



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



JOÃO PAULO DE ALMEIDA FIGUEIREDO

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO REFORÇADO COM
MACROFIBRA SINTÉTICA PARA APLICAÇÃO EM PISO
INDUSTRIAL**

VOLTA REDONDA

2022

JOÃO PAULO DE ALMEIDA FIGUEIREDO

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO REFORÇADO COM
MACROFIBRA SINTÉTICA PARA APLICAÇÃO EM PISO
INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de Processamento e caracterização de materiais reciclados, linha de pesquisa de Materiais Compósitos.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Cirlene Fourquet Bandeira

VOLTA REDONDA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

F475d Figueiredo, João Paulo de Almeida
Desenvolvimento de concreto reforçado com macrofibra sintética para
aplicação em piso industrial. / João Paulo de Almeida Figueiredo. - Volta

Redonda: UniFOA, 2022. 72 p.: II

Orientador (a): Prof^o Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coorientador (a): Prof^a Dra. Cirlene Fourquet Bandeira

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em
Materiais, 2022

1. Materiais - dissertação. 2. Concreto. 3. Compressão axial. 4. Compósito.
5. Macrofibra sintética. I. Magnago, Roberto de Oliveira. II. Bandeira,
Cirlene Fourquet. III. Centro Universitário de Volta Redonda. IV.
Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



JOÃO PAULO DE ALMEIDA FIGUEIREDO

DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRA
SINTÉTICA PARA APLICAÇÃO EM PISO INDUSTRIAL

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM MATERIAIS”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ROBERTO DE OLIVEIRA MAGNAGO
1º Membro da banca/Orientador/UniFOA

Prof. Dr. SERGIO ROBERTO MONTORO
2º Membro da banca/UniFOA

Prof. Dr. MARCIO LEÃO FERNANDES
3º Membro da banca/UFV

30 de junho de 2022.

DEDICATORIA

Dedico esse trabalho a Deus.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família por ter conseguido chegar até aqui, a minha esposa Lívia Nogarect Figueiredo, minha mãe Maria Teresa de Almeida e em especial ao meu tio José Ivo (*in memoriam*) por ter me incentivado, ter sido o idealizador para que meu sonho de me tornar mestre pudesse se realizar.

Agradeço também a instituição UniFOA, aos meus colegas e professores, ao coordenador e também meu orientador Roberto Magnago por todo apoio durante o curso.

Sou grato também ao professor Marcio Leão por ter aceitado participar da minha banca de defesa, profissional ao qual admiro e me sinto lisonjeado em poder compartilhar este momento.

Obrigado à todos que direta ou indiretamente puderam contribuir para vencer todas as etapas e conquistar este título tão gratificante para mim.

EPÍGRAFE

"Nada na vida deve ser temido, somente compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos."

Marie Curie

FIGUEIREDO, J. P. A. **DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRA SINTÉTICA PARA APLICAÇÃO EM PISO INDUSTRIAL**. 2022. DISSERTAÇÃO (MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS) – FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA, CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA, VOLTA REDONDA, 2022.

RESUMO

As empresas construtoras atualmente estão em busca de economia em seus empreendimentos, adotando o uso das novas tecnologias, dessa forma, surgem novas ideias e novos conceitos. Durante a pandemia da COVID-19, estas demandas por novas tecnologias aumentaram devido à escassez de insumos e para tanto, a presente dissertação objetivou caracterizar o concreto e analisar as alterações com a adição de macrofibras sintéticas, verificando seu benefício para aplicação em piso industrial como alternativa para a substituição parcial do aço CA-50. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica através dos trabalhos de diversos pesquisadores, autores, e análise de dados. Na fundamentação teórica foram conceituados os elementos para formação do compósito e a viabilidade técnica para aplicação em piso industrial. Posteriormente, é apresentado o processo de materiais e métodos, nos quais foram feitos os ensaios de DSC, TGA e MEV da macrofibra sintética. Já no compósito foram realizados ensaios de Compressão Axial, MEV e DRX sem adição de macrofibra sintética e com adição de 2,25, 4,0 e 6,25 kg de macrofibra sintética por m³ de concreto atingindo resistência de 25 e 40 MPa. Também foi verificado a expansibilidade da macrofibra sintética misturada com o cimento *Portland* pelo método das agulhas de Le Chatelier. Por fim, o concreto reforçado depois de 28 dias atingiu o valor de 26,41 e de 36,45 MPa com adição de 4,0 kg/m³, onde os mesmos traços sem adição do produto atingiram 27,29 e 35,86 MPa. O concreto com adição deste material mostra que é viável o uso alternativo das macrofibras sintéticas para aplicação em piso industrial.

Palavras-chave: Concreto; Compressão Axial; Compósito; Macrofibra Sintética.

FIGUEIREDO, J. P. A. **DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRA SINTÉTICA PARA APLICAÇÃO EM PISO INDUSTRIAL**. 2022. DISSERTAÇÃO (MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS) – FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA, CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA, VOLTA REDONDA, 2022.

ABSTRACT

Construction companies are currently looking for savings in their projects, adopting the use of new technologies, in this way, new ideas and new concepts arise. During the COVID-19 pandemic, these demands for new technologies increased due to the scarcity of inputs and for that, the present dissertation aimed to characterize the concrete and analyze the changes with the addition of synthetic macrofibers, verifying its benefit for application in industrial floor as alternative for the partial replacement of CA-50 steel. A bibliographic research was carried out through the works of several researchers, authors, and data analysis. In the theoretical foundation, the elements for the formation of the composite and the technical feasibility for application in industrial flooring were conceptualized. Subsequently, the process of materials and methods is presented, in which the DSC, TGA and SEM tests of the synthetic macrofiber were performed. As for the composite, Axial Compression, SEM and XRD tests were carried out without the addition of synthetic macrofiber and with the addition of 2.25, 4.0 and 6.25 kg of synthetic macrofiber per m³ of concrete, reaching strength of 25 and 40 MPa. The expandability of synthetic macrofiber mixed with Portland cement was also verified by Le Chatelier's needle method. Finally, the reinforced concrete after 28 days reached the value of 26.41 and 36.45 MPa with the addition of 4.0 kg/m³, where the same traces without the addition of the product reached 27.29 and 35.86 MPa . The concrete with the addition of this material shows that the alternative use of synthetic macrofibers for application in industrial flooring is viable.

Keywords: Concrete; Axial Compression; Composite; Synthetic Macrofiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Teste de <i>Slump</i>	30
Figura 2 Areia utilizada nesta pesquisa	38
Figura 3 Brita composta no concreto desta pesquisa	38
Figura 4 Macrofibra sintética TUF-STRAND MaxTen da marca Viapol	39
Figura 5 Organograma do projeto	41
Figura 6 Equipamento Elmer STA 600 para análises DSC e TGA.	42
Figura 7 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).	43
Figura 8 Realização do <i>Slump</i>	46
Figura 9 Corpos de prova executados.....	47
Figura 10 Corpos de prova imersos em um tanque com água.....	47
Figura 11 Prensa EMIC, modelo PC 150C, rompendo um CP.....	49
Figura 12 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	50
Figura 13 Difratorômetro da marca Shimadzu modelo XRD 6100.....	51
Figura 14 Ensaio de expansibilidade (Le Chatelier)	51
Figura 15 Análises térmicas (DSC e TGA) da macrofibra sintética	52
Figura 16 Ampliação de 200X da macrofibra sintética.	53
Figura 17 Coeficiente de variação aos 7 dias das amostras	56
Figura 18 Coeficiente de variação aos 28 dias das amostras.	57
Figura 19 Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova sem a utilização de macrofibra sintética	58
Figura 20 Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova com a utilização de 2,25 kg/m ³ de macrofibra sintética.	59
Figura 21 Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova com a utilização de 4,0 kg/m ³ de macrofibra sintética... ..	60
Figura 22 Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova com a utilização de 6,25 kg/m ³ de macrofibra sintética	61
Figura 23 Difratorogramas de raios X das amostras de concreto, com variados teores de macrofibra sintética.	62
Figura 24 Ensaio de expansibilidade da macrofibra sintética com o cimento <i>Portland</i>	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Cimento, definição e tipos.....	25
Tabela 2 Principais compostos do cimento <i>Portland</i>	27
Tabela 3 Composição química do cimento <i>Portland</i>	28
Tabela 4 Tipos de aditivos para concreto	29
Tabela 5 Espessuras e tolerâncias – CP's de concreto.....	31
Tabela 6 Características físicas do cimento utilizado.	37
Tabela 7 Informações da TUF-STRAND MaxTen (macrofibra sintética).	40
Tabela 8 Traço dos corpos de prova ensaiados.	44
Tabela 9 Resultados dos rompimentos dos CP's, Fck 25 e 40 MPa aos 7 dias.	54
Tabela 10 Resultados dos rompimentos dos CP's, Fck 25 e 40 MPa aos 28 dias. ...	54

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	29
Equação 2.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas
TGA – Análise Termogravimétrica
CPI – Cimento Portland comum
CP – Corpo de prova
CP´s – Corpos de prova
DSC – Calorimetria exploratória diferencial
MEV – Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR – Norma brasileira
SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto
DP – Desvio-Padrão
RPM – Rotações por minuto
SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente
UNESP – Universidade Estadual Paulista
UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivos gerais.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 CONCRETO	19
2.2 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO	19
2.2.1 Uso da água	20
2.2.2 Uso de agregados	21
2.2.3 Histórico do cimento portland e definição	23
2.2.4 Uso e composição do cimento	26
2.3 ADITIVOS.....	28
2.4 RESISTÊNCIA DO CONCRETO.....	29
2.5 MÉTODO DE ABATIMENTO (<i>SLUMP</i>)	30
2.6 MOLDAGEM E CURA	31
2.7 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO	31
2.8 OS POLÍMEROS.....	33
2.9 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS EM REFORÇO PARA O CONCRETO	35
2.10 VANTAGEM TÉCNICA DO USO DE FIBRA SINTÉTICA EM PISO INDUSTRIAL.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 MATERIAIS	37
3.1.1 Cimento	37
3.1.2 Areia	37
3.1.3 Brita	38
3.1.4 Água	39
3.1.5 Macrofibra sintética	39
3.1.6 Criação do compósito.....	41
3.2 MÉTODOS	41
3.2.1 Caracterização da macrofibra sintética	41

3.2.1.1 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	42
3.2.1.2 Análise Termogravimétrica (TGA)	42
3.2.1.3 Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	43
3.2.2 Caracterização do compósito	43
3.2.2.1 Preparação dos CP's	44
3.2.2.2 Realização do método de abatimento (<i>Slump</i>)	45
3.2.2.3 Adensamento	46
3.2.2.4 Desmoldagem e cura	47
3.2.3 Ensaio de compressão axial	48
3.2.4 Análise de MEV	49
3.2.5 Análise de Difração de Raio-X (DRX).....	50
3.2.6 Ensaio de expansibilidade (Le Chatelier)	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MACROFIBRA SINTÉTICA	52
4.1.1.1 Análises térmicas (DSC e TGA)	52
4.1.2 Análise MEV da macrofibra sintética	53
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO	53
4.2.1 Ensaio de resistência e compressão	54
4.2.1.1 Resultados para sete e vinte e oito dias	54
4.2.2 Análise MEV do compósito	58
4.2.3 Difração de raios-X	61
4.2.4 Le Chatelier (ensaio de expansibilidade)	63
5 CONCLUSÕES	64
6 TRABALHOS FUTUROS	66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas construções realizadas até o fim do século XIX, as estruturas eram feitas em madeira e em alvenaria. Na época a madeira era farta, porém, devido ao fato de não ser durável, além de proporcionar problemas referentes à combustão, eram usados tijolos e pedras nas obras mais relevantes. Assim sendo, define-se alvenaria como um sistema construtivo que se constitui na adequação de elementos como: pedras, tijolos ou blocos, ligados por um ligante (CARVALHO, 2008).

A alvenaria de pedras é um sistema construtivo dos mais antigos utilizados pela humanidade. O tijolo era utilizado nas regiões onde a madeira e a pedra eram insuficientes. Nos primeiros experimentos com a alvenaria de pedras, já se buscava um material que unificasse as pedras como um todo, conforme a argamassa de barro, que era a argila como material ligante. Posteriormente utilizou-se outro produto com mais durabilidade e resistência como a argamassa de cal (CARVALHO, 2008).

Vale destacar que o produto utilizado na calafetação da Pirâmide de Quéops (Khufu) data de 2.700 a.C., mostrando que os egípcios já haviam experimentado a argamassa de cal. A pirâmide do faraó Tutancâmon, possui uma porta que foi construída com grandes pedras rebocadas com argamassa. De acordo com Guimarães (2002) o cimento tem sua origem em 2500 a.C.

É possível que o material cimentante primitivo tenha sido descoberto em 5600 a.C. Acredita-se que o complexo de inertes com determinado ligante, cal ou gesso, tenha sido usado na edificação das pirâmides do Egito. Este material foi usado pelos romanos, como misturas com aspecto pozolânicas de pedra, areia, cal e água, na construção de pontes, aquedutos e demais obras públicas. A utilização do concreto ocorreu com plenitude depois do invento do cimento *Portland*, por Louis Vicat (HELENE; ANDRADE, 2017).

Nessa circunstância, relata-se nesse estudo o uso da macrofibra sintética na estrutura do concreto, que tem como finalidade substituir a tela metálica em muitos projetos de piso, tendo em vista a economia e praticidade. A macrofibra viabiliza ductilidade ao concreto, aumentando a resistências ao impacto e fadiga, contendo as

fissuras menos relevantes e de temperatura. São resistentes aos álcalis do concreto, não sendo corrosivas, nem magnéticas (ROCHA, 2018).

A adição de macrofibra no concreto contribui para atenuar as limitações do referido material, diminuindo seu comportamento frágil, e interfere no certame à fissuração, ampliando a possibilidade de deformidade no estágio pós-fissuração. A preferência de fazer a junção das fibras espalhadas no concreto possibilita que após andamento da cura, o concreto fique ligado pelas fibras, constituindo pontes que o atravessam em todas as direções (MEDEIROS, 2012).

As macrofibras sintéticas possuem a função estrutural, logo, concorrem com as fibras de aço. O emprego das fibras de polipropileno com aplicabilidade estrutural no país (Brasil) ainda está em fase inicial, já nos países desenvolvidos coloca-se as macrofibras de forma rotineira (FIGUEIREDO, 2011; MEDEIROS, 2012).

Para tanto, esse estudo se justifica para demonstrar que o concreto com à adição de macrofibra sintética tem sido aplicado em diversos tipos de construção, cita-se como exemplo em pisos industriais. Segundo Barreda, Iaianin e Sota, (2000) a distribuição homogênea das fibras melhora a performance do concreto ao ser empregado, tendo em vista as facilidades de execução.

Ressalta-se ainda que devido ao fato do desenvolvimento acelerado da tecnologia, sendo o progresso inevitável, grandes centros urbanos foram criados e os indivíduos passaram a usufruir de um maior conforto, por estarem inseridos neste contexto.

Com isso, o concreto é fundamental em uma obra, sendo formado por mistura de cimento *Portland*, agregados graúdos, miúdos e água, também passou por várias alterações em sua composição, com a finalidade de se criar um composto mais resistente.

Dentre as diversas descobertas de elementos que contribuíram com o desenvolvimento do concreto, tem-se a macrofibra sintética que podem ser adicionadas ao concreto. O uso desta solução no concreto é relativamente novo no Brasil, mas já é comprovado que sua utilização oferece muitas vantagens, conforme mencionado.

Nesse seguimento, no Brasil a macrofibra sintética é vendida há pouco tempo, portanto, sua especificação para reforço estrutural do concreto ainda não tem uma norma brasileira que trata do assunto. Este estudo visa uma melhor compreensão do assunto, de modo especial a aplicação em pisos industriais, foco deste estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as alterações características do concreto com adição de macrofibra sintética.

1.2.2 Objetivos Específicos

Apresentar as vantagens técnicas da aplicação de macrofibra sintética no concreto ao ser utilizado em piso industrial;

Retratar as facilidades de execução empregando concreto com macrofibra sintética;

Demonstrar viabilidade de desempenho do concreto com e sem adição de macrofibra sintética em três formações de massa (macrofibra sintética) por volume (concreto) sendo: 0,00, 2,25, 4,00 e 6,25 kg/m³.

1.3 JUSTIFICATIVA

Devido a pandemia da COVID-19 e *lockdowns* pelo mundo houve a escassez de insumos da construção civil no Brasil, dentre eles a tela de aço CA-50 utilizada no concreto armado para construção de piso industrial.

Para sanar a dificuldade em adquirir tal insumo, é necessário verificar o que a tecnologia dos dias atuais oferta como substituição e para isso este trabalho colabora com o desenvolvimento de um concreto reforçado com macrofibra sintética, testado através de diversas técnicas e ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO

O concreto é composto por cimento, água, areia e brita. Quando a mistura desses elementos ocorre, gera-se uma liga com diversas empregabilidade. O concreto possui características que estão ligadas a resistência, moldabilidade, durabilidade e trabalhabilidade, conforme a “Associação Brasileira de Cimento *Portland* (2002)”. Possui ainda duas propriedades como a resistência à água e sua flexibilidade Trata-se de um material que ao ser submetido à água a degradação é pequena, logo, é empregado em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água. Além disso, proporciona a realização obras arquitetônicas com formas construtivas diferentes como as de Niemayer (IBRACON, 2009).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) afirma que o concreto é um compósito formado de aglomerante (cimento e água) associando partículas de naturezas variadas. É formado por seixos, areia, rocha britada, pedregulho e outros tipos de resíduos (IBRACON, 2009).

2.2 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

Na construção civil o concreto pode ser catalogado como um elemento híbrido que procede da ligação do cimento *Portland*, água, areia e brita, que são agregados miúdo, graúdo e aditivos (FUSCO, 2008; ALMEIDA, 2017).

Weidmann (2008) diz que a escolha errada dos agregados pode ocasionar disfunções no concreto. Para o autor é relevante conhecer as propriedades e aplicações dos agregados que serão trabalhados, tentando sempre achar a melhor relação entre custo e benefício, devendo analisar o custo total do produto (concreto ou argamassa).

Valverde (2001) afirma que o uso de agregados inadequados, pode causar rápida deterioração do concreto de cimento *Portland* quando exposto a condições de temperaturas severas. Os fabricantes de agregados utilizados na construção civil,

devem se atentar com o controle de qualidade para que o agregado cumpra com o propósito projetado.

Os agregados devem possuir certos aspectos necessários que são ditados pelos processos construtivos devendo ter características que: facultem ser manuseados de forma satisfatória no decorrer do transporte e estocagem; mistura dos agregados com o ligante; colocação da mistura e compactação ou cura da mistura (VALVERDE, 2001).

De acordo com Helene e Tutikian (2011), o traço do concreto é constituído pelo cimento, areia, brita e água, sendo expressa em volume ou em peso. Algumas propriedades devem ser consideradas ao buscar novos tipos de traço tais como: resistência mecânica do concreto, trabalhabilidade, durabilidade, deformabilidade e a sustentabilidade. Pode variar em função da necessidade ou do material usado, em substituição ao agregado graúdo.

2.2.1 Uso da água

Os anidros são presentes no cimento *Portland*. O cimento ao ser hidratado altera os compostos anidros com maior predisposição em solubilidade. A hidratação é um processo que engloba a consolidação dos minerais do clínquer através da água, metaestáveis em temperatura ambiente, gerando compostos como o C-S-H, etringita e portlandita (CAVALCANTI, 2014).

Kihara e Centurione (2005) confirmam que esta hidratação do cimento *Portland* precisa: da associação da água-cimento, finura, temperatura, processos de cura e demais agentes físicos e não somente das frações de minério do clínquer e dos incrementos ativos do cimento. É primordial que os componentes do clínquer abranjam seu âmbito de equilíbrio de acordo com as condições ambientais, estando correlacionadas com a avidez do cimento por água. Assim, os elementos químicos, unidos à água, reconstituem-se em sistemas cristalinos, dando dureza ao composto. Dessa mistura sucedem as reações transformando o cimento *Portland* em agente ligante, ou seja, a água, os silicatos e aluminatos tornando produtos de hidratação e com o tempo origina um produto endurecido. A hidratação dos aluminatos está ligada com a pega e o enrijecimento do concreto, enquanto os silicatos são fundamentais na elaboração de resistência mecânica (FALCÃO BAUER, 2019; FRANCISCO, 2017).

Um dos componentes muito relevante na elaboração do concreto é a água. O contato da água com o cimento contribui com o endurecimento e com a cura do concreto. Além disso, representa 20% do volume do concreto (FRANCISCO, 2017; FALCÃO BAUER, 2019).

2.2.2 Uso de agregados

Do ponto de vista econômico e prático, o uso de agregados oferece vantagens, ao serem distribuídos granulométricas de forma contínua, uma vez que podem ser naturais ou artificiais. Geralmente são utilizados em obras de engenharia, como na elaboração de bases para calçamentos, preparação de argamassas, concretos, dentre outras (NEVILLE, 2015).

As peculiaridades dos agregados interferem na durabilidade e no desempenho da composição do concreto. Por causa de suas particularidades técnicas, o concreto tem mais estabilidade dimensional e resistência (no que se trata da pasta de cimento pura (NEVILLE, 2015).

Conforme a origem, os agregados podem ser graúdos e miúdos. Os resquícios maiores que 4,8 mm, são os graúdos e os menores que 4,8 mm são os miúdos. A NBR 7.211/2005 especifica os agregados, como naturais que são cascalho, pedras, areia e artificiais que são os rejeitos originários das siderúrgicas. Na categoria dos agregados sintéticos, englobando as matérias primas desenvolvidas termicamente, como argila, que ao serem disseminadas, são utilizados para produzir concreto leve.

A NBR 12655/2006 da ABNT relaciona os agregados conforme sua massa específica, como agregados leves os que obtém massa específica $\leq 1.800 \text{ kg/m}^3$ e agregados densos ou pesados, que possuem massa peculiar $\geq 3.000 \text{ kg/m}^3$.

Os agregados recebem ainda outras classificações como:

- **Agregados ultraleves:** sua massa peculiar é inferior a 300 kg/m^3 , da mesma forma a vermiculita e o poliestireno difundido;
- **Leves:** massa específica entre 300 e 1200 kg/m^3 , como argila difundida, escória de alto-forno expandida e pedra pomes;

- **Densos:** de massa específica entre 1200 e 1700 kg/m³, assim como a rocha e areia;
- **Extradensos:** massa específica acima de 1700 kg/m³, assim como a magnetita, barita, limonita e itabirito.

Os agregados são relevantes para a tecnologia do concreto influenciam sobre as propriedades essenciais do concreto fresco, sua trabalhabilidade, quanto ao concreto endurecido, sua resistência à compressão, estabilidade dimensional e durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O uso dos agregados artificiais é relacionado a um aprendizado antecipado da qualidade e pertinência conforme critérios presentes nas normas de avaliação de desempenho (SILVA, 2000; CUNHA, 2015).

Os agregados são materiais inertes, ocupando cerca de 60 a 80% da quantidade do concreto. São partículas minerais adicionadas à mistura de cimento com água, colaboraram com grãos capazes de resistir a esforços solicitantes ao desgaste e a ação das intempéries, contribuindo para o ganho mecânico (SILVA, 2000; CUNHA, 2015).

Segundo NBR 7211 (2019) os agregados miúdos são areias de origem natural e/ou britadas, são grãos que atravessam peneiras de 4,8 mm e que são retidas em peneiras de 0,075 mm.

Enquanto os agregados graúdos que procedem de rocha estável, os grãos passam pela peneira de 152 mm e são retidos nas peneiras de 4,8 mm.

Os agregados graúdos são partículas maiores que 4,75mm (malha n° 4 Mesh), e os miúdos referem-se às partículas de agregados inferiores a 4,75 mm (malha n° 200 Mesh) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com a NBR 9935 (2011) são definidos como os pedregulhos ou britas originários de rochas os grãos passam pela peneira que possuem vão na malha 75 mm.

As propriedades físicas e químicas e as combinações de dimensões distintas de agregados na mistura de concreto interferem de forma direta na resistência e nas peculiaridades físicas do concreto em modo endurecido. Intervém diretamente na

trabalhabilidade do concreto em estado fresco por serem os componentes que possuem dimensão maior na mistura do concreto gerando mais atrito da massa de concreto (HELENE; TERZIAN, 1995).

Os ensaios de definição dos agregados graúdos devem ser realizados conforme ABNT NBR NM 248 e usando peneiras em conformidade com a ABNT NBR NM ISO 3310-1 e 2.

Os agregados miúdos são areias de origem natural ou derivadas da moagem de rochas estáveis. Os grãos de areia passam pela peneira ABNT de 4,8mm, ficando retidos na peneira ABNT 0,150 mm (ABNT NBR 7211/2011).

As características dos agregados influenciam na trabalhabilidade e resistência do concreto, por preencherem os vazios deixados pelo agregado graúdo, devido suas elevadas dimensões. Os agregados miúdos preenchem as partes menores integrando uma parte de impermeabilidade ao concreto consoante a sua finura (HELENE; TERZIAN, 1995).

O módulo de finura do agregado miúdo tem atuação direta com a trabalhabilidade do concreto em estado fresco, que de acordo com o tamanho de seus grãos, a mistura se torna mais fluida. O agregado miúdo mais fino necessita de mais água na mistura para poder “lubrificar” todas as partes finas existentes na fração do agregado miúdo.

Tendo módulo de finura maior, a mistura consome menos água, mas se torna menos fluida em decorrência do aumento do atrito das partículas da porção fina da mistura. O produto final gerado por esta mistura pode apresentar um maior número de vazios se o teor de argamassa não estiver em harmonia com a fração de cimento e de agregado miúdo (HELENE; TERZIAN, 1995).

Os agregados são materiais de importância relativa na fabricação do concreto, é o segundo mais utilizado e pode ter influência direta nas características do concreto, como a trabalhabilidade ou a resistência à compressão (FUSCO, 2008).

2.2.3 Histórico do cimento *Portland* e definição

A origem da expressão cimento é do latim “CAEMENTU”, era uma categoria de pedra natural de rochedos na Roma antiga, sua existência é de aproximadamente

4.500 anos. No passado utilizava-se de uma mistura de gesso calcinado para construir muitos monumentos do Egito antigo. Na construção do Coliseu e do Panteão, foi utilizado solos de vulcânicos que eram endurecidos com a ação da água (ABCP, 2002).

O inglês John Smeaton contribuiu muito com o desenvolvimento do cimento que obteve um produto resistente através de calcinação de calcários moles e argilosos. O francês Vicat em 1818, considerado o inventor do cimento artificial, obteve desfechos parecidos aos de Smeaton ao misturar componentes argilosos e calcários (ABCP, 2002; FALCÃO BAUER, 2019).

No Brasil, foram realizados estudos com a finalidade de usar os princípios da fabricação do cimento *Portland*. Em 1988 o comendador Antônio Proost Rodovalho se esforçou para instalar em sua fazenda uma fábrica de cimento *Portland* que fica situada no município de Sorocaba, SP (ABCP, 2002).

Nessa época foram desenvolvidas diversas iniciativas para sua fabricação. Em 1882, na ilha de Tiriri, na Paraíba foi instalada uma fábrica pequena, chegando a funcionar por um breve período três meses. Em 1890 o engenheiro francês Louis Felipe Alves da Nóbrega, trouxe novas ideias para o Brasil, como um projeto da fábrica pronto e um livro publicado (ABCP, 2002).

Por causa da distância dos centros e a pequena escala de produção, não obteve sucesso nas tentativas, uma vez que não conseguia competitividade com os cimentos importados da época (ABCP, 2002).

Para Botelho (2012), o cimento *Portland* possui resistência mecânica, se desenvolvendo por meio de reações químicas durante o processo de hidratação. É formado por clínquer moído juntamente com uma pequena quantidade de gipsita (sulfato de cálcio) para moderar o tempo de pega, ou seja, o período de início das reações do aglomerante com a água.

A tabela 1 apresenta a definição de cimento e os tipos existentes:

Tabela 1. Cimento, definição e tipos.

TIPOS DE CIMENTO <i>PORTLAND</i>	CONCEITO
CP I S – Cimento <i>Portland</i> comum	Compõe-se de (clínquer+gesso), com adição menor de material pozolânico (de 1% a 5%). Isso fornece uma característica de diminuição da permeabilidade ocasionado à adição de pozolana.
CP II E – Cimento <i>Portland</i> composto com escória	A tem clínquer com gesso, adição de outro material a escória de alto-forno, cuja a propriedade é de baixo calor de hidratação. A composição é definida a partir de 94% a 56% de clínquer com gesso e 6% a 34% de escória, e pode adicionar material carbonático no limite de 10%. Seu uso é indicado na produção de estruturas que solicite uma liberação de calor mais lento.
CP II Z – Cimento <i>Portland</i> com pozolona	É constituído com material pozolânico entre 6% até 14%, liberando ao cimento uma redução de permeabilidade é bastante indicado o uso em obras subterrâneas possui material carbonático de no máximo em 10% em massa.
CP II F – Cimento <i>Portland</i> com filer	Composto de 90% a 94 % de clínquer com gesso, acrescido com 6% a 10% de material carbonático. Seu uso é indicado para estruturas de concreto em geral e argamassas de assentamento e revestimento, sendo sua utilização restrita a lugares demasiadamente agressivos para a sua composição.
CP III – Cimento <i>Portland</i> de alto forno	Possui adição de escória na proporção de 35% a 70%, facultando propriedades específicas entre elas: menor calor de hidratação, aumento de impermeabilidade e durabilidade, sugeridos para obras grandes e agressivas e para aplicação geral nas argamassas para aplicação de revestimento.
CP IV – Cimento <i>Portland</i> pozolânico	Contém pozolana na proporção de 15% a 50%. O alto índice de pozolana lhe permite uma alta impermeabilidade e resistência. Observa-se que o concreto elaborado com CP IV possui resistência mecânica superior ao concreto de cimento comum. Sugerido para aplicação em locais agressivos.
CP V-ARI – Cimento <i>Portland</i> de alta resistência inicial	Produzido por intermédio de um clínquer de dosagem diferente de calcário e argila quando comparados aos demais. Essa particularidade em sua fabricação lhe dar uma característica muito importante de resistência durante os seus primeiros dias de consolidação atingindo até 26 MPa de resistência em 1 dia de idade. A sua aplicação é bastante solicitada em obras que precisam de uma solidificação mais célere.
CP RS – Cimento <i>Portland</i> resistente a sulfatos	Os tipos de cimento <i>Portland</i> mencionados anteriormente podem ser classificados como resistente a sulfatos, desde que, se delimitem em umas das seguintes características a seguir: 1) Taxa de aluminato tri cálcico (C ₃ A) do clínquer e teor de adições carbonáticas no limite de 8% a 5% respectivamente;

	2) Cimentos de tipo alto-forno que contém de 60% e 70% de escória;
	3) Cimentos da espécie pozolânicos que compreendem entre 25% e 40% de material pozolânico;
	4) Cimentos que abrangem resultados de grande duração de construção que precisam de resistir aos sulfatos.
CP BC – Cimento <i>Portland</i> de baixo calor de hidratação	É uma espécie de cimento que tem como intuito adiar o desprezo de calor em matérias primas de maior massa de concreto, visando impedir o aparecimento de fissuras de origem térmica.
CP B – Cimento <i>Portland</i> branco	Este cimento não é estrutural, indicado em projetos de arquitetura para obter um visual melhor.

Fonte: Adaptado de Botelho, 2012.

2.2.4 Uso e composição do cimento

O cimento *Portland* é formado por diversos elementos tais como: sílica, alumina, cal, magnésia, óxido de ferro, sulfatos e álcalis. Tais substâncias ao reagirem entre si no forno dão origem a outros produtos. Seu nome é usado até a presente data para definir um cimento obtido pela mistura dosada de calcários e argilosos ou outros materiais que possuam sílica, alumina e óxidos de ferro, ao ser aquecido a uma temperatura precisa para a clinquerização e esmagando-se o clínquer resultante (NEVILLE, 2015).

Fazem parte ainda da composição do cimento *Portland* o silicato dicálcico, silicato tricálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico. Os aluminatos causam as primeiras reações, levando a valores mais baixos de resistência aos esforços mecânicos. De forma geral, os silicatos são essenciais em relação à resistência nas primeiras idades, o silicato tricálcico e o silicato dicálcico em idades maiores (HOPPE FILHO, 2008).

O aglomerante com a água desenvolve uma reação, que é o calor. Ocorre devido singularmente ao aluminato tricálcico, seguido pelo silicato tricálcico, tendo em vista que o silicato dicálcico e o ferroaluminato tetracálcico liberam pouco calor durante a hidratação. A utilização do aluminato tricálcico contribui para que ocorra a pega do cimento, por ser o elemento mais reativo do clínquer. O ferroaluminato tetracálcico

tem função irrelevante na resistência química do cimento, de maneira específica ao ataque de sulfatos às estruturas de concreto (HOPPE FILHO, 2008).

Depois que se misturar o material, este vai para um forno, sendo submetido a uma temperatura de 1450°C. Ao atingir essa temperatura, ocorre a fusão de 20 a 30% do material, sendo obtidas esferas de 3 a 25 mm de diâmetro, conhecidas como clínqueres. O mesmo é triturado, e a ele é incrementado o sulfato de cálcio com a finalidade de retardar a pega do cimento resultando, finalmente, no cimento *Portland*, tal como é conhecido (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O cimento ao ser hidratado pela água, forma um compósito que promove a aderência dos fragmentos de agregados considerados como grãos e miúdos. Infere-se que o aglomerante, componente ativo do concreto, na presença da água, provoca ações físicas e químicas, culminando a união e aglutinação dos agregados (EMILIO, 2018).

Os silicatos tricálcico e dicálcico são os mais relevantes, tem como responsabilidade a resistência do compósito. Após as primeiras idades do concreto, a presença de aluminato tricálcico praticamente não contribui para sua resistência, ou seja, após os primeiros dias de hidratação, sendo assim indesejável (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Ainda o aluminato tricálcico, tende a formar sulfoaluminato de cálcio na presença de sulfatos, podendo resultar na desagregação do concreto. O ferroaluminato tetracálcico reage com a gibbsita para formar sulfoferrito de cálcio, portanto, sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos, mas ele está presente no cimento em baixas quantidades e não afeta significativamente o comportamento do mesmo (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A Tabela 2 e 3 apresentam a composição química do cimento *Portland* (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Tabela 2. Principais compostos do cimentos *Portland*.

COMPOSTO	COMPOSIÇÃO EM ÓXIDOS	ABREVIATURA
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A

Ferroaluminatotetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF
-----------------------------------	---	-------------------

Fonte: Adaptado de Neville, 2015.

Tabela 3. Composição química do cimento *Portland*.

ITEM	TEOR TÍPICO (%)	LIMITES (%)
CaO	63,00	60,00 – 67,00
SiO ₂	20,00	17,00 – 25,00
Al ₂ O ₃	6,00	3,00 – 8,00
Fe ₂ O ₃	3,00	0,50 – 6,00
SO ₃	2,00	1,00 – 3,00
MgO	1,50	0,10 – 4,00
Na ₂ O+K ₂ O	1,00	0,20 – 1,30
Outros	1,00	-
Perda ao Fogo	2,00	-
Resíduo Insolúvel	1,50	-

Fonte: Adaptado de Neville, 2015.

2.3 ADITIVOS

Os produtos utilizados na composição do concreto recebem a denominação de aditivo. Ao ser posto na betoneira, antes, durante ou de forma imediata a combinação do concreto, em quantidade pequenas e bem misturado, faz aparecer ou reforçar certas características (FALCÃO BAUER, 2019).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) o desenvolvimento das indústrias de aditivos está relacionado diretamente com a verificação da mudança das características do concreto no estado rígido e fresco a partir da adição de elementos para fazer a mistura de concreto.

Os aditivos podem diferenciar em relação à composição química e a performance da função de acordo com o tipo de obra (BOTELHO; FERRAZ, 2016).

Os aditivos relevantes e expostos pela ABNT NBR 11.768 de 2011 encontram-se descritos na tabela 4.

Tabela 4. Tipos de aditivos para concreto.

ADITIVOS	
Tipo	Função
P	Aditivo Plasticante
R	Aditivo Retardador
A	Aditivo Acelerador
PR	Plastificante Retardador
PA	Plastificante Acelerador
IAR	Aditivo Incorporador de Ar
SP	Aditivo Superplastificante
SPR	Aditivo Superplastificante Retardador
SPA	Aditivo Superplastificante Acelerador

Fonte: ABNT NBR 11768, (2011).

2.4 RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Segundo a NBR 6118 (2014) o concreto pode ser considerado estrutural, desde que o seu f_{ck} esteja numa faixa entre 20 MPa à 90 MPa. Porém, sua aplicação depende do tipo de estrutura de cada projeto.

Segundo Neville (2015) para atingir a resistência à compressão do concreto, adota-se a idade de 28 dias como referência. Assim sendo, para se calcular o f_{ck} em idades distintas, é possível realizar por meio do cálculo do f_{cj} . Calcula-se o f_{cj} por meio da equação:

$$f_{cj} = f_{ck} - 1,65 * DP \quad (1)$$

sendo:

- f_{cj} = resistência média à compressão, calculada para a idade de j dias, em MPa do concreto;

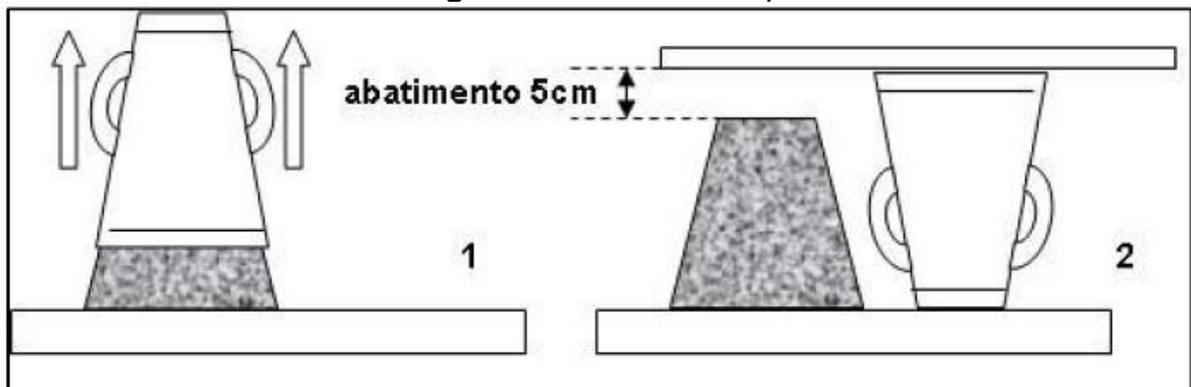
- f_{ck} = resistência à compressão, em MPa do concreto;
- DP = desvio-padrão, em MPa da dosagem.

Quando o desvio-padrão (DP) do traço utilizado não é conhecido, adota-se uma das condições descritas na NBR 12655 (2006), que são de 4 MPa, 5,5 MPa e 7 MPa.

2.5 MÉTODO DE ABATIMENTO (*SLUMP*)

O concreto para ser executado na forma, é necessário fazer o teste de *Slump* (figura 1), pois através dele é verificado se o concreto irá envolver as interferências de armação e vazios de ar e se tornar um produto homogêneo (BOTELHO, 2012).

Figura 1. Teste de *Slump*.



Fonte: Botelho (2012).

Conforme a NBR 5738 (2003), para descobrir o valor do *Slump* é necessário utilizar um cone metálico que é apinhado com concreto em diversas camadas. Quando o cone estiver cheio, este é removido e sua altura é comparada com a altura do concreto, sendo que a diferença de altura é o *Slump*.

Para Botelho (2012), o concreto com um resultado de bom espalhamento, são necessários alguns fatores:

- Quantidade de água por m^3 ;
- Granulometria adequada (evitando diâmetros grandes);
- Aditivos plastificantes.

2.6 MOLDAGEM E CURA

De acordo com a NBR 5738 (2015) os moldes dos corpos-de-prova devem ser em moldes cilíndricos, para medir a resistência a compressão, e o prismáticos para medir resistência à tração, conforme demonstrado na tabela 5 a seguir:

Tabela 5. Espessuras e tolerâncias – CP's de concreto.

ESPESSURAS MÍNIMAS DAS PAREDES (MM)	DIMENSÃO	TOLERÂNCIAS		
		DIMENSÕES BÁSICAS (MM)		
		100	>=150	
MOLDES CILÍNDRICOS	Base 4,50	- Dimensões nominais; - Diferença máxima entre as dimensões de dois diâmetros ortogonais, um deles passa pela geratriz cortada do molde; - Desvio máximo da chapa de base do molde cilíndricos no que se refere a um plano; - Desvio máximo de qualquer geratriz em relação a um plano.	+ -1,00 1,00	+ -1,50 1,50
	Parede 3,00		0,050 0,030	0,050 0,30
MOLDES PRISMÁTICOS	Base 12,00 Parede 12,00	- Dimensões nominais (dimensões básicas e altura).	-	+ -1,50

Fonte: Adaptado de NBR 5738 (ABNT, 2015).

Segundo a NBR 9479 (1993), os CP's devem permanecer imersos em água saturada de cal ou ficar enterrados em areia saturada de água ou em câmara úmida que tenha no mínimo 95% de umidade. Em todas ocasiões a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura.

2.7 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

A trabalhabilidade do concreto é sintetizada pela ASTM C-125 como a propriedade que origina o esforço exigido para manejar uma quantidade de concreto fresco sem que ocorra perda de homogeneidade. Portanto, o concreto tem que ser transportado, bombeado e acomodado nas formas (DYER, 2020).

Os métodos pioneiros utilizados para medir a trabalhabilidade do concreto quando está em estado fresco são: ensaio Vebe, de abatimento de tronco de cone, de fator de compactação e Tattersall. O melhor ensaio depende de dois fatores: característica do concreto (fluido ou denso) e a forma como ele será aplicado e transportado (lançado, injetado ou simplesmente moldado) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; DYER, 2020).

No método do volume absoluto, o traço é dado em volume e no método do peso, o traço é dado em peso, o segundo método, “do peso” é menos preciso. Esses dois métodos são recomendados para dosagem do concreto convencional, porém, não requer informações sobre massa específica dos materiais usados na sua produção (MEHTA; MONTEIRO, 2008; DYER, 2020). Como por exemplo:

Os mesmos autores afirmam ainda que os dois métodos envolvem uma série de passos, alguns são comuns aos métodos apresentados. Algumas informações são fundamentais para se dar início aos cálculos e se alcançar um concreto com propriedade específica (MEHTA; MONTEIRO, 2008; DYER, 2020).

- Granulometria dos agregados (grãos e miúdos), módulo de finura;
- Massa unitária do agregado grão no estado compactado seco;
- Massa específica dos materiais;
- Capacidade de absorção ou umidade livre no agregado;
- Teor de ar e granulometria dos agregados disponíveis;
- Relação entre a resistência e a relação água/cimento (a/c) para as combinações disponíveis de cimento e agregado;
- Caracterização da obra, se existir, com referência máxima de água/cimento, teor de ar mínimo, abatimento mínimo, etc.

Em relação às etapas, tem-se a possibilidade: do abatimento, opção da dimensão máxima e propriedade do agregado, estimativa dos aditivos e adições, estimativa do consumo da água de amassamento e teor de ar, escolha da relação água/cimento, estimativa do consumo de cimento, estimativa do consumo de agregados, correção da umidade dos agregados e o ajuste entre os componentes para uma combinação ideal (DYER, 2020).

Todo procedimento de cálculo é considerado experimental; ou seja, vai se estabelecendo uma semelhança dos componentes e fazendo os ensaios convenientes até que se alcance um traço satisfatório (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.8 OS POLÍMEROS

A origem da palavra polímero é do grego: Poli = muitas, Meros = partes. É composto por muitas partes. A estrutura molecular de um polímero pode ser apreentada de diferentes formas: cadeias lineares, cíclicas, ramificadas e reticuladas (AKCELRUD, 2007).

Os polímeros são macromoléculas que resultam da junção de diversas unidades de pequenas moléculas (monômeros). Alguns estão disponíveis na natureza, outros podem ser sintetizados em laboratório (AKCELRUD, 2007).

Esses compostos constituem grandes moléculas, sendo formados pela repetição de pequenas unidades que são os monômeros. Assim, os Polímeros podem ser de orgiem orgânica ou inorgânica, naturais ou sintéticas (CAVALIERE, 2021):

- **Naturais:** são aqueles encontrados totalmente no ambiete natural, cita-se como exemplo: a borracha da seringueira, polissacarídeos, o amido da batata, proteínas como a queratina das unhas, a celulose das plantas verdes, o colágeno da pele e os ácidos nucleicos;
- **Sintéticos:** para se alcaçar esses polímeros é necessário um processamento. São formados essencialmente por hidrocarbonetos derivados do petróleo e não são biodegradáveis, quase nunca são recicláveis, em geral, sua incineração causa danos ambientais.

De acordo com Callister (2008) os polímeros naturais são derivados de plantas e animais, sendo usados há séculos, como: a madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda.

Em relação a utilização dos polímeros sintéticos, como borrachas, plásticos e fibras, seu aprimoramento ocorreu a partir da Segunda Guerra Mundial. Porém, muitos tiveram suas características transformadas ficaram com mais qualidade no que concerne a outros de origem natural e com custo menor (CALLISTER, 2008).

Quanto aos Polímeros Termoplásticos, são aqueles que liquefazem, ou se tornam amolecidos ao serem aquecidos e endurecem quando são resfriados. Esses processos são reversíveis, possibilitam repetição. Em escala molecular, o amolecimento ocorre quando o material é aquecido (aumento do movimento das moléculas), isso nos dá uma diminuição das forças de ligação. A temperatura sendo muito elevada, em alguns eventos poderá ocorrer a degradação irreversível (CALLISTER, 2008).

Os polímeros termorrígidos, termofixos ou termoendurecidos tem como característica a formação de cadeias reticuladas, isto é, as ramificações formam retículos. Ao aumentar a temperatura de forma considerável e marginal da pressão, ficam flexíveis, porém, não tanto como os termoplásticos, atingindo o formato do molde (CANEVAROLO, 2010).

Segundo Manrich (2005) os polímeros termorrígidos ao passarem pelo processo de cura (ligações cruzadas), não podem ser misturados ou dissolvidos sem que aconteça a degradação de sua estrutura química. Eles são maleáveis, o que possibilita moldar somente no momento em que é fabricado. Caso ocorra um aumento de temperatura e pressão começam a degradar. Isto acontece devido a sua formação de conexões em todas as direções do espaço, vindo a formar uma rede tridimensional denominada de retículo.

O Copolímero é composto por duas unidades repetidas, com possibilidades distintas de sequências de arranjos moleculares ao longo da cadeia polimérica (CALLISTER, 2008).

Estes arranjos quando ocorre a junção de unidades recorrentes análogas no decorrer da cadeia, figura um Copolímero em bloco. Finalmente em relação às ramificações laterais de homopolímeros de uma forma específica são enxertadas nas cadeias principais de homopolímeros compostos por um tipo diferente de cadeia, forma um Copolímero enxertado (CALLISTER, 2008).

2.9 TIPOS DE FIBRAS UTILIZADAS EM REFORÇO PARA O CONCRETO

O uso das fibras estruturais incrementam a tenacidade do concreto, caracteriza-se pela energia que necessita para conduzir a peça a ruptura, possibilitando ao concreto grandes deformações antes do colapso (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

As fibras estruturais, de aço ou macrofibras poliméricas, possuem a mesma série de aplicações. Todavia, existe uma área de domínio na qual cada uma é mais eficaz que a outra.

Em pisos com baixa capacidade de carga, tais como: estacionamento de shoppings, de edifícios comerciais, residenciais, as macrofibras poliméricas são mais competitivas. Em contrapartida, em cargas superiores e pisos excessivamente carregados, as fibras de aço são mais indicadas (RODRIGUES, 2006).

As fibras metálicas mais usuais são feitas de arame trefilado a frio, chapas cortadas ou arame trefilado e escarificado. O comprimento é variável de 30 mm à 60 mm e o diâmetro entre 0,50 mm e 1,05 mm. Trata-se de um tipo de fibra resistente à tração de 600 até 1.200 MPa, que pode resistir a teor elevado de carbono. O módulo de deformação é em torno de 200 GPa (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Em relação às macrofibras poliméricas, de modo geral sua composição é de polipropileno, o comprimento varia cerca de 40mm e 60mm e diâmetro menor que 0,3mm. Evidenciam resistência à tração entre 450 e 1.000 MPa e módulo de deformação entre 2 e 10 GPa (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

2.10 VANTAGEM TÉCNICA DO USO DE FIBRA SINTÉTICA EM PISO INDUSTRIAL

As macrofibras sintéticas de acordo com Costa (2015), Rodrigues e Montardo (2002) oferecem vantagens técnicas como a utilização em piso industrial. Desempenham parte da função da malha soldada, que é manter o concreto íntegro, mesmo após a ocorrência de fissuração intensa. O autor afirma ainda que as macrofibras:

- Mitigam as falhas na execução da armadura por falta de espaçador pelo amassamento do aço devido ao trânsito dos profissionais durante a execução por falha no transpasse;
- Elas distribuídas em toda espessura da laje, assim, contribuem para diminuir a ocorrência de falhas.

Cruz (2015) afirma que uma das alternativas para minimizar patologia na construção é a adição de fibras no concreto dos pisos industriais. Dessa forma, a matriz cimentícia ao ser reforçada com fibras, ocorre transformações em suas propriedades tais como: trabalhabilidade, resistência à compressão, à tração na flexão, à tração direta, ao impacto, à fadiga, aumento da tenacidade e inibição na disseminação de fissuras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Foram utilizados cimento, areia, brita, água e copolímeros comprados pelo autor no município de Volta Redonda, RJ.

3.1.1 Cimento

Foi usado o cimento CP III-40 RS, invólucro de 50 kg da marca “CSN Cimentos S.A.”, obtido pelo autor no município de Volta Redonda, RJ.

A Tabela 6 mostra a composição e as características físicas do cimento utilizado nesta pesquisa.

Tabela 6. Características físicas do cimento utilizado.

TIPO DE CIMENTO		CLINQUER E GESSO				ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO		MATERIAL CARBONÁTICO	
CP III		25 - 65				35 - 75		0 - 10	

Características físicas do Cimento CP III										
		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				FINURA	TEMPO DE PEGA		EXPANSIBILIDADE	
Tipo de cimento	Classe	MPa 3 dias	MPa 7 dias	MPa 28 dias	MPa 91 dias	Resíduo na peneira 75µm	Início (min)	Fim (min)	À Frio (min)	A quente (min)
CP III	32	≥10	≥20	≥32	≥40	≤8,0	≤60	≤720	≤5	≤5
	40	≥12	≥23	≥40	≥48	≤8,0	≤60	≤720	≤5	≤5

Fonte: Adaptado de CSN, 2022 .

3.1.2 Areia

A areia utilizada neste estudo a dimensão média é de 0,42 mm a 1,2 mm, também foi adquirida pelo autor no município de Volta Redonda, RJ (figura 2).

Figura 2. Areia utilizada nesta pesquisa.



Fonte: Autor, 2022.

3.1.3 Brita

A brita utilizada também foi adquirida pelo autor no município de Volta Redonda, RJ.

Foi usada a brita 1 (\varnothing variando de 9,50 mm a 19,00 mm) como pode ser visto na figura 3.

Figura 3: Brita composta no concreto desta pesquisa.



Fonte: Autor, 2022.

3.1.4 Água

Para fazer a mistura utilizou-se água potável, abatecida por meio do sistema de abastecimento do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Volta Redonda/RJ.

3.1.5 Macrofibra sintética

O copolímero utilizado neste estudo foi a macrofibra sintética TUF-STRAND MaxTen da marca Viapol (figura 4), adquirido pelo autor no município de Barra do Piraí, RJ.

Figura 4. Macrofibra sintética TUF-STRAND MaxTen da marca Viapol.



Fonte: Autor, 2022.

A Viapol (2022) especifica que a TUF-STRAND MaxTen, é uma macrofibra sintética estrutural formada de copolímeros 100% virgens. É utilizada como opção em substituição das fibras de aço e das telas de aço CA-50 em uma vasta diversidade de utilizações como reforço estrutural.

Aplica-se a TUF-STRAND MaxTen para a mingramento de fissuras de retração plástica, para aprimorar a resistência à abrasão, impacto e a resistência à fadiga. As dosagens podem variar de 1,8 até 6,0 kg/m³, conforme as condições de cada projeto

(podendo chegar a 7,0 kg/m³ com perda de *slump*, de acordo com informações técnicas apresentadas na tabela 7 a seguir (VIAPOL, 2022):

Tabela 7. Informações da TUF-STRAND MaxTen (macrofibra sintética).

Fabricante	Viapol	
Material	Copolímeros 100% puro	
Dosagem Recomendada	1,8 até 6,0 kg / m ³	
Densidade	0,91 kg / m ³	
Comprimento	51 mm	
Fator de Forma	102	
Resistência à Tração	620-685 MPa	
Ponto de Fusão	160 °C	
Fabricante	Viapol	
Módulo de Elasticidade	9,0 GPa	
Ponto de Inflamação (ASTM D1929)	330 °C	
Condutividade Elétrica e Térmica	Baixa	
Cor	Cinza	
Absorção de Água	Desprezível	
Resistência ao Alcalis e Ácidos	Excelente	
Validade	36 meses a partir da data de fabricação, embalagens originais e perfeitas	
Embalagens	Embalagens Plásticas de 5 kg	
Normas	Aplica-se o Código Internacional (ICC), cumprindo algumas partes conforme Critérios de aceitação AC32 para fibras sintéticas.	Atende os requisitos da norma ASTM C1116, "Especificação padrão para Concreto reforçado com fibra e concreto projetado"

Fonte: Adaptado de Viapol, 2021.

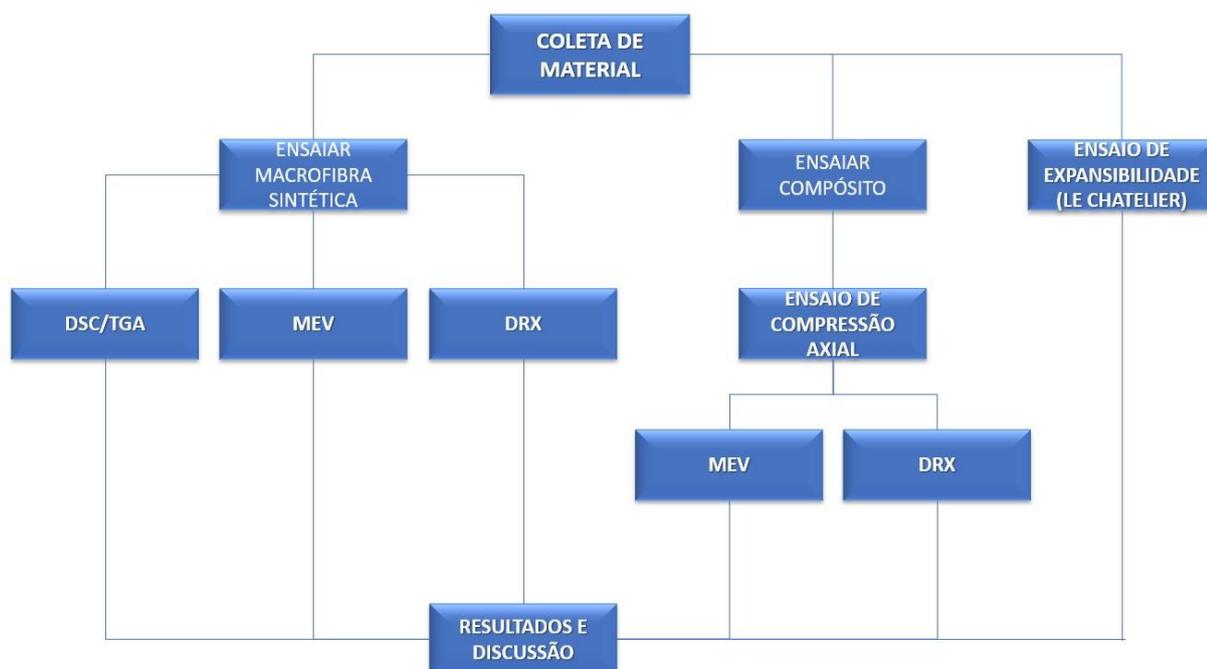
3.1.6 Criação do compósito

Para desenvolver o compósito em estudo, foram utilizados todos os materiais apresentados anteriormente, os quais foram misturados, utilizando-se betoneira da marca CSM, modelo CS150L.

3.2 MÉTODOS

Foram realizados três estudos nesta pesquisa, sendo um para a macrofibra sintética, um do compósito e outro da mistura do cimento utilizado com a macrofibra sintética conforme é apresentado na figura 5:

Figura 5. Organograma do projeto.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.1 Caracterização da macrofibra sintética

A macrofibra sintética foi caracterizada por meio de três ensaios, sendo:

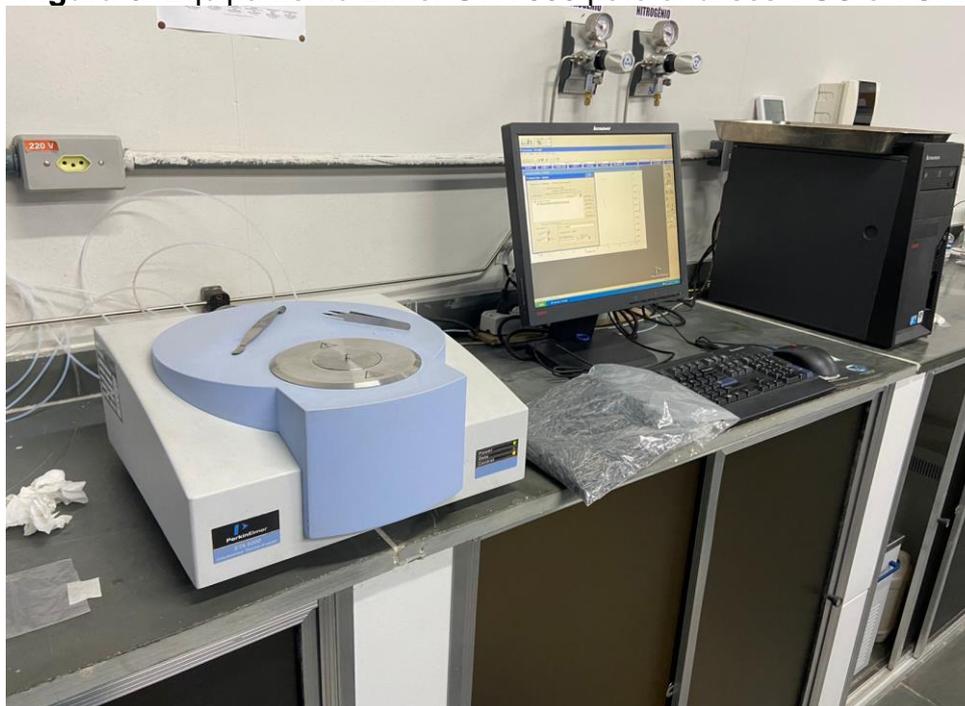
- Calorimetria exploratória diferencial (DSC);

- Análise termogravimétrica (TGA);
- Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- Análise de Difração de Raio-X (DRX).

3.2.1.1 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

Foram realizadas as análises de DSC no Laboratório da UniFOA (unidade de Três Poços), através do equipamento Elmer STA 6000 (figura 6), devidamente calibrado com as especificações do fabricante, numa faixa de temperatura de 20° à 950°C, perante fluxo regular de nitrogênio (50ml/min) e taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹. Os recipientes para amostragem, foram painéis de alumínio para sólidos com massa de amostra de aproximadamente 3,458 mg.

Figura 6. Equipamento Elmer STA 600 para análises DSC e TGA.



Fonte: Autor, 2022.

A macrofibra sintética empregada neste ensaio, foi do mesmo lote dos demais ensaios desta pesquisa.

3.2.1.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

As análises termogravimétricas (TGA), também foram executadas no Laboratório da UniFOA (unidade de Três Poços), utilizando o equipamento modelo STA-6000 da Perkin Elmer.

Para essa análise foi utilizada uma massa de 3,458 mg, porta amostra de platina e alumina como material de referência. As amostras foram aquecidas utilizando uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, sob fluxo constante de nitrogênio de $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e em uma faixa de temperaturas entre 20 e $950\text{ }^{\circ}\text{C}$. O equipamento foi devidamente calibrado conforme especificações do fabricante.

3.2.1.3 Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

O MEV utilizado foi o do Laboratório do UniFOA, da marca HITACHI, modelo TM 3000, com tensão do tubo de 15 kV e detector de elétrons secundários (figura 7). O mesmo pode fazer ampliações de até 30000X, é fundamental para observar sobre as características morfológicas e físicas das amostras.

Figura 7. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Autor, 2022.

Para esta pesquisa foram utilizados aumentos de 200X com tensão do tubo de 15 kV.

3.2.2 Caracterização do compósito

Para o concreto no estado fresco, foi executado o ensaio de abatimento de tronco de cone tomando como base a NBR NM 67 para determinação da consistência. No estado endurecido, realizou-se o ensaio para determinação de resistência mecânica a compressão NBR 5739/2007.

A resistência mecânica á compressão estimada no desenvolvimento dos traços de cada concreto foi de 25 e de 40 MPa.

3.2.2.1 Preparação dos CP's

Utilizou-se o espaço físico particular do autor próximo ao Laboratório da UniFOA (unidade de Três Poços) para preparar os corpos de prova. Foi usado o traço para Fck 25 e 40 MPa.

Foram feitos 5 corpos de prova para cada idade (7 e 28 dias), sem adição de macrofibra sintética e com adição em 3 proporções distintas conforme tabela 8, totalizando 80 corpos de prova.

Tabela 8 . Traço dos corpos de prova ensaiados.

Traço	Materiais	Quantidade	Traço	Materiais	Quantidade
Fck: 25 MPa	Cimento	362 kg/m ³	Fck: 40 MPa	Cimento	404 kg/m ³
	Brita 1	710 kg/m ³		Brita 1	687 kg/m ³
	Areia	135 kg/m ³		Areia	665 kg/m ³
	Aditivo Plastificante	2,68 l/m ³		Aditivo Plastificante	2,38 l/m ³
	Água	200 l/m ³		Água	200 l/m ³
Fck: 25 MPa + Macrofibra Sintética (2,25 kg/m ³)	Cimento	362 kg/m ³	Fck: 40 MPa + Macrofibra Sintética (2,25 kg/m ³)	Cimento	404 kg/m ³
	Brita 1	710 kg/m ³		Brita 1	687 kg/m ³
	Areia	135 kg/m ³		Areia	665 kg/m ³
	Aditivo Plastificante	2,68 l/m ³		Aditivo Plastificante	2,38 l/m ³
	Água	200 l/m ³		Água	200 l/m ³
	Macrofibra Sintética	2,25 kg/m ³		Macrofibra Sintética	2,25 kg/m ³
Fck: 25 MPa + Macrofibra Sintética (4,00 kg/m ³)	Cimento	362 kg/m ³	Fck: 40 MPa + Macrofibra Sintética (4,00 kg/m ³)	Cimento	404 kg/m ³
	Brita 1	710 kg/m ³		Brita 1	687 kg/m ³
	Areia	135 kg/m ³		Areia	665 kg/m ³
	Aditivo Plastificante	2,68 l/m ³		Aditivo Plastificante	2,38 l/m ³
	Água	200 l/m ³		Água	200 l/m ³
	Macrofibra Sintética	4,00 kg/m ³		Macrofibra Sintética	4,00 kg/m ³
Fck: 25 MPa	Cimento	362 kg/m ³	Fck: 40 MPa	Cimento	404 kg/m ³
	Brita 1	710 kg/m ³		Brita 1	687 kg/m ³
	Areia	135 kg/m ³		Areia	665 kg/m ³

+ Macrofibra Sintética (6,25 kg/m ³)	Aditivo Plastificante	2,68 l/m ³	+ Macrofibra Sintética (6,25 kg/m ³)	Aditivo Plastificante	2,38 l/m ³
	Água	200 l/m ³		Água	200 l/m ³
	Macrofibra Sintética	6,25 kg/m ³		Macrofibra Sintética	6,25 kg/m ³

Fonte: Autor, 2022.

As formas usadas para confeccionar os CP's, são de metal, lisas e cilíndricas com dimensão de 100 x 200 mm. Para facilitar a desmoldagem foi utilizado óleo vegetal.

3.2.2.2 Realização do método de abatimento (*Slump*)

Antes da realização do *Slump* foi feita limpeza, umedecimento interno do cone (molde metálico) e também da placa utilizada como apoio. Em seguida o cone foi posicionado sobre a placa de base.

Após a produção do concreto, foi extraído uma amostra para execução deste teste. No momento de execução o laboratorista posicionou os pés sobre as abas do cone para fixá-lo e adicionar a amostra de concreto obtido.

A adição do concreto decorreu em três camadas, cada uma com 1/3 da altura do molde, sendo que cada camada foi golpeada 25 vezes com o auxílio da haste de compactação, no qual, os golpes foram aplicados de forma distribuída e uniforme. Após preenchimento do molde, foi nivelada a superfície para dar início a desmoldagem.

O cone foi então içado verticalmente pelas alças, evitando-se vibrações para o concreto formar uma torre cônica por gravidade. Em seguida o cone foi colocado invertido ao lado da torre (figura 8).

A haste metálica usada na compactação, foi colocada horizontalmente sobre a parte superior do cone com sua projeção paralela em relação ao topo da torre. Com uma trena, foi medido a distância da linha inferior da haste até o topo da torre. O *slump* de 10+-2 cm foi encontrado em todas as medições (figura 8).

Figura 8. Realização do *Slump*.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.2.3 Adensamento

Foi efetuado o adensamento manual do concreto nas formas com uma haste. O preenchimento dos CP's se deu em duas etapas, entre uma e outra etapa, foi desferido 12 golpes com a haste ao preencher 50% do volume e outros 12 golpes a 100% do preenchimento, com a finalidade de melhorar a compactação do concreto no molde. Foi também utilizada uma colher de pedreiro para o último acabamento após transbordo do molde, conforme recomendado pela NBR 5738 (2015).

Abaixo na (figura 9) é possível visualizar alguns CP's executados para esta pesquisa:

Figura 9. Corpos de prova executados.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.2.4 Desmoldagem e cura

Após a moldagem dos CP's, esperou-se 24 horas em temperatura ambiente para desenformar e assim serem identificados conforme NBR 5763 (2003).

Posteriormente, os CP's foram imersos em um tanque com água (figura 10) a temperatura de $(23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ até o dia do ensaio de compressão axial de cada idade (7 e 28 dias).

Figura 10. Corpos de prova imersos em um tanque com água.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.3 Ensaio de compressão axial

Para a definição da resistência à compressão axial do concreto, foi utilizada a prensa do Laboratório do UniFOA, marca EMIC, modelo PC 150C, com capacidade máxima de 100 MPa e célula de carga de 15.000 toneladas, tomando como base de neoprene tanto em cima como embaixo do CP (figura 11). A resistência à compressão axial de cada corpo de prova foi determinada pela razão entre a força de compressão máxima resistida pelo CP e a área da seção transversal do CP de compressão, usando-se a equação a seguir:

$$f_c = F_c/A \quad (2)$$

onde:

f_c é a resistência a compressão axial, em MPa;

F_c é a força de compressão alcançada pelo CP, em kN;

A é a área de seção transversal do CP, em cm².

Figura 11. Prensa EMIC, modelo PC 150C, rompendo um CP.



Fonte: 2022.

3.2.4 Análise MEV

A análise dos CP's do compósito foi realizada utilizando o mesmo MEV usado na, análise da macrofibra sintética, que foi o do Laboratório do UniFOA (marca HITACHI, modelo TM 3000), com tensão do tubo de 15 kV e detector de elétrons secundários (figura 12). Este equipamento permite fazer ampliações de até 30000X, é importante para observar as características morfológicas e físicas dos materiais.

Para este trabalho foram utilizados aumentos de 200X com tensão do tubo de 15 kV. As imagens foram realizadas por meio das amostras retiradas dos CP's do ensaio de compressão axial.

Figura 12. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Autor, 2022.

3.2.5 Análise de Difração de Raio-X (DRX)

Assim como o MEV, o DRX foi realizado com amostras dos CP's usados no ensaio de compressão axial. As amostras foram designadas para a realização da difratometria de Raios X em um difratômetro da marca Shimadzu modelo XRD 6100 (figura 13), localizado no Laboratório da UniFOA, com tensão de 40 kV, fonte de radiação de cobre, corrente de 30 mA, com velocidade de 2,0 °/min, sob o ângulo de varredura de 10° e 80°.

Figura 13. Difratorômetro modelo XRD 6100 da marca Shimadzu.

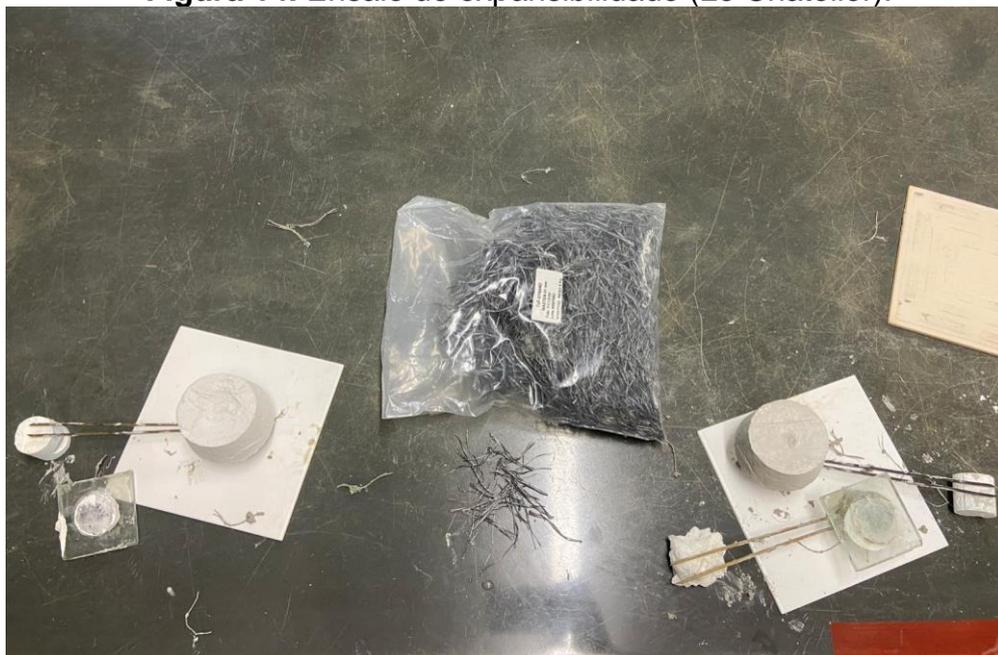


Fonte: Autor, 2022.

3.2.6 Ensaio de expansibilidade (Le Chatelier)

Também no Laboratório da UniFOA, foi medida a expansibilidade da macrofibra sintética com o cimento *Portland* pelo método das agulhas de Le Chatelier (figura 14) conforme NBR 11582 (1991).

Figura 14. Ensaio de expansibilidade (Le Chatelier).



Fonte: Autor, 2022.

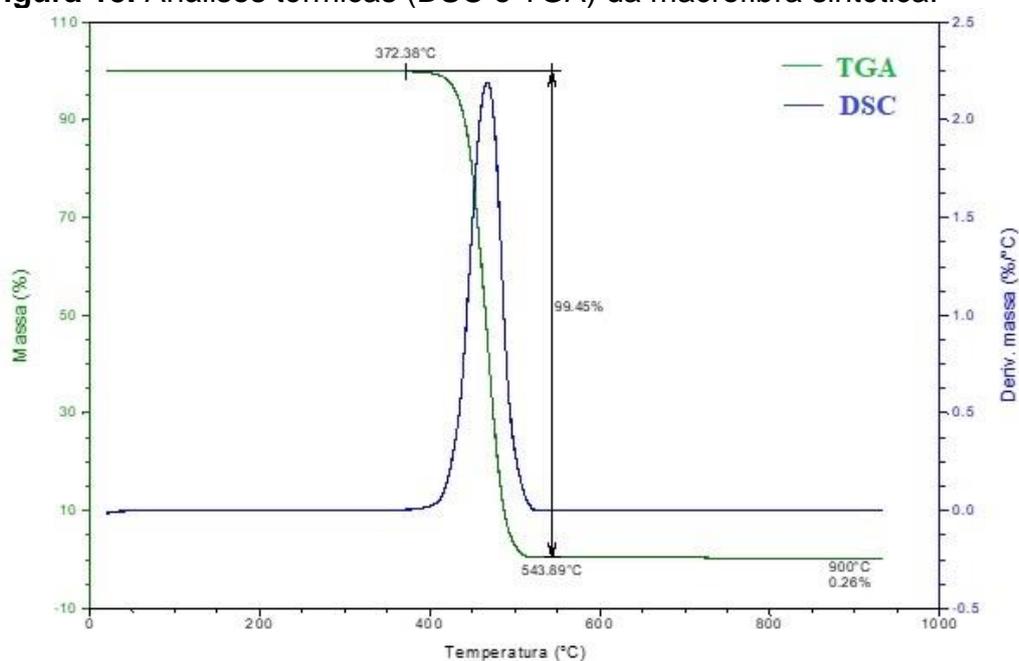
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MACROFIBRA SINTÉTICA

4.1.1 Análises térmicas (DSC e TGA)

As curvas termogravimétricas da macrofibra sintéticas obtidas com razão de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, no intervalo de 20°C à 950°C , com temperatura ambiente de 25°C e fluxo regular de nitrogênio de $50\text{ml}/\text{min}$, baseado na norma ASTM E2550, é mostrada na figura 15 a seguir:

Figura 15. Análises térmicas (DSC e TGA) da macrofibra sintética.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 15 apresenta as curvas de TGA/DSC da amostra macrofibra sintética com massa inicial de $3,458\text{mg}$. No eixo Y da esquerda (curva em verde) é mostrada a curva de TGA, ou seja, de variação de massa em função da temperatura. No eixo da Y da direita (curva em azul) é mostrada a primeira derivada da variação de massa em função da temperatura. Pode-se observar que o perfil térmico da amostra apresenta uma única perda de massa que pode ser comprovado pela presença de apenas um pico na derivada (DSC). Desta forma, pode-se afirmar que a amostra macrofibra sintética apresenta estabilidade térmica até 372°C quando então começa

a se decompor. Verifica-se que a partir desta temperatura a amostra perde quase que a totalidade de sua massa restando um resíduo de 0,26 % em 900°C.

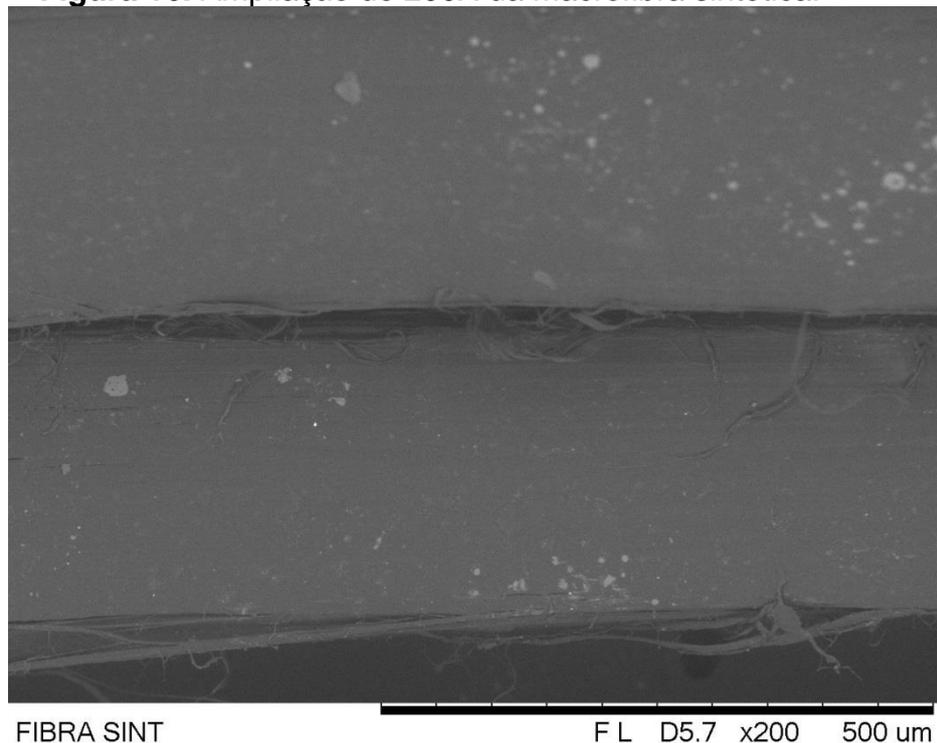
A temperatura de estabilidade térmica da macrofibra sintética conforme mencionado, é de 310°C que é próxima a encontrada por Lopes (2016), que fez o este estudo com compostos de PEAD reforçados com fibras da casca de noz macadâmia.

4.1.2 Análise MEV da macrofibra sintética

As amostras utilizadas nesta análise, foi uma amostragem retirada do mesmo lote de macrofibra sintética para os demais ensaios desta pesquisa.

As análises MEV da macrofibra sintética (figura 16) foi utilizada para caracterizar a morfologia e entender como a mesma se apresenta na análise MEV do compósito com macrofibra sintética.

Figura 16. Ampliação de 200X da macrofibra sintética.



Fonte: Autor, 2022.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

4.2.1 Ensaio de resistência a compressão

Os resultados apresentados nas tabelas 9 e 10, representam as idades dos CP's testados aos 7 e 28 dias, tendo como parâmetro de comparação o resultado padrão (sem adição de macrofibra sintética).

4.2.1.1 Resultados para sete e vinte e oito dias

A tabela 9 e 10, apresenta os resultados do concreto de Fck 25 e 40 MPa aos 7 e 28 dias respectivamente:

Na tabela 9 e 10, tem-se os resultados

Tabela 9. Resultados da compressão axial dos CP's, Fck 25 e 40 MPa aos 7 dias.

Fck (MPa)	Identificação: kg/m ³ de Marcofibra Sintética no Concreto	Média (MPa)	Coefficiente de Variação(%)
25	0,0	16,53	4,85
	2,25	17,13	4,04
	4,0	18,94	2,86
	6,25	18,96	2,60
40	0,0	20,49	7,83
	2,25	25,47	14,54
	4,0	22,10	12,65
	6,25	22,90	10,89

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 10. Resultados dos rompimentos dos CP's, Fck 25 e 40 MPa aos 28 dias.

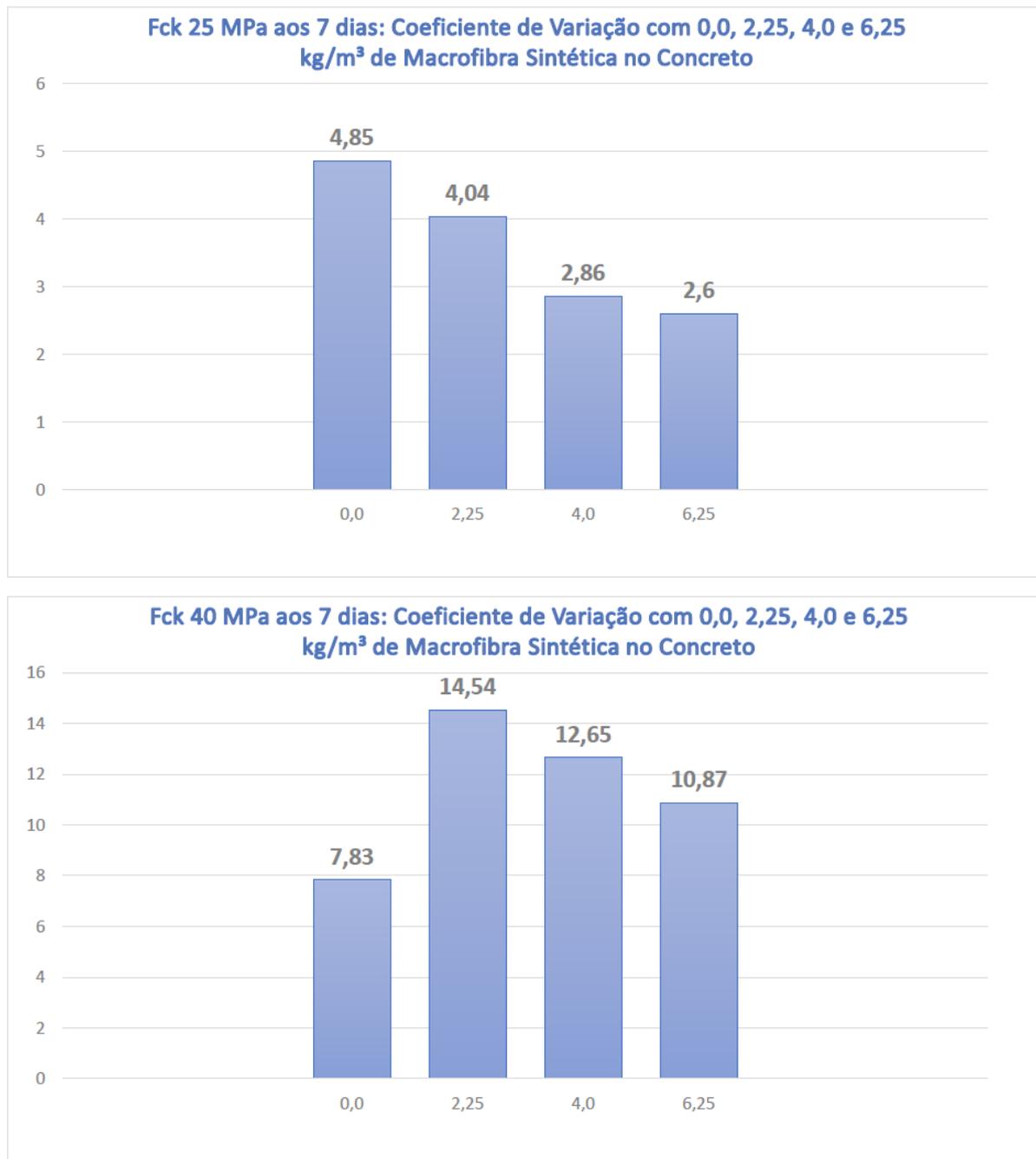
Fck (MPa)	Identificação: kg/m ³ de Marcofibra Sintética no Concreto	Média (MPa)	Coefficiente de Variação(%)
25	0,0	27,29	4,95
	2,25	26,41	5,76
	4,0	25,41	6,49
	6,25	25,56	9,72
40	0,0	35,86	2,40
	2,25	36,45	6,02
	4,0	35,31	8,93
	6,25	36,74	10,29

Fonte: Autor, 2022.

Ao analisar a média das amostras, observou-se que as amostras do Fck 25 MPa, lograram bom resultado em todas as proporções aos 28 dias (tabela 10). Assim, foi possível chegar ao resultado esperado do traço.

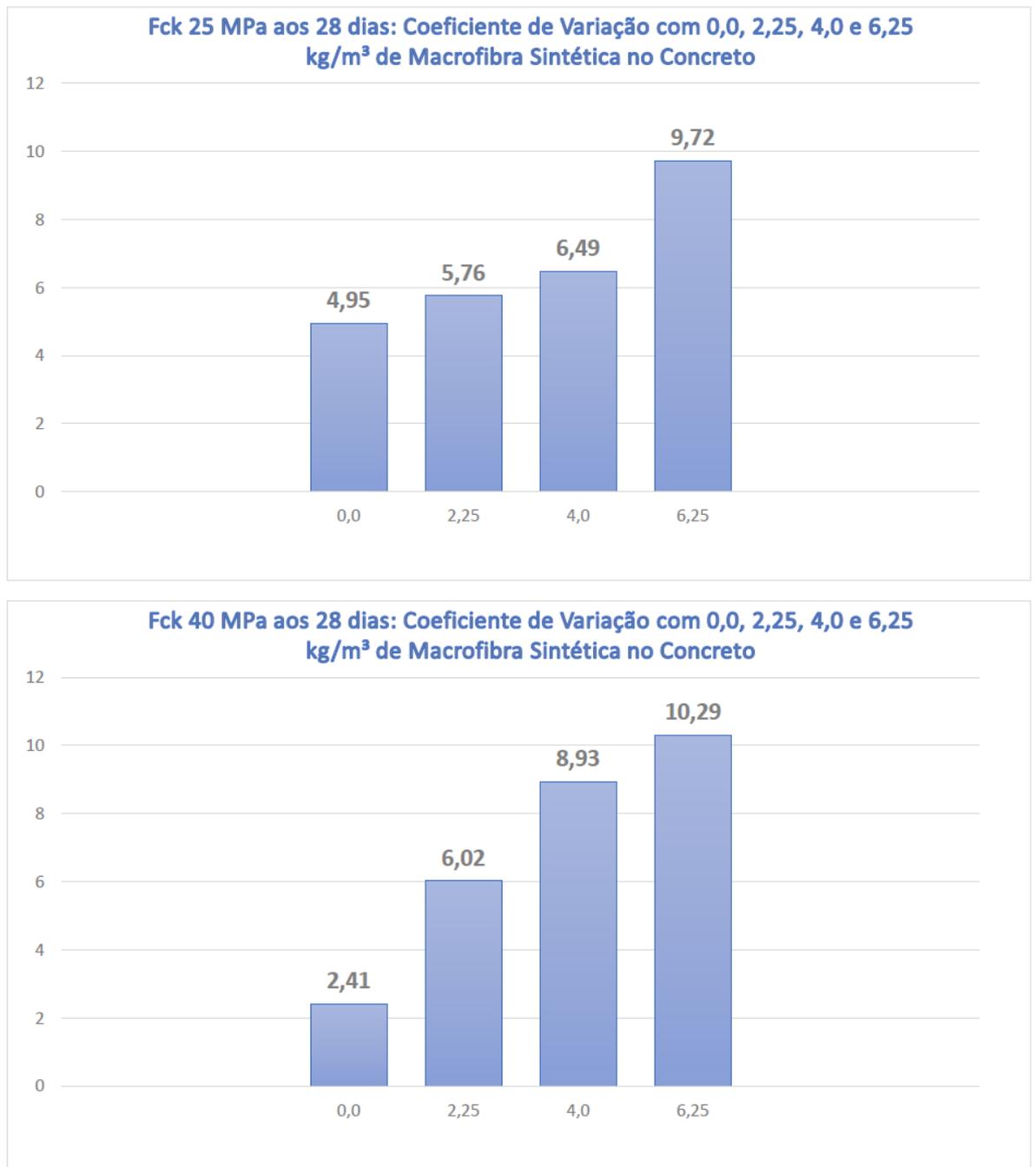
Quanto a resistência do Fck 40 MPa, houve uma variação na média das amostras de 35,31 à 36,74 MPa também aos 28 dias. Porém, segundo a NBR 5739/07, a resistência é crescente até os 63 dias de idade, com grandes chances de chegar aos 40 MPa.

Para análise do coeficiente de variação de ambas as resistências, os resultados estão apresentados nos gráficos aos 7 e aos 28 dias. Na figura 17 pode-se observar o comparativo do coeficiente de variação de ambas as resistências aos 7 dias nas quatro proporções deste estudo.

Figura 17: Coeficiente de variação aos 7 dias das amostras.

Fonte: Autor, 2022.

A figura 18 apresenta o coeficiente de variação de todas as amostras aos 28 dias.

Figura 18. Coeficiente de variação aos 28 dias das amostras.

Fonte: Autor, 2022.

Os resultados observados pelos coeficiente de variação, em comparação com a amostra padrão (0,0 kg/m³ de adição de macrofibra sintética), foi possível observar que aos 28 dias, ele é menor do que em qualquer outra proporção.

Tais resultados ocorreram devido ao fato de que o compósito não foi misturado em caminhão betoneira de acordo com a recomendação da Viapol (2022). As

amostragens do concreto com macrofibra sintética foram mais elevadas, se tratando de coeficiente de variação.

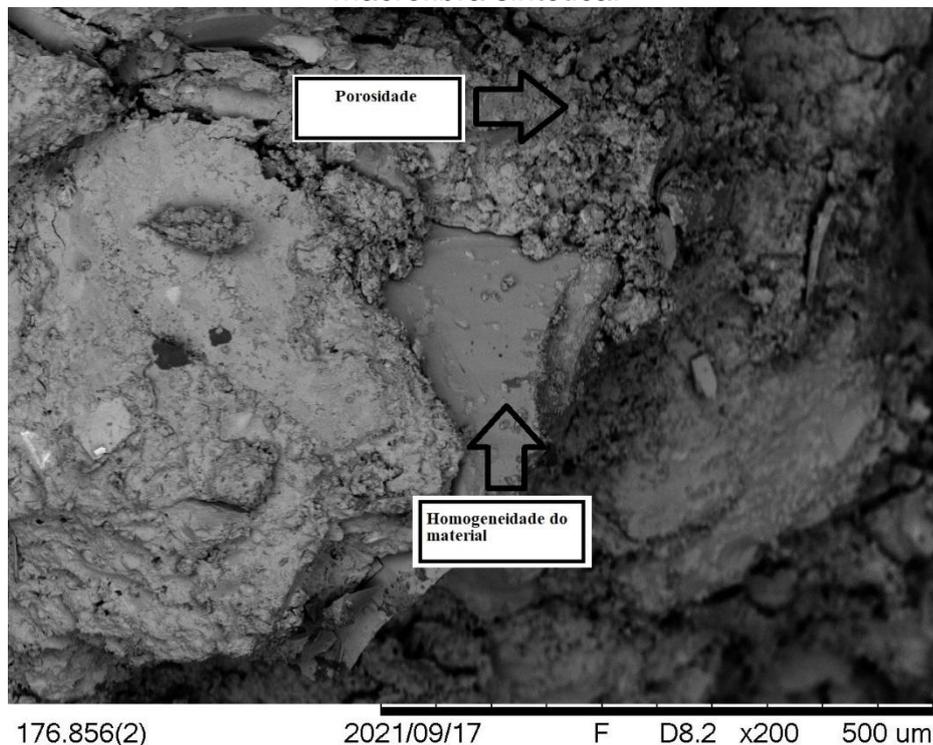
Os resultados do coeficiente de variação amostral desse estudo, são semelhantes aos obtidos por Fernandes (2018) que ao misturar concreto com fibra de coco, uma vez que quanto maior for a dosagem da fibra, maior será a variação do coeficiente de variação amostral.

4.2.2 Análise MEV do compósito

Nessa análise, as amostras dos corpos de prova utilizadas, foram um dos fragmentos utilizados, do ensaio anterior desta pesquisa, ou seja, após o ensaio de compressão axial de 28 dias de idade.

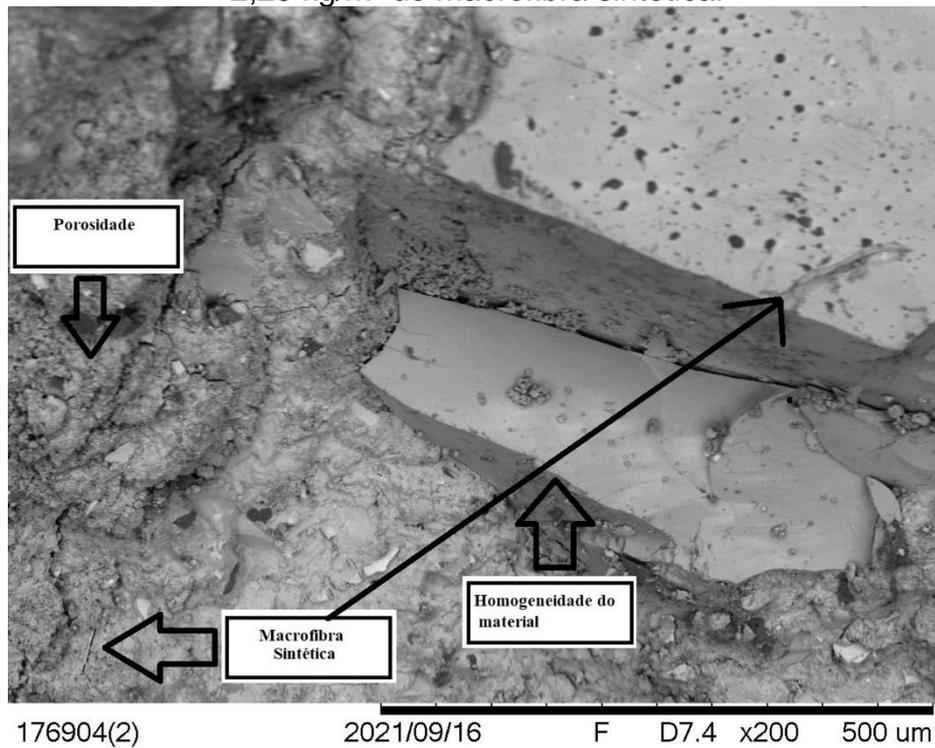
Com isso, foi possível averiguar a comparação da morfologia do concreto padrão (sem adição de macrofibra sintética), com as figuras 19, 20, e 21.

Figura 19. Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova sem a utilização de macrofibra sintética.



Fonte: Autor, 2022.

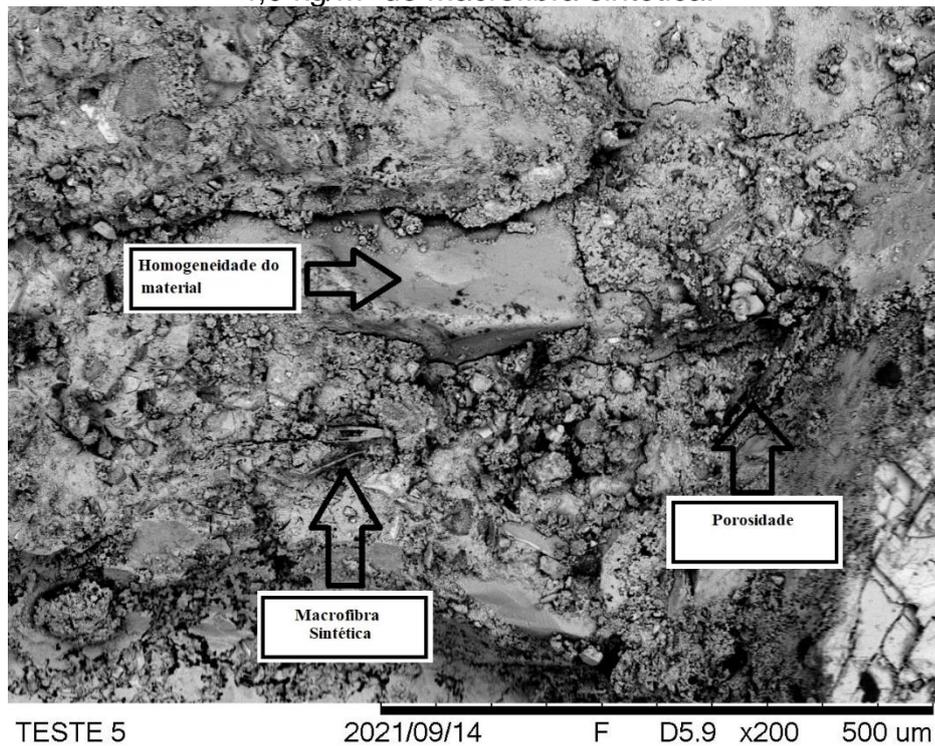
Figura 20. Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova com a utilização de 2,25 kg/m³ de macrofibra sintética.



Fonte: Autor, 2022.

Com as dosagens de 2,25 kg/m³ (figura 20) e 4,0 kg/m³ (figura 21) de macrofibra sintética, observa-SE que a fibra se encontra homogeneizada por todo o material, que possivelmente confirma a dosagem típica do fabricante que informou ser de 1,80 à 6,00 kg/m³, pois a dosagem utilizada foi de 2,25 e 4,5 kg/m³ respectivamente.

Figura 21. Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova com a utilização de 4,0 kg/m³ de macrofibra sintética.

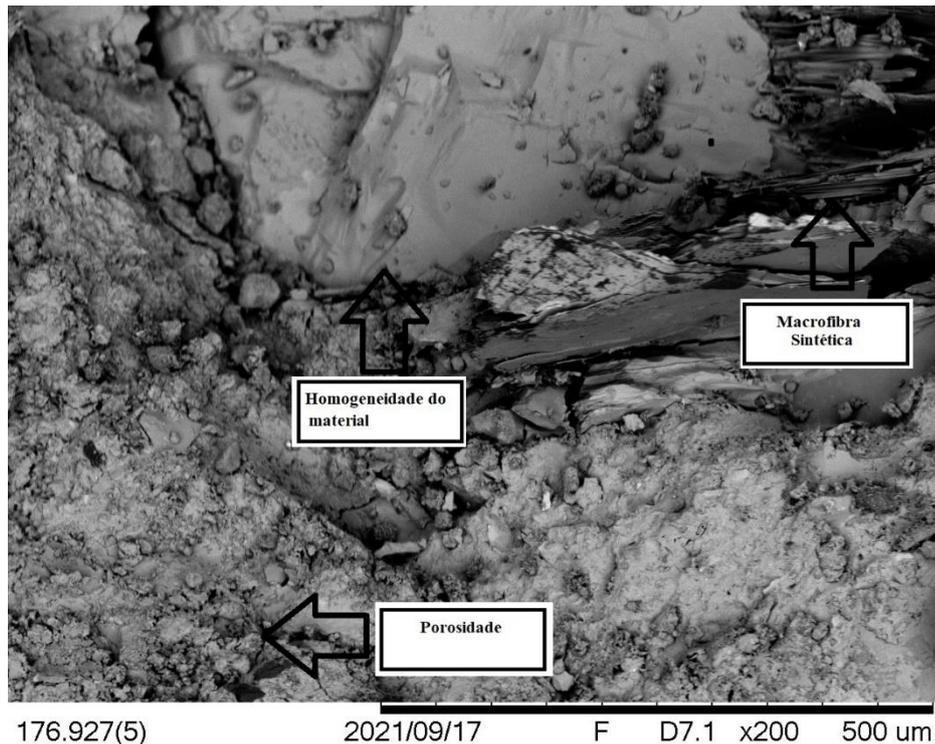


Fonte: Autor, 2022.

Já na figura 22, foi utilizada uma dosagem de 6,25 kg/m³, superando a dosagem típica proposta pelo fabricante Viapol. Ficou claro que devido a quantidade de macrofibra sintética na amostra, a mesma obteve uma parcial segregação ou não homogeneização com os outros materiais do compósito na análise MEV. Fato que pode ter contribuído, foi que a mistura não foi feita através do caminhão betoneira (recomendação do fabricante).

Os resultados encontrados, são semelhantes aos do Francisco (2017), que encontrou na análise MEV, a maior visibilidade de segregação na amostra de maior percentual de resíduos no concreto, muito provável ser da infelicidade ao operar a betoneira.

Figura 22. Ampliação de 200X do fragmento do corpo de prova com a utilização de 6,25 kg/m³ de macrofibra sintética.

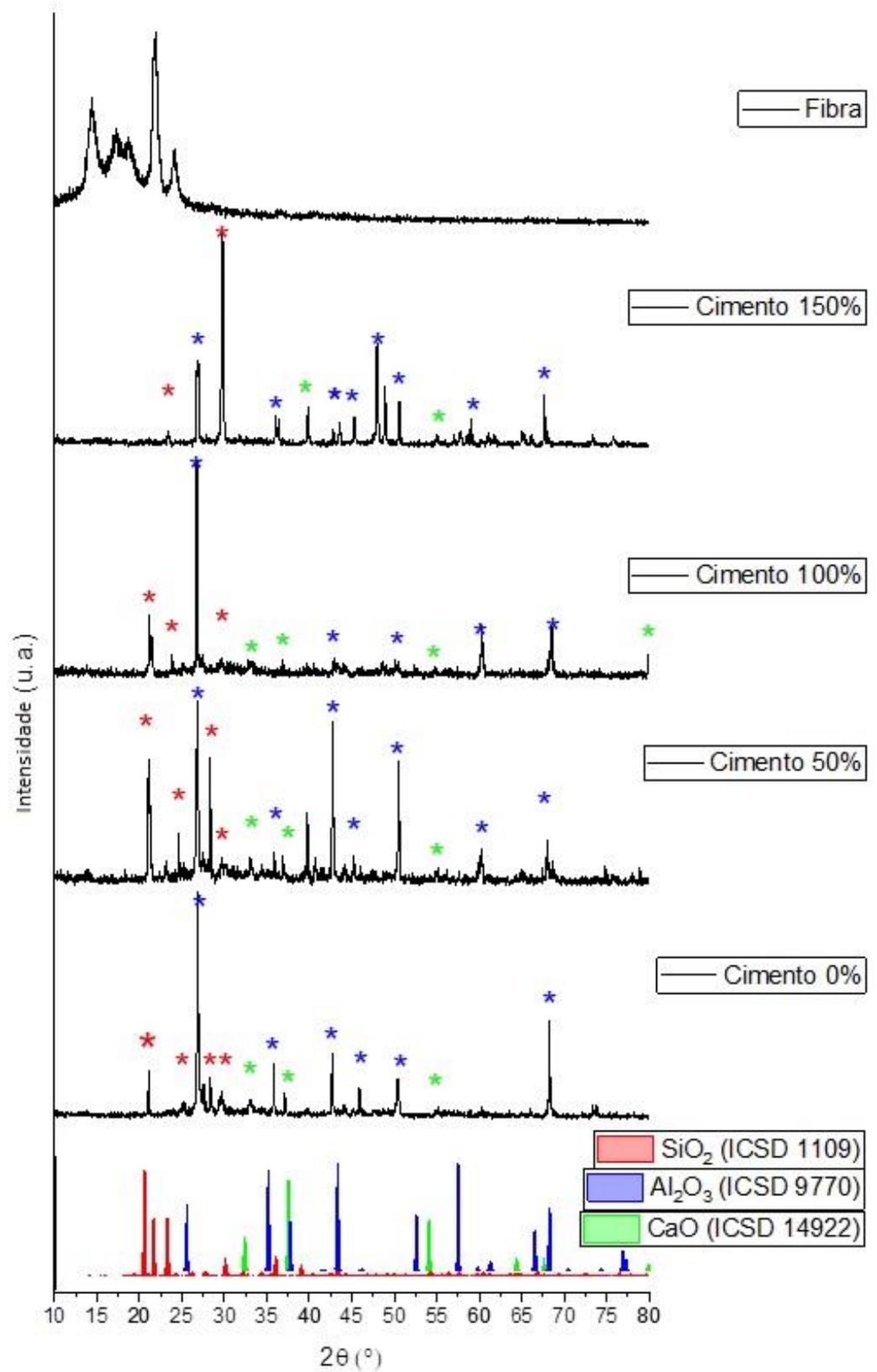


Fonte: Autor, 2022.

4.2.3 Difração de raios-X

A figura 23 mostra os difratogramas de raios X das amostras de concreto com diferentes quantidades de macrofibra sintética em sua estrutura. Sendo 0% para nenhuma fibra inserida no corpo de prova evidenciando nosso corpo de prova referência, além de 50%, 100% e 150% em volume de acréscimo de fibra polimérica respectivamente nos CP's fraturados. Os picos cristalinos encontrados referem-se a presença de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e Cal (CaO), elementos químicos comumente encontrados em compósitos cerâmicos de concreto. Identificadas a presença de sílica com diferentes intensidades de picos cristalinos. A fibra polimérica apresenta praticamente todos os seus picos antes de 25° , sendo então sua influência de intensidade ocorrendo nessa região dos difratogramas das composições estudadas, contudo, seus principais picos coincidentes nessa região são compatíveis com picos de SiO_2 . Dessa forma, esperava-se que estes picos tivessem acréscimo de intensidade com o aumento da proporção de fibra, porém, não houve tendência clara de tal comportamento, muito provavelmente devido a heterogeneidade do compósito e a deformações decorrente dos testes de compressão realizadas anteriormente, o que altera as intensidades e posicionamento dos picos encontrados na fibra polimérica.

Figura 23. Difratomogramas de raios X das amostras de concreto, com variados teores de macrofibra sintética.

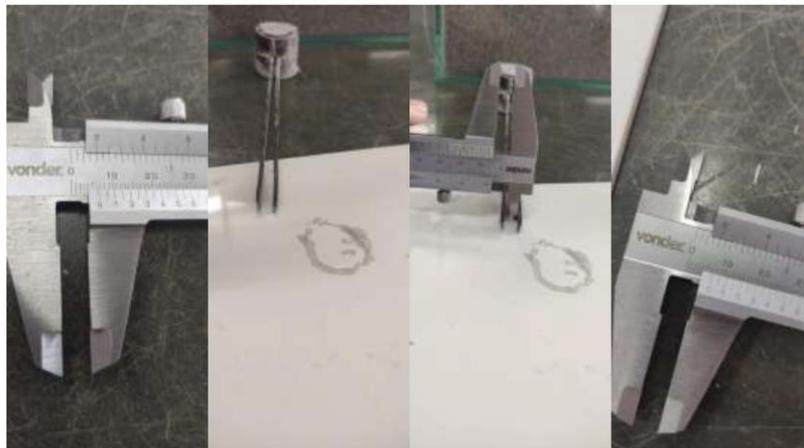


Fonte: Autor, 2022.

4.2.4 Le Chatelier (ensaio de expansibilidade)

Conforme tabela 6 exibida anteriormente, a expansibilidade do CP III-40 RS chega a ser menor ou igual 5,0 mm segundo o fabricante CSN (2022) e com a macrofibra sintética em todas as proporções utilizadas no compósito desse estudo, ela se manteve, chegando no máximo aos 4,0 mm após o ensaio do método das agulhas de Le Chatelier (figura 24) conforme NBR 11582 (1991).

Figura 24. Ensaio de expansibilidade da macrofibra sintética com o cimento *Portland*.



Fonte: Autor, 2022.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que, foi possível analisar as características do concreto reforçado com macrofibra sintética e visto que o mesmo não sofreu algum tipo de anomalia.

Apresentou-se as vantagens técnicas e facilidade na execução de obra usando a macrofibra sintética no concreto com aplicação em piso industrial. Como: ganho de trabalhabilidade na aplicação, mitigação de erros de execução, rapidez para a execução (ganho de tempo), se tornando alternativa as telas de aço para o concreto armado.

A viabilidade de desempenho de todas as proporções deste estudo foram vistas nas caracterizações como satisfatória.

Pelos resultados obtidos nos laboratórios, as análises térmicas da macrofibra sintéticas são inertes até 310°C. Já no compósito concluiu-se que não aconteceu perda de resistência mecânica com a adição deste produto nas três proporções estudadas para o Fck 25 MPa, já no Fck 40 MPa, houve uma variação na média das amostras, sendo de 35,31 à 36,74 MPa aos 28 dias, inclusive no padrão (sem adição de macrofibra sintética), mas conforme a NBR 5739/07, a resistência é crescente, devendo ser acompanhada até os 63 dias.

As amostras que receberam a dosagem de 6,25 kg/m³ deste material, através da análise MEV, ficou claro que o concreto não ficou homogeneizado, diferentemente das demais amostras com dosagens inferiores. Isso é justificado pelo fato da dosagem ter sido superior a recomendação típica do fabricante e também pela betoneira utilizada ter sido a CSM, modelo 150L com rotação de 34 rpm e não um caminhão betoneira que recebe o concreto dos misturadores da usina e mantém ao transportar até a obra com rotação de 2 a 3 rpm. O fabricante Viapol (2022) recomenda a utilização do produto através do concreto usinado.

A macrofibra sintética não possui expansibilidade como foi visto no ensaio de Le Chatelier, sendo seus resultados em todas as proporções inferiores a 5,0 mm como já é do cimento *Portland* utilizado nesta pesquisa, segundo o próprio fabricante (CSN, 2022).

O compósito desenvolvido desta pesquisa apresentou resultados técnicos e científicos satisfatórios, tornando-se viável a adição de macrofibra sintética como alternativa para substituição de armaduras pelos calculistas estruturais.

Assim sendo, esse trabalho contribuiu para redução da dúvida em utilizar este produto e afirma a existência de alternativas construtivas para esta finalidade.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Produzir concreto com outras proporções de macrofibra sintética e em outras idades;
- Executar o mesmo traço do Fck 40 MPa e romper aos 63 dias de idade para verificar o êxito de atingir ou não a resistência;
- Desenvolver um estudo com outro tipo de fibra estrutural (fibra metálica);
- Repetir a pesquisa utilizando caminhão betoneira.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. Guia **Básico de utilização do cimento portland (BT-106)**. 7ª. Ed. São Paulo [s.n.], 2002. 28 p. Disponível em <<https://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/11/28-Guia-basico-de-utilizacao-do-cimento-portland.pdf>>. Acesso em 10 nov. 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro 2006.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739. Concreto – Ensaio de compreensão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11.582. Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier**. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11.768. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland: requisitos**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9479** Esta Norma fixa as condições exigíveis de câmaras úmidas e tanques de cura utilizados nos ensaios de cimento e concreto. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9935 Agregados, terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBRNM-ISO3310-1 Peneiras - Requisitos técnicos e verificação-parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5763**. Água – determinação do oxigênio. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11768**. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland-Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

AKCELRUD, L. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. Editora Manole Ltda, São Paulo, 2007.

ALMEIDA, D. H. **Adição de resíduo de louça sanitária como agregado em diferentes formulações de concreto**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Alfenas, 2017.

BARREDA, M., IAIANI, C., SOTA, J. D. **Hormigon reforzado con fibras de polopropileno: tramo experimental de un pavimento de hormigon**. In: IV Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, 2000, Neuquén. Anais. Viena: INTERNATIONAL Atomic Energy Agency (IAEA), 2000. P. 1145-1150.

BOTELHO, T. E. T.; JUNIOR, N. S. **REVITALIZAÇÃO E INOVAÇÕES NO PROJETO DE AUTOMAÇÃO DA FÁBRICA DE CIMENTO DA HOLCIM EM PEDRO LEOPOLDO - MG**. *16º Seminário de Automação e TI Industrial*, Rio de Janeiro, 2012, p. 255-261.

BOTELHO, N. H. C.; FERRAZ, N. N. **Concreto Armado – eu te amo – vai para a obra**. 6ª ed. Editora Blucher, 2016.

CALLISTER, JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CANEVAROLO JR. S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo. Artliber editora, 2003.

CARVALHO, J. D. N. D. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. *Revista Tecnológica*, Maringá, Outubro 2008. p. 19-28.

CAVALCANTI, E. **Água e cidadania**: a privatização dos recursos hídricos e os atores sociais. Revista Jurídica, v. 3, n.36, 2014.

CAVALIERI, I. **Reciclagem de Polímeros**. Disponível em <http://www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infol=1167&sid=8..> Acesso em: 03 dez. 2021.

CHODOUNSKY, M. A., VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto**: aspectos teóricos e construtivos. São Paulo: Reggenza, 2007.

COSTA, F. B. P. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com fibras**. 2015. 169 f. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Rio Grande do Sul.

CUNHA, J. C. L. **Traços de concreto sem função estrutural com adição de entulho**. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais). Centro Universitário de Volta Redonda, 2015, 63 fl.

CRUZ, D. R. **Execução de piso industrial de concreto com a utilização de fibra sintética**.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG. 54 fl. 2015. Disponível em <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AGUNNL/1/monografia_ufmg_abril_15.pdf>. Acesso em 10 jan. 2022.

DYER, T. **A durabilidade do concreto**. 1ª edição, ed. Ciência Moderna 2020).

EMILIO, R. **Concreto de cimento Portland com adição de pseudoboemita**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia). Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2018, 71 fl. Disponível em <<http://tede.mackenzie.br/jspui/handle/tede/3797#preview-link0>>. Acesso em 10 ago. 2021.

FALCÃO BAUER L. A. **Materiais de Construção**. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ltda. 6º Ed., 2019.

FERNANDES, F. **Engenharia de avaliação método científico**. Uberlândia, 2018.

FIGUEIREDO, A. D., AGUAFO A., FLUENTE, A. D., EXCARIZ, R. et al. **Fibras Plásticas como reforço de de tubos de concreto. Parte 1: Caracterização Tecnológica.** In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012. Maceió. Anais., São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2012.

FRANCISCO, M. O. V. **Estudo da utilização de resíduos em concretos para aplicações não estruturais.** Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais). Centro Universitário de Volta Redonda, 2017, 66 f. Disponível em <https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/marco-oliveira-vargas-francisco.pdf>. Acesso em 10 out; 2021.

FUSCO, P. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.** São Paulo: Pini, 2008.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 2002.

HELENE, P; ISAIA, G.C; TUTIKIAN, B.F. **Concreto de Alto e Ultra Alto Desempenho.** In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, Cap 36, 2011.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland.** In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.** 3ª ed. Revisada e Atualizada. São Paulo: Ibracon, 2017, v.II, p. 970-1005. ISBN.: 978-85-98576-27-5

HELENE, P.; TURZIAN P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo. Pini, 1995.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese (Doutorado em Engenharia), 318 fls., 2008. Universidade de São Paulo, Doutorado em Engenharia, São Paulo, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19082008-172648/publico/TESE_DOUTORADO_JUAREZ_HOPPE_FILHO.pdf. Acesso em: 02 nov. 2021.

IBRACON. Instituto Brasileiro do Concreto. **Concreto: material construtivo mais consumido no mundo.** **Revista Concreto & Construções.** 2009. Disponível em <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em 27 de fevereiro de 2022.

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo. IBRACOM, 2005.

LOPES, G. S. da. **Produção e caracterização de compósitos de pead reforçados com fibras da casca de noz macadâmia**. Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, 75 fl. 2016. Disponível em <https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/gabrie-lla-silva-lopes.pdf>. Acesso em 10 ou. 2021.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde, 1. ed. - São Paulo: Artiliber Editora, 2005.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 201 fl. Tese Doutorado em engenharia civil. Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e Materiais. São Paulo: Editora Ibracon, 2008. p. 12-14, 121, 122.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete**: microstructure, properties and materials. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 5º ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2º ed. São Paulo: Pini, 2015.

PINHO, I., GODINHO, D.S.S. **Análise do comportamento termomecânico do concreto reforçado com fibras de aço**. Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Disponível em ww.repositorio.unesc.net/handle/1/7512. Acesso em 10 jun. 2022.

ROCHA, R. M. **Análise comparativa de resistência de peças em concreto com adição de fibras de vidro e de polipropileno**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018 64 fl. Disponível em <https://bibliotecadigital.unifor.br:21015/xmlui/bitstream/handle/123456789/806/TCC_RobertaMartinsRocha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 10 abr. 2022.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A influência da Adição de Fibra de Polipropileno nas Propriedade dos Concretos para Pisos e Pavimentos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, 2006, Belo Horizonte.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

VALVERDE, F. M. **Agregados para construção civil. Balanço mineral brasileiro.** São Paulo, 2001.

VIAPOL. **UF-STRAND Maxten.** 2022. Disponível em <<http://www.viapol.com.br/produtos/aditivos-e-adi%C3%A7%C3%B5es/fibras/tuf-strand-max-ten/>>. Acesso em 20 mar 2022.