade de j dias;

S_d = desvio-padrão da dosagem.

Tabela 1: Desvio-padrão em função da condição de preparo do concreto

Classificação	Desvio-padrão (MPa)	Condição de preparo do concreto
A	4,0	Aplicável a todas as classes de concreto, configuração de dosagem em massa com dispositivo dosador
B	5,5	Classes C10 até C20, configuração de dosagem com medidas de cimento (em massa); água (em massa ou volume) e agregados (em massa ou volume) com dispositivo dosador
C	7,0	Classes C10 até C15, configuração de dosagem com medidas de cimento (em massa); água (em volume) e agregados (em volume)

Fonte: NBR 12655 (2022).

A abordagem para controle estatístico do concreto por amostragem total, ou seja, os exemplares de todas as betonadas distintas são amostradas e representam o valor de $f_{ck,est}$, presente na Equação 2, conforme item 6.2.3.1 da NBR 12655 (2022):

$$f_{ck,est} = f_{cm,betonada} \quad \text{Equação 2}$$

5.1.2. Resistência à Tração

O método mais consistente para obtenção da resistência à tração de concretos de cimento Portland é o ensaio de resistência de tração na flexão, que recomenda flexão simples de quatro pontos, para a obtenção da resistência à

tração na flexão ($f_{ct,f}$), NBR 12142 (2010), no entanto o ensaio de flexão utiliza-se de corpos de prova prismáticos, com dimensões conforme NBR 16940 (2021) norma específica para CRF. A resistência à tração direta (f_{ct}) pode ser estimada conforme Equação 3, não conforme o estudo em questão, presente no item 8.2.5 da NBR 6118 (2014), da seguinte forma:

$$f_{ct} = 0,7 \cdot f_{ct,f} \quad \text{Equação 3}$$

Pode-se estimar a resistência característica à tração média ($f_{ct,m}$) por meio do f_{ck} para classes $\leq C50$, por meio do termo da Equação 4:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{Equação 4}$$

Contudo, neste estudo será avaliada resistência à tração na flexão, as Eq. (5) e (6) são encontradas na NBR 12142 (2010), para cálculo de resistência a tração dentro do terço médio, conforme Equação 5, temos:

$$f_{ct,f} = F \cdot \ell / b \cdot d^2 \quad \text{Equação 5}$$

Para ruptura fora do terço médio, temos na Equação 6:

$$f_{ct,f} = 3 \cdot F \cdot a / b \cdot d^2 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$f_{ct,f}$ = resistência média à tração na flexão do concreto;

F = força máxima registrada na máquina de ensaio;

ℓ = comprimento do vão entre apoios;

b = largura média do corpo de prova;

d = altura média do corpo de prova;

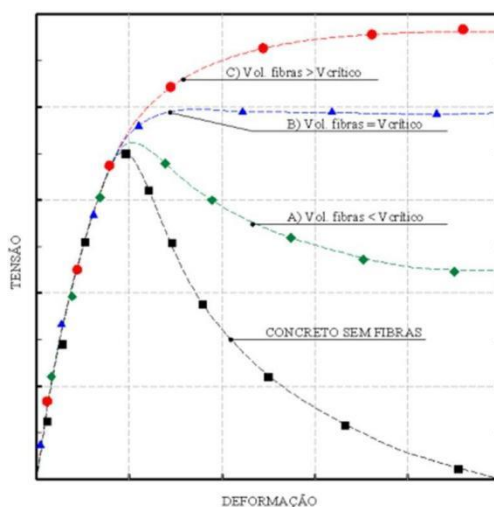
a = distância entre a linha de rutura na face tracionada até a linha do apoio mais próximo.

5.1.3. Tenacidade

O ensaio de Flexão trata por meio da fadiga de um corpo de prova que sofre flexão por três ou quatro pontos, proporcionando o gráfico carga-deflexão ou tensão-deformação, que permite reproduzir o comportamento do material perante cargas aplicadas.

A Tenacidade é a capacidade do material de absorver energia antes de sua ruptura, representada pela área abaixo da curva tensão versus deformação específica, ou flecha como na Figura 1.

Figura 1: Curva versus flecha para diferentes volumes de fibras.



Fonte: Quinino (2015).

Durante o ensaio de flexão o corpo de prova entra em diferentes regimes de deformação podendo estar em estado plástico de deformações permanentes ou regime elástico de deformações temporárias, seu comportamento pode ser variável, mas por meio da curva no gráfico tensão-deformação utilizando-se dos dados de regime elástico pode-se calcular Módulo

de elasticidade (E , parâmetro mecânico importante para o dimensionamento de estruturas), resistência à flexão limite elástica, limite de ruptura, ductilidade e tenacidade, que seria sua capacidade de absorção de energia do início do carregamento de deformação permanente até sua ruptura.

5.1.4. Módulo de Elasticidade Estático (MOE Estático)

Descoberto com auxílio de molas por Robert Hooke (1676), na publicação “De Potentia Restitutiva or Of Spring” apresentando uma relação linear entre tensão e deformação no regime elástico (MONTEIRO, 2021, p. 31), denomina-se a expressão da Equação 7 “*lei de Hooke*”:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

σ = tensão normal;

E = MOE (constante de proporcionalidade);

ε = deformação específica ($\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$);

δ = deformação normal média do corpo de prova ($\delta = L - L_0$).

Posteriormente, Thomas Young (1807) publicou uma explicação da lei em “A course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts”, demonstrando uma porção inicial retilínea do diagrama tensão-deformação conferido até o limite de proporcionalidade. Portanto, observa-se que o MOE representa uma propriedade mecânica que indica a rigidez do material, contudo aplica-se essa equação somente para materiais elasto-lineares (HIBBELER, 2015). Para isso, é necessário avaliar o comportamento dos diversos materiais incorporados neste estudo.

5.1.5. Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOE Dinâmico)

O Módulo de Elasticidade Dinâmico está em função da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (V) apresentado na Equação 8 conforme NM 58 (1996), utilizada para determinação da velocidade de pulso ultrassônico. Portanto, representa matematicamente uma relação entre comprimento e a distância de propagação de uma onda ultrassônica propagada em meio elástico isotrópico com dimensões infinitas, dada pela seguinte equação:

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda ultrassônica;

L = distância entre os eixos e/ou faces dos transdutores;

t = tempo decorrido da emissão à recepção da onda.

5.1.6. Módulo de Elasticidade Estático Estimado ou Empírico

O módulo de elasticidade é uma medida fundamental para avaliar a resposta do concreto às cargas aplicadas e sua capacidade de deformação elástica. Segundo o IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto), o módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante na região elástica do material. Em outras palavras, é a medida da rigidez do concreto (IBRACON, 2019).

Uma abordagem empírica é frequentemente utilizada para determinar o módulo de elasticidade do concreto. Conforme o estudo de Barros et al. (2017), este método é baseado em testes de compressão realizados em corpos de prova de concreto, nos quais a carga é aplicada de maneira axial e os valores de deformação são medidos. A relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante é utilizada para determinar o módulo de elasticidade.

Vários fatores influenciam o módulo de elasticidade do concreto empírico. A idade do concreto desempenha um papel significativo, pois o módulo de elasticidade tende a aumentar com o tempo, devido à evolução das reações de hidratação do cimento. De acordo com o estudo de Suleiman et al. (2015), o módulo de elasticidade do concreto pode ser modelado como uma função exponencial do tempo de cura. Além disso, a relação água/cimento também é um fator importante, uma vez que concretos com baixa relação água/cimento tendem a ter módulos de elasticidade mais altos. A porosidade, a densidade e a resistência do concreto também afetam o módulo de elasticidade (BARROS et al., 2017).

5.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

O concreto fresco apresenta diversas propriedades que são essenciais para sua aplicação e manipulação adequadas. Segundo Mehta e Monteiro (2014), "a trabalhabilidade é uma das principais propriedades do concreto fresco e se refere à facilidade com que o material pode ser misturado, transportado, colocado e compactado". Essa citação destaca a importância da trabalhabilidade, que está relacionada à plasticidade e fluidez do concreto fresco.

5.2.1. Estudo Teórico da Dosagem

A relação a/c é o parâmetro mais importante na dosagem de concreto estrutural. Após definidas a relação a/c e certos materiais a resistência e a durabilidade são únicas. O concreto é mais econômico quanto maior for a dimensão máxima característica do agregado graúdo e menor for o abatimento no tronco do cone (*Slump test* ou cone de Abrams).

Conforme classificação de Recena (2017) demonstradas na Tabela 2 e Tabela 3, podem ser justificados os valores de teor de argamassa (α) e relação água/materiais secos (H) obtidos durante estudo de dosagem.

Tabela 2: Teor de argamassa por graduação da rocha britada.

Propriedade química da rocha	Classificação da brita	Teor de argamassa (α)
Granítica	0	60
	1	53
	2	51
	3	49
Basáltica	0	60
	1	55
	2	53
	3	51

Fonte: Recena (2017).

Tabela 3: Relação água/materiais secos (H).

Propriedade química da rocha	Classificação da brita	H (%)
CP-IV (Pozolânico)	0	10,5
	1	9,8
	2	9,6
	3	9,4
CP-I e CP-II (Cimento Comum) e CP-V (ARI)	0	10,2
	1	9,6
	2	9,4
	3	9,2

Fonte: Recena (2017).

5.2.2. História das Dosagens

Inicialmente, Fuller e Thompson propuseram uma curva parabólica para composição granulométrica para definir uma granulometria contínua, sua percentagem era determinada pela relação entre diâmetro do agregado graúdo e miúdo (d/D) na Eq. (12). Duff A. Abrams (1918) propõe modificações nos postulados anteriores, em sua publicação “*Design of Concrete Mixtures*” relacionando a resistência em função da água e cimento, demonstrando quanto maior for a idade e melhor a qualidade do cimento, menor será o valor k_2 e

introduz os conceitos de consistência por meio do cone de Abrams (THOMAZ, 2010), definido na Eq. (13) denominada “Lei de Abrams”.

Posteriormente, J. Bolomey (1925) engenheiro suíço propõe uma variação nos postulados de W. B. Fuller e Thompson (1907) que publicou em “*The Laws of Proportioning Concrete*” desenvolvendo conceitos de “*Curve of Maximum Density*”, transferindo as propriedades do módulo de finura para a água de mistura, demonstrando que concretos com mesmas quantidades de água têm a mesma resistência e determinou a correlação entre agregado graúdo/miúdo e as curvas granulométricas contínuas (CORINGA e NETO, 2021; HOUSTON et al., 1962). Leclerc Du Sablon (1927) devido à conclusão de barragens “*Valléc d’Ossau*” concluiu estudos de René Ferét (1892) que demonstrou que o mínimo de vazios é alcançado com granulometrias descontínuas. Com isso, Leclerc Du Sablon determinou a compacidade de argamassas com traços sem grãos médios com adição de pó de pedra e areia (HELENE e TERZIAN, 1992).

Na “Lei de Lyse” Eq. (14), desenvolvida por Inge Lyse (1932) realiza a interação entre a quantidade de massa seca entre agregados e cimento, demonstrando o abatimento do tronco do cone em função da relação água/materiais secos, independente ao traço seco (1:a:b). Contudo, o consumo de aglomerante cimento tem relação sob o valor do traço seco “*m*” na Eq. (11) denominada “Lei de Molinari” (BOGGIO, 2000).

O primeiro método de dosagem a anexar o agregado graúdo de graduação granulométrica contínua e descontínua, método SNCF (*Société Nationale des Chemins de Fer Français*, Serviço Nacional de Estradas de Ferro da França), apresentado pelo engenheiro Roger Vallette em 1948, leva em consideração características intrínsecas e suas condições de aplicação in loco, visando o teor de argamassa ideal com baixa quantidade de grãos médios e maior relação agregado graúdo/miúdo possível (HELENE e TERZIAN, 1992).

Contudo, não se enquadra nos métodos de dosagem adaptados para as condições brasileira, como o Método ABCP/ACI, preconizado pelo estudo do engenheiro Públio Penna Firme Rodrigues, publicado em 1984 pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), baseia-se na norma ACI 2111-81

(1981), identificando-se como método de dosagem adaptado do método prático americano, dosagem baseada em gráficos e tabelas elaboradas por resultados experimentais adaptado para ferramentas e materiais utilizados no Brasil (apud BOGGIO, 2000).

Desenvolvido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo), atualizado e generalizado pela EPUSP (Escola Politécnica da USP) em 1992, o método de dosagem IPT/EPUSP, dosagem utilizada neste trabalho que apresenta como resultado final um, diagrama de dosagem com três quadrantes elaborado pelas denominadas “leis do comportamento”, descritas nas correlações na Equação 9, Equação 10, Equação 11 e Equação 12 a seguir (HELENE e TERZIAN, 1992):

$$P = \frac{d}{D} \quad \text{Equação 9}$$

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação 10}$$

$$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c} \quad \text{Equação 11}$$

$$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c} \quad \text{Equação 12}$$

$$C = \frac{1.000}{k_5 + k_6 \cdot m} \quad \text{Equação 13}$$

Ainda assim, as “leis do comportamento” são princípios de grandezas que implicam nas quantidades empregadas em traços de argamassa e concreto, como na Equação 14 que exprime o “Teor de argamassa seca” (α) e a relação agregados miúdos secos/cimento (m) na Equação 15.

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \quad \text{Equação 14}$$

$$m = a + p \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

f_{cj} = resistência à compressão axial, à idade j dias, em MPa;

a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg;

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

m = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

α = teor de argamassa seca; deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

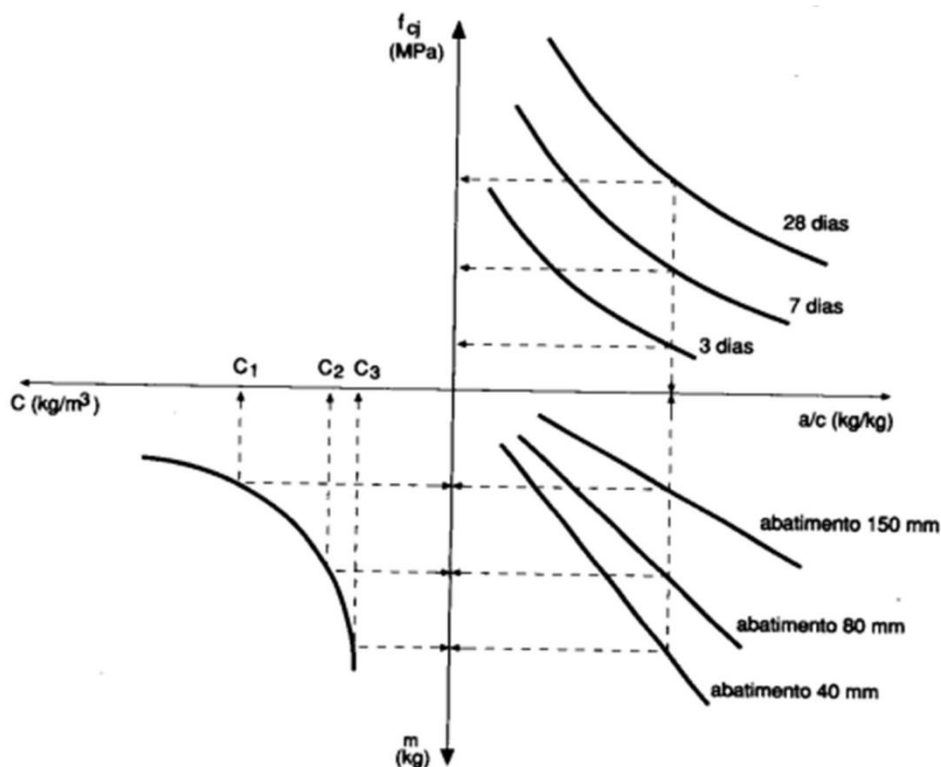
p = relação agregados graúdos secos/cimento em massa, em kg/kg;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e k_6 = constantes que dependem exclusivamente dos materiais na seguinte ordem (cimento, cimento, agregados totais, cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e aditivos).

5.2.3. Diagrama de Dosagem

Quanto mais longo o período de cura, maior a resistência, conforme apresenta a Figura 2. Nos elementos de concreto se ocorrer perda de água por evaporação dos capilares, as condições de cura ao ar prevalecem e a resistência não aumentará com o tempo. O concreto ensaiado à compressão axial aos 28 dias é aceito universalmente como índice geral de resistência (Mehta e Monteiro, 2014).

Figura 2: Diagrama de Dosagem.



Fonte: HELENE e TERZIAN (1992).

Conforme Helene (1984), aos 28 dias o concreto atinge sua resistência de referência, ideal para realização de desformas. Ainda assim, ocorrem ganhos de resistência após 28 dias de cura em pequenas magnitudes servindo para compensar, as perdas devidas ação de cargas de longa duração (fluência) e, portanto, deve indiretamente ser considerada nos cálculos estruturais.

5.3. ALUMÍNIO COMPOSTO PROCESSADO

A ABNT NBR 15446 (2006) define painéis de alumínio composto (ACM) como sendo painéis formados por chapas de alumínio, que podem ser ligadas ou não por um núcleo de material termoplástico extrudado. Os tipos mais utilizados em fachadas são o painel de chapa sólida, formado somente por chapas sólidas de alumínio e o painel composto, formado por duas chapas de alumínio ligadas por um núcleo de material termoplástico extrudado, geralmente polietileno de baixa densidade.

Rapidez na instalação, possibilidade de moldagem, variedade de cores e facilidade na manutenção, o ACM tem sido uma opção de revestimento bastante adotada por arquitetos e projetistas em fachadas de edifícios comerciais, quer seja em obras executivas ou reformas. Um dos fatores que influenciam nessa escolha, além das vantagens já citadas, é a possibilidade de evitar-se o transtorno da demolição do revestimento antigo. (MORENO, 2012)

Ainda, uma edificação não pode mais ser vista como uma unidade isolada, mas sim como um organismo que gera impactos ao longo de todo o seu ciclo de vida: projeto, construção, utilização, demolição, reutilização e/ou reciclagem (MULFARTH, 2002).

Tratando-se de resíduos, esses são responsáveis por poluir todos os meios (solos, águas e o ar) e sua produção tem aumentado com o desenvolvimento socioeconômico e tecnológico da sociedade. Além da contaminação, os resíduos contribuem na proliferação de vetores transmissores de doenças, principalmente quando são depositados a céu aberto em aterros clandestinos. Atualmente, como mencionado acima, a única maneira de separar esses materiais é queimando as chapas descartadas a fim de reaproveitar o alumínio, porém, como o polímero presente é o polietileno, este vai liberar o gás etileno, gerando um alto teor tóxico na atmosfera (NAPOLI e MARQUES, 2014).

Contudo, os resíduos de alumínio composto podem ser reaproveitados e ganhar nova funcionalidade, podendo assim como os polímeros como o polipropileno e poliéster (EHRENBRING *et al.*, 2018), reutilizado e processado para fabricação de concreto reforçado.

5.4. REFORÇO DE CONCRETO ESTRUTURAL

O concreto é um material primordialmente compósito, portanto, uma mistura de materiais em diferentes estados físicos, envolto em materiais inertes de utilidade principal para aderir resistência e ocupar vazios de forma ordenada, que são os agregados graúdos e miúdos envolvidos por uma matriz cimentícia, em específico uma pasta de clínquer compreende como produto da calcinação

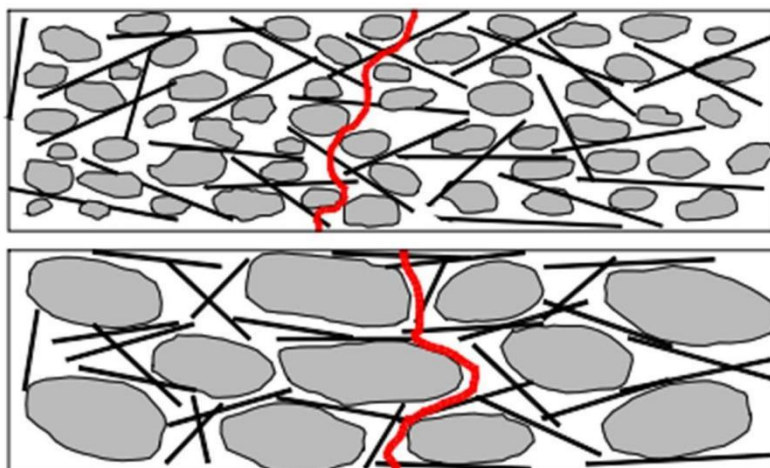
de calcários especiais com argilas e minério de ferro com adições, como gesso, cinzas pozolânicas ou escória de alto forno. O clínquer é o cimento portland em uma fase inicial, mas detém de grãos da espessura da ordem de μm , composto por silicatos, calcário proveniente de argilas, além de componentes com ferro e alumínio (BAUER, 2008).

Segundo Ehrehbring *et al.* (2018) o concreto possui características mecânicas adequadas para sua utilidade estrutural, no entanto, tem baixa resistência à tração, característica evidenciada pela utilização de aço no concreto armado para sanar essa deficiência no seu desempenho. Contudo, segundo inúmeros estudos desde os anos 60 as fibras poliméricas são um aditivo interessante para reforço, especificamente melhorando o desempenho mecânico, especificamente a tenacidade da peça.

Conforme NBR 16938 (2021), a qualificação do compósito de CRF, deve ser considerada obrigatoriamente nos ensaios de tração na flexão e compressão axial. Para isso, devem ser realizados ensaios aos 28 dias em no mínimo oito amostras, com coeficiente de variação de no máximo 25%. Com resistência calculada por média aritmética de pelo menos seis corpos de prova.

O CRF é utilizado para diversas finalidades, especialmente reforço estrutural, peças pré-moldadas, estruturas sujeitas à carregamentos dinâmicos, revestimento de túneis e estruturas sujeitas à incêndios. O concreto convencional tem ruptura frágil e baixa resistência à tração, comumente de 8 à 15% da resistência à compressão. Para reduzir essa deficiência as fibras podem ser incorporadas ao concreto para agregar resistência à tração e ductilidade (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 3: Esquema de Fissura em CRF.



Fonte: FIGUEIREDO (2000).

Conforme Figura 3, as fibras são descontínuas e uniformemente dispersas no elemento incorporado. As fibras são incorporadas sem orientação, com adensamento mecânico por vibrador de imersão. Para no instante da ruptura da argamassa matriz, a deformação decorrida por abertura de fissura seja ligeiramente suportada pela fibra. Portanto, a fibra atua como elemento de transição de tensões entre as seções, para isso, requer-se incorporar teor de fibras à seção transversal. Para incrementar ao concreto capacidade resistente no período pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

5.5. MÉTODO DE PROCESSAMENTO INDUSTRIAL

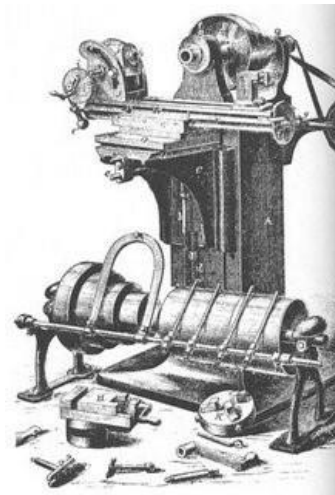
O processamento industrial envolve uma série de operações complexas para transformar matérias-primas em produtos acabados. Essas operações podem incluir mistura, separação, purificação, destilação e muitas outras etapas. Segundo WNEK (2017, p. 6), "o processamento industrial é o elo crítico entre a descoberta de novos materiais e a entrega de produtos de alta qualidade ao mercado".

Os primeiros estudos acerca de usinagem foram realizados pelo estadunidense Joseph W. Roe, o fundador da máquina-ferramenta em seus estudos "Turbinas à vapor" em 1911, "O equipamento mecânico" em 1918, contudo também atribui-se créditos das primeiras máquinas-equipamentos ao inventor da primeira máquina de moagem, Eli Whitney, além de Robert S.

Woodbury, etc. Além dos inventores das primeiras máquinas de fresagem Joseph Johnson, Simeão do Norte, John H. Hall e Thomas Blanchard. São um invento atribuído a muitos nomes devido a evolução da tecnologia com o tempo.

Contudo, somente em 1861, Joseph R. Brown, resolveu o problema da incapacidade do dimensionamento de uma máquina de 3 eixos com a denominada “*Brown & Sharpe’s* fresadora universal”, conforme apresentado na Figura 4, melhorando as práticas de moagem. No entanto, somente no período pós-Segunda Guerra Mundial em 1950 com o controle numérico (NC), em 1960 até o presente evoluindo para NF CNC como o avanço em armazenamento de dados e mídia (BROWN AND SHARPE MANUFACTURING, 2019).

Figura 4: Brown & Sharpe’s (Usinagem).



Fonte: Brown & Sharpe (2019).

Na fresagem de Topo, a ação de corte é realizada por uma lâmina de fresa, apresentada na Figura 5, que em função do funcionamento de um motor promete cortes, detalhes e tamanho em qualquer dimensão, ao que se refere as limitações dimensionais da máquina de fresagem. Além de muito utilizada no corte de Alumínio composto, zinco, (FABRICANTE vonder, 2022), também é muito utilizado em cortes de alumínios reforçados especiais utilizado para fuselagem aeronáutica (SUAREZ, 2007).

Figura 5: Fresa Router Espiral 4 cortes VONDER HSS 9.0.



Fonte: Vonder (2022).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. MÉTODO DE DOSAGEM EXPERIMENTAL

A dosagem de concretos de cimento Portland, toma-se par a realização de ensaios de resistência do concreto endurecido. Essa dosagem é baseada no método IPT/ EPUSP (1992), classificado como teórico-experimental pois detém de cálculo analíticos que evidenciam seu desempenho laboratorial baseado em leis fundamentais das propriedades do Concreto. Mas também é um método prático e simples que atende os pré-requisitos técnicos e operacionais de projetos estruturais (HELENE e TERZIAN, 1992).

Na dosagem IPT/EPUSP, inicialmente utiliza-se um traço (em massa, devido ao grau de precisão desejado) na proporção 1:2:3, no qual fixa-se a quantidade de agregado graúdo para obtenção do teor ideal de argamassa para um determinado concreto.

6.1.1. Dosagem IPT/EPUSP

Para montagem do diagrama de dosagem é necessária a correlação entre resistência à compressão, traço, relação água/cimento e consumo de cimento.

Para isso, são necessários definir os pontos preliminares na fase experimental, misturando na betonada com traço de 1:5,0 (cimento e agregados totais secos, medidos em massa) apresentado no Quadro 1, que demonstra a dosagem utilizada neste estudo obtida por meio do estudo de dosagem experimental IPT/EPUSP.

Quadro 1: Dosagem utilizada neste estudo.

Formulação	Cimento		Agregado Miúdo		Agregado Graúdo		Teor de Argamassa (α)	Relação a/c	Aditivo	
	Proporção	Massa (kg)	Proporção	Massa (kg)	Proporção	Massa (kg)			% SPC	Massa (g)
1 : 5,0	1	34,01	2,06	70,07	2,94	100,00	51%	41%	0,33%	112,00

Fonte: Autor (2023).

6.1.2. Determinação do teor ideal de argamassa no traço padrão (1:5,0)

Esta fase demonstra a adequação do concreto ao ser lançado na fôrma. A falta de argamassa na mistura pode ocasionar porosidade excessiva no concreto e falhas na concretagem. O excesso de argamassa, no entanto, propõe melhor aparência ao concreto, mas aumenta o risco fissuração por retração térmica de secagem pela reação de hidratação e reduz a economia (custo por m³), pois o cimento normalmente é o composto mais caro da mistura.

Com isso, o objetivo deve ser obter o teor ideal de argamassa, ou seja, o mínimo possível para mistura de produção do concreto. O traço de 1:5,0, serve para determinação de proporção por tentativa e erro, com coleta de dados por observação prática.

No Apêndice III estão as quantidades de materiais para a mistura da betonada, referente à um teor de argamassa a ser adotado. Para alcançar os resultados requeridos deve-se seguir as seguintes atividades:

- I. Conforme apresenta a Figura 6, inserir na betoneira uma fração de concreto ou traço de imprimação superior ou igual a 6 kg (≥ 6 kg) recomenda-se em traço 1:2:3 e relação a/c = 0,65, ou traço de

argamassa 1:3 e $a/c = 0,65$. Despejar a sobra de material livremente pela abertura da betoneira para baixo com o misturador em movimento para espalhar uniformemente nas superfícies da betoneira, isso se dá para reduzir as perdas no interior da betoneira devido a betonadas anteriores.

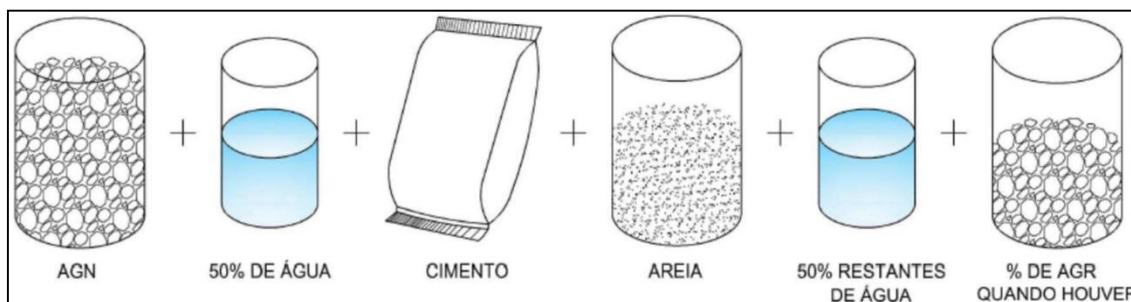
Figura 6: Interior da betoneira com traço de imprimação.



Fonte: Autor (2022).

- II. Pesar e lançar os primeiros materiais na betoneira, e misturar no máximo por 5 minutos, realizar uma pausa intermediária para limpeza das pás. Por fim, verificar se há plasticidade e coesão suficiente para um teste de abatimento de tronco de cone.
 - i. Introduzir os materiais na betoneira, seguindo a seguinte ordem proposta por HELENE e TERZIAN (1992): água (80%); agregado graúdo (100%); agregado miúdo (100%); cimento (100%); restante da água (se houver, 20%). Outro modo segundo BAUER (2016, p. 244-245): água (100%) e agregados graúdos (100%); cimento (100%); agregados miúdos (100%). Neste estudo adotou-se a inserção de materiais por Padovan (2013), expressa na Figura 7.

Figura 7: Ordem de introdução dos materiais na betoneira.



Fonte: Padovan (2013).

Estudos de Abrams (1918), verificaram que houve o aumento da resistência do concreto em tempos de mistura de até 2', outros estudos das normas ACI 614 (1959) e o Concrete Manual (2011) indicam que misturas após 2' a 3' minutos têm aumento sutil da resistência à compressão, não justificando necessidade do aumento no tempo de mistura.

- III. Realizar acréscimos sucessivos de argamassa na mistura, respeitando o tempo de mistura entre acréscimos de 2' minutos, conforme colunas de acréscimos no Apêndice I e II, mantendo inalterada a quantidade de agregado graúdo na mistura.

Figura 8: Acréscimos pesados em balança de precisão, postos em embalagem.



Fonte: Autor (2022).

- IV. Para definir o teor ideal, realizar observações práticas, para cada teor de argamassa:

- i. Com a betoneira desativada, limpar as pás e a sua superfície interna.
- ii. Usar uma colher de pedreiro para inserir todo o material na região inferior da cuba da betoneira, inserindo o agregado solto no interior da mistura.
- iii. Realizar teste prático de acabamento, segundo FOCHS (2011) um teste para certificação de trabalhabilidade e acabamento, usar novamente a colher de pedreiro passando-a sobre a superfície do concreto fresco, realizando um movimento de dentro para fora da massa, levantando-a no sentido vertical. Observação: Checar se a superfície exposta do concreto possui vazios, isso indica falta de argamassa.

Figura 9: Teste prático de acabamento para determinação do teor de argamassa ideal, realizado no interior da betoneira.



Fonte: Autor (2022).

- iv. Realizar teste prático de coesão, usando novamente colher de pedreiro e retirar uma parte de concreto, levantando-a até a região superior da cuba da betoneira. Para verificar se ocorre desprendimento do agregado graúdo da massa, isso indica falta de aderência. Observação: Outro fator que indica falta de argamassa. Logo após, soltar o concreto da colher

e verificar se cai de forma compacta e homogênea.
Observação: Isso indica teor de argamassa adequado.

Figura 10: Teste prático de coesão e desprendimento do concreto, realizado no interior da betoneira.



Fonte: Autor (2022).

- v. Misturas com teor de argamassa adequado, sem vazios superficiais, sem desprendimento de agregados e queda de concreto homogêneo e compacto, deve-se determinar o abatimento do tronco de cone (cone de Abrams, *Slump test*, etc). Contudo, caso não atinja o perfil estabelecido, acrescentar água até ser suficiente com auxílio de recipiente graduado.

Figura 11: Realização de acréscimos com proveta graduada e béquer.



Fonte: Autor (2022).

- vi. Após o ensaio de abatimento do tronco do cone, com o concreto ainda no formato de cone, bater suavemente na lateral inferior do mesmo, com a haste de socagem, para verificar a queda. Se a queda for realizada de forma homogênea, sem desprendimento de porções. Observação: Indica que o teor de argamassa é adequado.

Figura 12: Realização do ensaio de Abatimento do concreto fresco (*Slump test*).



Fonte: Autor (2022).

- vii. Verificar na mesma amostra do ensaio de abatimento, se a sua superfície lateral de concreto está compacta e sem vazios superficiais. Essa observação indica bom teor de argamassa.

- viii. Observar se ao redor da base de concreto, no formato de cone, se aparece uma camada de água da mistura (exsudação), Observação: Indica ausência de finos e tendência a exsudação de água, pode-se corrigir com mudança na granulometria da areia ou aumentando teor de argamassa na mistura.
 - ix. O teor final é dependente do fator externo da possível perda de argamassa no transporte e lançamento (por quantidades retidas nas fôrmas e armadura, ou até mesmo quando é utilizada uma bica de madeira), pode-se estimar esse valor como 2 a 3% de perdas.
- V. O teor final e argamassa é definido nos itens anteriores, acrescentando-se as perdas estimadas.
 - VI. Realizar nova mistura em traço 1:5, com o teor de argamassa definitivo e todas as características do concreto fresco, indicando na tabela: relação a/c (para o abatimento requerido); consumo de cimento/m³ de concreto; consumo de água/m³ de concreto; massa específica do concreto fresco; e abatimento do tronco do cone.
 - VII. Moldar os corpos-de-prova cilíndricos para rupturas na idade de 28d.

6.1.3. Misturas experimentais

Para efetuar as misturas dos traços experimentais, foram seguidas as seguintes instruções, conforme Helene e Terzian (1992):

- i. Relação a/c para obter a consistência ou abatimento desejada;
- ii. Consumo de cimento/m³;
- iii. Realizar o ensaio de abatimento do tronco do cone;
- iv. Moldar corpos-de-prova cilíndricos para rupturas nas idades de 28d;
- v. Preencher a tabela de misturas experimentais in loco (Anexo I e Apêndice I).

6.2. MATERIAIS

Os materiais assumidos serão os materiais comumente utilizados na dosagem prática experimental IPT/EPUSP para concreto simples:

Tabela 4: Parâmetros de Dosagem.

Areia	Média
Brita	1
Cimento	CP-II E-32
<i>Slump</i> desejado (mm)	120

Fonte: Autor (2022).

6.2.1. Cimento Portland

A finura é um fator vital para a velocidade da reação de hidratação do cimento, devido que as partículas de cimento são de dimensões na ordem de finura de no mínimo 12% de resíduos na peneira de 75 μm , para cimento CP II-E 32, segundo NBR 16697 (2018). Portanto a menor finura proporciona maior superfície de contato, que pode melhorar a resistência, diminuir a exsudação e outras segregações dos materiais, aumentar a trabalhabilidade, impermeabilidade e coesão do concreto, contudo, pode acelerar excessivamente a reação de hidratação (fator que pode ser regulado com adição de gesso ou aditivo retardante), aumentando assim liberação de calor de hidratação e a fissuração autógena, tornando o concreto sensível ao fissuramento (TUTIKIAN e HELENE, 2011).

A perda de fogo e resíduos insolúveis podem ser resultado da carbonatação ou a hidratação devida exposição à umidade do ar, isso causa o envelhecimento do cimento, a NBR NM 18 (2012) nos recomenda por meio de análise química detectar adições de substâncias estranhas, inertes ou insolúveis no ácido clorídrico. A resistência à compressão aos 28 dias obtidas por meio de

tensões para verificação do comportamento mecânico do cimento no Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, como indica a NBR 5739 (2018).

Um aglomerante hidráulico com característica de adição de escória de alto forno (CP II-E) será adotado neste estudo, por atingir resistência satisfatória na idade de 28 dias, deve atingir no mínimo cerca de 32 MPa em 28 dias de a cordo com sua classe de resistência. O CP II-E possui clínquer Portland com altas proporções de silicatos de cálcio, em mistura por moagem com sulfatos de cálcio, além de carbonatos de cálcio. O termo “E” refere-se a adição de escória graduada de alto forno em proporções de 6~34% no clínquer, ligeiramente proporcionando resistência satisfatória para idades avançadas.

Suas proporções são de teores de 51~94 % de clínquer com sulfatos de cálcio, e durante o período de moagem são realizadas misturas com materiais, realizando-se adição de escória de alto forno de 6~34% e materiais carbonáticos de 0~15 %, critérios conforme NBR 16697 (2018).

6.2.2. Agregado Graúdo e Miúdo

Os agregados devem estar livres de reatividade álcali-agregado, presença de sulfatos e carbonatos e presença de material pulverulento de argila. São características importantes para alcançar a eficácia dos ensaios destrutivos sem inalteração das amostras por patologias em função do agregado (TUTIKIAN e HELENE, 2011). O método IPT/EPUSP fixa um teor de argamassa seca para a mínima quantidade de água para uma mesma trabalhabilidade através de análise experimental, para isso, procurar-se-ia os agregados que melhor atenderem aos requisitos de praticidade e conformidade com o método em questão, que serão areia como agregado miúdo e Basalto para graúdo.

Para os agregados graúdos, as características de maior valor para dosagem de concreto são a granulometria, expressa em proporções das dimensões de grãos em porcentagem, assim como os agregados miúdos, contudo, sua compactidade e resistência tem função importante na qualidade do concreto, assim como a dimensão máxima característica, pois quanto maior,

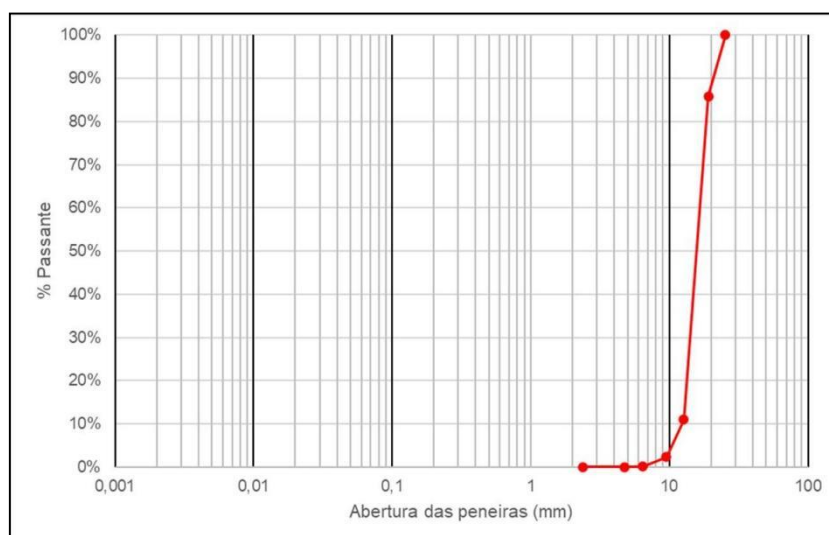
maior será a economia do concreto. No entanto, está relacionada diretamente com a trabalhabilidade do concreto fresco, e deve ser prevista em cálculo estrutural, para condução adequada de transporte, espaçamento entre armaduras e concepção de formas para cimbramento. Características aferidas pelo ensaio verificado na NM 248 (2003).

Assumida na NBR 16917 (2021) as características de densidade e absorção de água são obtidas por meio de submersão em tanque e secagem em estufa e aferição de umidade relativa com atenção a absorção de água do agregado, que deve ter entre 4,75 a 75 mm de diâmetro. É importante saber sua apreciação petrográfica a fim de conhecer sua origem para adequar sua natureza ao método de dosagem do concreto, analisando volume por umidade, possível reatividade, ou seja, conhecer suas propriedades físicas e químicas.

Misturas de agregados graúdos podem ocorrer, e sua análise é simples, não requerendo cálculos avançados de curvas granulométricas. É utilizada quando se busca reduzir custos do concreto. Para isso, é necessário a compactação de agregado em estado seco, para aferição de sua massa unitária.

O agregado graúdo utilizado no presente estudo foi analisado em ensaio de granulometria, com peneiras e vibrador mecânico. O ensaio foi realizado na empresa Franco Engenharia em Imperatriz, Maranhão. Sendo este, conforme resultados apresentados na Figura 13, avaliado como brita 1 uniformemente distribuída com módulo de finura 5,0 definido como utilizável, conforme limites de composição granulométrica na NBR 7211 (2022).

Figura 13: Curva granulométrica do agregado graúdo.

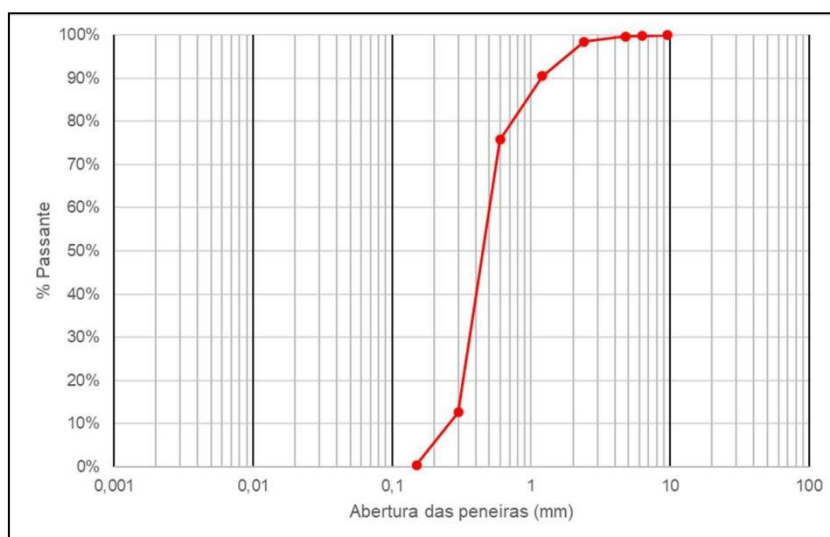


Quanto ao Agregado miúdo, o que mais tem influência na dosagem é sua granulometria, módulo de finura, massa unitária, massa específica, inchamento, umidade crítica, apreciação petrográfica, curvas normalizadas e sua classificação.

Sua composição granulométrica está em função de suas proporções de grãos, estabelecida em porcentagem (%), que age nas características de compacidade e resistência na qualidade dos concretos. O ensaio de granulometria é conduzido com peneiras, estufa, balança e um agitador mecânico determinado pela NBR NM 248 (2003) e pode ser seguido por um ensaio de sedimentação, regido pela NBR 7181 (2016) e realizado com estufa, balança, recipientes adequados, aparelho de dispersão, densímetro de bulbo simétrico, termômetro, bagueta, bisnaga e cápsula metálica para determinação das proporções e dimensões para classificação do solo em estudo.

Conforme ensaio de granulometria, resultados apresentados na Figura 14 a areia utilizada neste trabalho de granulometria uniforme média e módulo de finura de 2,22, portanto, na zona utilizável inferior, conforme NBR 7211 (2022).

Figura 14: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2023).

Contudo, dos ensaios ditos anteriormente pode-se tirar um dado muito importante para a dosagem denominado Módulo de Finura, relacionado à área superficial, altera a água de molhagem para uma certa consistência e deve ser mantido constante e dentro de limites para evitar alteração do traço. Verificado pela NBR 7217 (2016), seu ensaio resulta a curva granulométrica que pode ser comparada com as curvas normalizadas, previstas na NBR 7211 (2009), que nos

demonstram as tolerâncias observadas para as proporções acumuladas nas peneiras classificando os agregados miúdos em muito fino, fino, médio e grosso.

É a razão entre a massa total e volume de vazios entre os grãos do agregado, são através da Massa Unitária que se pode transformar traços de massa para volume o contrário. Seu ensaio é regido pela NBR 16972 (2021) experimento conduzido com balança, haste de adensamento, recipientes adequados, pá ou concha, placa de rasamento do recipiente, estufa e termômetro.

Relação entre massa e volume de grãos do agregado, determinação recomendada pela NBR 16916 (2021) que diz sobre Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Em que sua aparelhagem é balança, frasco com tampa, molde tronco-cônico, haste de compactação, estufa, recipientes adequados, peneiras, espátula de aço, circulados de ar quente regulável e dessecador.

Outra característica importante seria o Inchamento, pois é o aumento de volume de determinada massa de agregado, resultante da absorção de água. Importante para o volume, porque pode alterar a massa de agregado para um mesmo volume de dosagem. O coeficiente de inchamento serve para medir o índice de alteração de volume por massa do agregado miúdo, expresso em uma relação entre volumes final úmido e inicial seco, comumente aferida juntamente a umidade crítica que é a determinada umidade em que o inchamento se mantém constante.

6.2.3. Aditivos

Os aditivos são materiais que podem aderir ao concreto fresco ou endurecido características distintas e devem ser analisados durante sua dosagem. Para isso, é importante verificar sua massa específica e recomendações de desempenho técnico-econômicas, para evitar erros de especificação e aspectos de qualidade, verificando sua cor, conformidade e validade, conforme especificações do fabricante. O aditivo utilizado foi da marca DARATARD HC do tipo Aditivo Plastificante Retardante que atende à ABNT NBR 11768 (2011). O fabricante recomenda dosagem de 0,2 à 1,0% SPC (em relação a massa de cimento). Este aditivo contém massa específica de 1,11 g/cm³ (DARATARD, 2021). Neste estudo, sua dosagem será incorporada em relação à massa de cimento (% SPC) na ordem de 0,33%, de acordo com a trabalhabilidade requerida.

6.2.4. Água de Amassamento

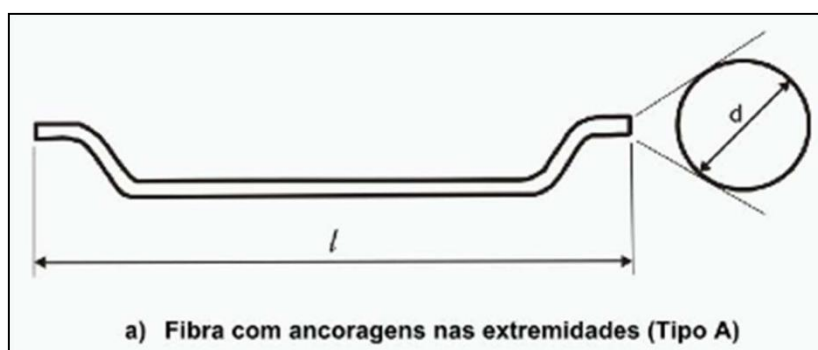
Para correta dosagem deve-se utilizar água potável, e de acordo com os requisitos da NBR 15900-1 (2009), águas de distribuição pública são adequadas para dosagem de concreto, por isso não há necessidade de análise química de teores de zinco, cloreto, chumbo, sulfato, fosfato, álcalis nitrato ou açúcares, substâncias que podem classificar a água de amassamento para

tratamento pré-dosagem, readequando-a para tornar-se água de amassamento. A água é distribuída pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) no município de Açailândia, Maranhão.

6.2.5. Fibra de Referência

A fibra adotada foi a DRAMIX® 3D 80/60 BG, de comprimento (L) 60 mm e diâmetro (h ou d) de 0,75 mm, com fator de forma (L/h) de 80, com ancoragens nas extremidades conforme Tipo A da ABNT NBR 15530 (2019), sua resistência à tração é 1225 MPa, valor nominal do arame trefilado a frio, em baixo carbono, conforme DIN 17140-D9 (ANO), EN 10016-2 (ANO) e C9D (ANO). A dosagem indicada pelo fabricante é de no mínimo 10 kg/m³ de acordo com a EM 14889-1. Recomenda-se teor de argamassa superior à 50%, fator de água/cimento inferior à 50% e abatimento de 110 ± 20 mm. Sua composição é de arame com valor nominal de tensão resistente de 1.225 N/mm² com baixo carbono (ArcelorMittal e BEKAERT, 2019).

Figura 15: Fibra com ancoragens nas extremidades, representando o Tipo R.



Fonte: NBR 15530 (2019).

A Figura 16 apresenta a fibra de aço utilizada neste estudo como parâmetro de referência para ensaio do comportamento mecânico de CRF.

Figura 16: Fibras de aço.



Fonte: Autor (2023).

A Tabela 5 apresenta as propriedades físicas e mecânicas conforme fabricante da fibra e o arame utilizado em sua produção.

Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas da Fibra referência.

Propriedade	Valores
Diâmetro (mm)	0,75
Comprimento (mm)	60
Fator de forma (mm/mm)	80
Resistência à tração (MPa)	1225

Fonte: ArcelorMittal e BEKAERT (2019).

A fibra de categoria 3D é contida somente por uma curva de ancoragem, acondicionada em sacos de 20 kg não hidrossolúveis, selecionadas para o seguinte estudo segundo suas dimensões requeridas para facilitar o processamento da fibra reaproveitada e custo de aquisição (menor custo total), nas características escolhidas o fabricante recomenda aplicação para Pisos Industriais Pesados, Pisos Industriais Leves, Pisos Comerciais, Garagens/Estacionamentos, Pavimentos Portuários, Pistas de Aeroportos, Pavimentos Rodoviários, Pisos sem Juntas (Jointless Floor), Capas de

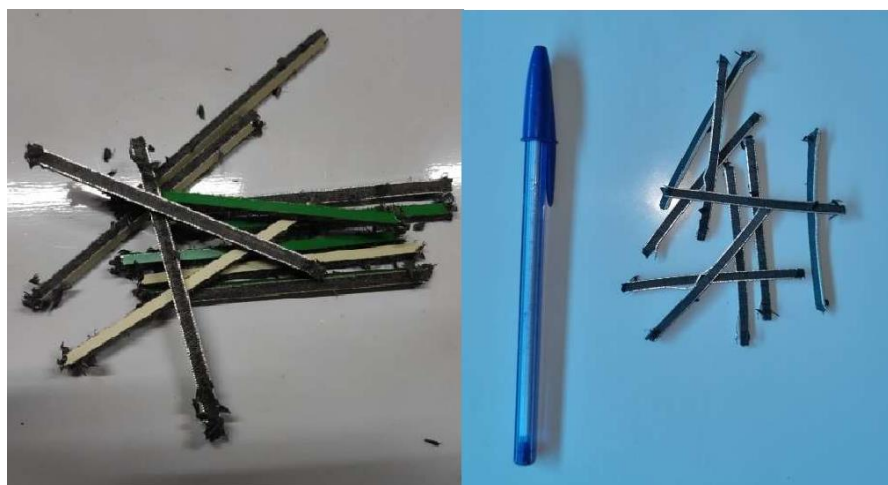
Compressão, Pisos Estaqueados, Tubos de Concreto e Anéis Segmentados (para Túneis), caracterizando um material fibrilar para elementos de alto desempenho em abrasão, deformação e resistência mecânica.

6.2.6. Fibra Processada e Reciclada

Os resíduos de ACM coletados foram processados em uma máquina de fresagem de topo com CNC, tentando aproximar ao máximo das dimensões da fibra de referência. Contudo, as dimensões alcançadas foram de 1x3x60 mm para cada monofilamento. Resultando em uma fibra composta, com um material metálico e outro polimérico. Requer-se neste estudo avaliar o CRF resultante do processamento e reciclagem de resíduos de ACM.

A Figura 17 apresenta a fibra desenvolvida para ensaio do comportamento mecânico de CRF.

Figura 17: Fibra de ACM pós-processamento.



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 6 apresenta as propriedades físicas e mecânicas conforme fabricante do ACM reaproveitado.

Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas da fibra de ACM.

Propriedade	Valores
Largura (mm)	1
Espessura (mm)	3
Comprimento (mm)	60
Fator de forma (mm/mm)	60
Resistência à tração (MPa)	160

Fonte: Fabricante FerroNorte (2022).

6.3. PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS

Como o resíduo é encontrado em restos de chapas lamelares serão realizadas em suas superfícies corte de ficção da placa visando melhor aproveitamento de área para transposição em monofilamentos, buscando a melhor eficácia na obtenção das seguintes dimensões proporcionais a sua proporção incorporada, o processamento será realizado no município de Açailândia no Edifício de Galpão Comercial AQUARELA, Av. Aulídia Gonçalves dos Santos, Bairro Jardim Glória II que contém os equipamentos de corte a seguir:

Apresentada na Figura 18, o equipamento de corte é uma máquina com controladora CNC, de marca brasileira modelo Rhino CNC RMC 5000 Plus, com motor de corte em potência de 4 cv, é uma fresadora comanda por dados computacionais (CNC) que atua em 3 dimensões, com estrutura em pórtico com três motores individuais, dois no sentido vertical Y e um em X e Y com torque de até 65 kgfm, com velocidade máxima de operação de 7000 mm/min na área útil de 1850x2750x150 mm (RHINO, 2022).

Figura 18: Fresadora Rhino CNC RMC 5000 Plus.



Fonte: Autor (2023).

6.4. MISTURA E MOLDAGEM DE AMOSTRAS

Serão analisadas nesse estudo 28 amostras de corpos de provas, divididos em cilíndricos (12 amostras) nas dimensões de 200x100 mm (Proporção 1:2 segundo item 4.1.1.1 da NBR 5738:2016) e prismáticos (16 amostras), nas dimensões de 150x150x550 mm (dxD). A NBR 5738 (2016) indica na proporção $D=3d+50$ mm. Contudo, a NBR 16940 (2021, item 4.1) a qual se refere a concretos reforçados com fibras, recomenda as dimensões dos CPs prismáticos nas dimensões adotadas para agregado de diâmetro máximo de 25 mm e fibras com comprimento máximo de 60 mm. Neste trabalho serão analisadas proporções de fibras incorporadas em traços de 0% (REF), 0,45% (Fibra de ACM) e 2,19% (Fibra de Aço e ACM) por massa de cimento.

De acordo com a NBR 15530 (2019), o traço de referência (REF) desempenha um papel crucial nos estudos de CRF. O traço de referência consiste na definição das proporções dos materiais constituintes do concreto, incluindo a quantidade e o tipo de fibras a serem incorporadas. Ele serve como uma base de comparação para avaliar o desempenho do CRF em relação a propriedades mecânicas, durabilidade e outros critérios relevantes. O traço de referência permite estabelecer parâmetros consistentes para experimentos e análises, auxiliando na compreensão dos efeitos das fibras no comportamento do concreto e possibilitando a seleção adequada de traços otimizados para aplicações específicas (Romero et al., 2014; ABNT NBR 15530, 2019).

Como demonstra a Figura 19, foram fixadas nas formulações as quantidades de teor de fibras e quantidade de aditivo nos traços, em cada formulação foram extraídos 3 corpos-de-prova cilíndricos (CPC) e 4 corpos-de-prova prismáticos (CPP).

Figura 19: Traços definitivos incorporados no estudo.

Formulação	Fibra	SPC (kg)	Teor de Fibras (% SPC)	Massa de Fibras (g)	Aditivo (% SPC)	CPC	CPP
REF	-	34,01	-	-	0,33%	3	4
FAÇO2,19	Aço	34,01	2,19%	745	0,33%	3	4
FACM2,19	ACM	34,01	2,19%	745	0,33%	3	4
FACM0,45	ACM	34,01	0,45%	154	0,33%	3	4

Fonte: Autor (2023).

Inicialmente, foram realizados três traços REF, FACM2,19 e FAÇO2,19. Contudo, devido a discrepância de resultados obtidos, foi necessário realização de um novo traço FACM0,45. O traço FACM2,19 demonstrou distanciamento do comportamento em que se requer o CRF, que seria apreciação do volume crítico conforme Figura 1 por Quinino (2015).

Este trabalho tem foco nas propriedades mecânicas de tenacidade, ductilidade e resistência à fissuração avaliados por módulo de elasticidade, resistência à tração e resistência à compressão do concreto.

Tabela 7: Ensaio realizados e suas respectivas normas técnicas.

Ensaio	Norma Técnica	Nº de CPs	Idades
Abatimento do Tronco do Cone	NM 67	-	Concreto no Estado Fresco
Compressão Axial	NBR 5739	12	28d
Tração na Flexão	NBR 16940	16	28d
Ultrassom	NBR 8802	16	28d

Fonte: Autor (2022).

6.4.1. Corpos-de-prova Cilíndricos e Prismáticos

Com os moldes em aço ou outro material inerte, o corpo de prova deve manter superfície lisa e livre de imperfeições, segundo NBR 5738 (2016, p. 2), nos dá o as dimensões dos moldes para corpos de prova cilíndricos e prismáticos e suas tolerâncias nas dimensões básicas em espessuras de paredes e base. Para adensamento, pode-se utilizar haste, vibrador de imersão, mesa vibratória, concha ou góia, todos os dispositivos de conformação manual devem atender aos requisitos de material rígido e não corrosivo. A moldagem e cura dos corpos de prova serão realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UEMASUL – Campus Açaíândia.

Figura 20: Molde de corpo de prova cilíndrico em polímero de alta densidade.



Fonte: Aditec (2022).

Os moldes utilizados serão da marca Aditec, modelo F-10 em polímero de alto desempenho nas dimensões de 10x20 cm, segundo NBR 5738 (2016) apresentados na Figura 20 e Figura 21.

Figura 21: Moldes e corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Autor (2023).

Conforme NBR 5738 (2016, p. 4), demonstra as recomendações para socos por número de camadas, dimensões dos CPs, golpes por camada e tipo de adensamento, neste estudo adotou-se 2 camadas para adensamento manual por meio de 12 golpes por camada. No adensamento manual com haste, deve-se distribuir os socos para toda a camada, não podendo penetrar a camada já adensada, o teste de abatimento deve ser realizado a fim de efetivar os parâmetros equivalentes para a moldagem correta do corpo de prova.

Para este estudo foram fabricados moldes prismáticos em compensado nas dimensões de 15x15x55 cm, conforme NBR 16940 (2022) apresentadas na Figura 22 a seguir.

Figura 22: Molde de corpo de prova prismáticos em compensado.



Fonte: Autor (2023).

A desforma deve ocorrer 24h para CPC, e 48h CPP após moldagem, devem ser transportados por caixas com serragem ou areia molhada e os CPs devem ter cura final em, no mínimo, 95% de umidade relativa em água estanque saturada em cal, sem incidência solar, com fechamento hermético por portas e temperatura entre 21 à 25°C até o ensaio, conforme NBR 9479 (2008).

Na Figura 23 observa-se que as fibras incorporadas nos traços FAÇO2,19 e FACM2,19 com massa similar pesadas em balança.

Figura 23: Fibras incorporadas nos traços FAÇO2,19 e FACM2,19.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 24 apresenta as fibras dos traços FAÇO2,19 e FACM0,45, as fibras foram igualadas em volume aparente.

Figura 24: Fibras incorporadas nos traços FAÇO2,19 e FACM0,45.



Fonte: Autor (2023).

6.5. ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO-DESTRUTIVOS

6.5.1. Ensaio de Compressão Axial

Caso o corpo de prova cilíndrico tenha alguma deformidade em sua superfície deve-se realizar a preparação das bases de acordo com a NBR 5738 (2016), pois as forças resultantes devem coincidir ao centro do corpo de prova. A máquina de ensaio possui valores máximos de cargas admissíveis e classe I ou superior classificadas conforme ISO 7500-1 (2018) que nos demonstra os parâmetros para calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial de tração e/ou compressão e sua medição de força, que são resolução relativa de indicação da porcentagem de força da máquina de ensaio, erros relativos à repetitividade e o valor verdadeiro convencional, em *Newtons* (N), por escala digital ou analógica, segue Figura 25.

Figura 25: Prensa Hidráulica Pavitest I.30001.C.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com a NBR 5139 (2018), que descreve o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 100x200 mm (dxD, $D=2d$, como indica a norma, tabela 2, NBR 5738:2016) e sua avaliação de

desempenho. A aplicação da carga deve ser realizada de forma estável, a fonte de energia deve manter funcionamento contínuo, livre de choques, realizando um carregamento em tensão de 0,30 à 0,60 MPa/s (NBR 5739:2018, item 5.6). Os corpos de prova não podem ter relação altura/diâmetro superior a 2,06 e requerem correções se menores que 1,94 (NBR 5739:2018, item 6.1.2), caso ocorra realizar correções, segundo a norma. Existe tolerância recomendada para a idade de ensaio, em 7 dias, com tolerância máxima de 6 h, para 28 dias, com tolerância máxima de 20 h, conforme NBR 5139 (2018, item 5.3).

6.5.2. Ensaio de Tração na Flexão

O aparelho de ensaio deve ser similar as diretrizes da NBR 5739 (2018) e de acordo com os critérios de moldagem e cura dos corpos de provas prismáticos na NBR 5738 (2016).

Figura 26: Prensa Hidráulica INSTRON 23-100.

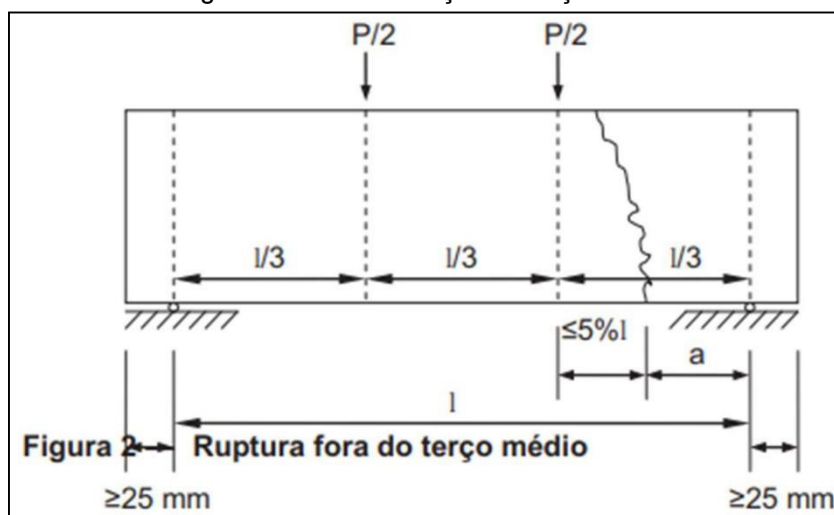


Fonte: Autor (2023).

A distância entre os apoios e a força deve ser constante durante o ensaio, a força é normal a superfície do corpo de prova e deve ser aplicada em intensidade crescente e uniformemente no intervalo de 0,9 à 1,2 MPa/min, medir

a seção de ruptura quanto as dimensões de altura e largura com precisão de até 1 mm, com a média de três determinações. Após retirada de cura úmida o tempo de tolerância para realização do ensaio é de no máximo 3 h, caso não haja contato perfeito entre o corpo de prova e o apoio, polir a superfície do corpo de prova, de acordo com a NBR 12142 (2010).

Figura 27: Caracterização do terço médio.



Fonte: NBR 12142 (2010).

O cálculo da resistência à tração possui duas determinações, segundo NBR 12142 (2010), que está em função da seção de ruptura, localizada dentro ou fora dos limites do terço médio, segundo apresenta Figura 27. Os vãos entre apoio e extremidade do corpo de prova devem ser de no mínimo 25 mm. E os dados resultantes deste ensaio são força máxima, resistência à tração na flexão e para o ensaio realizado com auxílio de sensores, pode-se ainda obter dados de diagramas de tensão-deformação, fator de tenacidade, limites de deformação, etc.

6.5.3. Ensaio de Abatimento de Concreto

Ensaio não-destrutivo realizado no concreto no seu estado fresco. Normatizado na NM 67 (1996), que recomenda adensamento de 3 camadas cada em 1/3 da altura do cone de Abrams, tronco cônico com 20 cm do diâmetro

da base, 10 cm de diâmetro da borda superior e 30 cm de altura. Cada camada deve ser adensada manualmente com 25 golpes com haste de socagem, recomenda-se umedecer o molde e a placa de base para reduzir a aderência entre o concreto e a chapa metálica, a Retirada do molde deve ser em 5 a 10s. Aferir abatimento de 5 em 5 mm (arredondar para o mais próximo).

Conforme Silva (2018, p.52), o abatimento ideal para o concreto estrutural varia de acordo com diversos fatores, como tipo de estrutura, método de colocação e características dos materiais utilizados. Geralmente, adota-se um abatimento entre 10 e 15 centímetros para garantir uma boa trabalhabilidade do concreto.

Para garantir a qualidade do concreto, observar na superfície lateral se há compactação sem vazios, indicando teor de argamassa adequado. Além disso, observar se ao redor da base de concreto aparece uma camada de água, indicando exsudação por falta de finos (necessária mudança na granulometria da areia). Outrossim, pode-se realizar o denominado ensaio de escorregamento batendo suavemente na lateral da placa de base e verificar se ocorre queda homogênea e sem desprendimento de porções, indicando teor de argamassa adequado (HELENE e TERZIAN, 1992).

6.5.4. Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico por Ultrassom de Concreto

Neste estudo será realizada a determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica conforme Equação 16, presente na NBR 8802 (2019), que recomenda na mínima dimensão lateral de 65 mm para transdutores de frequência 54kHz, a fim de medir o tempo decorrido da emissão até a recepção das ondas para posterior obtenção do módulo de elasticidade dinâmico do concreto endurecido por meio de ondas longitudinais medidas no aparelho de marca PROCEQ, modelo Pundit Lab (+) apresentado na Figura 28, com capacidade de medições por sensores de velocidade de pulso, frequência e tempo de propagação de ondas.

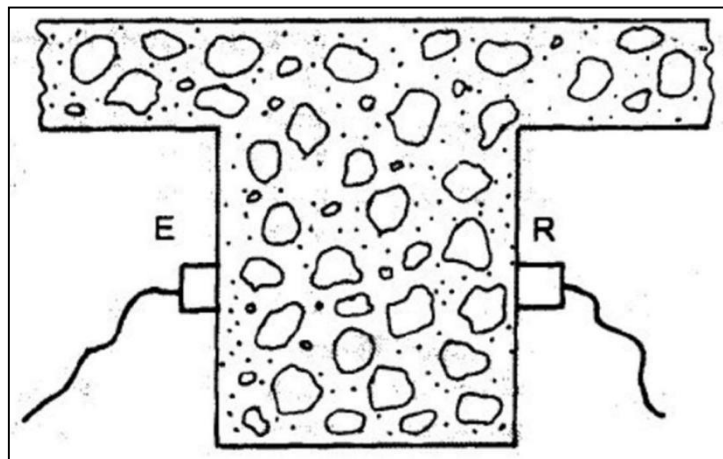
Figura 28: Aparelho de Ultrassom PROCEQ Pundit Lab+.



Fonte: Autor (2023).

O aparelho e seus transdutores foram posicionados em transmissão direta nas extremidades do CPP, conforme indica Figura 29.

Figura 29: Transmissão direta de UPV.



Fonte: NM 58 (1996).

$$E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad \text{Equação 16}$$

E_d = MOE dinâmico;

ρ = densidade do concreto endurecido;

μ = coeficiente Poisson, $\mu = 0,2$ para concreto (BEER e JOHNSTON, 2019; NBR 6118, 2014; NBR 12655, 2022);

V = velocidade de propagação da onda ultrassônica.

6.5.5. Módulo de Elasticidade Estático Estimado ou Empírico

Na Tabela 8, estão apresentadas algumas das equações empíricas e suas respectivas normas e parâmetros considerados em cálculo:

Tabela 8: MOE e relações empíricas para estimativa.

Norma vigente	MOE tangencial	Classe de concreto	MOE secante	Onde
NBR 6118 (2014)	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	C20 até C50	$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci}$	$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$
	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}$	C55 até C90		

Fonte: Autor (2022).

O MOE para idades inferiores a 28 dias pode ser estimado pelas expressões nas Equação 17 e Equação 18 a seguir:

Para classes de C20 até C45, temos:

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right]^{0,5} \cdot E_{ci} \quad \text{Equação 17}$$

Para classes de C50 até C90, temos:

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right]^{0,3} \cdot E_{ci} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

$E_{ci}(t)$ = estimativa de MOE do concreto para idades de 7 a 28 dias;

f_{ckj} = resistência característica à compressão do concreto para idades de 7 a 28 dias.

6.6. TRATAMENTO DE DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA E REGRESSÃO LINEAR)

Para analisar os dados, foram conduzidas avaliações descritivas para obter a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Para as análises estatísticas, foram realizadas comparações de médias (ANOVA) com um nível de confiança de 95%. A comparação de médias estatisticamente avalia a influência do fator de controle na variável de resposta. Quando os efeitos são significativos, é realizada uma segunda análise estatística usando o Teste de Tukey.

O Teste de Tukey compara os componentes dentro dos grupos para determinar qual fator gera um efeito significativo na variável de resposta. Além disso, foram realizadas análises de regressão linear simples entre as variáveis de resposta (eixo-x nos gráficos) para examinar a influência das propriedades do concreto em relação a uma variável dependente. No que diz respeito aos valores do coeficiente de determinação (R^2), consideramos valores acima de 0,60 como aceitáveis. Valores inferiores a 0,60 são considerados baixos e não representam adequadamente o comportamento do fenômeno estudado.

Ainda assim, é importante ressaltar que os valores das equações das retas representam os resultados experimentais obtidos neste estudo e não devem ser generalizados de forma alguma, pois estão limitados ao escopo desta pesquisa.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados e discussões relativos às propriedades analisadas neste estudo.

7.1. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

7.1.1. Ensaio de Abatimento do Tronco do Cone de Abrams (*Slump Test*)

Os resultados do ensaio de abatimento *Slump test* para os traços de referência e fibras incorporadas são apresentados na Tabela 9. Comparando a REF com a dosagem com fibras de aço (FAÇO2,19) e fibras reaproveitadas de ACM (FACM2,19). A % SPC indica porcentagem de adição em massa de cimento.

Figura 30: Resultados de *Slump test*.



Fonte: Autor (2023).

Pode-se notar em primeiro instante, que o concreto REF possui abatimento similar ao FACM2,19, contudo, houve uma diminuição da trabalhabilidade para o concreto com fibras de aço incorporadas (FAÇO2,19), a

Figura 23 e Figura 24 (anteriores) demonstram as fibras incorporadas nas formulações, em FAÇO2,19 e FACM2,19 com mesma massa de 0,745 g, pesadas em balança de precisão. No mesmo traço foi incorporado a mesma massa de fibras (FAÇO2,19 e FACM2,19), que obtiveram diferentes abatimentos.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de abatimento do tronco do cone de Abrams.

Formulação	Fibra	Teor de Fibras (% SPC)	Teor de Aditivo (% SPC)	Abatimento (mm)
REF	-	-	0,33%	120
FAÇO2,19	Aço	2,19%	0,33%	70
FACM2,19	ACM	2,19%	0,33%	120
FACM0,45	ACM	0,45%	0,33%	120

Fonte: Autor (2022).

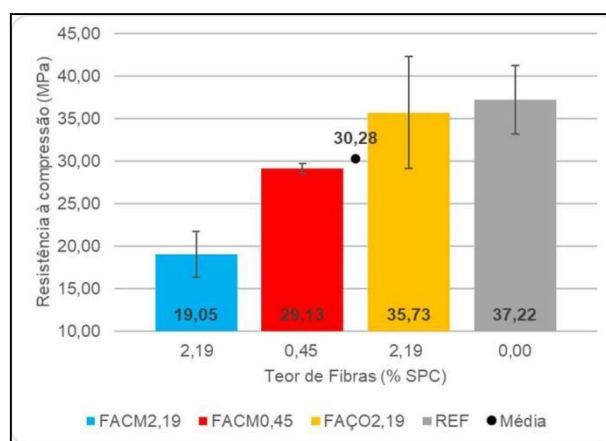
O traço FAÇO2,19 com menor volume de fibras, obteve menor trabalhabilidade no ensaio do tronco do cone, mesmo detendo de um menor fator de forma e dimensões. Contudo, foram igualados em volume as fibras dos traços FAÇO2,19 e FACM0,45.

7.2. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

7.2.1. Ensaio de Resistência à Compressão Axial Concreto Reforçado com Fibras

Os resultados de resistência à compressão axial das amostras são apresentados na Figura 31. São a média dos resultados de três amostras ensaiadas por formulação, resultados para idade de 28 dias de cura.

Figura 31: Resultados de resistência à compressão (Gráfico de resistência-Teor de fibras).



Fonte: Autor (2022).

A redução da resistência à compressão no concreto com fibras de ACM (FACM2,19 e FACM0,45) é de 35%, as formulações de referência (REF) e fibras de Aço (FAÇO2,19) não possuem diferença significativas estatisticamente, A diferença mais significativa ocorre entre as fibras de mesma proporção (FACM2,19 e FAÇO2,19) de cerca de 47% de redução. A menor redução com foi relativo à 19% (FACM0,45 e FAÇO2,19).

Conforme Mehta e Monteiro (2014) e Bentur e Mindess (2007), teores de fibras de aço inferiores a 2% por volume exercem influência desprezível sobre a resistência à compressão. A resistência à compressão do concreto pode ocorrer devido má compactação ou excesso de ar incorporado, o que provoca altas reduções (OLIVEIRA JUNIOR, 2012 *apud* VITOR, SANTOS e TRAUTWEIN, 2018).

Na Tabela 10 estão os resultados de ANOVA dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 10: ANOVA da resistência à compressão.

Fonte de variabilidade	SQ	GL	QM	Razão F	F _{tab} , 5%
Entre tratamentos	301,54	2	150,77	10,45	4,2
Dentro tratamentos	129,86	9	14,43		

Fonte: Autor (2022).

Rabelo *et al* (2019) em seu estudo sobre resistência à compressão de CRF de alumínio de latas de refrigerante (alumínio AA3104) cortadas e beneficiadas demonstrou perda de resistência de 75% em traços com alto teor de fibras, provocado devido à baixa adesão das fibras a matriz de concreto.

Na Tabela 11 estão os resultados do Teste Tukey dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 11: Teste de Tukey da resistência à compressão.

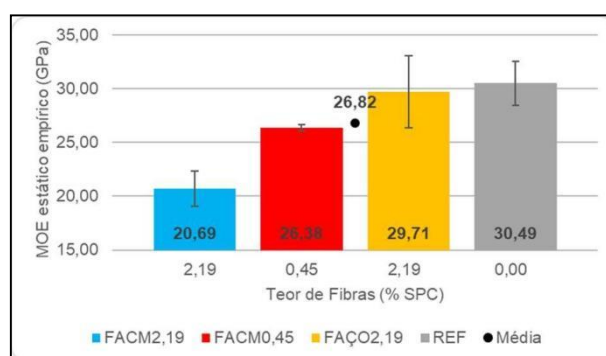
Comparação	Diferença de médias	Erro padrão	q calculado	q tab.(2, 9; 0,05)	Conclusão
FACM2,19-FACM0,45	13,88	0,96	14,40	4,2	H0 é Rejeitada
FACM2,19-FAÇO2,19	20,48	0,96	21,25	4,2	H0 é Rejeitada
FACM2,19-REF	21,97	0,96	22,79	4,2	H0 é Rejeitada
FACM0,45-FAÇO2,19	6,60	0,96	6,85	4,2	H0 é Rejeitada
FACM0,45-REF	8,09	0,96	8,40	4,2	H0 é Rejeitada
FAÇO2,19-REF	1,49	0,96	1,55	4,2	H0 é Válida

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 10, análise de variância (ANOVA) demonstra que os dados se remetem a grupos de amostras distintas, por isso com diferenças significativas. Contudo, o Teste Tukey na Tabela 11 demonstrou-se ausência de diferença significativa em resistência à compressão entre os traços REF e FAÇO2,19.

Na Figura 32 estão os resultados de MOE Empírico dos ensaios de resistência à compressão.

Figura 32: Resultados de estimativa de MOE empírico.



Fonte: Autor (2023).

A redução do MOE Empírico é proporcional à redução da resistência à compressão, devido que é um parâmetro derivado. As reduções correspondentes são de 35% (FACM2,19 e FACM0,45), 47% (FACM2,19 e FAÇO2,19) e 30% (FACM0,45 e FAÇO2,19).

Na Tabela 12 estão os resultados de ANOVA dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 12: ANOVA do MOE empírico.

Fonte de variabilidade	SQ	GL	QM	Razão F	F _{tab, 5%}
Entre tratamentos	59,64	2	29,82	7,45	4,2
Dentro tratamentos	36,05	9	4,01		

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 13 estão os resultados do Teste Tukey dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 13: Teste Tukey de MOE Empírico.

Comparação	Diferença de médias	Erro padrão	q _{calculado}	q _{tab.(2, 9; 0,05)}	Conclusão
FACM2,19-FACM0,45	5,69	0,53	10,82	4,2	H ₀ é Rejeitada
FACM2,19-FAÇO2,19	9,02	0,53	17,16	4,2	H ₀ é Rejeitada
FACM2,19-REF	9,80	0,53	18,64	4,2	H ₀ é Rejeitada
FACM0,45-FAÇO2,19	3,34	0,53	6,34	4,2	H ₀ é Rejeitada
FACM0,45-REF	4,11	0,53	7,82	4,2	H ₀ é Rejeitada
FAÇO2,19-REF	0,78	0,53	1,48	4,2	H ₀ é Válida

Fonte: Autor (2023).

Nas Tabela 12 e Tabela 13 a ANOVA demonstrou que a hipótese nula não é válida para os grupos de comparação, não demonstrando que pertencem a mesma classe de resistência à compressão. Exceto ao concreto com a Fibra de referência (FAÇO2,19) e o concreto convencional sem fibras (REF). Portanto, existem diferenças significativas entre os dados das amostras.

7.2.2. Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Na Figura 33 estão as fissuras resultantes de ensaio de tração na flexão dos 4 CPs referentes à formulação REF.

Figura 33: CPPs do traço REF em estágio pós-ruptura.

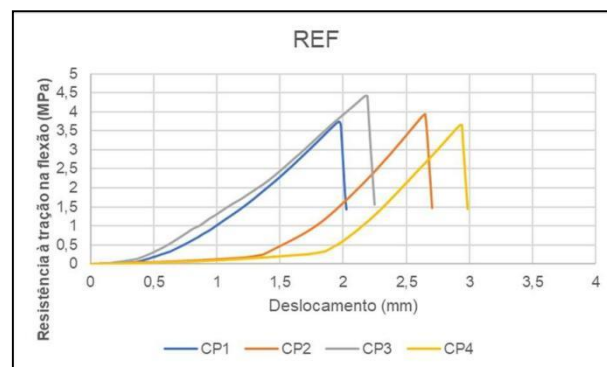


Fonte: Autor (2023).

Todas as seções de ruptura ocorreram dentro do Terço-médio. Contudo, houve Rompimento total da seção de ruptura, evidenciando ruptura frágil, sem aviso prévio.

Na Figura 34 estão os diagramas de tensão-deformação dos ensaios de tração na flexão para 4 corpos de prova prismáticos de concreto sem fibras (REF) aos 28 dias de cura.

Figura 34: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe REF



Fonte: Autor (2023).

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o concreto convencional sofre ruptura frágil na primeira abertura de fissura. Contudo, o CRF não se rompe de forma imediata após a abertura da primeira fissura, fator dependente ao teor de fibras incorporadas.

Na Figura 35 estão as fissuras resultantes de ensaio de tração na flexão dos 4 CPs referentes à formulação FAÇO2,19.

Figura 35: CPPs do traço FAÇO2,19 em estágio pós-ruptura.



Fonte: Autor (2023).

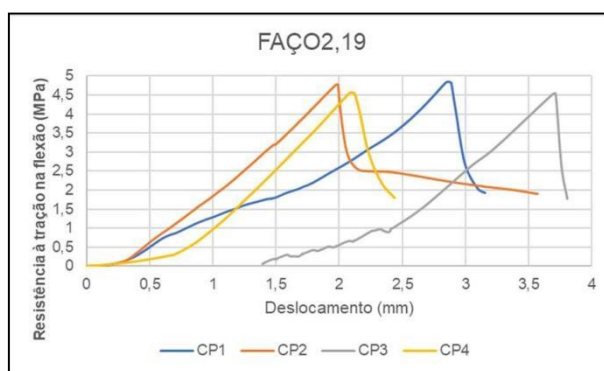
Todas as seções de ruptura ocorreram dentro do terço-médio. Contudo, houve rompimento parcial da seção de ruptura, com as fibras suportando na parte comprimida da seção, evidenciando ruptura dúctil, com aviso prévio por meio da abertura de fissuras.

De acordo com Oliveira *et al.* (2018), diversos fatores podem influenciar a resistência à tração do concreto simples. Entre eles, destacam-se a relação água/cimento, a qualidade dos materiais constituintes, o teor de umidade, o tempo de cura e o processo de mistura. A relação água/cimento é um dos principais fatores que afetam a resistência à tração, pois um maior teor de água resulta em uma menor resistência do concreto. Além disso, a qualidade dos materiais utilizados, como agregados e cimento, também desempenha um papel fundamental na resistência do concreto. A presença de impurezas nos materiais pode comprometer a aderência entre as partículas, diminuindo a resistência do concreto. O teor de umidade no momento da moldagem também pode influenciar a resistência à tração, pois um teor excessivo de umidade pode

comprometer a formação adequada das ligações químicas. Além disso, o tempo de cura e o processo de mistura são importantes para garantir a hidratação completa do cimento e a homogeneização dos materiais, impactando diretamente a resistência à tração do concreto simples.

Na Figura 36, estão os resultados em diagramas de tensão-deslocamento para 4 corpos de prova prismáticos de CRF de aço (FAÇO2,19) aos 28 dias de cura.

Figura 36: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe FAÇO2,19.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com Silva *et al.* (2020), a presença de fibras em concretos reforçados pode promover um significativo aumento na resistência à tração do material. Estudos demonstraram que as fibras atuam como reforços dispersos na matriz de concreto, interrompendo a propagação de fissuras e aumentando a tenacidade do material. Além disso, a adição de fibras também contribui para a redução da fissuração e do desprendimento do concreto, resultando em uma maior capacidade de absorção de energia e resistência à tração.

Na Figura 37 estão as fissuras resultantes de ensaio de tração na flexão dos 4 CPs referentes à formulação FACM2,19.

Figura 37: CPPs do traço FACM2,19 em estágio pós-ruptura.

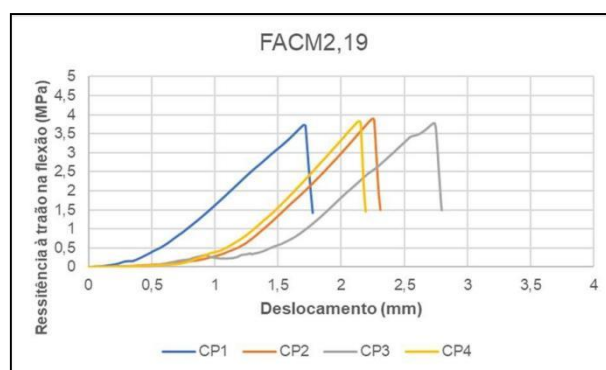


Fonte: Autor (2023).

Todas as seções de ruptura ocorreram dentro do Terço-médio. Contudo, houve rompimento parcial da seção de ruptura, com as fibras suportando na parte comprimida da seção, evidenciando ruptura dúctil, com aviso prévio por meio da abertura de fissuras.

Na Figura 38, estão as curvas dos diagramas de tensão-deslocamento de 4 corpos de provas prismáticos ensaiados com fibras de ACM (FACM2,19) aos 28 dias de cura.

Figura 38: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe FACM2,19



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 39 estão as fissuras resultantes de ensaio de tração na flexão dos 4 CPs referentes à formulação FACM0,45.

Figura 39: CPPs do traço FACM0,45 no estágio pós-ruptura.

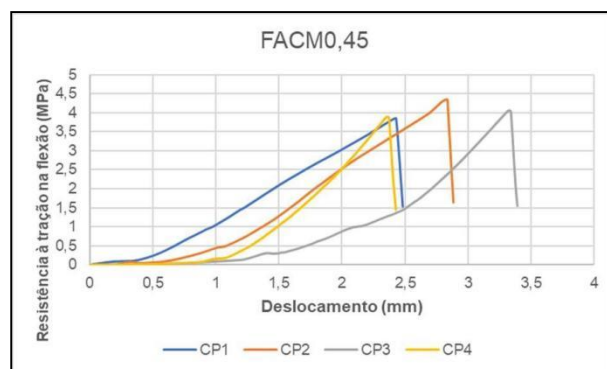


Fonte: Autor (2023).

Todas as seções de ruptura ocorreram dentro do terço-médio. Contudo, houve rompimento total da seção de ruptura evidenciando uma ruptura frágil, sem aviso prévio.

Na Figura 40, estão os resultados em diagramas de tensão-deslocamento para 4 corpos de prova prismáticos ensaiados à tração na flexão de 4 pontos de CRF de ACM (FACM0,45) aos 28 dias de cura.

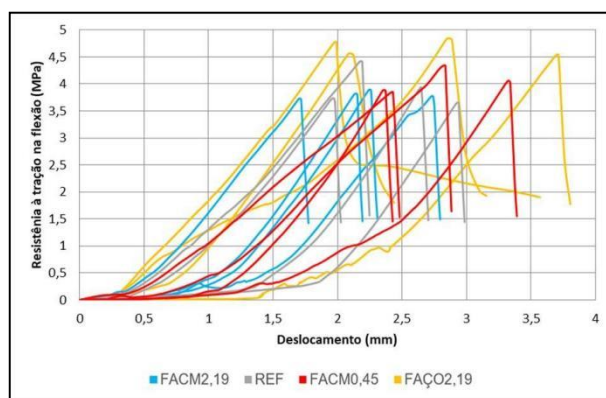
Figura 40: Diagrama de tensão-deformação de tração na flexão da classe FACM0,45.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 41 estão todos os resultados dos corpos de prova prismáticos ensaiados à tração na flexão neste estudo.

Figura 41: Diagrama de tensão-deslocamento de tração na flexão de todas as classes.

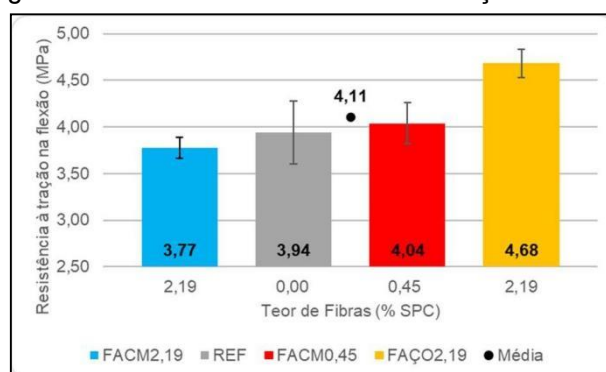


Fonte: Autor (2023).

Pode-se perceber que as amostras de FAÇO2,19 alcançaram as maiores resistências e deslocamentos pós-ruptura, comportamento levemente observado no grupo FACM0,45. Contudo, não há diferença visual ou estatística entre os resultados em diagramas das amostras FACM2,19 e REF.

Na Figura 42 estão os resultados das médias de tração na flexão entre as classes analisadas neste estudo, de acordo com a resistência à tração e seu teor de fibras incorporadas.

Figura 42: Resultados de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor (2023).

Nas Tabela 14 estão os resultados de ANOVA de resistência à tração na flexão.

Tabela 14: ANOVA da resistência à tração na flexão.

Fonte de variabilidade	SQ	GL	QM	Razão F	F _{tab} , 5%
Entre tratamentos	0,47	3	0,16	1,30	3,49
Dentro tratamentos	1,46	12	0,12		

Fonte: Autor (2023).

Nas Tabela 15 estão os resultados do Teste Tukey de resistência à tração na flexão.

Tabela 15: Teste Tukey da resistência à tração na flexão.

Comparação	Diferença de médias	Erro padrão	qcalculado	qtab.(3, 12; 0,05)	Conclusão
FACM2,19-FACM0,45	0,26	0,05	5,06	3,49	H0 é Rejeitada
FACM2,19-FAÇO2,19	0,91	0,05	17,49	3,49	H0 é Rejeitada
FACM2,19-REF	0,16	0,05	3,18	3,49	H0 é Válida
FACM0,45-FAÇO2,19	0,65	0,05	12,44	3,49	H0 é Rejeitada
FACM0,45-REF	0,10	0,05	1,88	3,49	H0 é Válida
FAÇO2,19-REF	0,74	0,05	14,32	3,49	H0 é Rejeitada

Fonte: Autor (2023).

Conforme ANOVA, não há diferenças significativas entre os tratamentos (classes de CRF), mas analisando de forma mais profunda, comparando as classes um a um no Teste Tukey, podemos ver que somente não existem diferenças significativas entre as classes FACM2,19-REF e FACM0,45-REF. Houve um aumento entre FAÇO2,19 e REF de 16%.

Apesar das fibras no traço FAÇO2,19 serem inferiores em volume e iguais em massa ao traço FACM2,19, o volume foi na ordem de 300% superior no traço FACM2,19, como demonstra Figura 23. As fibras de Aço possuem densidade superior de 4.690 fibras/kg (ArcellorMittal e BEKAERT, 2019) em comparação as fibras reaproveitadas de ACM de 15.000 fibras/kg (Autor, 2023).

Os resultados obtidos demonstram que as fibras de aço no traço (FAÇO2,19) não romperam, situação diferente das fibras de ACM (FACM0,45 e FACM2,19) onde não foram rompidas fibras quando incorporadas no maior teor de 2,19%, igualmente Andrade (2020) que analisou CRF de PP, PE e Aço.

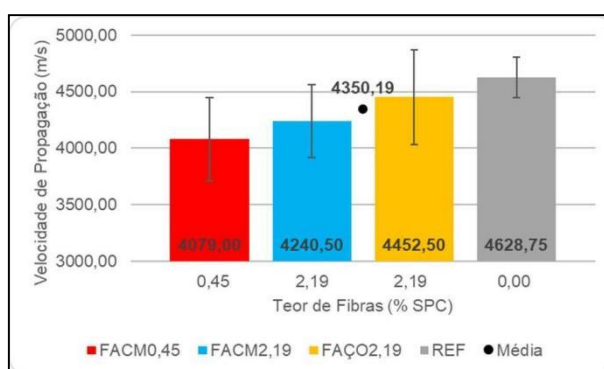
A principal diferença entre os traços pode ser analisada na ruptura, onde o CRF, quando em teores adequados não têm ruptura completa da seção transversal, na qual a fissuração é assegurada pelas fibras na parte superior da

seção transversal, situação observada principalmente nos traços FACM2,19, FAÇO2,19 e FACM0,45 (em específico na amostra 3 e 4) demonstrando maior ductilidade em estágio pós-fissuração, similar a Vitor, Santos e Trautwein (2018).

7.2.3. Ensaio de Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas (UPV)

Os resultados dos ensaios de UPV realizados em 16 corpos de prova prismáticos estão na Figura 43, por meio de transmissão direta longitudinal. São 4 amostras cada formulação analisada neste estudo.

Figura 43: Resultados do ensaio de UPV.



Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 16 estão os resultados de ANOVA dos ensaios de UPV.

Tabela 16: ANOVA de UPV.

Fonte de variabilidade	SQ	GL	QM	Razão F	F _{tab} , 5%
Entre tratamentos	173638,92	3	57879,64	0,53	3,49
Dentro tratamentos	1304674,44	12	108722,87		

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 17 estão os resultados do Teste Tukey dos ensaios de UPV.

Tabela 17: Teste Tukey de UPV.

Comparação	Diferença de médias	Erro padrão	qcalculado	qtab.(3, 12; 0,05)	Conclusão
FACM2,19-FACM0,45	161,50	80,88	2,00	3,49	H0 é Válida
FACM2,19-FAÇO2,19	212,00	80,88	2,62	3,49	H0 é Válida
FACM2,19-REF	388,25	80,88	4,80	3,49	H0 é Rejeitada
FACM0,45-FAÇO2,19	373,50	80,88	4,62	3,49	H0 é Rejeitada
FACM0,45-REF	549,75	80,88	6,80	3,49	H0 é Rejeitada
FAÇO2,19-REF	176,25	80,88	2,18	3,49	H0 é Válida

Fonte: Autor (2022).

De acordo com Isaac Lawson (2011), que analisou por meio de diferentes relações a/c a propagação do pulso ultrassônico, dados apresentados na Tabela 18, que podem ser utilizados para verificar a uniformidade, detecção de condição ou estado de deterioração do concreto em comparação a dados similares coletados por equipamento de UPV. De acordo com a relação da Tabela 18, o concreto analisado variou de Bom (nas formulações FACM2,19, FACM0,45 e REF) para excelente (na formulação FAÇO2,19).

Tabela 18: Relação UPV e qualidade do concreto.

Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico no Concreto Endurecido (m/s)	Classificação da Qualidade do Concreto
> 4500	Excelente
3500 até 4000	Bom
3000 até 3500	Regular
2000 até 3000	Ruim
< 2000	Péssimo

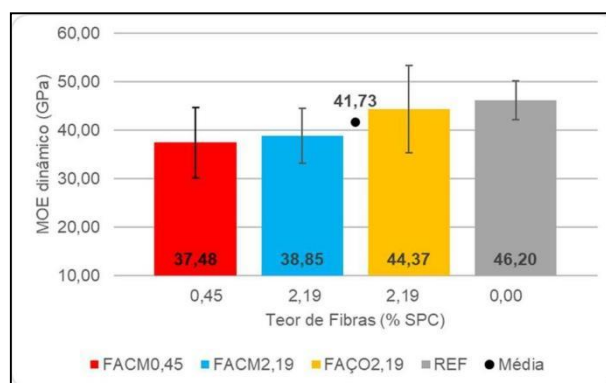
Fonte: adaptado de LAWSON (2011).

Ainda assim, a NM 58 (1996) por meio de valores do módulo de elasticidade dinâmico faz uma correlação para analisar a variação da massa específica, que podem variar continuamente pela extensão de uma estrutura de concreto, principalmente pela porosidade, índice de vazios e ar incorporado. Devido que se há dificuldade na realização de ensaio de ressonância em uma

estrutura concebida, para isso, pode-se por meio de ensaio não-destrutivo de UPV medir a velocidade de propagação em qualquer ponto da estrutura.

Os resultados de dados de MOE dinâmico das formulações estão na Figura 44, a seguir:

Figura 44: Resultados de MOE dinâmico por transmissão direta.



Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 19 estão os resultados de ANOVA com dados de MOE dinâmica.

Tabela 19: ANOVA de MOE dinâmico.

Fonte de variabilidade	SQ	GL	QM	Razão F	F _{tab, 5%}
Entre tratamentos	53,22	3	17,74	0,40	3,49
Dentro tratamentos	526,39	12	43,87		

Fonte: Autor (2023).

Nas Tabela 20 estão os resultados do Teste Tukey com dados de MOE dinâmica.

Tabela 20: Teste Tukey de MOE dinâmico.

Comparação	Diferença de médias	Erro padrão	qcalculado	qtab.(3, 12; 0,05)	Conclusão
FACM2,19-FACM0,45	1,37	1,61	0,85	3,49	H0 é Válida
FACM2,19-FAÇO2,19	5,52	1,61	3,42	3,49	H0 é Válida
FACM2,19-REF	7,34	1,61	4,55	3,49	H0 é Rejeitada
FACM0,45-FAÇO2,19	6,89	1,61	4,27	3,49	H0 é Rejeitada
FACM0,45-REF	8,71	1,61	5,40	3,49	H0 é Rejeitada
FAÇO2,19-REF	1,83	1,61	1,13	3,49	H0 é Válida

Fonte: Autor (2023).

Conforme Mehta e Monteiro (2014), em demonstração com relação empírica, para resistência à compressão de 30 MPa, MOE dinâmico está na ordem de 34,9 GPa. O MOE dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena traçada a partir da origem, com reação de aproximação com módulo tangente inicial. De 20 à 40% mais alto ao MOE estático para concretos de alta, média e baixa resistência.

Na ANOVA, conforme Razão F, percebe-se a aproximação de F a 0, isso indica que a hipótese que as formulações pertencem a mesma classe de qualidade de concreto, fator confirmado no Teste Tukey que demonstrou que não há diferença estatística entre as formulações analisadas.

Contudo, pode-se perceber que os dados de UPV e MOE dinâmico nas formulações de fibras de ACM incorporadas (FACM2,19 e FACM0,45) são inferiores as demais formulações (REF e FAÇO2,19), o fenômeno de atenuação sonora em corpos de prova de concreto podem provocar redução das leituras de UPV e ocorrem principalmente devido a condições de umidade, quantidade e tipo de agregado, microfissuras e heterogeneidade (MALHOTRA e CARINO, 2004 apud NASCIMENTO et al, 2020).

7.2.4. Módulo de Elasticidade empírico em função do módulo de elasticidade dinâmico

Na intenção de correlacionar propriedades, foi realizada análise de regressão linear simples entre módulo de elasticidade dinâmico e empírico, sendo valores apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Regressão linear entre módulo de elasticidade empírico e dinâmico.

Concreto	Fonte de variação	GL ¹	SQ ²	QM ³	F ⁴	F de significação ⁵
FAÇO2,19	Regressão	1	13752422,82	13752422,82	1,58	0,43
	Resíduo	1	8717101,743	8717101,743		
	Total	2	22469524,56			
FACM2,19	Regressão	1	5108201,29	5108201,29	57,67	0,083
	Resíduo	1	88568,82	88568,82		
	Total	2	5196770,11			
REF	Regressão	1	3990163,75	3990163,75	0,95	0,51
	Resíduo	1	4215898,45	4215898,45		
	Total	2	8206062,20			
FACM0,45	Regressão	1	64191,39	64191,39	0,58	0,59
	Resíduo	1	111141,26	111141,26		
	Total	2	175332,65			

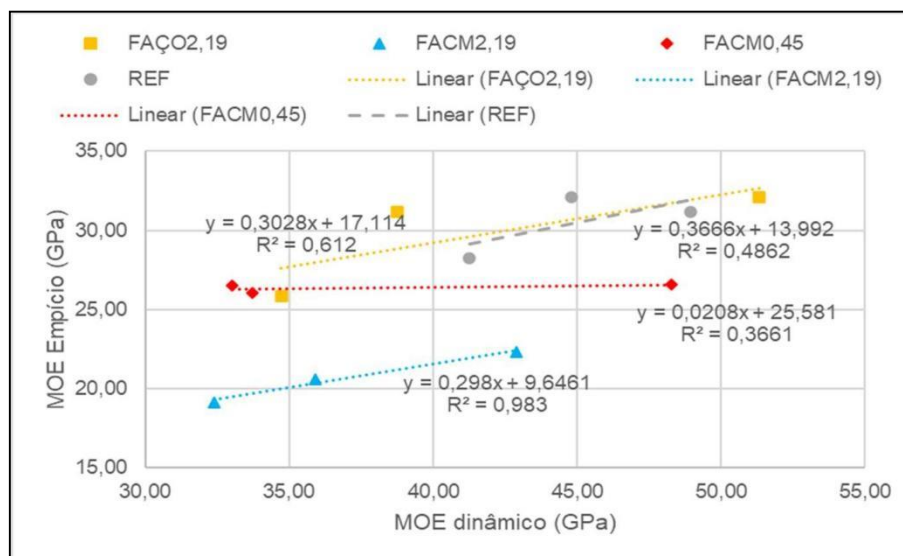
¹GL = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³QM = média quadrada; ⁴F = valor de F; ⁵F de significação = interação entre as variáveis.

Fonte: Autor (2023).

Por meio de análise estatística, percebe-se que existe uma relação entre módulo de elasticidade empírico e dinâmico para uma significância de 5% para os traços de CRF neste estudo.

Na Figura 45, estão os parâmetros de regressão linear em função da reta e os devidos coeficientes de determinação.

Figura 45: Módulo de elasticidade empírico em função do módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Autor (2023).

Os coeficientes de determinação dos concretos variam em função do tipo de fibra, suas proporções e do tipo de MOE relacionando-os. Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico os coeficientes de determinação dos concretos produzidos com REF, FAÇO2,19, FACM2,19 e FACM0,45 foram de 48, 61, 98 e 36%, demonstrando que o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico pode ser modelado por meio de uma reta.

Em relação aos valores obtidos, observa-se que o concreto FACM2,19 alcançou os menores valores de MOE dinâmico e empírico, embora com a mesma fibra incorporada, mas com teor de fibras inferior o concreto FACM0,45 alcançou valores superiores. Enquanto o concreto REF e FAÇO2,19 estão com valores aproximados e com retas paralelas. As fibras de aço têm a vantagem de serem normatizadas no Brasil, definindo exigências que garantem sua capacidade de reforço do concreto, conforme Figueiredo (2011).

7.2.5. Módulo de Elasticidade dinâmico em função da resistência à tração na flexão

Na intenção de correlacionar propriedades, foi realizada análise de regressão linear simples entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão, sendo valores apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Regressão linear entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão.

Concreto	Fonte de variação	GL¹	SQ²	QM³	F⁴	F de significação⁵
FAÇO2,19	Regressão	1	0,04885	0,04885	1424,05308	
	Resíduo	1	0,00003	0,00003		0,01687
	Total	2	0,04888			
FACM2,19	Regressão	1	0,0036	0,0036	0,2186	
	Resíduo	2	0,0331	0,0165		0,6861
	Total	3	0,0367			
R = F	Regressão	1	0,21	0,21	2,86	
	Resíduo	2	0,15	0,07		0,23

	Total	3	0,35		
	Regressão	1	0,00046	0,00046	0,00615
FACM0,45	Resíduo	2	0,15051	0,07525	0,94462
	Total	3	0,15097		

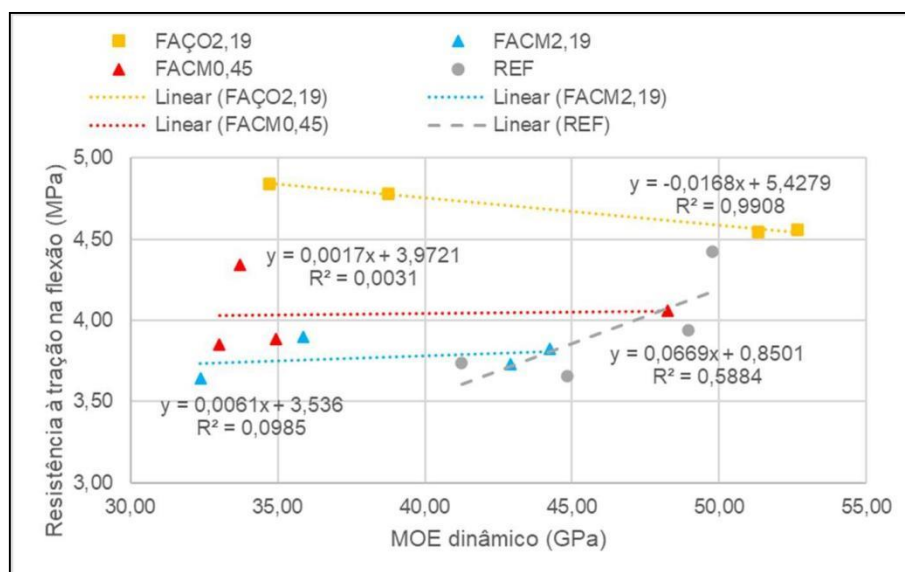
¹GL = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³QM = quadrado médio; ⁴F= valor de F; ⁵F de significação = interação entre as variáveis.

Fonte: Autor (2023).

Por meio de análise estatística, percebe-se que existe uma relação entre módulo de elasticidade empírico e dinâmico para uma significância de 5% para os traços de CRF neste estudo, exceto para o concreto FACM0,45 e FACM2,19 que não apresentam relação entre as propriedades de módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão.

Na Figura 46, estão os parâmetros de regressão linear em função da reta e os devidos coeficientes de determinação.

Figura 46: Módulo de elasticidade empírico em função da resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor (2023).

Os coeficientes de determinação dos concretos variam em função do tipo de fibra e suas proporções. Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico os coeficientes de determinação dos concretos produzidos com REF, FAÇO2,19, FACM2,19 e FACM0,45 foram de 58, 99, 9 e 0,3%, demonstrando que o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico não pode ser modelado por meio de uma reta para os concretos com fibras de ACM reaproveitado

incorporado (FACM2,19 e FACM0,45), já que o módulo de relação direta com a resistência a tração na flexão é o próprio módulo de elasticidade à flexão, conforme Mehta e Monteiro (2014).

Em relação aos valores obtidos, observa-se que o concreto FACM2,19 alcançou os menores valores de MOE dinâmico e tração na flexão, embora com a mesma fibra incorporada, mas com teor de fibras inferior o concreto FACM0,45 alcançou valores superiores. Enquanto o concreto FAÇO2,19 alcançou valores superiores. O concreto REF deteve menor variabilidade de resultados, contudo manteve-se em patamar inferior, juntamente com concreto com fibras de ACM (FACM2,19 e FACM0,45).

7.2.6. Módulo de Elasticidade dinâmico em função da resistência à compressão

Na intenção de correlacionar propriedades, foi realizada análise de regressão linear simples entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão, sendo valores apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Regressão linear entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão.

Concreto	Fonte de variação	GL¹	SQ²	QM³	F⁴	F de significação⁵
FAÇO2,19	Regressão	1	53,79	53,79	1,61	0,42
	Resíduo	1	33,32	33,32		
	Total	2	87,11			
FACM2,19	Regressão	1	14,04	14,04	72,31	0,07
	Resíduo	1	0,19	0,19		
	Total	2	14,23			
REF	Regressão	1	15,88	15,88	0,93	0,51
	Resíduo	1	17,12	17,12		
	Total	2	33,00			
FACM0,45	Regressão	1	0,23	0,23	0,58	0,59
	Resíduo	1	0,40	0,40		
	Total	2	0,63			

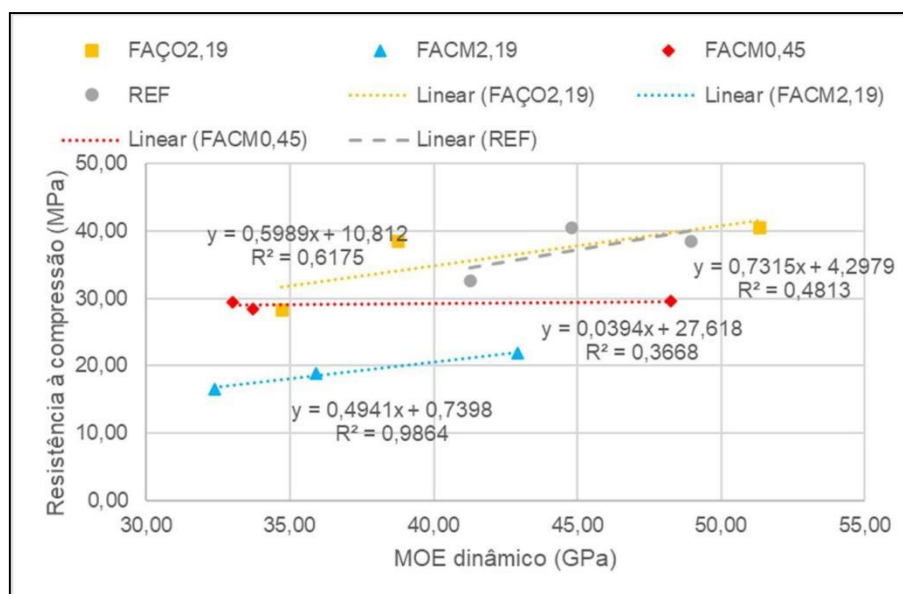
¹GL = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³QM = quadrado médio; ⁴F = valor de F; ⁵F de significação = interação entre as variáveis.

Fonte: Autor (2023).

Por meio de análise estatística, percebe-se que existe uma relação entre módulo de elasticidade empírico e dinâmico para uma significância de 5% para os traços de CRF neste estudo.

Na Figura 47, estão os parâmetros de regressão linear em função da reta e os devidos coeficientes de determinação.

Figura 47: Módulo de elasticidade dinâmico em função da resistência à compressão.



Fonte: Autor (2023).

Os coeficientes de determinação dos concretos variam em função do tipo de fibra, suas proporções e do tipo de MOE relacionando-os. Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico os coeficientes de determinação dos concretos produzidos com REF, FAÇO2,19, FACM2,19 e FACM0,45 foram de 48, 61, 98 e 36%, demonstrando que o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão pode ser representado por meio de uma reta.

Em relação aos valores obtidos, observa-se que o concreto FACM2,19 alcançou os menores valores de MOE dinâmico e resistência à compressão, embora com a mesma fibra incorporada, mas com teor de fibras inferior o concreto FACM0,45 alcançou valores superiores. Enquanto o concreto REF e FAÇO2,19 estão com valores aproximados e com retas paralelas. Os

valores são similares ao MOE empírico, devido que é um parâmetro determinado por meio da resistência à compressão.

7.2.7. Resistência à tração na flexão em função da resistência à compressão

Na intenção de correlacionar propriedades, foi realizada análise de regressão linear simples entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão, sendo valores apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Regressão linear entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

Concreto	Fonte de variação	GL¹	SQ²	QM³	F⁴	F de significação⁵
FAÇO2,19	Regressão	1	51,53	51,53	1,45	0,44
	Resíduo	1	35,57	35,57		
	Total	2	87,11			
FACM2,19	Regressão	1	1,08	1,08	0,08	0,82
	Resíduo	1	13,15	13,15		
	Total	2	14,23			
REF	Regressão	1	0,0058	0,0058	0,0002	0,9916
	Resíduo	1	32,9973	32,9973		
	Total	2	33,0031			
FACM0,45	Regressão	1	0,43	0,43	2,17	0,38
	Resíduo	1	0,20	0,20		
	Total	2	0,63			

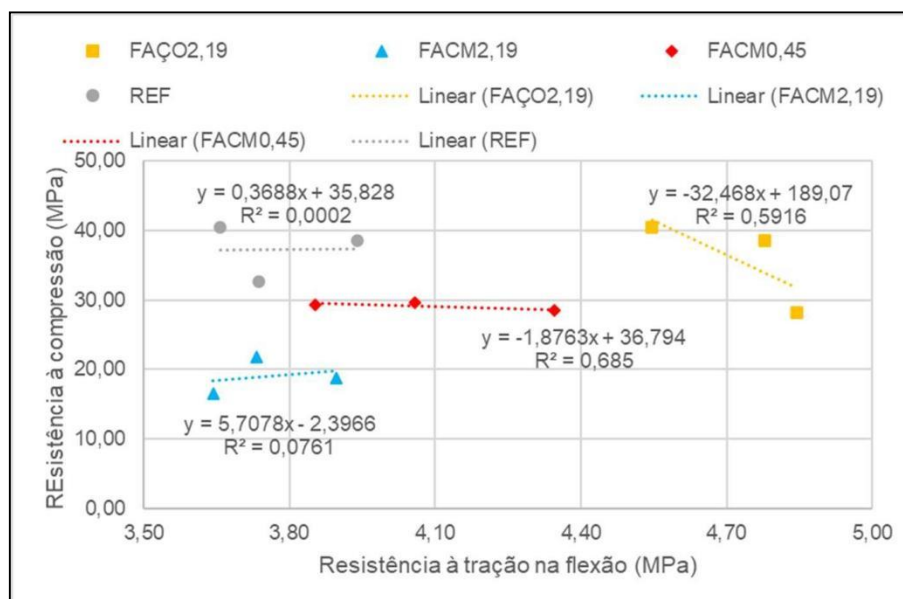
¹GL = grau de liberdade; ²SQ = soma quadrada; ³QM = quadrado médio; ⁴F = valor de F; ⁵F de significação = interação entre as variáveis.

Fonte: Autor (2023).

Por meio de análise estatística, percebe-se que existe uma relação entre módulo de elasticidade empírico e dinâmico para uma significância de 5% para os traços de CRF neste estudo, exceto para o concreto REF e FACM2,19 que não apresentam relação entre as propriedades de resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

Na Figura 48, estão os parâmetros de regressão linear em função da reta e os devidos coeficientes de determinação.

Figura 48: Resistência à tração na flexão em função da resistência à compressão.



Fonte: Autor (2023).

Os coeficientes de determinação dos concretos variam em função do tipo de fibra, suas proporções e do tipo de resistência relacionando-os. Em relação as resistências os coeficientes de determinação dos concretos produzidos com REF, FAÇO2,19, FACM2,19 e FACM0,45 foram de 0,2; 59, 7 e 68%, demonstrando que o comportamento das resistências à tração na flexão e compressão podem ser modeladas por meio de uma reta.

Em relação aos valores obtidos, observa-se que o concreto FACM2,19 alcançou os menores valores de resistência, contudo, com a mesma fibra incorporada e teor de fibras inferior, o concreto FACM0,45 alcançou valores superiores em ambas resistências. Isso demonstra que para esta fibra, não foram alcançadas suas proporções para alcançar seu Volume crítico, conforme Quinino (2015) na Figura 1 (anterior neste trabalho).

No entanto, o concreto FAÇO2,19 está com os maiores valores em relação à ambas as resistências, e o concreto REF alcançou valores superiores somente em relação à resistência à compressão, inferior 20% à média do concreto FAÇO2,19 e inferior 8% a média do concreto FACM0,45.

8. CONCLUSÃO

Em uma abordagem inicial, analisando os resultados da caracterização do concreto no estado fresco, as fibras incorporadas no concreto tiveram principal influência sob a trabalhabilidade da mistura, causando redução por parte da fibra de referência de aço e mantendo o *Slump*, para a fibra de ACM reaproveitado. Isso ocorre principalmente pelas características geométricas, os teores de fibras incorporados e pela influência dos materiais. A fibra de ACM é composta de dois materiais, alumínio anodizado e polietileno. Um material metálico e outro termoplástico.

Para ensaios não-destrutivos aos 28 dias pós-cura, analisando a velocidade de propagação, por meio da classificação do concreto utilizando-se da relação velocidade de propagação de pulso ultrassônico e qualidade do concreto, para concreto FAÇO2,19 e REF, foi realizada uma mistura de qualidade Excelente, e para concreto reforçado com FACM2,19 e FACM0,45, qualidade Boa. A redução da qualidade do concreto com adição de fibras de ACM pode ser justificado pela ineficácia do método de processamento e geometria da fibra, com seção retangular e maiores dimensões que a fibras de aço de seção cilíndrica com menores dimensões. O método de processamento das fibras de ACM deixaram rebarbas e não permitiram menores dimensões de corte do que 1 mm, precisão máxima do equipamento.

Nas comparações entre Módulo de elasticidade empírico e dinâmico, o concreto REF e FAÇO2,19 estão com valores aproximados e com retas paralelas conforme Figura 45, demonstrando concretos em patamar estatisticamente similares quanto ao seu desempenho elasto-linear.

O comportamento mecânico do concreto conforme comparações, o módulo de elasticidade dinâmico não tem relação linear com a resistência à tração na flexão. O concreto FAÇO2,19 alcançou os maiores valores de resistência à compressão e tração na flexão. O concreto com fibras de ACM reaproveitado de menor teor de fibras (FACM0,45), alcançou resistência à compressão e tração na flexão superior ao concreto com a mesma fibra em teor superior (FACM2,19). Contudo, o concreto FACM0,45 alcançou resistência à

compressão inferior e à tração na flexão superior ao concreto REF. Os concretos de fibra de ACM, demonstraram maior variabilidade de resultados, isso pode ter ocorrido devido à baixa amplitude de amostras, dimensões e o distanciamento do teor de fibras ideal.

Em análise dos corpos de prova pós-ruptura percebeu-se zonas com maior concentração da matriz, onde houve boa adesão da fibra, evidenciando necessidade de maior resistência e matriz mais densa do concreto, podendo-se substituir cimento convencional (CP-II) por cimento de alta resistência inicial (CP-V ARI).

A redução da resistência à compressão para FACM2,19 e FACM0,45 pode ter ocorrido devido a diferença de volume entre as fibras de ACM e Aço, com quantidades de fibras incorporadas iguais em massa nos traços FACM2,19 e FAÇO2,19, contudo com volumes iguais nos traços FACM0,45 e FAÇO2,19.

RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Propagação do pulso ultrassônico em função da umidade do concreto.
- Apreciação das propriedades físicas e mecânicas da fibra de ACM.
- Análise de diferentes proporções dosadas em volume conforme FIGUEIREDO (2011) de fibras de ACM reaproveitado.

$$V_{f,crit} = \frac{(\epsilon_{mu} \cdot E_c)}{\sigma_{fu} \cdot \eta_1}$$

- Comparação de métodos de processamento do ACM reaproveitado para produção de fibras para concreto estrutural.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 614. ACI 614-59: Recommended Practice For Measuring, Mixing and Placing Concrete. University of Virginia, Virginia, 1959.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Detroit: ACI, 1981.

ANDRADE, Victor H. D. de. Estudo da Influência das Fibras de Aço e Macrofibras Poliméricas no Concreto. Monografia (Bacharelado de Engenharia Civil) Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORES IMOBILIÁRIOS. PIB da Construção Civil cresce 9,7% em 2021. Disponível em: <<https://www.abrainc.org.br/construcao-civil/2022/03/04/pib-da-construcao-civil-cresce-97-em-2021/>>. Acesso em: 17 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. Artigo: Assessoria de Imprensa da Termomecânica. Disponível em: <<https://www.abmbrasil.com.br/>>. Acesso em: 06 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12142: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16940: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos. 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, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9479: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM ISO 7500-1: Materiais metálicos - Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração do sistema de medição da força. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de Cimento Portland - Preparo, Controle e Recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15530: Concreto reforçado com fibras – Procedimento para dosagem, controle e recebimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. 3ª edição. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9479: Sistemas de proteção por extintores de incêndio. 2ª edição. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade. São Paulo: ABAL, 2017.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. NM 58: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. São Paulo: AMN, 1996.

BARROS, J. A. O.; CARVALHO, L. N.; & AMORIM, S. L. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir de ensaios empíricos. In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2017.

BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. 5. ed., Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos Ltda., 2008.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JR., E. Russell. Mecânica dos Materiais. 7. ed. São Paulo: Editora ABC, 2019.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. 2. ed. London: Elsevier, 2007.

BOGGIO, Aldo J. Estudo comparativo de Métodos de Dosagem de Concreto de Cimento Portland. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BROWN AND SHARPE MANUFACTURING CORPORATION. Brown & Sharpe Machinists Tools: Catalog 135. 1954, 46 p.

Catálogo ADITEC. Fôrma para Moldagem de Corpos de Prova Cilíndricos 10cm x 20cm de Concreto. Disponível em: <www.aditec.site>. Acesso em: 27 jul. 2022.

Catálogo LEITZ. Ferramentas para painéis compostos de alumínio: Usinagem CNC. Disponível em: <<http://www.leitz.org>>. Acesso em: 26 jan. 2022.

Catálogo VONDER. Ferramentas de corte, furação, rosqueamento, fresamento e acessórios para máquinas operatrizes. Disponível em: <www.vonder.com.br>. Acesso em: 26 jul. 2022.

Concrete Manual (2011). U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation. Concrete Manual: A Manual for the Control of Concrete Construction (a Water Resources Technical Publication Series, Eighth Edition. Washington D. C., 1975.

CONRADO, Rafael Dallegrave. Efeitos do corte por laser sobre a integridade superficial de um aço médio carbono. Orientador: Rodrigo P. Zeilmann, 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.

CORINGA, Jeanne; NETO, Olívio. Uso das curvas granulométricas de Fuller e Bolomey para determinação do teor de argamassa no método IPT/EPUSP. CONCRETO & Construções, Ed. 104, p. 74-80, 2021. Disponível em: <http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/edicao104/Revista%20Concreto%20IBRACON%20104%20-%20Pesquisa%20e%20desenvolvimento%204.pdf>. Acesso em: 14 de mar. 2023.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Luiz C. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. Instituto de Química – UERJ. São Carlos: Editora Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

EHRENBRING, Hinoel Zamis; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; QUININO, Uziel Cavalcanti de M. Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 195-209, jun./set. 2018.

FIGUEIREDO, A. D.; MOURAD, F. A.; CARVALHO, J. L. C. Aspectos do controle do concreto reforçado com fibras de aço para pavimentos. In: Congresso Brasileiro do Concreto do Instituto Brasileiro do Concreto, XXXXII, 2000. Fortaleza, Artigo (Revista). Fortaleza: IBRACON, 2000.

FIGUEIREDO, Antônio D. de. Concreto Reforçado com Fibras. Tese (Livre-Docência) Departamento de engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/TD10.pdf>. Acesso em: mai. 2023.

FOCHS, Rafael Gómez. Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável. 2011. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade

Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10923/3328>. Acesso em: 14 mar. 2023.

Folha de dados do produto. GCP Applied Technologies DARATARD: Aditivo plastificante retardador, 2021. Disponível em: https://gcpat.com.br/sites/default/files/pdf/current/resource/GCPAT_daratard_br_2211.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.

FUSCO, Péricles B; ONISHI, Minoru. Introdução à Engenharia de Estruturas de Concreto. Editora CENGAGE Learning, 1. Ed. 2017, 264 p.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2008.

GONÇALVES, Marco Á. Um estudo sobre implementação de ciclos de usinagem através de programação parametrizada em máquinas de comando numérico computadorizado. Orientador: Alexandre Dias da Silva, 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2007.

GOUVEIA, Graziela. Análise energético-ambiental de fachadas com foco na reciclagem. Estudo de caso com painéis de alumínio composto “ACM” em Brasília. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, jun. 2012.

HIBBELER, Russell Charles. Resistência dos Materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.

HOUSTON, Bill J.; KENNEDY, Thomas B.; POLATTY, J. M.; CURRY, R. L. Investigation of Gap Gradings of Concrete Aggregates: Review of Available Information. Technical Report no. 6-593, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station: Corps of Engineers. Vicksburg, 1962. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RRGfU2wiWQoC&lpg=PA5&ots=FOS3Sokhd&dq=bolomey%201925%20publica%C3%A7%C3%A3o&hl=pt-BR&pg=PA5#v=onepage&q=bolomey%201925%20publica%C3%A7%C3%A3o&f=false>. Acesso em: 14 mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. PIB - Produto Interno Bruto. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7500-1:2018. Metallic materials – Calibration and verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines – Calibration and verification of the force-measuring system. Geneva: ISO, 2018.

KLEPPNER, Daniel. Relendo Einstein sobre radiação. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 1, p. 87-91, 2004.

LAWSON, I. et al. Non-destructive evaluation of concrete using ultrasonic pulse velocity. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, v. 3, n. 6, p. 499-504, 2011. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/265144573_Non-Destructive_Evaluation_of_Concrete_using_Ultrasonic_Pulse_Velocity>.

Acesso em: 12 de fev. 2023.

MÁRTIRES, Geól. Raimundo Augusto Corrêa. Série Estatísticas e Economia Mineral. Alumínio. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/4-1-aluminio>>. Acesso em: 29 ago. 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais. 2. ed. 751 p. São Paulo: IBRACON, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS, GOVERNO DA ÍNDIA. Estratégia sobre eficiência de recursos em setor de alumínio; 2019. Disponível em: <<http://www.eu-rei.com>>. Acesso: 29 ago. 2021.

MONTEIRO, Isadora. As forças que equilibram o universo: revisitando Robert Hooke. 2021, 86 p. Dissertação (Mestrado em História e Filosofia das Ciências)

– Universidade de Lisboa, Lisboa, 2021. Disponível em:

https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/53772/1/TM_Isadora_Monteiro.pdf.

Acesso em: 14 de mar. 2023.

MORENO, Graziela; SPOSTO, Rosa M. Análise energético-ambiental de fachadas com foco na reciclagem. Estudo de caso com painéis de alumínio

composto “ACM” em Brasília. *Arquitextos*, São Paulo, ano 16, n. 181.06, Vitruvius, jun. 2015.

MULFARTH, R.C.K. *Arquitetura de baixo impacto humano e ambiental - Vol 1*. 2002. 64p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NAPOLI, Bruna; MARQUES, Luis Paulo de Oliveira. *Processo de reciclagem de alumínio composto*. Escavador, 2014. Disponível em:

<<https://www.escavador.com/patentes/72444/processo-de-reciclagem-de-aluminio-composto>>. Acesso em: 29 ago. 2021.

NASCIMENTO T. E. G.; PRATA, A. L. C.; SANTOS, I. S.; SILVA, L. A.; SANDES, R. P. I. L.; ALVELOS, D. L.; OLIVEIRA, M. M. B.; MARTINS, C. O. D. Análise da Sensibilidade do Ultrassom na Composição e Presença de Defeitos em Estruturas de Concreto. In: Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, XXXVIII, 2020, Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales, XXII, 2020. Rio de Janeiro. Artigo (Anais) Rio de Janeiro: ABENDI - PROMAI, 2020.

OLIVEIRA, R. C. C.; FERREIRA, E. R.; GONÇALVES, F. S. Influência dos fatores na resistência à tração do concreto simples. *Revista de Engenharia Civil*, v. 20, n. 2, p. 54-63, 2018.

ONU - Organização das Nações Unidas. *Relatório de status global de 2021 para edifícios e construção*. Disponível em: <<https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>>. Acesso em: 17 set. 2022.

PADOVAN, R. G. *Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto*. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/3270/Rafaela+Gava+Padovan.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 de fev. 2023.

QUININO, Uriel C. *Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições hídras de fibras*. Orientador: Luiz Carlos

Pinto da Silva Filho, 2015, 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, escola de Engenharia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2015.

RABÊLO, Raul S. P.; LIMA, Evelyne E. P.; CARVALHO, Thaisse I. V. de; JÚNIOR, Antônio da S. S. ANÁLISE DE ADIÇÃO DE FIBRA DE ALUMÍNIO EM MATRIZES DE CONCRETO: Resistência à compressão. Revista Acta Scientia, Cabedelo, v. 1, n. 1. jan./jun. 2019.

RECENA; Fernando Antônio Piazza. Dosagem e Controle da Qualidade de Concretos Convencionais de Cimento Portland. EdiPUCRS, 2017.

ROMERO, R. E.; FAIFER, M.; ALBUQUERQUE, P. J. R. Concreto Reforçado com Fibras: Conceitos, Métodos de Projeto e Casos de Aplicação. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

SILVA, J. A. Utilidades do Alumínio Composto (ACM) na Construção Civil Brasileira. Editora ABC, São Paulo, 2022.

SILVA, J. P. da; SOUZA, M. L. de; GOMES, R. S. Influência das fibras na resistência à tração de concreto reforçado com fibras. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 10, n. 2, p. 75-84, 2020.

SILVA, João da. Concreto Estrutural: Tecnologia e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora XPTO, 2018. p. 52.

SUAREZ, Mauro Paipa. Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da FEMEC, XIII., 2007, Uberlândia. Precisão dimensional e acabamento na superfície do alumínio aeronáutico 7075-T7 no processo de fresamento de topo. Uberlândia: FEMEC/UFU, 2007.

SULEIMAN, M. T. A.; SABRY, H. H.; EL-HAKIM, A. R. Estimation of Elastic Modulus of Hardened Cement Paste and Concrete at Early Ages Using Artificial Neural Networks. Journal of Civil Engineering Research, p. 18-30, 2015.

THOMAZ, Eduardo. Dosagem do Concreto: Duff A. ABRAMS - Chicago, 1918. Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://aquarius.ime.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/abrams_dosagem_rev11.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2023.

TUTIKIAN, Bernardo; HELENE, Paulo. Concreto: Ciência e Tecnologia. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo, v. 2., 1. ed., 2011

VITOR, Paula de C. P.; SANTOS, Antônio C.; TRAUTWEIN, Leandro M. Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 255-270, set. 2018.

WNEK, G. M. Engineering Materials: Bridging the Gap between Science and Engineering. 2nd ed. New York: Springer, 2017.

ANEXOS

ANEXO I - Determinação do teor ideal de argamassa de traço 1:5,0

Quadro 2: Determinação do teor ideal de argamassa de traço 1:5,0.

Teor de Argamassa (%)	Traço Unitário (1:a:p)	Q ¹⁰⁰ de Areia (kg)		Q ¹⁰⁰ de Cimento (kg)		Q ¹⁰⁰ de Água (kg)		Relação a/c Final
		Massa Total	Acréscimo na Mistura	Massa Total	Acréscimo na Mistura	Massa Total	Acréscimo na Mistura	
35	1 : 1,10 : 3,90	8,46		7,69				
37	1 : 1,22 : 3,78	9,68	1,22	7,94	0,25			
39	1 : 1,34 : 3,66	10,99	1,31	8,20	0,26			
41	1 : 1,46 : 3,54	12,36	1,37	8,47	0,27			
43	1 : 1,58 : 3,42	13,86	1,50	8,77	0,30			
45	1 : 1,70 : 3,30	15,45	1,59	9,09	0,32			
47	1 : 1,82 : 3,18	17,17	1,72	9,43	0,34			
49	1 : 1,94 : 3,06	19,02	1,85	9,80	0,37			
51	1 : 2,06 : 2,94	21,02	2,00	10,20	0,40			
53	1 : 2,18 : 2,82	23,19	2,17	10,64	0,44			
55	1 : 2,30 : 2,70	25,55	2,36	11,11	0,47			
57	1 : 2,42 : 2,58	28,14	2,59	11,63	0,52			
59	1 : 2,54 : 2,46	30,98	2,84	12,20	0,57			
61	1 : 2,66 : 2,34	34,10	3,12	12,82	0,62			
63	1 : 2,78 : 2,22	37,57	3,47	13,51	0,69			
65	1 : 2,90 : 2,10	41,43	3,86	14,29	0,78			

Características do Concreto	
1. Teor de argamassa adotado (%)	
2. Massa específica do concreto fresco (kg / m ³)	
3. Teor de ar incorporado e/ou aprisionado (L / m ³)	
4. Abatimento obtido (mm)	

Quantidade de Agregado Graúdo na Mistura		
Total: 30 kg		
Individual	Massa (kg)	%
Pedra B. nº 0		
Pedra B. nº 1		
Pedra B. nº 2		

Abatimento
_____ ± _____ mm

Consumo por m ³ de Concreto	
1. Cimento:	kg
2. Água:	L

Tabela 6.6 – Determinação do teor ideal de argamassa para traço 1,0:5,0

Fonte: Helene e Terzian (1992).

APÊNDICES

APÊNDICE I – Determinação do teor ideal de argamassa de traço 1:5,0

Quadro 3: Determinação do teor ideal de argamassa de traço 1:5,0.

Teor de Argamassa (%)	Traço Unitário (1 : a : p)	Quant. De Areia (kg)		Quant. De Cimento (kg)		Quant. De Água (kg)		Massa de Fibras (kg)	Relação a/c Final	Aditivo (%SPC)
		Massa Total	Acréscimo na Mistura	Massa Total	Acréscimo na Mistura	Massa Total	Acréscimo na Mistura			
35	1:1,10:3,90	28,205	4,070	25,641	0,814					
37	1:1,22:3,78	32,275	4,337	26,455	0,867					
39	1:1,34:3,66	36,612	4,631	27,322	0,926					
41	1:1,46:3,54	41,243	4,956	28,249	0,991					
43	1:1,58:3,42	46,199	5,316	29,240	1,063					
45	1:1,70:3,30	51,515	5,718	30,303	1,144					
47	1:1,82:3,18	57,233	6,166	31,447	1,233					
49	1:1,94:3,06	63,399	6,669	32,680	1,334					
51	1:2,06:2,94	70,068	7,237	34,014	1,447					
53	1:2,18:2,82	77,305	7,880	35,461	1,576					
55	1:2,30:2,70	85,185	8,613	37,037	1,723					
57	1:2,42:2,58	93,798	9,454	38,760	1,891					
59	1:2,54:2,46	103,252	10,423	40,650	2,085					
61	1:2,66:2,34	113,675	11,550	42,735	2,310					
63	1:2,78:2,22	125,225	12,870	45,045	2,574					
65	1:2,90:2,10	138,095		47,619						

Quantidade de Agregado Graúdo na Mistura		
Total: 100 kg		
Individual	Massa (kg)	%
Pedra B. nº 1	-	-
Pedra B. nº 2	-	-

Abatimento	
±	

Características do Concreto	
1. Teor de argamassa adotado (%)	-
2. Massa específica do concreto fresco (kg/m³)	-
3. Teor de ar incorporado e/ou aprisionado (L/m³)	-
4. Abatimento (mm)	-

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE II – Determinação do teor ideal de argamassa de traço 1:5,0

Quadro 4: Traços brutos para traço 1:5,0.

Teor de Argamassa (%)	Traço (c : a : b)			Proporções (kg)			Relação a/c
	Cimento	Areia	Brita	Cimento	Areia	Brita	
35	1	1,10	3,90	25,64	28,21	100,00	0,07
37	1	1,22	3,78	26,46	32,28	100,00	0,07
39	1	1,34	3,66	27,32	36,61	100,00	0,08
41	1	1,46	3,54	28,25	41,24	100,00	0,08
43	1	1,58	3,42	29,24	46,20	100,00	0,09
45	1	1,70	3,30	30,30	51,52	100,00	0,09
47	1	1,82	3,18	31,45	57,23	100,00	0,09
49	1	1,94	3,06	32,68	63,40	100,00	0,10
51	1	2,06	2,94	34,01	70,07	100,00	0,10
53	1	2,18	2,82	35,46	77,30	100,00	0,11
55	1	2,30	2,70	37,04	85,19	100,00	0,11
57	1	2,42	2,58	38,76	93,80	100,00	0,11
59	1	2,54	2,46	40,65	103,25	100,00	0,12
61	1	2,66	2,34	42,74	113,68	100,00	0,12
63	1	2,78	2,22	45,05	125,23	100,00	0,13
65	1	2,90	2,10	47,62	138,10	100,00	0,13

Fonte: Autor (2023).