



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
FACULDADE DE TECNOLOGIA

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



SAMUEL CAMELI FERNANDES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE
CONCRETOS REFORÇADOS COM MICROFIBRA DE VIDRO E
MICROFIBRA DE POLIPROPILENO**

MANAUS / AM

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
FACULDADE DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



SAMUEL CAMELI FERNANDES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE
CONCRETOS REFORÇADOS COM MICROFIBRA DE VIDRO E
MICROFIBRA DE POLIPROPILENO**

Orientador: Prof^o. Dr. Jean Carlos Silva Andrade

Coorientador: Prof^o. Dr. Laerte Melo Barros

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFAM).

Linha de pesquisa: Propriedades Físicas, Mecânicas e Modelagem de Materiais

Área de concentração: Materiais compósitos

MANAUS / AM

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

F363a Fernandes, Samuel Cameli
Avaliação do comportamento mecânico de misturas de concretos reforçados com microfibra de vidro e microfibra de polipropileno / Samuel Cameli Fernandes. 2023
113 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Jean Carlos Silva
Coorientador: Laerte Melo
Barros

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.

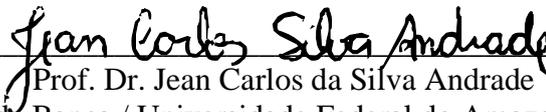
1. Concreto. 2. Resistência mecânica. 3. Microfibras de vidro. 4. Microfibras de polipropileno. I. Andrade, Jean Carlos Silva. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

SAMUEL CAMELI FERNANDES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE
CONCRETOS REFORÇADOS COM MICROFIBRA DE VIDRO E
MICROFIBRA DE POLIPROPILENO**

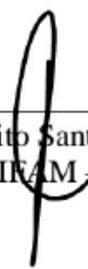
Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFAM).

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jean Carlos da Silva Andrade
Presidente da Banca / Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Prof^ª Dra. Samantha Pinheiro Paiva
Membro externo / Universidade do Estado do Amazonas - UEA


Prof^ª Dr. Carlos Benedito Santana da Silva Soares
Membro externo / UFAM - CMC/SIPAM

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família. Com destaque aos meus pais, Euclides Fernandes e Raline Cameli por me ensinarem o valor da formação através da educação e às minhas irmãs Natália e Estela.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação tem a contribuição, com formas diferentes, de várias pessoas, familiares, amigos, colegas e professores, que eu prefiro não citá-los nominalmente, exceção a orientadores e família, pois cometeria, certamente, várias injustiças de tantos nomes em tão poucas linhas. Mas, apesar de não citados gostaria de agradecer a todas as pessoas que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade por ter aceitado o desafio da orientação, obrigado pelo acolhimento, confiança e profissionalismo. Ao co-orientador Prof. Dr. Laerte Melo Barros pelos ensinamentos, conversas, paciência, encorajamento e por me ensinar a nunca desistir. Aos referidos professores minha admiração e agradecimentos.

Agradeço aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais (PPGCEM/UFAM).

Aos docentes e laboratoristas dos Laboratórios de Materiais de Construção, Estudo de Dosagem, Resistência dos Materiais e Laboratório da Central Analítica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM/CMC). Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica (LTMOE), subordinado a Coordenação de Pesquisas e Acompanhamentos das Atividades Finalísticas – CPAF do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

A empresa Nova Infra Fibras pelo fornecimento das microfibras de vidro e polipropileno na pessoa da Sr^a. Andreia.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Agência de Fomento à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM).

Agradecer a minha família, principalmente aos meus pais Euclides e Raline, por sempre fazerem o melhor, o possível e o impossível para que eu encontre o meu melhor caminho através do trabalho e da educação, assim como, às minhas irmãs Natália e Estela. Vocês são a minha base e inspiração.

Não posso deixar de mencionar aqueles que fraternalmente me acolheram e me ajudaram a finalizar mais esta importante conquista Terezinha, Abner, Óllin, Sandro e Sebastian (sempre vivo) minha segunda família. Obrigado por me proporcionarem suporte, carinho e puxões de orelha.

Agradeço à Deus, Senhor de todas as coisas, que nos possibilita sabedoria para entender que a imaginação e a memória muitas vezes se confundem, mas que o pensamento crítico e o conhecimento são fundamentais para vivermos em harmonia.

RESUMO

Este estudo investiga a comparação de concreto convencional com concreto reforçado com microfibras nas idades de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias. A fim de aumentar a ductilidade e resistência mecânica do concreto frente às cargas de compressão, tração e flexão, pode-se implementar a adição de microfibras para reduzir os problemas associados à fragilidade do concreto. A pesquisa avaliou a trabalhabilidade dos concretos em estado fresco, características físicas, químicas e morfológicas por DRX e MEV/EDS, as propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração e resistência a flexão reforçados com microfibra de vidro e microfibra de polipropileno. Considerando a quantidade de fibra e cimento usados, foram preparados corpos de prova de compressão e tração com dimensões de (10×20) cm e corpos de prova de viga de flexão com dimensões de (50×15×15) cm. As microfibras apresentam diâmetro e comprimento médios de 18 μm e (12 a 15) mm, respectivamente, demonstrados em ensaio de microscopia. Os resultados dos dados de difração de raios X confirmam os dados de microscopia eletrônica quanto a composição das misturas com microfibra de vidro e microfibra de polipropileno. Os resultados experimentais indicaram que a trabalhabilidade foi altamente influenciada pelas microfibras no concreto, independentemente do tipo. As adições diminuíram a trabalhabilidade da mistura cimentícia em maior proporção nas microfibras de polipropileno em 38%. Os dois tipos de fibra melhoraram a resistência à compressão em 5,68% para MPV e 7,95% para MFPP; resistência à flexão em 15,67% para MFV e 17,65% para MFPP; resistência à tração em 7,50% para MFV e 20% para MFPP aos 90 dias. As adições de microfibras de polipropileno aumentaram as resistências mecânicas de forma mais eficaz do que as microfibras de vidro. As propriedades do concreto convencional foram melhoradas com a adição das fibras justificando-se a viabilidade das mesmas.

Palavras-chave: Concreto, resistência mecânica, microfibras de vidro, microfibras de polipropileno.

ABSTRACT

This study investigates the comparison of conventional concrete with microfiber reinforced concrete at the ages of 7, 14, 21, 28, 60 and 90 days. In order to increase the ductility and mechanical strength of the concrete against compressive, tensile and bending loads, the addition of microfibers can be implemented to reduce the problems associated with the brittleness of the concrete. The research evaluated the workability of fresh concrete, physical, chemical and morphological characteristics by XRD and SEM/EDS, the mechanical properties of compressive strength, tensile strength and flexural strength reinforced with glass microfiber and polypropylene microfiber. Considering the amount of fiber and cement used, compression and tension specimens with dimensions of (10×20) cm and bending beam specimens with dimensions of (50×15×15) cm were prepared. The microfibers have an average diameter and length of 18 μm and (12 to 15) mm, respectively, demonstrated in a microscopy test. The results of the X-ray diffraction data confirm the electronic microscopy data regarding the composition of the mixtures with glass microfiber and polypropylene microfiber. Experimental results indicated that workability was highly influenced by microfibers in concrete, regardless of type. The additions decreased the workability of the cementitious mixture in greater proportion in polypropylene microfibers by 38%. The two fiber types improved the compressive strength by 5.68% for MPV and 7.95% for MFPP; flexural strength in 15.67% for MFV and 17.65% for MFPP; tensile strength of 7.50% for MFV and 20% for MFPP at 90 days. Additions of polypropylene microfibers increased mechanical strength more effectively than glass microfibers. The properties of conventional concrete were improved with the addition of fibers, justifying their viability.

Keywords: Concrete, mechanical resistance, glass microfibers, polypropylene microfibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Complexo residencial-lazer Mina A Salam com o Burj al Arab ao fundo em Dubai	23
Figura 2: “The Address” Downtown Burj Khalifa – um dos dois hotéis exclusivos gêmeos no coração de Dubai.	24
Figura 3: (a) Basílica do Sagrado Coração de Jesus da Argélia; (b) Assembleia Nacional em Dhaka, Bangladesh; (c) Museu de Arte Moderna de São Paulo, MASP, no Brasil; (d) Infinity Tower em Dubai, no Emirados Árabes.	26
Figura 4: Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) descontínuas e alinhadas e (b) descontínuas e orientadas aleatoriamente.	29
Figura 5: O preenchimento do volume de concreto com agregado é auxiliado por uma larga distribuição de tamanho das partículas, onde as menores preenchem os espaços entre as maiores, adaptado de (44).....	32
Figura 6:O preenchimento do volume de concreto com agregado é auxiliado por uma larga distribuição de tamanho das partículas, onde as menores preenchem os espaços entre as maiores, adaptado de (44).....	33
Figura 7: Características morfológicas dos agregados: (a) representação gráfica; (b) agregado natural, adaptado de (44).	33
Figura 8: Representações esquemáticas das diversas características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa, que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição, (e) orientação, adaptado de (26).	35
Figura 9: Distribuição granulométrica da escória comum e escória ultrafina, (58)	39
Figura 10: Esboço conceitual ilustrando o mecanismo de trabalho dos codispersantes não adsorventes em cimento em baixas relações a/c (63).	41
Figura 11: Procedimento do teste de abatimento do concreto: (a) moldagem do corpo de prova; (b) deslizamento vertical do corpo de prova; (c) medida da altura de queda.	42
Figura 12: Teste do mini-slump: (a) dimensões do molde metálico com material a ser testado; (b) elevação vertical do molde; (c) espalhamento do material (d) medida do abatimento ou	

espalhamento (69).....	44
Figura 13: Ensaio de resistência à compressão do concreto.....	45
Figura 14: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	47
Figura 15: Ensaio de resistência à flexão por três pontos.....	49
Figura 16: Tensão de flexão com adição de fibra de polipropileno nas proporções 0%, 0,10%, 0,20% e 0,30% (106).	50
Figura 17: Tensão de flexão com adição de fibra de vidro (GFRC) e fibra de polipropileno (PPFRC) nas proporções 0%, 0,10%, 0,20% e 0,30% (107).....	51
Figura 18: Padrões de difração de raios X de: (a) clínquer puro: C3S-alita($3CaO.SiO_2$); C2S-belita($2CaO.SiO_2$); C3A-aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$); C4AF- tetraferroaluminato de cálcio ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) (77).....	52
Figura 19: Interferência entre raios a nível planar (79).	53
Figura 20: Microscopia eletrônica de varredura (83)	54
Figura 21: Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.....	55
Figura 22: Imagens MEV das microfibras de vidro e microfibra de polipropileno, (a) microfibra de vidro, (b) MEV microfibra de vidro, (c) microfibra de polipropileno, (d) MEV microfibra de polipropileno.....	58
Figura 23: Aditivo superplastificante: (a) medida da quantidade de superplastificante da mistura; (b) medida dos materiais para preparação das misturas	59
Figura 24: Ensaio de Kantro de compatibilidade do cimento e do superplastificante Tec Fluid 1000: (a) levantamento vertical do minicone; (b) medida do espalhamento após 2 minutos para a estabilização do material.....	60
Figura 25: Preparação da mistura: (a) colocação dos materiais; (b) mistura dos materiais.	62
Figura 26: Procedimentos de execução do teste de abatimento “slump test”: (a) procedimento de adensamento em três camadas e 25 golpes/camada; (b) nivelamento da parte superior do cone para retirada do mesmo; (c) deslizamento vertical do cone; (d) medida da altura de queda.	63
Figura 27: Processo de moldagem e cura dos corpos de prova: (a) preparação dos moldes; (b)	

procedimento de moldagem; (c) desmoldagem e identificação; (d) retirada do tanque de cura.	64
Figura 28: Preparação das amostras para os ensaios de compressão e tração por compressão diametral: (a) procedimento de capeamento das amostras para o ensaio de compressão axial; (b) amostra demarcada no início de aplicação da carga para o ensaio de tração por compressão diametral.	65
Figura 29: Ensaio de compressão axial: (a) amostras após capeamento com enxofre para regularização da superfície de contato com a prensa de ensaio; (b) procedimento de ensaio. .	66
Figura 30: Procedimentos de ensaio de tração por compressão diametral: (a) amostra sobre efeito de aplicação de carga; (b) finalização do ensaio com a ruptura da amostra.....	66
Figura 31: Ensaio de flexão: (a) demonstração do corpo de prova antes da aplicação da carga; (b) finalização do ensaio com ruptura da viga de ensaio.....	67
Figura 32: Difratômetro de raios X: (a) colocação do material no porta-amostra; (b) encaixe da amostra de material no equipamento para início do ensaio.....	68
Figura 33: Ensaio de microscopia eletrônica de varredura – MEV: (a) preparação das superfícies fraturadas montadas em stub de alumínio com uso de fita de carbono; (b) colocação das amostras fraturadas na câmara interna do MEV para análise das amostras.	69
Figura 34: Teste de queda "slump test", média das alturas de queda dos concretos MR, MFV e MFPP.	70
Figura 35: Média das tensões de três amostras de compressão axial concreto MR, MFV e MFPP, para as idades de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias.....	72
Figura 36: Característica da fratura dos concretos MR e MFPP: (a) Concreto MR fratura frágil; (b) concreto MFPP fratura dúctil.....	73
Figura 37: Média das tensões de tração por compressão diametral de três amostras para cada mistura de concreto MR, MFV e MFPP, para as idades de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias.	76
Figura 38: Média das tensões de tração com adições de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5% de fibras de polipropileno (96).	77
Figura 39: Média das tensões de flexão de três amostras para cada mistura de concreto MR, MFV e MFPP, para as idades de 7, 14 e 28 dias.	78

Figura 40: Análise pós-teste de amostras de mistura referência (MR) e misturas com microfibra de polipropileno (MFPP) submetidas a ensaio de flexão.	80
Figura 41: Característica da fratura dos concretos MR e MFPP: (a) Concreto MR fratura frágil; (b) concreto MFPP fratura dúctil.....	80
Figura 42: DRX da areia.....	82
Figura 43: DRX da brita 0.....	83
Figura 44: DRX do cimento Portland.....	84
Figura 45: DRX da microfibra de vidro.	85
Figura 46: DRX da mistura de concreto convencional aos 7 dias de cura.	86
Figura 47: DRX da mistura de concreto com adição de polipropileno (MFPP) aos 60 dias de cura.	87
Figura 48: DRX da mistura de concreto com adição de fibra de vidro (MFV) aos 60 dias de cura.	88
Figura 49: MEV da superfície fraturada MR: (a) MEV da superfície fraturada da mistura de concreto de referência; (b) EDS da composição elementar.....	89
Figura 50: MEV da superfície fraturada com fibra de vidro: (a) MEV da superfície fraturada da mistura de concreto com adição de fibra de vidro; (b) EDS da composição elementar.....	90
Figura 51: MEV da superfície fraturada com microfibra de polipropileno: (a) MEV da superfície fraturada da mistura de concreto com adição de microfibra de polipropileno; (b) EDS da composição elementar.....	91
Figura 52: Mapeamento químico da superfície fraturada da mistura de concreto com microfibra de vidro MFV: (a) Sobreposição dos elementos químicos; (b) composição elementar de cálcio; (c) composição elementar de silício; (d) espectrograma mostrando principalmente as presenças de silício e cálcio.	93
Figura 53: Mapeamento químico da superfície fraturada da mistura de concreto com microfibra de polipropileno MFPP: (a) Sobreposição dos elementos químicos; (b) composição elementar de cálcio; (c) composição elementar de silício; (d) espectrograma mostrando principalmente as presenças de silício e cálcio.....	94

Figura 54: Análise microestrutural (MEV) da superfície fraturada do concreto de referência MR.....	95
Figura 55: Análise microestrutural (MEV) das superfícies fraturadas: (a) mistura de MFPP; (b) mistura de MFV.....	96
Figura 56: Análise microestrutural (MEV) das superfícies fraturadas: (a) mistura de MFPP; (b) mistura de MFV.....	97
Figura 57: Análise microestrutural (MEV) das superfícies fraturadas: identificação da zona de transição (a) mistura de MFV; (b) mistura de MFPP.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tamanhos de aberturas em peneiras-padrão.....	34
Tabela 2: Principais reações de hidratação do cimento Portland.	36
Tabela 3: Resistência relativa aproximada do concreto segundo a influência do tipo de cimento	37
Tabela 4: Ensaio físicos de caracterização do cimento.....	56
Tabela 5: Características físicas dos agregados usados na produção dos concretos	56
Tabela 6: Características das microfibras empregadas nas misturas de concreto	57
Tabela 7: Misturas do ensaio de espalhamento	59
Tabela 8: Misturas do ensaio de espalhamento	60
Tabela 9: Proporções de mistura utilizadas nos ensaios mecânicos.....	61
Tabela 10: Mostra o valor do <i>Slump</i>	71
Tabela 11: Média das tensões de compressão axial e desvio padrão das misturas MR, MFV e MFPP ensaiadas.....	73
Tabela 12: Média das tensões de tração por compressão diametral e desvio padrão das misturas MR, MFV e MFPP ensaiadas	76
Tabela 13: Média das tensões de flexão e desvio padrão das misturas MR, MFV e MFPP ensaiadas.....	79
Tabela 14: Espectro de soma mapeamento químico	92

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	45
Equação 2	47
Equação 3	48
Equação 4	52
Equação 5	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivo Geral	21
1.2 Objetivos Específicos	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Concreto na construção civil	22
2.2 Concreto com adição de fibras	27
2.3 Agregados para concreto	30
2.4 Cimento Portland.....	35
2.5 Adições minerais	38
2.6 Aditivos Químicos.....	40
2.8 Compatibilidade do aditivo superplastificante e o cimento Portland.....	42
2.9 Resistência do concreto	44
2.10 Resistência à compressão	44
2.11 Resistência do concreto à tração	46
2.12 Resistência do concreto a flexão	48
2.13 Difração de raios X - DRX.....	51
2.14 Microestrutura do concreto	53
3. MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 Cimento	56
3.2 Agregados.....	56
3.3 Água	57
3.4 Microfibras	57
3.5 Aditivo Superplastificante	58
3.6 Ensaio de compatibilidade do cimento.....	59
3.7 Dosagem.....	60
3.8 Produção das misturas de concreto	61
3.9 Moldagem dos corpos de prova	63
3.10 Ensaio Mecânicos	65
3.10.1 Ensaio de compressão.....	65
3.10.2 Ensaio de tração por compressão diametral	66
3.10.3 Ensaio de Flexão.....	67
3.11 Caracterização química e morfológica	67

3.11.1 Difratomia de raios X.....	67
3.11.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 Trabalhabilidade das misturas	69
4.2 Compressão axial	71
4.3 Tensão de tração por compressão diametral	75
4.4 Resistência à flexão.....	78
4.5 Difratomia de Raios X	81
4.6 Análise de Espectroscopia Dispersiva de Energia (EDS)	88
4.7 Análise microestrutural (MEV).....	94
CONCLUSÕES.....	99
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

1. INTRODUÇÃO

O concreto tem uma baixa resistência à tração, mas pode suportar elevadas cargas de compressão. A inclusão de aditivos e adições melhoram os esforços de tração, porém o compósito mesmo assim apresentará fissuras indesejáveis, que podem ser minimizadas. As fissuras em concreto simples são comuns e são uma combinação de diferentes causas como cargas aplicadas excessivamente, gradiente de temperatura, retração por secagem, restrições estruturais e recalque diferencial. Esteticamente as fissuras são indesejáveis por desvalorizar qualquer edificação e causar problema de durabilidade. No concreto promovem o contato de agentes agressivos ao meio interno do compósito, degradando a estrutura interna do concreto, comprometendo a durabilidade do elemento estrutural projetado. A penetração de água após a formação de rachaduras e a entrada de cloretos aceleram a corrosão das armaduras, enquanto que a entrada de sulfatos possibilitam a formação da etringita causando expansão volumétrica e modificação da microestrutura do concreto (1), (2).

De acordo com (3) os concretos reforçados com fibra possuem qualidade como se fosse um concreto de alta resistência com controle da abertura da fissura e capacidade de absorção de carga. Combinado com um processo de cura controlada teremos um material durável e de expressiva utilização no futuro. Porém, os conceitos de durabilidade com base no desempenho ainda são necessários para avaliação da qualidade dos concretos.

A substituição das armaduras e o controle do comportamento de fissuração são os principais motivos pelas quais as fibras surgiram na tecnologia do concreto. Como o concreto é um material frágil, reforços são colocados ao lançar o concreto para suportar as cargas de tração. Os reforços estão localizados em locais distintos. As fibras, por outro lado, são distribuídas uniformemente na matriz. Elas não são capazes de suportar grandes tensões de tração, mas devido à sua distribuição uniforme, podem controlar o comportamento de fissuração (4).

A estabilização das tensões geradas durante a formação de fissuras e elasticidade do concreto podem ser controladas com a utilização de microfibras, pois as fibras têm a capacidade de atuar como um elemento de transferência das tensões superficiais geradas durante a cura do concreto diminuindo o tamanho da abertura das fissuras por retração (5). Melhorar o comportamento de fissuração dos concretos também melhora a resistência à flexão e cisalhamento, pois a incorporação de microfibras elimina a formação de fissuras no seu início, com o concreto ainda no seu estado fresco, também interrompe sua propagação, melhorando o seu desempenho quando comparado ao concreto simples (2).

Yoo et al (6) estudaram a eficiência das fibras nos compósitos cimentícios como forma de controlar a expansão compensando a retração geral, os mesmos estudaram a eficiência da mistura redutora de retração (0 - 2%). O estudo verificou que o maior teor de fibra, 2% de adição de fibra reduziu a retração em 28% aos 28 dias, ou seja, resultou em menor retração e potencial de fissuração, da mesma forma que aumentou ligeiramente a resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

As microfibras apresentam tamanho entre 1 mm e 30 mm e sua principal função nas misturas de concreto é superar o efeito de retração nas idades iniciais e limitar a formação de fissuras, aumentam a durabilidade e prolongam a vida útil do elemento. As microfibras podem ser uma alternativa às malhas de controle de trincas. Nas misturas de concreto as dosagens com microfibra ficam em torno de 1,10% a 0,30% em volume (7).

As microfibras de vidro possuem alto módulo de elasticidade, chegando a 72 GPa, com a finalidade de diminuir os efeitos de retração do concreto na fase de endurecimento (8).

As microfibras de polipropileno podem ser divididas em dois tipos básicos, as de monofilamento e fibriladas. As fibras chamadas de monofilamento consistem em fios cortados em comprimento padrão, enquanto as fibriladas apresentam-se como uma malha de finos filamentos de seção retangular. A estrutura em malha das fibriladas promove um aumento na adesão com a matriz cimentícia, devido a um efeito de intertravamento (9).

De acordo com Kakooei et al. (5) a utilização de macrofibras e microfibras para reforçar o concreto permite aumentar a estabilização das tensões geradas durante a abertura de fissuras e a elasticidade do material, pois as fibras têm a característica de atuar como uma ponte de transferência das tensões superficiais geradas durante a cura do concreto, reduzindo a tensão existente e, por consequência, o tamanho da abertura destas fissuras. A formação de fissuras no concreto proporciona a exposição da parte interna do material, o ataque da sua microestrutura, causando um aumento da permeabilidade e permite que agentes exteriores possam degradar a estrutura interna do concreto, diminuindo a durabilidade do elemento estrutural.

Este estudo investigou a comparação de concreto convencional com concreto reforçado com microfibras. A pesquisa avaliou a trabalhabilidade dos concretos em estado fresco, características físicas, químicas e morfológicas DRX e MEV/EDS, as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral nas idades de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias e resistência a flexão para as idades de 7, 14 e 28 de concretos tomados como referência em comparação a concretos reforçados com microfibra de vidro e microfibra de polipropileno.

1. 1 Objetivo Geral

Avaliar a influência das microfibras de polipropileno e microfibras de vidro nas propriedades mecânicas do concreto, como resistência axial, resistência a tração por compressão diametral, resistência flexão e características físicas, químicas e morfológicas DRX e MEV/EDS.

1. 2 Objetivos Específicos

Adquirir e caracterizar os materiais a serem utilizados ao longo de toda a pesquisa;

Ensaiar e caracterizar o cimento através dos ensaios de início e fim de pega, resistência a compressão axial, finura, consistência e análise de fases por DRX.

Caracterizar os agregados graúdo e miúdo por peneiramento granulométrico, massa específica, massa unitária e análise de fases por DRX;

Avaliar a influência da adição das microfibras de polipropileno e microfibras de vidro através das resistências à compressão, tração indireta e flexão.

Analisar as características físico-químicas e morfológicas das misturas por MEV/EDS e DRX.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica teve como objetivo fazer um levantamento da utilização e importância do concreto como material de construção, destacando a evolução da tecnologia do concreto em diferentes localidades, sejam em países desenvolvidos ou em desenvolvimento, e como esta evolução modificou a característica física das grandes cidades.

2.1 Concreto na construção civil

O concreto é o material de construção produzido pelo homem mais empregado no planeta, pelas suas mais variadas características, como capacidade de resistir a água e poder de ser adequado, quando endurecido, a uma variedade de formas e dimensões, além da sua facilidade de aquisição. É um compósito utilizado para a construção de vários projetos de Engenharia e Arquitetura como barragens, estruturas de arranha-céus, pontes, estradas e residências (10). Um dos motivos para o alto emprego do concreto na construção civil é o baixo custo e a rápida disponibilidade dos materiais para emprego. Os componentes para a produção do concreto, cimento, agregados e água, são relativamente baratos e facilmente encontrados em todos os lugares do mundo (11).

De acordo com o ACI Committee 116R (12) e a ASTM (13) o concreto é um compósito constituído essencialmente de um meio aglomerante por entre o qual estão aglutinadas partículas ou fragmento de agregados. Sendo o concreto de cimento Portland formado por um aglomerante composto pela mistura de cimento hidráulico e água.

De acordo com (14) o concreto comum, é composto tipicamente, de 12% de cimento, 8% de água de hidratação e 80% de agregado grosso e fino, por massa. Com referência ao consumo de materiais, além dos 1,5 bilhão de toneladas anuais de cimento consumidos hoje, a indústria de concreto consome anualmente 9 bilhões de toneladas de areia e rocha e 1 bilhão de água de amassamento.

Para (15) o concreto de cimento Portland é uma mistura concentrada contendo agregados sólidos em um líquido viscoso chamado de pasta de cimento. É uma pasta fluida não uniforme e composta por grãos de cimento distribuídos na água. O concreto tem propriedades fluidas complexas devido ao tamanho de seus ingredientes que variam de micrómetro (μm) a centímetro (cm).

Distintamente da madeira e do aço comum, a capacidade do concreto de suportar a ação da água sem grande desgaste torna-o um material ideal para construção de estruturas para

controle, armazenamento e transporte da água. Desde de antigas aplicações conhecidas do material o mesmo já era empregado em aquedutos, cisternas e represas construídas pela civilização romana. Sendo atualmente o uso do concreto bastante empregado em barragens, revestimento de canais e pavimentos, sendo algo bastante comum de se encontrar em quase todos os lugares no mundo (14).

O concreto é um material muito importante pois antes do processo de endurecimento apresenta característica de fácil modelamento, consolidação e conformação, que possibilitam todos os processos de moldagem, assumindo todas as formas de elementos estruturais com as mais variadas formas e tamanhos.

O desenvolvimento da tecnologia do concreto possibilitou uma diversidade de projetos com uma rápida expansão e modificação física das cidades, conforme mostrado na Figura 1.



Figura 1:Complexo residencial-lazer Mina A Salam com o Burj al Arab ao fundo em Dubai

Fonte: (16).

Diferentes formas de construções de concreto são possíveis devido as novas técnicas de produção que saem das tradicionais, formas curvas e arredondadas são criadas devido as novas possibilidades de se produzir concreto. Adições e aditivos químicos são incorporados ao concreto para aumentar o desempenho, onde a capacidade de produzir componentes mais eficientes e até mais leves com resistência semelhante e até mais altas, possibilitam construir prédios com características estéticas mais arrojadas, Figura 2.



Figura 2: “The Address” Downtown Burj Khalifa – um dos dois hotéis exclusivos gêmeos no coração de Dubai.
Fonte: (16).

Tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento, vários projetos em concreto vêm sendo desenvolvidos desde o início da evolução da tecnologia do concreto, importantes projetos em concreto armado já foram construídos em diferentes países e ainda vêm sendo construídos, conforme a evolução da tecnologia do concreto. Sendo um desafio para tecnologia do concreto não apenas novos empreendimentos, mas também, a reabilitação e substituição de estruturas existentes em pontes, aeroportos, edifícios rodovias e outros (14).

No contexto da evolução da tecnologia do concreto a Basílica do Sagrado Coração de Jesus da Argélia, construída em 1956 é um exemplo revolucionário para o país da evolução do concreto como material de construção, exprimindo as melhores capacidades mecânicas, possibilidades técnicas e o desempenho do concreto. Para verificar se a estrutura atendia às suas características predefinidas, foi fundamental a realização de ensaios não destrutivos para avaliar a resistência do concreto, Figura 3 (a) (17).



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3: (a) Basílica do Sagrado Coração de Jesus da Argélia; (b) Assembleia Nacional em Dhaka, Bangladesh; (c) Museu de Arte Moderna de São Paulo, MASP, no Brasil; (d) Infinity Tower em Dubai, no Emirados Árabes.

A Figura 3 (b) demonstra a Assembleia Nacional em Dhaka o edifício mais famoso de Bangladesh. Teve o início de sua construção em 1962, recebeu o Prêmio Aga Khan em 1989, tornou-se uma das estruturas mais célebres do mundo. O destaque da construção foi a maneira particular como o concreto foi usado para a construção das suas paredes monolíticas (18).

O Museu de Arte Moderna de São Paulo, MASP construído de 1957 a 1968 destaca a evolução da tecnologia do concreto no Brasil, o edifício com uma superestrutura pendurada em 4 pilares maciços em concreto armado cobrindo um espaço público. A obra introduziu um novo

padrão arquitetônico em concreto armado no Brasil, Figura 3 (c) (19).

A icônica Infinity Tower em Dubai de 75 andares, Figura 3 (d), que completa um giro de 90° de sua base até o seu topo, teve seu início de construção em 2006, onde foi necessário o uso de um concreto de alto desempenho com resistência à compressão de 70 MPa e alta trabalhabilidade para o lançamento do concreto em zonas de alto congestionamento de aço estrutural. A mistura de concreto utilizou um aglutinante de cimento Portland de cinzas volantes e sílica ativa com uma proporção de água/cimento de 0,30 e aditivos redutores de água e modificadores de viscosidade de alto alcance (20).

2.2 Concreto com adição de fibras

O concreto é um material compósito e muitas de suas características não seguem as regras das misturas. Quando submetidos a cargas de compressão, tanto o agregado quanto a pasta de cimento, quando testados separadamente apresentam rompimento elástico, enquanto que o concreto apresenta rompimento inelástico. A resistência da mistura é muito menor que a resistência individual da pasta de cimento e do agregado (14).

Como visto anteriormente as características do concreto vêm sendo melhoradas ao longo do tempo em decorrência das exigências imprevisíveis e levantadas pela sociedade até como forma de ostentar poder econômico, através da construção de arranha-céus, pontes de grandes vãos, estruturas de concreto com alta resistência, terremotos, entre outros. Para atender a esses desejos, o concreto deve ter excelente desempenho em relação as suas propriedades frescas, mecânicas e de durabilidade.

Atualmente, os avanços no campo do concreto identificaram o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), o concreto reforçado com fibra de ultra-alto desempenho (UHP-FRC) concreto híbrido reforçado com fibra de ultra-alto desempenho (UHP- HFRC), além de outras formas de se produzir concreto, para se atender as novas exigências do mercado (21).

As restrições do concreto convencional levaram os pesquisadores a desenvolverem um concreto mais durável e eficiente, pois em idades iniciais o concreto comum apresenta uma microestrutura altamente porosa e com significativas limitações de durabilidade. Essas barreiras foram superadas, em parte, pelo uso de aditivos minerais como sílica ativa, cinzas volantes escórias de alto forno, metacaulim e cinzas de casca de arroz, além da incorporação de aditivos químicos de longo alcance no concreto (22), (23).

Constatou-se, através de pesquisas laboratoriais, que o uso de partículas minerais menores em misturas de cimento Portland melhoram a reação química de hidratação, devido ao aumento

da área superficial, com uma menor relação água/cimento, aumentando a formação de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), levando ao desenvolvimento de um concreto de alta resistência, porém com o aumento da resistência o concreto torna-se mais frágil (22), (24).

O desenvolvimento das propriedades do concreto evoluíram para o desenvolvimento de misturas menos frágeis, pois a ruptura frágil representa uma grande limitação para os concretos com resistência elevada. Vários estudos foram desenvolvidos para melhorar as propriedades de resistência e o comportamento de falha dos concretos melhorando o desempenho dos mesmos. É muito difícil produzir um concreto dúctil e com alta resistência, com uma combinação de resistência a compressão superior a 50 MPa e uma deformação superior a 0,5% (24).

A adição de mistura mineral aumenta a resistência mecânica dos concretos, que combinado com o acréscimo de fibras aumenta a ductilidade, diminuindo a fissuração, além de retardar a sua propagação, estas propriedades também melhoram significativamente a resistência mecânica da mistura (25).

Uma característica importante da maioria dos materiais, especialmente dos frágeis como o concreto no início da fase de endurecimento, é que a fibra com pequeno diâmetro é mais resistente do que o material volumétrico. A probabilidade da presença de um defeito superficial crítico, capaz de levar à fratura, diminui com a redução do volume da amostra, e essa característica é aproveitada nos compósitos reforçados com fibras. Além disso, os materiais usados como fibras de reforço apresentam altos limites de resistência à tração (26).

Quando a orientação da fibra é aleatória, são usadas fibras curtas e descontínuas; um reforço desse tipo é mostrado esquematicamente na Figura 4.

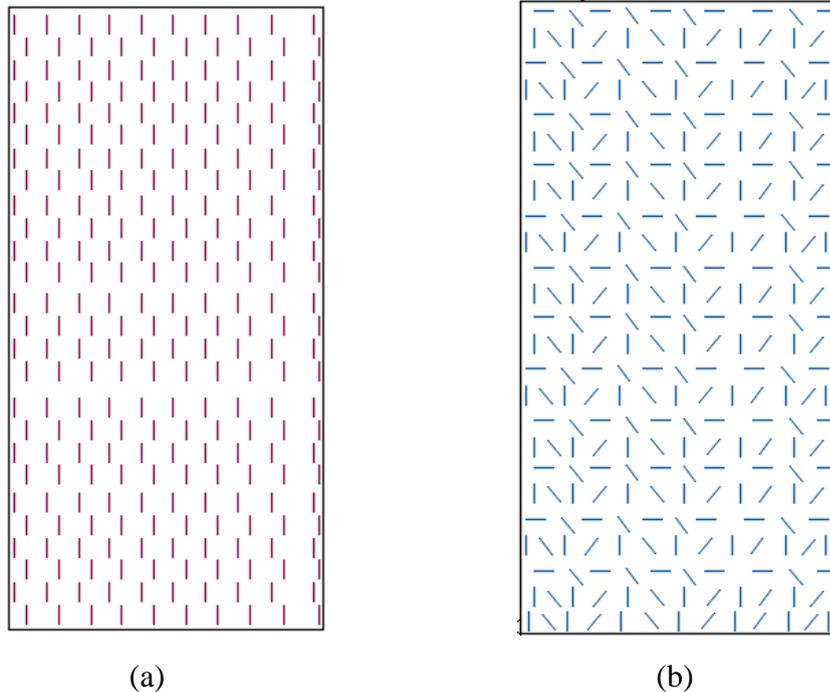


Figura 4: Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) descontínuas e alinhadas e (b) descontínuas e orientadas aleatoriamente.

Fonte: (26) adaptado.

O concreto por ser um material frágil e que apresenta defeitos internos e superficiais, suas características mecânicas de compressão, tração e flexão são influenciadas, principalmente quando as referidas características são combinadas aos efeitos das cargas das estruturas, temperatura e umidade ambiente, interferindo seriamente nos elementos estruturais produzidos com concreto (27).

O reforço com adição fibras é usualmente um método para melhorar principalmente os esforços de flexão, tração e tenacidade, controlando ou retardando o início e propagação de fissuras (16), (28).

Os compósitos cimentícios projetados com fibras, são novos tipos de concreto que geralmente aumentam a ductilidade e melhoram também a baixa resistência à tração dos concretos. A ductilidade nos concretos projetados com microfibras aumenta acima de 2%, quando comparado ao concreto convencional, enquanto que a resistência à tração pode variar na faixa de 4-20MPa, por reforçar principalmente a zona de transição pasta-agregado, retardando o início e a propagação de trincas que é uma das habilidades comportamentais mais significativas dos concretos reforçados com fibras. (27), (29), (30),(31).

Vários estudos têm demonstrado que as microfibras naturais e sintéticas apresentam-se com excelente potencial em diminuir a largura e a formação de fissuras em concretos e argamassas, além de serem utilizadas como materiais de reforço (32), (33). Ensaios mecânicos

mostrados por Beaudoin e Low (33), demonstraram que a adição de fibras naturais a compósitos cimentícios contendo sílica ativa e microfibras naturais garantiram um aumento na resistência à flexão. Nos experimentos desenvolvidos por Day et al (34) afirmaram que houve um aumento de 30% na resistência à compressão dos compósitos cimentícios como resultado da substituição de 10% de cimento por fibra natural de Wallastonita.

As fibras de polipropileno possuem alta tenacidade, são constituídas de um núcleo com boa resistência a tração e uma camada externa com propriedades de superfície favoráveis a velocidade de hidratação do concreto (5), (10), (35), (36). As microfibras de polipropileno, quando atuam como reforço em concreto têm como função controlar as fissuras decorrentes da mudança de volume em misturas cimentícias que ocorre durante o endurecimento, sendo seu uso recomendado em elementos estruturais como lajes, pisos e estruturas com grandes áreas superficiais (5), (37).

2.3 Agregados para concreto

De acordo com (5) a forma dos grãos do agregado graúdo interfere de modo direto nas características de qualidade do concreto, porque modifica a sua trabalhabilidade e sua resistência mecânica. O concreto produzido com agregados arredondados requer menos água de amassamento do que um concreto do agregados angulares, para uma mesma condição de trabalhabilidade. Pode-se afirmar que os agregados esféricos são mais vantajosos, porque a relação água/cimento afeta diretamente a resistência mecânica do concreto.

Os grãos irregulares, alongados e lamelares têm uma superfície específica maior. Nos elementos estruturais eles podem ficar presos nas barras de aço do concreto armado, possibilitando a formação de vazios nas estruturas, que são altamente prejudiciais ao desempenho dos elementos estruturais de concreto, porém os agregados de formato angular, as britas, oferecem maior aderência à argamassa do que os agregados arredondados, seixos. Então, para a mesma relação água/cimento garantindo uma boa concretagem e compactação, o uso de agregados angulares leva a concretos mais resistentes (37), (38).

Quanto à forma dos grãos dos agregados graúdos o formato arredondado, facilita a trabalhabilidade, mas dificulta aderência, já a forma angular piora a trabalhabilidade, mas favorece a aderência entre agregados e a massa de cimento, areia e água (39).

Para alcançarmos a resistência e a trabalhabilidade satisfatória de uma mistura de concreto de cimento Portland, a dosagem ou quantidade de materiais a serem misturadas devem estar nas quantidades corretas. Um bom empacotamento e um bom contato interfacial são

obtidos com a utilização de partículas de tamanhos diferentes; as partículas menores de areia devem preencher os espaços vazios deixados pelas partículas maiores de seixo ou brita. Frequentemente os agregados correspondem entre 60% e 80% do volume total da mistura, dependendo da resistência que se pretende chegar.

A pasta cimento e água deve ser suficiente para recobrir e agregar todas as partículas de areia e brita; pois em caso contrário a ligação de cimentação será incompleta. Uma ligação completa entre o cimento e as partículas do agregado depende da adição da quantidade correta de água. Pouca água leva a uma ligação incompleta, baixa hidratação, enquanto água demais resulta em uma porosidade excessiva, nas duas situações a resistência final será inferior a desejada (5).

O tipo de agregado é uma consideração importante, principalmente porque a distribuição de tamanhos dos agregados influencia a quantidade necessária da pasta cimento e água. Os agregados devem apresentar superfícies limpas e isentas de argila e sedimentos, os quais impedem a formação de uma ligação eficiente na superfície das partículas (5).

As investigações petrográficas dos agregados grosso e fino são realizadas empregando-se um microscópio óptico, as análises complementares podem ser feitas por difração de raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura ou Espectroscopia de Infravermelho, mas não existe vantagem maior em usar um tipo de areia no lugar de outra, desde que seja limpa e livre de argila e silte. Nas usinas de concreto existe apenas um silo de armazenamento de areia (40), (41).

A composição mineral do agregado graúdo pode afetar significativamente a resistência do concreto. A resistência do concreto pode ser aumentada aumentando a resistência dos agregados graúdos, enquanto a composição e a quantidade de outros materiais dentro do concreto permanecem constantes (42).

De acordo com (43) as propriedades de adensamento das partículas de agregado devem ser consideradas na redução do teor unitário de água do concreto, pois a fase agregada ocupa quase 70% do volume total do concreto. A consideração da densidade de empacotamento das partículas agregadas é crucial em campos de concreto. A estrutura de adensamento das partículas de agregado afeta diretamente o volume do meio de ligação necessário para se obter trabalhabilidade adequada, para diminuir a pasta de cimento em volume e conseqüentemente o teor de cimento, além de outros parâmetros. As características referem-se não apenas ao concreto em seu estado fresco, mas também à sua durabilidade no estado endurecido. A estrutura de empacotamento, relativa no adensamento, da fase do agregado muda com as propriedades das partículas de agregados finos e graúdos, como forma das partículas,

distribuição granulométrica, volume e composição entre as duas partículas.

Um empacotamento denso do agregado e um bom contato superficial são obtidos empregando-se partículas com dois tamanhos diferentes, as partículas finas de areia devem preencher os espaços vazios de brita. O motivo para combinação de agregados finos e grossos em uma determinada mistura de concreto pode ser entendida examinando-se a Figura 5. A combinação de agregados finos e grossos é responsável por 65-75% do volume total do concreto.

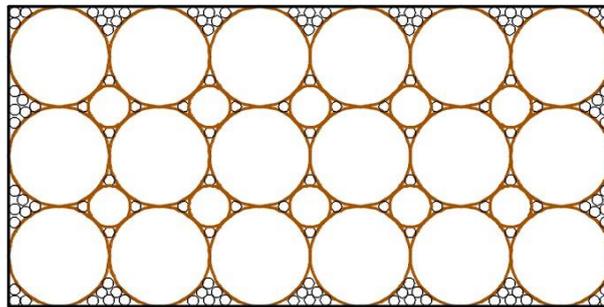


Figura 5: O preenchimento do volume de concreto com agregado é auxiliado por uma larga distribuição de tamanho das partículas, onde as menores preenchem os espaços entre as maiores, adaptado de (44).

A geometria de uma partícula é representada por três eixos, o maior, o menor e os eixos intermediários. Esses eixos são todos perpendiculares entre si, conforme mostrado na Fig. 6. Primeiro, o maior eixo é determinado, seguido pelo menor. Finalmente, o eixo intermediário é escolhido perpendicularmente ao plano definido pelos eixos anteriores. A Figura 6 mostra que o eixo intermediário é o melhor para descrever o tamanho de partícula, pois determina a distribuição de graduação usando um teste de análise de peneira (43).

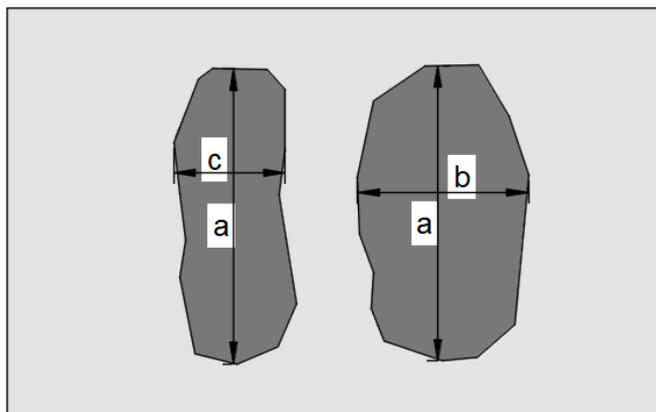


Figura 6: O preenchimento do volume de concreto com agregado é auxiliado por uma larga distribuição de tamanho das partículas, onde as menores preenchem os espaços entre as maiores, adaptado de (44).

Os autores (44) classificaram os agregados em três categorias com base no comprimento do eixo nas três direções: agregado de forma alongada com um eixo longo e dois eixos curtos; agregado esférico com dois eixos longos e um eixo curto; agregado cúbico com três eixos iguais, conforme mostrado na Figura 7.

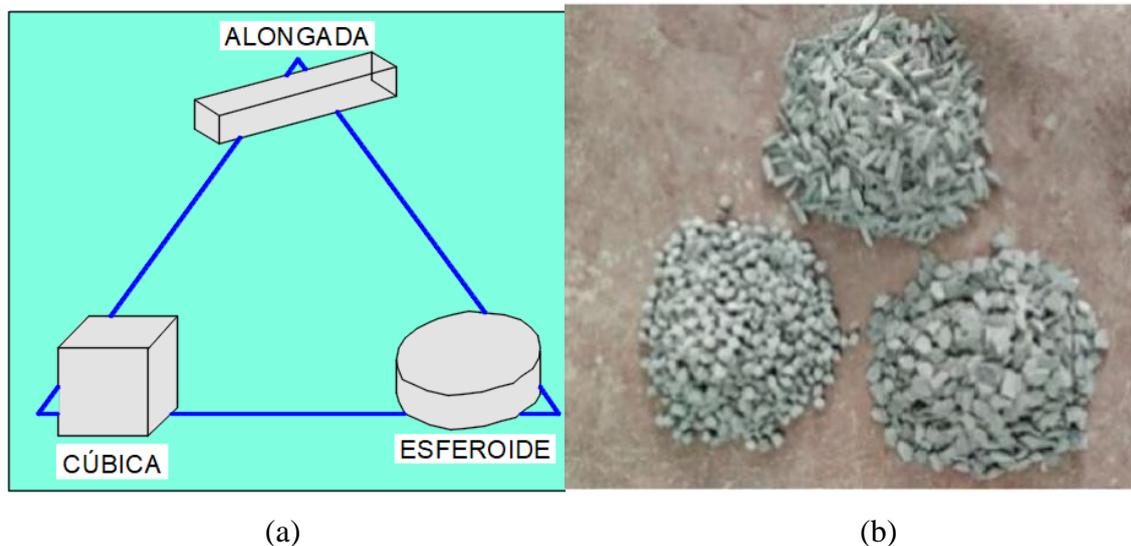


Figura 7: Características morfológicas dos agregados: (a) representação gráfica; (b) agregado natural, adaptado de (44).

Os tamanhos dos agregados grãos e miúdos são medidos e controlados por peneiramento padrão. Os tamanhos das aberturas das telas das peneiras são que controlam o tamanho dos grãos indicados na Tabela 1. Todos os componentes devem ser completamente misturados. A ligação completa entre o cimento e as partículas do agregado depende da adição da quantidade correta de água. Pouca água leva a uma ligação incompleta, enquanto muita água

resulta em uma porosidade excessiva, em ambos os casos a resistência final é inferior a ótima (45).

Tabela 1: Tamanhos de aberturas em peneiras-padrão

Designação da peneira	Abertura (mm)
Agregado graúdo (brita)	
6	152,4
3	76,2
1 ½	38,1
¾	19,1
3/8	9,5
Agregado fino (areia)	
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,6
50	0,3
100	0,15

Fonte: (44).

Como materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases: a matriz que é contínua e envolve a outra fase chamada comumente de fase dispersa, as propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Entendendo-se como fase dispersa a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação dessas partículas, tais características estão representadas na Figura 8 (26).

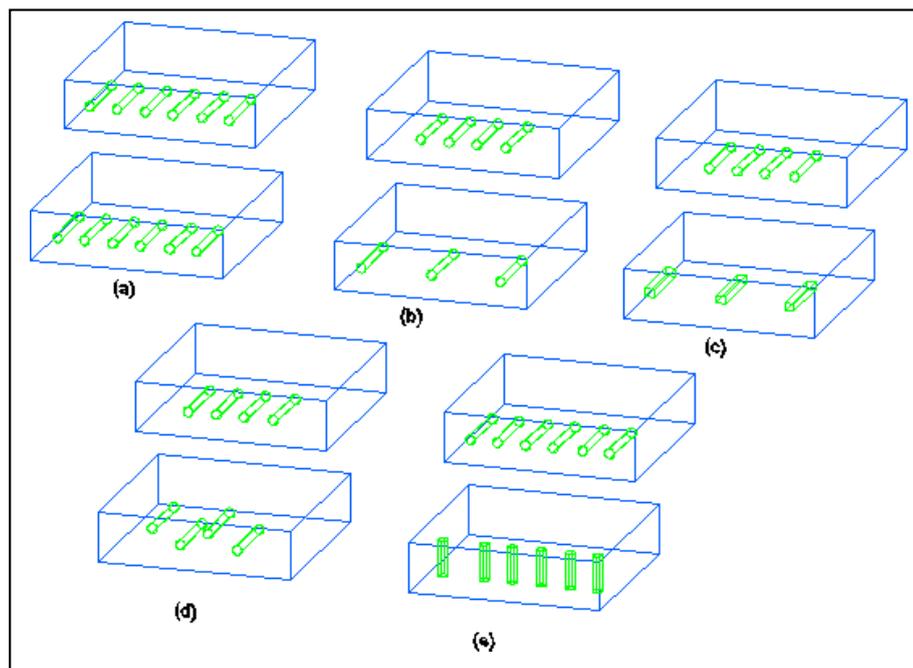


Figura 8: Representações esquemáticas das diversas características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa, que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição, (e) orientação, adaptado de (26).

2.4 Cimento Portland

O cimento Portland continua sendo de longe o tipo de cimento mais comum e proeminente em uso geral em todo o mundo hoje. Não é apenas amplamente utilizado na aplicação civil e de construção como material de ligação, mas também na cimentação de poços de petróleo e gás e geotérmicos. Este cimento foi inventado no início de 1800, como um produto de calcário de aquecimento extremo (CaCO_3) com outros materiais (por exemplo, argilas) em um processo chamado calcinação. A substância dura resultante, chamada clínquer, é então moída em um pequeno pó para produzir cimento Portland.

O clínquer de cimento Portland contém quatro minerais principais, nomeadamente Alite C_3S , Belite (C_2S), aluminato tricálcico C_3A e aluminoferrita tetracálcica C_4AF . Alite C_3S representa a fase mais crucial do clínquer do cimento Portland, constituindo aproximadamente 65% do peso total do clínquer.

É a queima de uma mistura bem proporcionada de matérias-primas contendo os quatro óxidos principais, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e FeO_3 , que produz o clínquer, um dos dois ingredientes básicos exigidos para fabricar o cimento Portland. O outro é o sulfato de cálcio na forma de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ou anidrita ou sulfato de cálcio (CaSO_4),

ou uma mistura de dois ou três deles (40).

O clínquer do cimento Portland é o produto final de uma tecnologia altamente complexa de piroprocessamento que transforma matérias-primas em fases de silicatos de cálcio e de aluminato de cálcio. O C_3S é o principal constituinte (50–80%) do clínquer do cimento Portland e o principal responsável pelo desenvolvimento da resistência, em particular nas primeiras idades. Após vários minutos em contato com a água, a taxa de dissolução inicialmente rápida de C_3S , caracterizada por um sinal exotérmico agudo nas medições de calorimetria isotérmica, cai e permanece lenta durante o período de indução. A duração deste período depende de vários parâmetros, incluindo a área de superfície específica (40); (46).

A hidratação do cimento Portland envolve vários processos desde a dissolução/dissociação de espécies moleculares até a sua precipitação e a formação de produtos de hidratação. No processo de fabricação o clínquer do cimento Portland sai do forno rotativo como uma mistura de duas fases de silicatos bem cristalizados de alita e belita, cujas as formas puras são C_3S e C_2S , e outras duas intersticiais composta de aluminato tricálcico C_3A e aluminoferrita tetracálcica C_4AF , mais ou menos cristalizada, e algumas impurezas tais como o periclásio (MgO), óxido de cálcio calcinado endurecido (CaO) e sulfatos alcalinos (40); (47).

As reações de hidratação endurecem e produzem a liga química da matriz com as partículas do agregado. A Tabela 02 mostra as principais reações de hidratação e os produtos finais associados.

Tabela 2: Principais reações de hidratação do cimento Portland.

(1)	$2C_3S + 6H \rightarrow 3Ch + C_3S_2H_3$ (tobermorita)
(2)	$2C_2S + 4H \rightarrow Ch + C_3S_2H_3$
(3)	$C_3A + 10H + C_3H_2 \rightarrow C_3ACSH_{12}$ (monossulfato de alumínio cálcio hidratado)
(4)	$C_3A + 12H + Ch \rightarrow C_3AChH_{12}$ (aluminato tetracálcio hidratado)
(5)	$C_4AF + 10H + 2Ch \rightarrow C_6AFH_{12}$ (aluminoferrito cálcico hidratado)

* A notação abreviada da tecnologia de cimento é $C_3S = 3CaO.SiO_2$, $C_2S = 2CaO.SiO_2$, $C_3A = 3CaO.Al_2O_3$, $C_4AF = 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, $H = H_2O$, $Ch = Ca(OH)_2$ e $C_S = CaSO_4$.

Fonte: (46).

O grau de hidratação do cimento tem um efeito direto na porosidade e, conseqüentemente, na resistência. O cimento Portland Tipo III ASTM, a uma temperatura normal, por ser mais fino hidrata-se mais rápido do que os outros. Nas primeiras idades, aos 1, 3 e 7 dias, e a uma

dada relação de água/cimento, um concreto dosado com cimento Portland Tipo III terá uma porosidade mais baixa e conseqüentemente uma resistência mais alta. Nos cimentos Portland Tipo I, II e III ASTM as taxas de hidratação e desenvolvimento de resistência quando comparados com cimentos tipo IV, V, cimentos de alto-forno e pozolânico são mais lentos aos 28 dias, porém as diferenças desaparecem após essa idade, quando tiverem alcançado um grau de hidratação semelhante Tabela 03 (14).

Tabela 3: Resistência relativa aproximada do concreto segundo a influência do tipo de cimento

Tipo de cimento Portland (ASTM)	Natureza	Resistência à compressão (porcentagem em relação ao Tipo I ou cimento Portland comum)			
		1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
		I	Normal ou uso comum	100	100
II	Calor de hidratação moderado e moderada resistência a sulfatos	75	85	90	100
III	Alta resistência inicial	190	20	110	100
IV	Baixo calor de hidratação	55	65	75	100
V	Resistência a sulfatos	65	75	85	100

Fonte: (1).

Os cimentos Portland puros, tipo I, são o cimento dominante em muitos países. No entanto, devido a restrições econômicas e ambientais, espera-se que a produção de cimentos misturados, tipos II, III, IV e V, aumentem cada vez mais. Os cimentos mistos são produzidos pela substituição de partes do cimento Portland por vários tipos de materiais pozolânicos. Por muitos anos, os cimentos especiais, como os cimentos granulados de escória de alto forno, provaram dar ao concreto uma resistência muito alta à penetração de cloretos em comparação com os cimentos Portland puros.

Nos últimos anos, no entanto, cimentos mais otimizados e de alto desempenho e combinações de cimentos com materiais pozolânicos têm sido usados para melhorar a durabilidade das estruturas de concreto em ambientes contendo cloretos severos, por exemplo (48).

2.5 Adições minerais

As adições são compostos baseados na substituição parcial do cimento Portland ou o acréscimo de outros materiais residuais que tornam o cimento Portland, e conseqüente concretos e argamassas mais eficientes, pois oferecem melhoria das características mecânicas das misturas, além da redução de custos, economia de energia e produtos indiscutivelmente superiores. As adições se dividem em dois grupos principais, materiais pozolânicos, como cinzas de combustível pulverizado, cinzas de casca de arroz, cinzas vulcânicas e sílica ativa, que agem diretamente no aglomerante e as adições modificadoras das propriedades mecânicas das misturas de concreto e argamassa, como as microfibras e macrofibras (14), (45).

Os materiais pozolânicos apresentam grande quantidade de SiO_2 e um baixo teor de CaO . Eles reagem com a cal, Ca(OH)_2 , produzida durante a fase inicial de hidratação da alita, Ca_3SiO_5 , do cimento Portland e a água para formar gel CSH, que contribui para a resistência da pasta de cimento. Por apresentarem baixo teor de CaO , a quantidade de portlandita na pasta de cimento hidratada é reduzida, com benefícios potenciais em termos de carbonatação reduzida e maior durabilidade (49).

As escórias siderúrgicas adições minerais acrescentadas aos concretos e argamassas são materiais multifásicos com composições químicas e mineralógicas variáveis. Apresentam algumas das fases típicas de compostos cimentícios como silicato dicálcico (C_2S), silicato tricálcico (C_3S) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (50).

As pesquisas com misturas pozolânicas em concreto e argamassas de cimento Portland têm sido discutidas porque as pozolanas desempenham um papel tanto físico quanto químico nas referidas misturas. Em alguns casos podem apresentar um efeito misto e promover uma melhora na hidratação do cimento. As características críticas dos aditivos minerais que atuam como cargas são a área de superfície específica, a distribuição do tamanho das partículas, a forma das partículas e a densidade (51).

O uso de aditivos minerais no concreto e argamassa melhoram não apenas os seus desempenhos, mas também aumentam a taxa de utilização de resíduos sólidos depositados em aterros sanitários promovendo o desenvolvimento sustentável. É um dos principais componentes e indispensável nos concretos modernos. As partículas minerais como cinzas volantes, escórias e pó de calcário podem ser classificadas em dois grupos:

- a) partículas de tamanho comum que variam de (10 a 100) μm ;
- b) e as partículas ultrafinas com tamanhos inferiores a 10 μm (52), (53).

Com a melhoria da tecnologia de moagem ultrafina, os pós pozzolânicos tem recebido maior atenção na produção dos concretos modernos. Como exemplo o uso de escória ultrafina para substituir parte do cimento pode melhorar a classificação com outras partículas devido ao seu efeito de enchimento, o que aumenta a densidade de empacotamento. Assim como os defeitos da baixa resistência inicial do concreto contendo escória comum podem ser melhorados. Como os efeitos de microagregado e pozzolânico estão relacionados com o tamanho da partícula, pode-se afirmar que a escória ultrafina possui alta reatividade, o que melhora a resistência e durabilidade do concreto (54), (55).

Uma das diferenças das adições minerais comuns e as adições ultrafinas é a área específica, as pozolanas ultrafinas possuem área superficial específica maior, o que fornece um grande número de sítios de nucleação para produtos de hidratação, onde o grau de reação aumenta e um grande número de produtos de hidratação é produzido. As adições ultrafinas preenchem os vazios intersticiais das partículas de cimento, o que melhora a compacidade da zona de transição da interface, aumentando significativamente a resistência à compressão axial e a durabilidade do concreto (56), (57).

A Figura 9 mostra as distribuições de tamanho de partícula de escória comum e escória ultrafina. Pode-se observar que enquanto o tamanho das partículas da escória ultrafina é menor que 10 μm a distribuição do tamanho das partículas da escória comum está entre 0 μm e 80 μm .

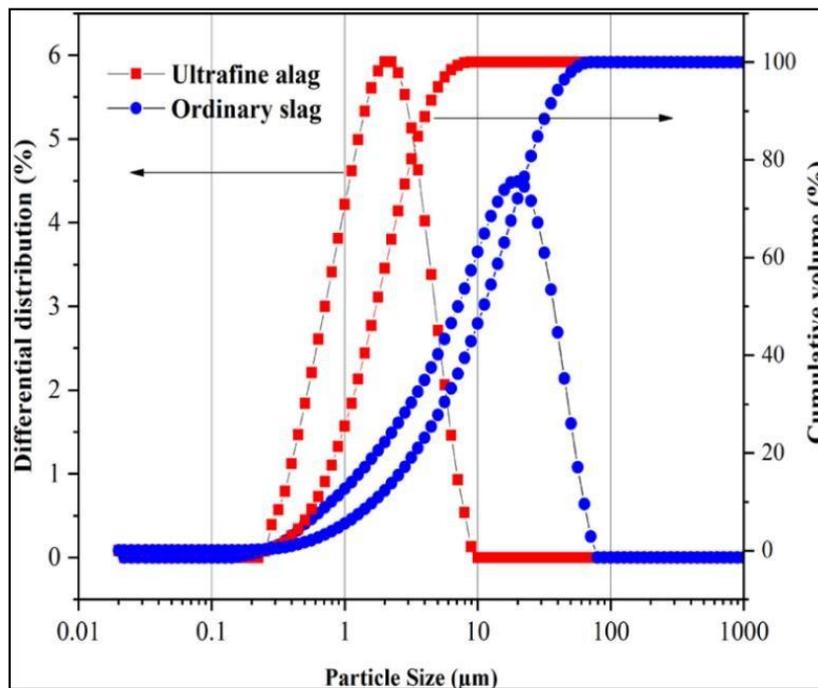


Figura 9: Distribuição granulométrica da escória comum e escória ultrafina, (58)

2.6 Aditivos Químicos

Os aditivos comercialmente disponíveis redutores de água de alta faixa, também denominados como superplastificantes, foram amplamente desenvolvidos e projetados para melhorar a fluidez e trabalhabilidade, bem como outras propriedades de polímeros à base de cimento Portland. Seu efeito redutor de água na produção de misturas de concreto para um determinado teor de cimento permite melhorar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto. O aditivo para concreto é um surfactante polimérico, e adsorve e dispersa partículas de cimento hidratantes. Vários polímeros para essas misturas foram desenvolvidos.

Essas misturas à base de surfactantes incluem lignossulfonatos, denominados plastificantes de primeira geração, e naftaleno/melamina formaldeído sulfonado de segunda geração. A terceira geração de aditivos compostos por polímeros consiste em policarboxilato, poliacrilato ou polietileno à base de éster ou copolímeros de éter em uma estrutura tipo pente (14), (40).

Os aditivos de terceira geração a base de policarboxilato, que age como redutor de água no concreto foi desenvolvido em 1981. Ele tem muitas vantagens sobre os superplastificantes à base de lignossulfonato, à base de melamina e à base de naftaleno, como dispersar partículas de cimento. Assim, está sendo cada vez mais utilizado em concretos como forma de melhorar o seu desempenho. Devido à estrutura única do policarboxilato ele pode ser modificado ou redesenhado alterando a composição dos seus grupos funcionais, comprimento da espinha dorsal, comprimento ou densidade da cadeia lateral para obter um desempenho favorável em materiais à base de cimento. Policarboxilatos com alto teor de grupo carboxílico adsorvem na superfície das partículas de cimento rapidamente e exibem dispersão inicial favorável, mas baixa retenção de abatimento, enquanto que policarboxilatos cadeia lateral longa apresentam efeito de dispersão no cimento (59), (60).

As propriedades da superfície das partículas e as interações coloidais controlam a fluidez e trabalhabilidade dos sistemas cimentícios. Os mecanismos de operação dos superplastificantes para atingir a estabilidade coloidal e a dispersão mostraram ser tanto estabilizações eletrostáticas quanto estéricas para dispersar as partículas e controlar a fluidez. A repulsão eletrostática resulta da carga negativa induzida pela adsorção de superplastificantes, enquanto o impedimento estérico resulta da espessura da camada adsorvida (61), (56). A adsorção e eficiência de aditivos de cimento, por exemplo, superplastificantes, dependem do pH, tipo iônico e concentração do meio dispersante, bem como da carga superficial das próprias

partículas (63).

A Figura 10 mostra que os aditivos não adsorvem no cimento nem modificam as quantidades adsorvidas na mistura. Isso indica que eles permanecem na solução do poro intersticial, onde contribuem para um efeito espaçador entre as partículas de cimento. De acordo com o modelo de conformação de solução de copolímeros em pente é estabelecido que as cadeias laterais dos superplastificantes se alinham em forma de gotas ao longo da cadeia principal do polímero.

Portanto, os codispersantes existem entre essas bolhas e impedem que as partículas de cimento se aproximem muito, caso contrário ocorreria uma perda local das pequenas moléculas. Tal condição é entropicamente desfavorável e, portanto, evitada através da formação de forças repulsivas. Essas interações repulsivas contribuem além da estabilização eletroestérica, como também, para a dispersão do cimento melhorando a fluidez (63).

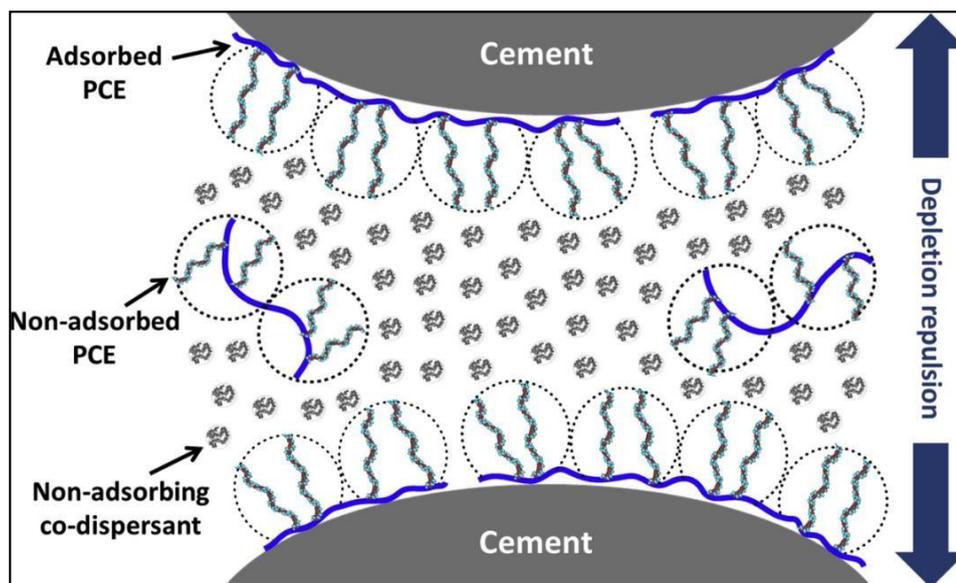


Figura 10: Esboço conceitual ilustrando o mecanismo de trabalho dos codispersantes não adsorventes em cimento em baixas relações a/c (63).

2.7 Trabalhabilidade do concreto

De acordo com (64) trabalhabilidade é a quantidade de trabalho necessária para produzir a compactação total, relacionando-a com o processo de colocação e manuseio do concreto. Para ACI é a propriedade do concreto ou argamassa recém-misturada que determina a facilidade e homogeneidade com que se pode ser misturada, colocada, consolidada e acabada (65).

O ensaio de abatimento, Figura 11, que é simples rápido e barato é quase universalmente

utilizado para quase todos os tipos de concreto de média e alta trabalhabilidade. Existem algumas diferenças na prática com o uso em diferentes países, principalmente no que se diz respeito aos padrões americanos e britânico. Os padrões britânicos e europeu definem que o abatimento deve ser medido até o ponto mais alto do concreto, enquanto o padrão americano e brasileiro especifica a medição até o centro original deslocado da superfície superior do concreto (66).

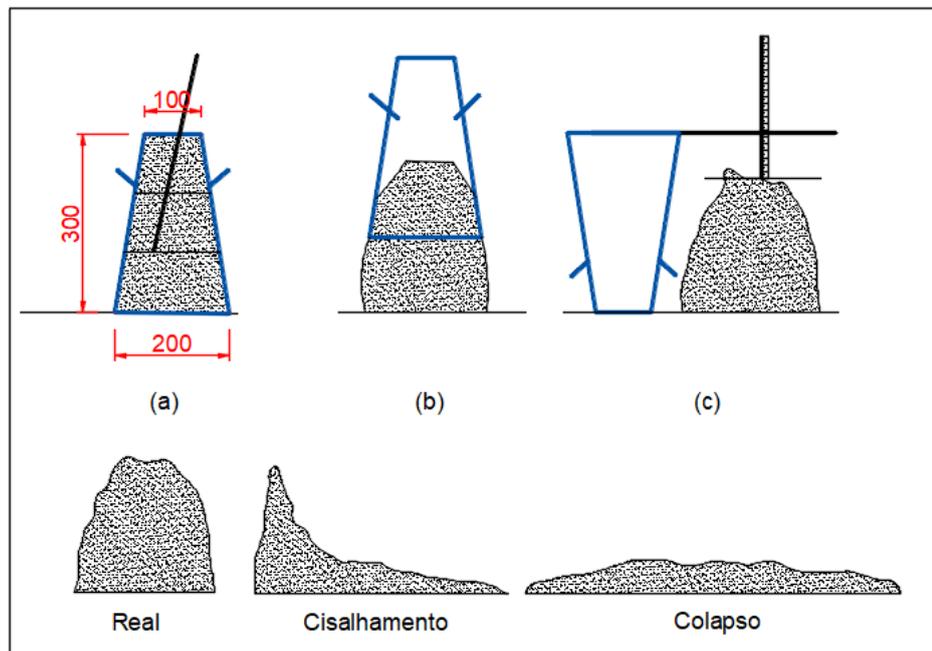


Figura 11: Procedimento do teste de abatimento do concreto: (a) moldagem do corpo de prova; (b) deslizamento vertical do corpo de prova; (c) medida da altura de queda.

O desenvolvimento e o uso crescente de vários tipos de concreto de alto desempenho, como concreto de alta resistência, concreto de alta durabilidade, concreto reforçado com fibras, concreto subaquático e concreto auto adensável; são concretos que contêm uma combinação de aditivos e adições com materiais de substituição do cimento, que, portanto, terão propriedades realógicas diferentes das misturas normais. Descrever a trabalhabilidade de tais concretos é mais difícil do das misturas normais.

2.8 Compatibilidade do aditivo superplastificante e o cimento Portland

O superplastificante e a sua compatilização com o cimento Protland é bastante importante, pois caso o concreto não esteja no abatimento correto para o seu lançamento na obra, não é correto que se adicione mais água. O certo é que seja incorporado um superplastificante para que

seja alcançado o abatimento desejado. Não sendo uma tarefa fácil encontrar uma regra que possibilite uma avaliação da quantidade precisa de superplastificante necessária para aumentar o abatimento, por exemplo, a quantidade de litros em relação a quantidade de cimento em quilogramas para se aumentar o abatimento em milímetros ou centímetros desejados (40).

O controle preciso do desempenho inicial do concreto para lançamento, a trabalhabilidade, onde sem dúvida, está relacionada com a adição de mistura química correta, desempenha o papel dominante no lançamento do concreto em uma construção. No entanto, alguns fenômenos inesperados, como baixa fluidez inicial, endurecimento rápido e pega anormal podem ocorrer através da adição de aditivos químicos, é o que chamamos de incompatibilidade de aditivos com cimento. Então, algumas investigações podem ser feitas sobre este assunto e uma série de fatores podem ser encontrados, que afetam a compatibilidade da mistura com o cimento, por exemplo, o teor de álcali e aluminato tricálcico (C_3A) no cimento, finura do cimento, dosagem e outros (40).

O Slump Test foi primeiramente desenvolvido para a determinação da “trabalhabilidade” ou consistência do concreto em seu estado fresco e tem sido utilizado em muitos campos devido à sua simplicidade de operação e precisão aceitável. No teste de abatimento, um molde cônico ou cilíndrico é cuidadosamente preenchido com o material a ser testado e, em seguida, o molde é elevado verticalmente a uma velocidade constante. O abatimento que é definido como a diferença entre a altura do molde e a altura do material abatido após o fluxo parar, é medido.

Uma medida alternativa para avaliar a compatibilidade do cimento é uma comparação do diâmetro final de espalhamento do material contendo cimento água e superplastificante preenchido em um molde metálico com dimensões 50 mm de base superior, 80 mm de base inferior e 60 de altura elevado verticalmente a uma velocidade constante, conforme mostrado na Figura 12. O teste do mini-slump foi desenvolvido para avaliar a influência de aditivos redutores de água na trabalhabilidade de pastas de cimento Portland puras (67), (68).

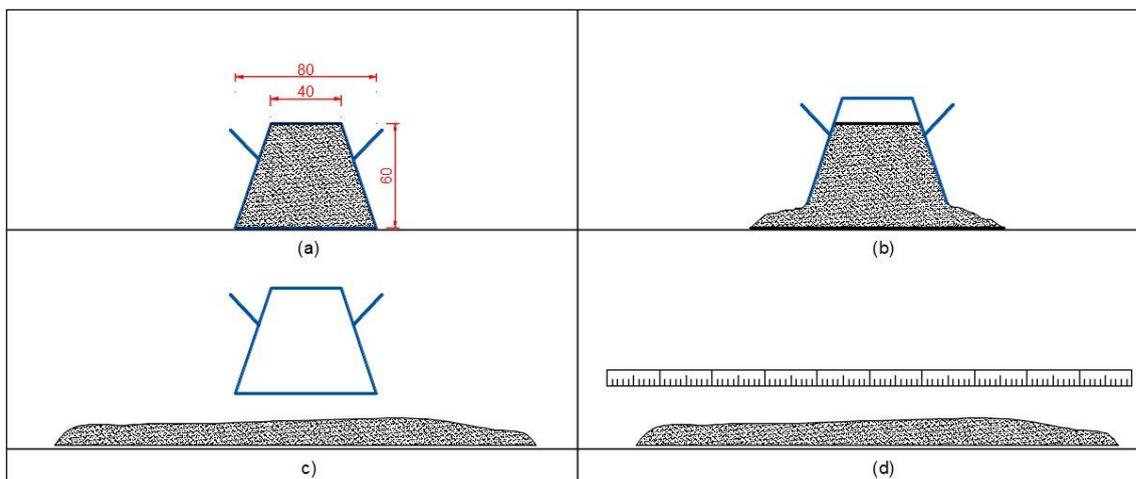


Figura 12: Teste do mini-slump: (a) dimensões do molde metálico com material a ser testado; (b) elevação vertical do molde; (c) espalhamento do material (d) medida do abatimento ou espalhamento (69).

2.9 Resistência do concreto

As propriedades mecânicas dos concretos investigados neste estudo destacam o concreto como produto final de utilização para a indústria da construção civil. Serão abordadas propriedades tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Na fase fresca será investigada a trabalhabilidade e os cuidados com o tempo de cura para a etapa endurecida, onde serão analisadas a resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão.

2.10 Resistência à compressão

De acordo com (14) a resistência é uma propriedade normalmente especificada no projeto do controle de qualidade do concreto, pois quando comparado a ensaios envolvendo outras propriedades apresenta-se como relativamente fácil e com resultados de bastante valor, além das propriedades como módulo de elasticidade, estanqueidade e resistência a intempéries estarem ligadas à resistência e serem deduzidas através dos dados da mesma. A resistência à compressão é a melhor forma de caracterização do concreto e muitas vezes maior que os outros tipos de resistência, além de ser o ensaio aos 28 dias aceito universalmente como um índice geral da resistência para o concreto (14).

A resistência à compressão é obtida por ensaio de curta duração em máquina universal em corpos de prova, que determinado pela Equação (1):

$$\sigma = F/A$$

Equação 1

No Brasil a NBR 6118:2014 estima a quantidade de corpos de prova através de ensaio, são utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro da base 10 cm e altura de 20 cm, onde a moldagem dos corpos de prova é especificada pela ABNT NBR 5738:2015, e o ensaio em conformidade com ABNT NBR 5739/2018, Figura 13, (70), (71), (72).

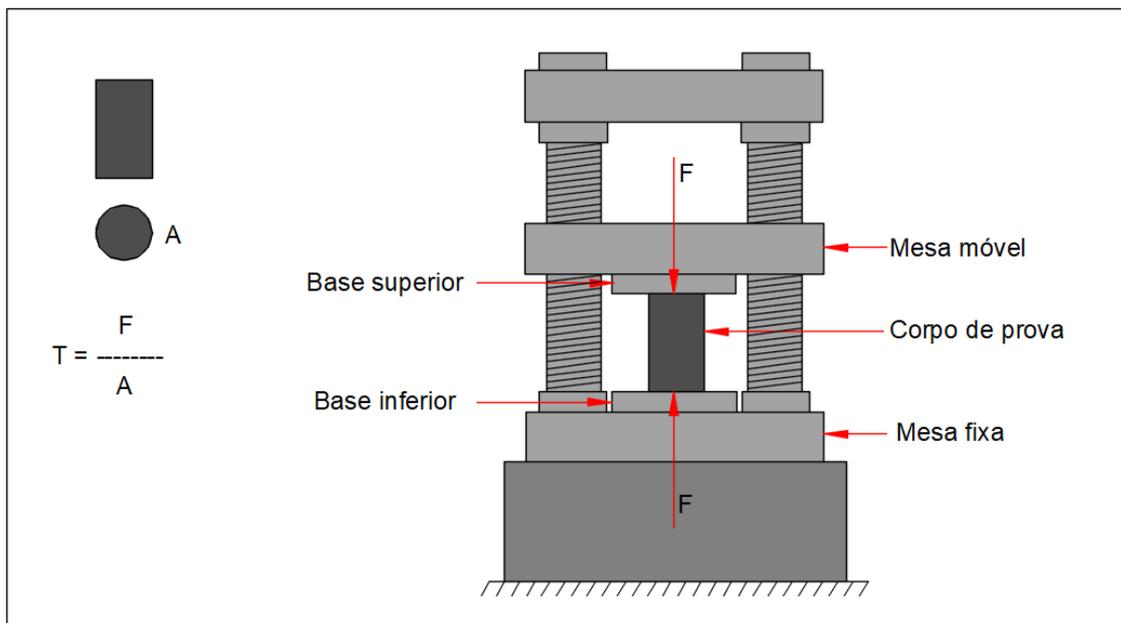


Figura 13: Ensaio de resistência à compressão do concreto.

Os concretos usuais comportam-se como materiais homogêneos e isotrópicos, onde o elo mais fraco é a pasta de cimento hidratado ou a zona de transição. Porém os concretos de alta resistência atuam como materiais compósitos não isotrópicos, compostos de pasta de cimento hidratado e agregados que apresentam propriedades mecânicas muito diferentes. Onde, as propriedades deste material são influenciadas pelas propriedades de cada um destes constituintes, assim como pela relação água/cimento (73).

Da mesma forma que para os concretos convencionais, a resistência à compressão dos concretos especiais, alto desempenho, à medida que a relação água/cimento diminui a resistência aumenta. Porém diferentemente do concreto usual a relação água/cimento é válida até a resistência de ruptura do agregado, pois para os concretos de alta resistência o agregado graúdo é o elo mais fraco da mistura. Quando os agregados graúdos não são mais resistentes em comparação com a resistência da pasta de cimento a resistência a compressão do concreto não aumenta mais significativamente à medida que a relação água/cimento diminui.

Para atingir a resistência e operacionalidade ótimas de uma mistura de concreto, as proporções entre os componentes devem ser adicionadas nas proporções corretas. A resistência à compressão é uma das propriedades mecânicas mais estáticas dos compósitos de concreto. É influenciado por vários fatores, como o tipo e a finura do cimento Portland, o tipo e a quantidade dos aditivos e adições, a relação água/aglomerante, o regime de cura, e outros (26), (74).

O concreto por ser um material multifásico existe uma relação inversa entre porosidade e resistência, onde a porosidade de cada componente da microestrutura pode se tornar um fator limitante para a resistência do conjunto. Nos concretos convencionais os agregados naturais são densos e fortes, enquanto que a porosidade da matriz cimentícia e da zona de transição na interface entre a matriz e agregado graúdo normalmente determinam a resistência característica do concreto de densidade normal (14).

2.11 Resistência do concreto à tração

A International Society for Rock Mechanics (ISRM), as normas C496/C496M-04 da American Society for Testing Material (ASTM), BS1881 Parte 4 e JISA1113 propõem o teste brasileiro de compressão diametral como um método convencional para testar a resistência à tração de materiais frágeis.

O ensaio de tração por compressão diametral é conhecido como ensaio brasileiro de resistência à tração, por ter sido sistematizado pelo professor engenheiro L. F. Lobo Carneiro, onde a resistência é obtida em ensaio segundo a ABNT NBR 7222:2011, conforme Figura 14 (75), (76).

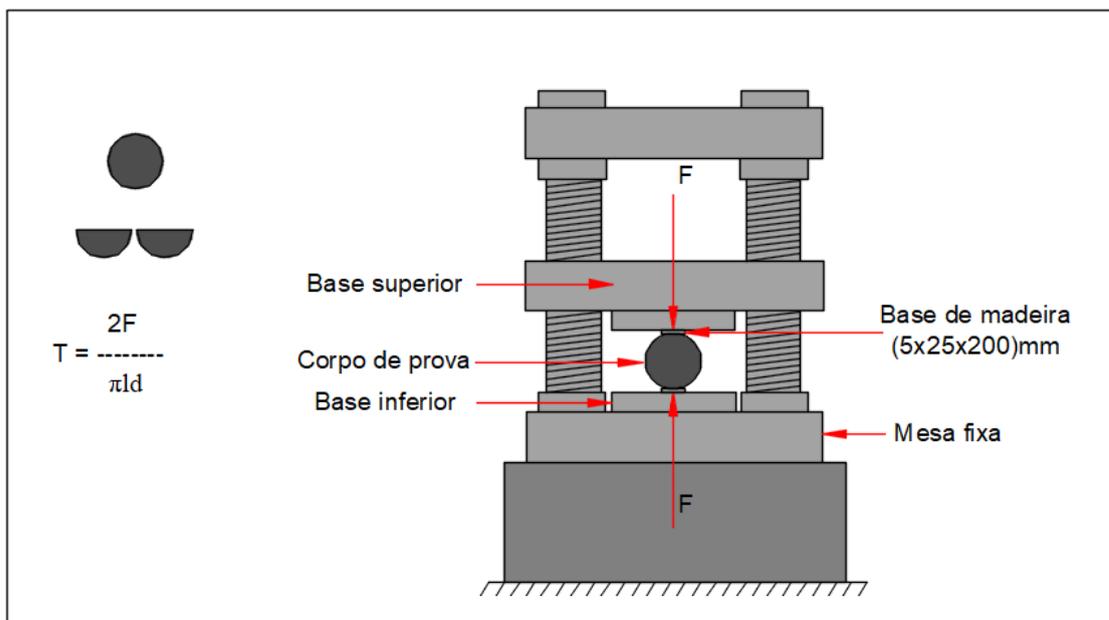


Figura 14: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A razão entre as resistências à tração uniaxial e à compressão geralmente tem variação de 7% a 11%. Devido à facilidade com que as fissuras podem se propagar sob a tensão de tração, isso não surpreende. A maioria dos elementos de concreto, portanto, é projetada supondo-se que o concreto resistirá às tensões de compressão, mas não às de tração.

Nos ensaios de tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222), um corpo de prova de concreto cilíndrico, de 10 por 20 cm, é submetido a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais que são diametralmente opostas. A carga é aplicada continuamente a uma velocidade constante dentro da faixa de resistência à tração por compressão diametral de 0,7 a 1,3 Mpa/minuto até a ruptura do corpo de prova.

A tensão de compressão produz uma tensão de tração transversal, que é uniforme ao longo do diâmetro vertical. A resistência à tração por compressão diametral é calculada com a fórmula:

$$\sigma = \frac{2F}{\pi ld} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

σ = resistência à tração

F = carga de ruptura

l = comprimento do corpo-de-prova

d = diâmetro do corpo de prova

2.12 Resistência do concreto a flexão

Engenheiros que trabalham com concreto armado desprezam o baixo valor da resistência à tração do concreto e usam o aço para suportar cargas de tração. Para grandes estruturas de concreto, como barragens, é impraticável o uso das armaduras de aço. Portanto, é necessário calcular a resistência à tração do concreto com confiabilidade.

De acordo com (14) a resistência à flexão do concreto é da ordem de 15% da resistência à compressão. O motivo de tão grande diferença entre a resistência à tração e à compressão é atribuída à heterogênea e complexa microestrutura do concreto.

No ensaio de flexão uma viga de concreto de 150 por 150 por 500 mm é carregada a uma velocidade de 0,8 a 1,2 MPa/min. A resistência à flexão é expressa em termos de módulo de ruptura, que é a resistência máxima à ruptura calculada por três pontos, Figura 15, a partir da fórmula de flexão (14):

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad \text{Equação 3}$$

onde:

σ = módulo de ruptura

F = carga máxima

L = comprimento do vão

b = largura do corpo de prova

h = altura do corpo de prova

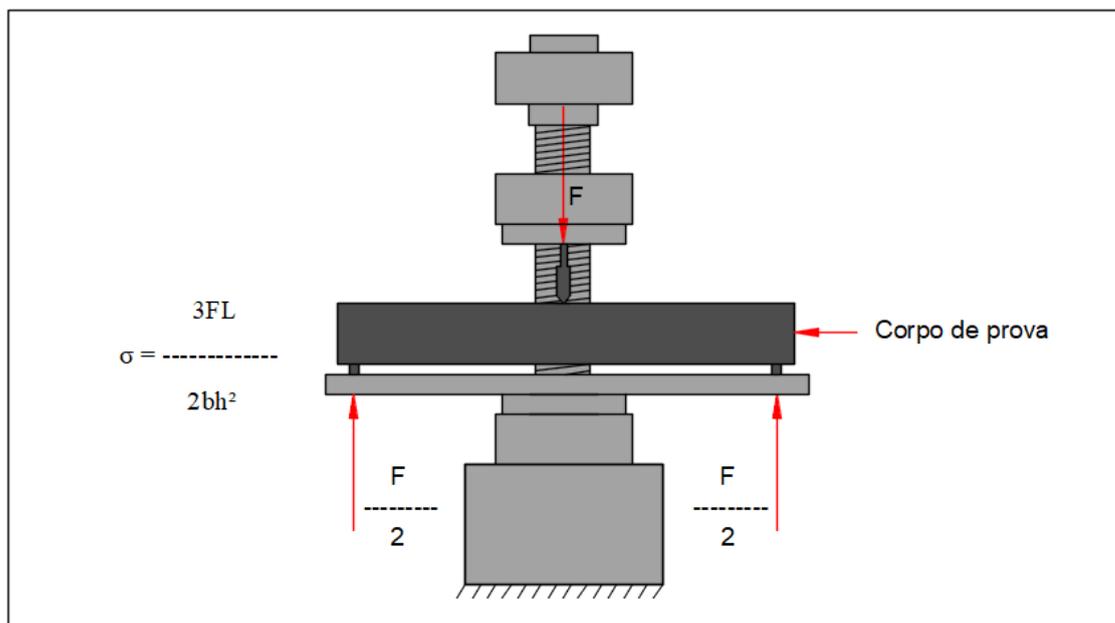


Figura 15: Ensaio de resistência à flexão por três pontos.

Durante as primeiras idades, a resistência do concreto, particularmente a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura do agregado; uma textura mais áspera propicia a formação de uma aderência física mais forte entre a pasta de cimento e o agregado. Em idades mais avançadas, com o desenvolvimento de uma aderência química mais forte entre a pasta e o agregado, esse efeito passa não ser tão importante.

Como visto, para o aumento da resistência a flexão, a adição de microfibras ao concreto convencional é atualmente um método comumente usado no endurecimento no início de cura e resistência as fissuras, entre as quais a adição de microfibras de vidro e microfibras de polipropileno são as mais usuais atualmente.

Na pesquisa (77) as amostras de fibra de polipropileno foram adicionadas em concreto simples na proporção de cimento, areia e agregado grosso. Fibras de polipropileno de 12 mm e 24 mm de comprimento foram adicionadas em 0,1%, 0,2% e 0,3% do volume de concreto. Em relação à mistura de referência, observou-se um aumento de 19% na resistência à flexão quando adicionado 0,2% de fibra de polipropileno de 12 mm. Uma diminuição de 2% na resistência à flexão só foi observada quando se utilizou 0,2% de microfibra de 24 mm de comprimento. A microfibra com menor comprimento apresentou um melhor desempenho em relação às microfibras mais longas e isso pode ser devido à baixa trabalhabilidade e conseqüentemente à consolidação da mistura de concreto, Figura 16. No caso da fibra de comprimento mais curto, obtemos uma mistura homogênea adequada em comparação com a fibra mais longa. Conseqüentemente, somente a adição com 0,10% de microfibra com comprimento de 24

mm apresentou acréscimo de 11% na resistência à flexão para a referida pesquisa.

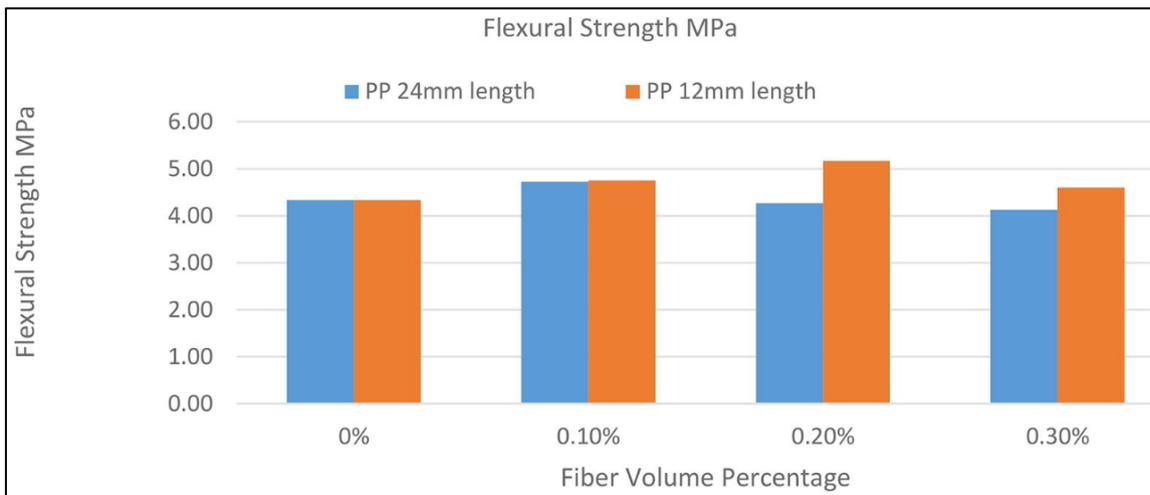


Figura 16: Tensão de flexão com adição de fibra de polipropileno nas proporções 0%, 0,10%, 0,20% e 0,30% (77).

Em comparação ao estudo de (78) que investigou os efeitos da adição de fibra de vidro e fibra de polipropileno com base na relação água/aglomerante e no teor de fibras. Para garantir a trabalhabilidade, durabilidade e propriedades mecânicas de um concreto reforçado com fibras, as razões água/aglutinante foram ajustadas para 0,3 e 0,35, respectivamente, enquanto a fração de volume de fibra de vidro e fibra de polipropileno foram 0,45%, 0,90% e 1,35%.

Para o referido estudo os resultados da resistência à flexão das amostras de concreto com adições de fibra de vidro (GFRC) e misturas de concreto com adições de polipropileno (PPFRC) quando w/b é 0,30 e 0,35. Conforme mostrado na Figura 17, a adição de fibra de vidro melhorou consideravelmente a resistência à flexão com a variação do fator água/aglutinante do concreto, enquanto a incorporação de fibras de polipropileno a reduziu.

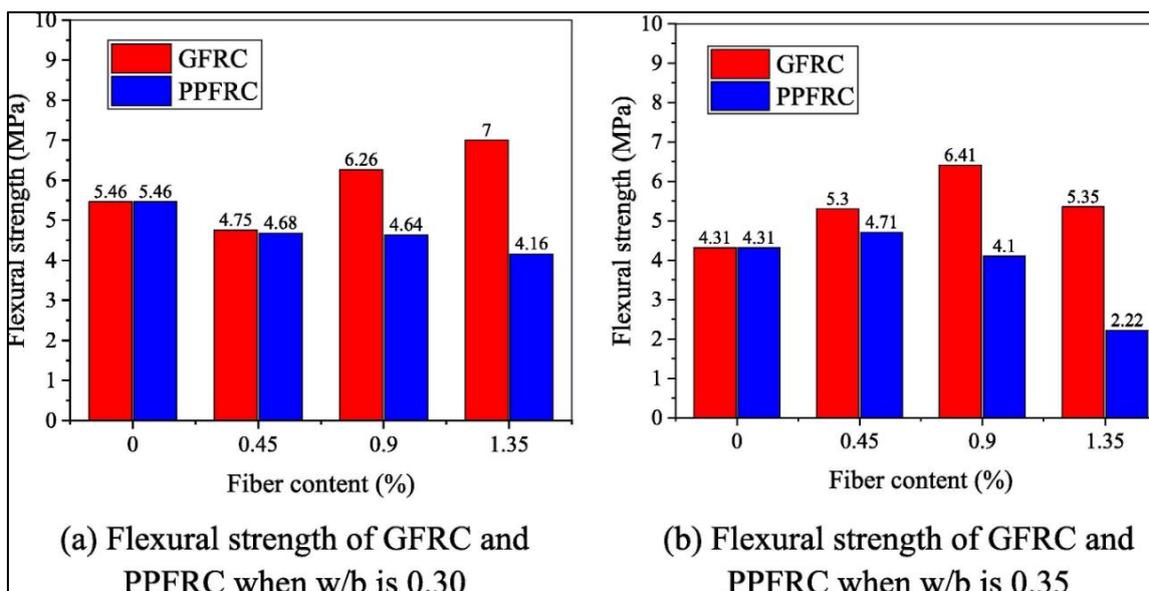


Figura 17: Tensão de flexão com adição de fibra de vidro (GFRC) e fibra de polipropileno (PPFRC) nas proporções 0%, 0,10%, 0,20% e 0,30% (78).

De acordo com os gráficos acima as resistências à flexão das misturas de concreto simples PC-30 e PC-35 foi de 5,46 MPa e 4,31 MPa, respectivamente. Quando o fator água/aglutinante é 0,30, a resistência à flexão dos espécimes de GFRC diminuiu um pouco quando a dosagem de fibra de vidro foi de 0,45%, porém os valores de resistência à flexão aumentam com o aumento das dosagens de fibra de vidro 0,90% e 1,35%, onde o valor máximo, ou seja, 7,0 MPa, ocorreu em 1,35% de fibra de vidro e foi 28,2% maior que a mistura de referência. Para as misturas com fibra de polipropileno com fator aglutinante/água de 0,35, apenas a resistência à flexão de com percentual de fibra de 0,45 melhorou ligeiramente, enquanto todas as outras misturas dos fatores 0,30 e 0,35, diminuíram com o aumento da dosagem de microfibras de polipropileno.

2.13 Difração de raios X - DRX

Uma forma prática para determinar a análise mineralógica de sólidos cristalinos é a técnica de difração de raios X (DRX). Quando um mineral cristalino é exposto aos raios X de um determinado comprimento de onda, as camadas dos átomos difratam os raios produzindo um padrão de picos que é característico do mineral. O ângulo de difração, escala horizontal, de um padrão típico de DRX fornece o espaçamento do arranjo cristalino, enquanto que a altura do pico, escala vertical, indica a intensidade do raio difratado.

Quando uma amostra submetida à análise por raios X contém mais do que um mineral, a intensidade dos picos característicos dos minerais individuais são proporcionais às suas quantidades, Figura 18, (14), (79).

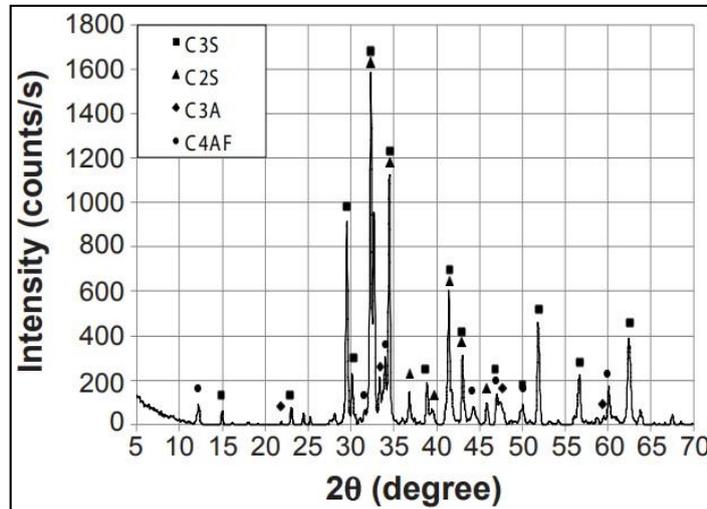


Figura 18: Padrões de difração de raios X de: (a) clínquer puro: C3S-alita($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$); C2S-belita($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$); C3A-aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$); C4AF- tetraferroaluminato de cálcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) (79).

De acordo com (80) o padrão DRX de cada material cristalino é único. As posições dos picos são determinadas pelo espaçamento dos planos cristalográficos de acordo com a lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Equação 4}$$

onde:

n é um número inteiro;

λ é o comprimento de onda da radiação usada;

d o espaçamento dos planos de cristal;

θ o ângulo do pico de difração.

A intensidade dos picos é determinada pelos tipos e posições dos átomos na rede cristalina de acordo com o fator de estrutura:

$$F(hkl) = \sum N f_n \exp 2\pi i (hx_n + ky_n + lz_n)$$

Equação 5

Onde:

hkl são os índices de Miller dos planos refletoraes;

f_n o fator de estrutura atômica;

x_n, y_n e z_n , as coordenadas do átomo n na célula unitária contendo N átomos.

A formação desses picos de difração em conformidade com a lei de Bragg quando vista em nível de planos cristalinos pode ser observada na Figura 19, que ilustra o fenômeno:

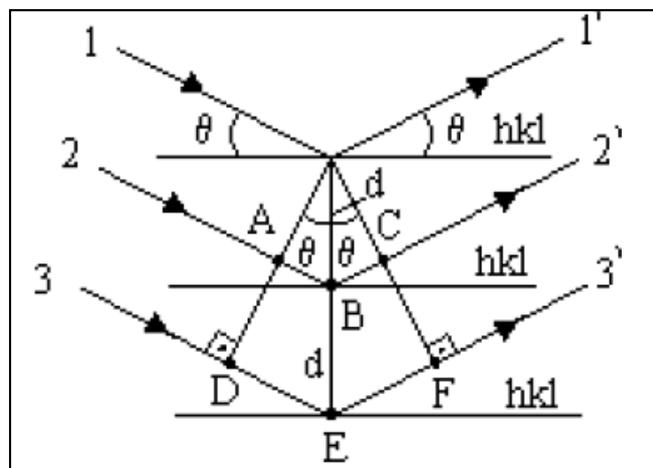


Figura 19: Interferência entre raios a nível planar (81).

2.14 Microestrutura do concreto

O tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua microestrutura. Os elementos macroscópicos de um material podem ser vistos facilmente em uma seção transversal, os elementos mais finos, por sua vez, são geralmente analisados com a ajuda de um microscópio. O termo macroestrutura é geralmente usado para a microestrutura grosseiramente visível a olho nu; o limite de resolução do olho humano é aproximadamente um quinto de um milímetro.

O termo microestrutura é usado para a porção com grandeza microscópica da macroestrutura. A capacidade de aumento dos microscópios eletrônicos modernos é da ordem de 10^5 vezes. Assim, a aplicação de técnicas de microscopia eletrônica de transmissão e varredura permite analisar a microestrutura de materiais até fração de um micrômetro (14).

A microscopia pode melhorar as propriedades mecânicas do concreto pela manipulação

de sua homogeneidade particulada e porosidade. Uma melhor microestrutura ser alcançada removendo agregados graúdos e reduzindo a relação água/cimento para reduzir o teor de CaO-SiO_2 da mistura. A microestrutura pode demonstrar que as adições minerais e nanopartículas podem não apenas preencher os poros maiores entre as partículas de cimento, mas também reduzir a fissuração devido ao calor de hidratação, criando assim uma matriz de concreto mais densa (82), (83).

Quase todos os instrumentos de microscopia eletrônica de varredura são equipados com espectroscopia de raios X de energia dispersiva que pode ser usada para medir a hidratação do concreto das partículas de cimento, tamanho dos poros, distribuição da forma e teor de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e CSH na escala de microns, conforme mostrado na figura 20 (84).

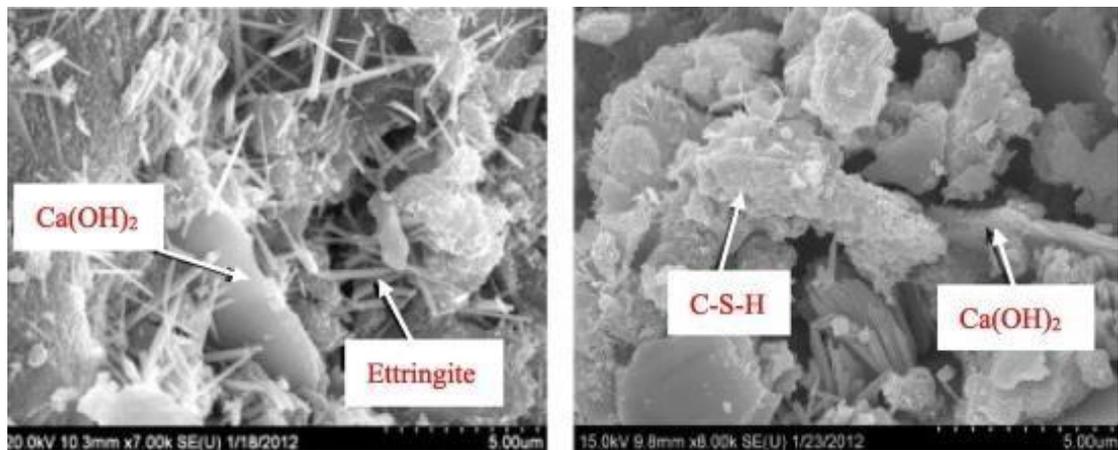


Figura 20: Microscopia eletrônica de varredura (85)

Um dos objetivos ao se estudar a microestrutura do concreto é acelerar suas reações de hidratação; pois ao usar esta ação, a produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é aumentada e o hidróxido de cálcio (CH) na microestrutura é minimizado. De acordo com pesquisas realizadas no concreto de alto desempenho é que inclusão de micro sílica pode ser útil para acelerar as reações de hidratação (85).

A microestrutura dos resultados dos concretos de alto desempenho com adições minerais mostra que o uso de substitutos do cimento (calcário e escória granulada de alto-forno), além de reduzir a quantidade de cimento não hidratado cria uma matriz de cimento mais densa e uniforme (85).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da figura 21 apresenta as fases do procedimento experimental, onde na primeira fase encontram-se as caracterizações físicas, químicas e morfológicas das matérias-primas utilizadas na pesquisa, enquanto que na segunda fase estão os ensaios mecânicos e caracterizações físicas das misturas de concreto utilizadas na pesquisa MR, MFPP e MFV.

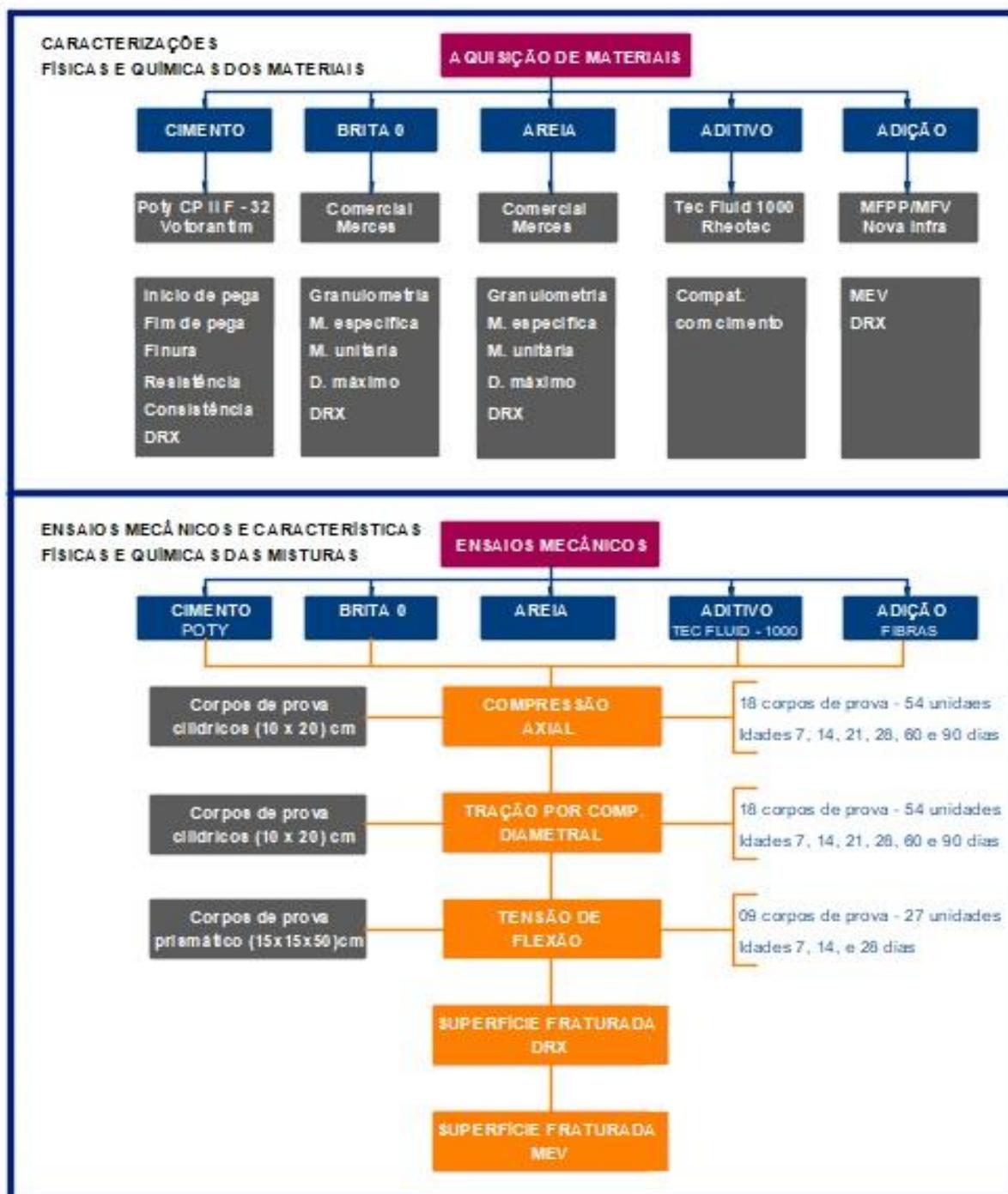


Figura 21: Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Cimento

Para as dosagens de concreto o cimento utilizado foi o Portland com adição de filler, caracterizado como CP II - F - 32, de fabricação da empresa Votorantim comercializado em Manaus. O cimento foi armazenado em toneis e utilizado dentro do prazo de validade, para que suas propriedades originais não fossem alteradas. As características do cimento são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Ensaio físico de caracterização do cimento

Ensaio	Valor encontrado
Tempo de início de pega (minutos)	180
Tempo de fim de pega (minutos)	285
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	12,4
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	32,5
# 200 finura (%)	1,90

Fonte: Os resultados de caracterização física foram obtidos em laboratório.

3.2 Agregados

Os agregados utilizados na produção dos concretos são de natureza mineralógica e comercializados na cidade de Manaus. O agregado miúdo utilizado foi a areia natural de terra firme, enquanto que o agregado graúdo foi a brita 0. A Tabela 5 apresenta a caracterização física dos materiais determinadas no Laboratório de Materiais de Construção do IFAM.

Tabela 5: Características físicas dos agregados usados na produção dos concretos

Ensaio	Método de ensaio		Areia	Brita
Massa específica (Kg/dm ³)	NBR 9776/87	NBR 9937/87	2,63	2,63
Massa unitária (kg/dm ³)	NBR NM 45:2006	NBR NM 45:2006	1,59	1,43
Módulo de finura	NBR 7211/22	NBR 7211/22	2,21	5,82
Diâmetro máximo (mm)	NBR NM 248:2003	NBR NM 248:2003	1,20	9,50
Coefficiente de inchamento (%)	NBR 6467/06	-	53,00	

Fonte: Ensaio no Laboratório de Materiais de Construção do IFAM.

Tanto os agregados graúdos e miúdos passaram por ensaio de granulometria, suas características físicas: massa específica, massa unitária, módulo de finura e diâmetro máximo e coeficiente de inchamento foram determinados experimentalmente em conformidade com as normas indicadas na Tabela 5.

3.3 Água

Para a produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente da rede de abastecimento local – Águas de Manaus.

3.4 Microfibras

Dois tipos de microfibras foram usadas nesta pesquisa com propriedades detalhadas na Tabela 6. As fibras foram provenientes da Empresa Nova Infra Brasil. As duas microfibras possuem alta resistência a álcalis e ácidos, o que as torna adequadas para ambientes altamente corrosivos. Isso também significa que são resistentes a alta alcalinidade dos concretos. Além disso, seus respectivos pontos de fusão, conforme apresentado na Tabela 6, estão acima de 160°C, o que os torna resistentes a danos durante a hidratação com a elevação do gradiente de temperatura. Imagens de MEV das superfícies das fibras são mostradas na Figura 22. Conforme observado nas imagens MEV, as microfibras de vidro apresentam formas mais regulares do que as microfibras de polipropileno.

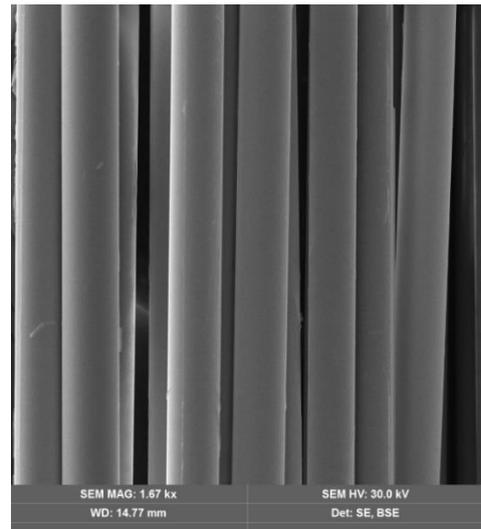
Tabela 6: Características das microfibras empregadas nas misturas de concreto

ID da fibra	Comprimento (mm)	Diâmetro	Ponto de fusão	Ponto de ignição	Densidade específica	Deformação na ruptura
FPP	12 a 15	18 µm	160°C	365°C	0,92g/cm ³	25%
FV	18	14 µm	860°C	900°C	2,68g/cm ³	0,3%

Fonte: Nova Infra fibras.



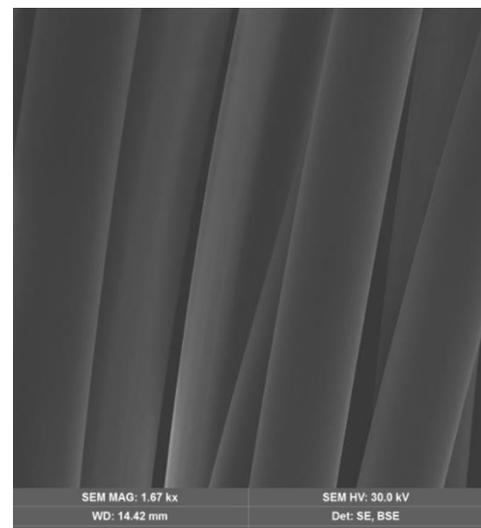
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 22: Imagens MEV das microfibras de vidro e microfibras de polipropileno, (a) microfibras de vidro, (b) MEV microfibras de vidro, (c) microfibras de polipropileno, (d) MEV microfibras de polipropileno.

3.5 Aditivo Superplastificante

O dispersante polimérico superplastificante utilizado foi o da Rheotec aditivos de concreto e argamassas com nome comercial de Tec Fluid 1000. Nos ensaios foi verificado que misturando previamente o dispersante à água as misturas apresentavam maior trabalhabilidade quando comparado a adição diretamente ao material já com água. A Tabela 7 apresenta as características técnicas do dispersante empregado na produção dos concretos.

Tabela 7: Especificações técnicas do aditivo (Rheotec)

Características	Valor
Função principal	Superplastificante
Base química	Naftaleno sulfonado
Aspecto	Líquido de cor marron
Densidade	$1,2 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
PH	$8,0 \pm 1,0$

Fonte: Rheotec aditivos de concreto e argamassas.

Todas as misturas de concreto utilizadas nesta pesquisa utilizaram o mesmo teor de superplastificante Tec Fluid 1000 de 2% da massa de cimento, a Figura 23 mostra o controle da quantidade do aditivo e dos outros materiais nas misturas ensaiadas.



(a)



(b)

Figura 23: Aditivo superplastificante: (a) medida da quantidade de superplastificante da mistura; (b) medida dos materiais para preparação das misturas

3.6 Ensaio de compatibilidade do cimento

Para avaliar a compatibilidade do cimento e a quantidade de superplastificante Tec Fluid 1000 a ser adicionada no concreto foi realizado o ensaio de Kantro. Um minicone metálico com 50 mm de base superior 80 mm de base inferior e 60 mm de altura foi usado para o experimento. Uma placa acrílica quadrada foi usada como base para teste. O minicone é colocado no centro da placa de acrílico e então preenchido com a pasta de cimento e superplastificante. Após o enchimento completo o cone foi levantado lentamente e a pasta

espalha-se na placa acrílica. Diferentes quantidades de superplastificantes foram testadas para se encontrar a quantidade ótima Tabela 8. O diâmetro da pasta foi medido após 2 minutos de espalhamento e a propagação média em duas direções estão demonstradas na Figura 24. A quantidade ótima de superplastificante para o tipo de cimento utilizado foi de 2%, onde pode-se verificar a perda de fluidez da pasta.



Figura 24: Ensaio de Kantho de compatibilidade do cimento e do superplastificante Tec Fluid 1000: (a) levantamento vertical do minicone; (b) medida do espalhamento após 2 minutos para a estabilização do material.

Tabela 8: Misturas do ensaio de espalhamento

Cimento (g)	Água (g)	Aditivo (%)	Espalhamento (cm)
200	60	-	9,0
200	60	0,4	14,5
200	60	0,8	19,0
200	60	1,0	20,5
200	60	1,5	27,0
200	60	2,0	27,9
200	60	3,0	28,1
200	60	5,0	28,4

Fonte: Os resultados de caracterização física foram obtidos em laboratório.

3.7 Dosagem

Duas características foram tomadas como mais significativas na produção de todas as

misturas de concreto analisadas nesta pesquisa, a relação água cimento e as resistências para diferentes idades de ruptura. Após a definição dos traços, Tabela 9, foram produzidas primeiramente as misturas de referência para posteriormente as misturas com microfibra de vidro e microfibra de polipropileno, respectivamente, para todos os ensaios mecânicos.

Consistência de misturas de concreto medida pelo teste de abatimento foi mantido no nível (210 ± 20) mm para que se mantivesse constante o fator a/c para todas as misturas estudadas. Os detalhes das proporções de mistura investigadas neste estudo são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Proporções de mistura utilizadas nos ensaios mecânicos

Mistura	Proporção da mistura (kg/m ³)					
	Cimento	Areia	Brita	SP	Volume fibra	Água
MR	1	1,98	2,21	2%	-	0,425
MFV	1	1,98	2,21	2%	600g/m ³	0,425
MFPP	1	1,98	2,21	2%	600g/m ³	0,425

Fonte: Os resultados de caracterização física foram obtidos em laboratório.

3.8 Produção das misturas de concreto

Como forma de controle rigoroso do fator água/aglomerante todos os agregados antes da produção dos concretos foram colocados em estufa por um período de 24 horas. Os agregados foram originários da mesma jazida e acondicionados em tonéis para que não houvesse falta ou mudança nas características das matérias-primas, a Figura 25 demonstra o processo de preparação das misturas de concreto.



(a)



(b)

Figura 25: Preparação da mistura: (a) colocação dos materiais; (b) mistura dos materiais.

Os concretos foram misturados em betoneira com capacidade de tambor de 320 L e capacidade de mistura de até 230 L, com número aproximado de 15 ciclos/hora e produção horária de 3,5 m³ de concreto.

Todas as misturas de concreto foram produzidas seguindo a mesma sequência de produção, inicialmente eram despejados os 100% do agregado grosso e 70% da quantidade da água de amassamento, já previamente misturada com o aditivo superplastificante, em seguida o cimento, o agregado fino, os últimos 30% de água restantes, homogeneizando até alcançar a trabalhabilidade desejada e finalmente, quando necessário, a adição das microfibras.

Após a finalização do processo de produção dos concretos eram realizados os procedimentos do teste de abatimento do concreto, através do ensaio de queda “slump test”, que é um ensaio rápido e utilizado para quase todos os tipos de concreto de média e alta trabalhabilidade. A Figura 26 demonstra o seu procedimento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 26: Procedimentos de execução do teste de abatimento “slump test”: (a) procedimento de adensamento em três camadas e 25 golpes/camada; (b) nivelamento da parte superior do cone para retirada do mesmo; (c) deslizamento vertical do cone; (d) medida da altura de queda.

3.9 Moldagem dos corpos de prova

Com o objetivo de propor (padronizar) o procedimento de moldagem dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios mecânicos de compressão axial e tração por compressão diametral de acordo com NBR 5738/15, o programa experimental de moldagem das amostras até a sua ruptura foi dividido em 4 (quatro) fases conforme explicado a seguir:

Primeira Fase: correspondente a preparação dos moldes cilíndricos, onde os mesmos foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral para facilitar o processo de desmoldagem.

Segunda Fase: o processo de moldagem foi sempre realizado em três camadas adensadas por 12 golpes cada camada.

Terceira Fase: desmoldagem, identificação das idades de ruptura 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias, marcação do corpo de prova, quando fosse o caso, e cura por imersão dos mesmos em tanque de água saturada de cal.

Quarta Fase: retirada dos corpos de prova 48 horas antes da realização dos ensaios mecânicos. Todas as quatro fases encontram-se ilustradas nas Figuras 27 (a), (b), (c) e (d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 27: Processo de moldagem e cura dos corpos de prova: (a) preparação dos moldes; (b) procedimento de moldagem; (c) desmoldagem e identificação; (d) retirada do tanque de cura.

As amostras após a retirada do tanque de cura passaram por regularização da superfície de contato com a máquina de ensaio, feita com enxofre, as amostras de tração por compressão diametral foram marcadas as posições do sentido de aplicação da carga na prensa, para facilitar o seu posicionamento antes do início do ensaio, conforme mostrado na Figura 28.



(a)



(b)

Figura 28: Preparação das amostras para os ensaios de compressão e tração por compressão diametral: (a) procedimento de capeamento das amostras para o ensaio de compressão axial; (b) amostra demarcada no início de aplicação da carga para o ensaio de tração por compressão diametral.

3.10 Ensaios Mecânicos

O concreto básico para análise foi um concreto referência (MR) composto por cimento Portland CP II - F, fabricado no Brasil, areia de rio, granito britado com diâmetro máximo de 9,5 mm, e aditivo superplastificante, com pH 8,0, massa específica 1.2 g/cm^3 e teor de sólidos de 38,0%. Utilizou-se o TEC-FLUID 1000 para que houvesse uma redução da quantidade de água de amassamento no concreto, água/cimento foi fixada em 0,425.

3.10.1 Ensaio de compressão

Para o ensaio de resistência à compressão foram criados três grupos de amostras de concreto MR, MFV e MFPP em corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura com três amostras para cada idade 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias, usando uma prensa universal com capacidade de 60 t de acordo com a NBR 5739/18, Figura 29. Vinte e quatro horas após a moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e curados em água saturada de cal por até 48 horas antes de serem ensaiados.



(a)



(b)

Figura 29: Ensaio de compressão axial: (a) amostras após capeamento com enxofre para regularização da superfície de contato com a prensa de ensaio; (b) procedimento de ensaio.

3.10.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram criados três grupos de amostras de concreto MR, MFV e MFPP em corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura com três amostras para cada idade 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias, usando uma prensa universal com capacidade de 60 t de acordo com a NBR 7222/11, Figura 30. Vinte e quatro horas após a moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e curados em água saturada de cal por até 48 horas antes de serem ensaiados.



(a)



(b)

Figura 30: Procedimentos de ensaio de tração por compressão diametral: (a) amostra sobre efeito de aplicação de carga; (b) finalização do ensaio com a ruptura da amostra.

3.10.3 Ensaio de Flexão

O ensaio de resistência à flexão foi investigado pelo carregamento de flexão por três pontos realizados em três lotes de concreto MR, MFV e MFPP em corpos de prova cúbicos de 50 cm comprimento, vão de 45 cm entre os apoios, altura de 15 cm e largura de 15 cm. O ensaio de flexão em três pontos foi realizado em três amostras para cada idade 7, 14, e 28 dias, usando uma prensa universal com capacidade de 60 t de acordo com a NBR 12142/10. Vinte e quatro horas após a moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e curados em água saturada de cal por até 48 horas antes de serem ensaiados, Figura 31.



Figura 31: Ensaio de flexão: (a) demonstração do corpo de prova antes da aplicação da carga; (b) finalização do ensaio com ruptura da viga de ensaio.

3.11 Caracterização química e morfológica

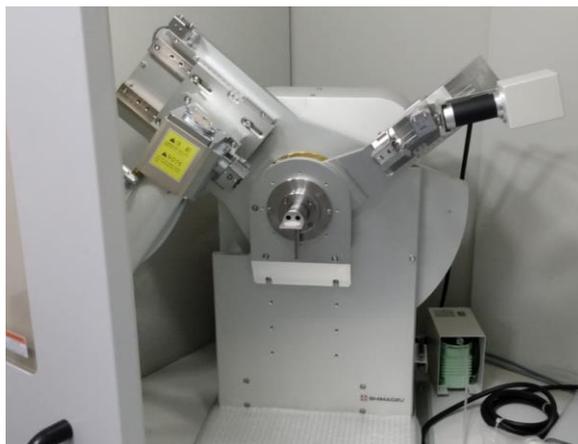
3.11.1 Difratomia de raios X

As análises foram realizadas em Difratorômetro de raios X, modelo XRD-7000 (Maxima) da Shimadzu, Figura 32, com um ânodo de cobre como fonte de radiação de raios X ($\text{CuK}\alpha = 0,15406 \text{ nm}$), com tensão de 40 kV e 30 mA de corrente, no intervalo 2θ variando de 10° a 80° com velocidade de 2° min^{-1} e passo de $0,02^\circ$.

Sendo assim, a cristalinidade das amostras foi calculada por meio do software *Crystallinity* que faz parte do pacote opcional do sistema interligado ao do equipamento da Central Analítica do IFAM/CMC.



(a)



(b)

Figura 32: Difratorômetro de raios X: (a) colocação do material no porta-amostra; (b) encaixe da amostra de material no equipamento para início do ensaio.

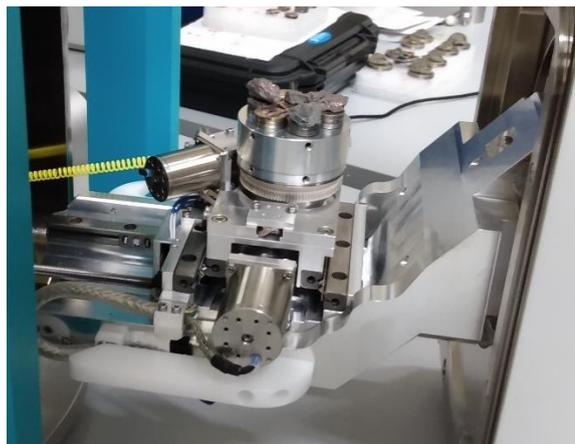
3.11.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microestrutura dos concretos foi analisada por: observação da morfologia das superfícies de fratura, análise de imagens de cortes transversais de amostras e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Observações da microestrutura bem como da morfologia da zona de transição interfacial entre pasta de cimento e as microfibras adicionadas as misturas. As superfícies fraturadas foram obtidas durante os ensaios mecânicos. As observações de MEV/EDS foram realizadas em amostras de dimensões de aproximadamente 5 e 6 mm de diâmetro.

Foi usado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de alto e médio vácuo TESCAN VEGA3 com fonte de elétrons de filamento de tungstênio, MEV acoplado com EDS de janela fina para análise de composição elementar. As superfícies fraturadas foram banhadas a ouro e montadas em um stub de alumínio usando fita de carbono. Foi utilizada uma tensão de aceleração de 30 kV, uma corrente de emissão nominal de 20 μA e uma distância de trabalho de 15,74 mm. Foram usados para observar a superfície das microfibras FPP, FV e as superfícies fraturadas das misturas de concreto MR, MFV e MFPP aos 90 dias de cura, Figura 33.



(a)



(b)

Figura 33: Ensaio de microscopia eletrônica de varredura – MEV: (a) preparação das superfícies fraturadas montadas em stub de alumínio com uso de fita de carbono; (b) colocação das amostras fraturadas na câmara interna do MEV para análise das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Trabalhabilidade das misturas

Os resultados experimentais dos abatimentos são apresentados na Figura 34. A principal razão para a diminuição do abatimento de 210 mm, 130 mm e 110 mm das misturas MR, MFV e MFPP, respectivamente, é que as microfibras de polipropileno são filamentos muito finos que se dispersam com facilidade na mistura de concreto, evitando a segregação do concreto, porém com área superficial específica maior que a microfibra de vidro, e ainda, por serem materiais que foram adicionados a mistura de concreto convencional.

De acordo com Soliman e Nehdi (86) em seus resultados experimentais indicaram que a adição de microfibras de wollastonita com proporção de 10% e 19% reduziu a trabalhabilidade da mistura em comparação com a mistura controle sem microfibras de wollastonita, enquanto que na proporção de adição de 5% de microfibras a trabalhabilidade da mistura aumenta. Os autores afirmam que quando a adição de microfibra é alta, a diminuição na trabalhabilidade da mistura é causada principalmente pelo entrelaçamento das microfibras de wollastonita aciculares. No entanto, quando as microfibras de wollastonita são de tamanho muito pequeno, elas podem fornecer um efeito lubrificante interno, resultando em uma redução na demanda de água.

A diminuição da trabalhabilidade dos compósitos cimentícios com a adição de

microfibras é justificada pela grande área superficial específica das microfibras que aumentam a demanda por água, além da forma de agulha das microfibras que aumenta o entrelaçamento entre as microfibras e a pasta de cimento (87), (88).

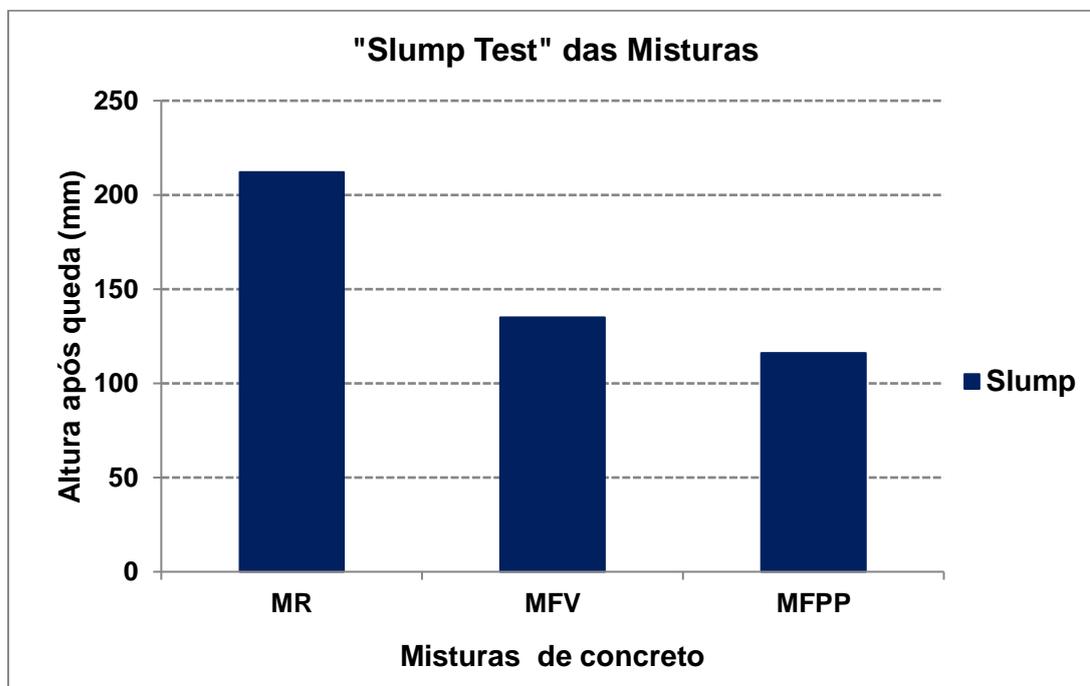


Figura 34: Teste de queda "slump test", média das alturas de queda dos concretos MR, MFV e MFPP.

De acordo com os resultados da Figura 34 a adição de microfibras no concreto possibilita a contenção de fissuração no concreto endurecido, e altera as condições de consistência e reologia da mistura e a sua trabalhabilidade. É uma modificação que depende de vários fatores, dentre os quais o tipo de fibra, a quantidade adicionada e a geometria da fibra. As modificações ocorrem por dois fatores: a) quando adicionamos fibras às misturas de concreto, principalmente as de maiores dimensões, diminui-se a mobilidade relativa das partículas, em particular os agregados miúdos; b) o aumento da área superficial, quando se adiciona fibras ao concreto, adiciona-se também uma grande área superficial demandando água na mistura para que se tenha a mesma consistência do concreto de referência. As microfibras de maior área superficial solicitarão maior quantidade de água de amassamento, produzindo acréscimo de coesão e diminuição da mobilidade do compósito no estado fresco (89)

De acordo com (90) em concretos com fibra a avaliação direta dos valores obtidos no ensaio de abatimento pode não representar a trabalhabilidade adequadamente dos compósitos.

Esse fato é devido ao ensaio estar baseado em condições estáticas nas quais as fibras possuem, em geral, tendência de reduzir o abatimento, criando uma aparente falta de trabalhabilidade, podendo o compósito responder muito bem quando submetido à vibração, logo o ensaio de abatimento fornece apenas uma indicação qualitativa da trabalhabilidade da massa.

Na pesquisa de (91) investigou o concreto reforçado com fibra de vidro na produção de concreto de resistência convencional C25. Fibras de vidro foram adicionadas com porcentagens variáveis de 0,05%, 0,1%, 0,15% e 0,2% sobre o peso total do cimento. A relação água/cimento 0,40 manteve-se a mesma para todas as misturas e atingiram um valor de abatimento de 35 mm para o concreto de referência. Na Tabela 10 pode-se observar que o abatimento das misturas de com fibra de vidro diminuem com o aumento do teor de fibras. Isso se deve ao aumento da natureza de ligação do reforço das fibras de vidro. Para os autores à medida que se aumenta o percentual de fibra de vidro no concreto, diminui-se a capacidade de fluxo do concreto preparado devido à resistência imposta pela fibra de vidro no fluxo ou viscosidade do concreto.

Tabela 10: Mostra o valor do *Slump*

Amostra	% de fibra de vidro	Teste de queda (mm)
1	0,00	36,0
2	0,05	32,5
3	0,10	24,6
4	0,15	14,0
5	0,20	0,00

Fonte: (91).

4.2 Compressão axial

Os valores de resistência à compressão de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias aumentaram continuamente para todas as misturas, conforme mostrado na Figura 35, como era de se esperar. As misturas de concreto convencional tiveram crescimento de 14%, 32%, 45% 53% e 56% em referência a resistência aos 7 dias, 28,40 MPa, 32,46 MPa, 37,48 MPa, 41,41 MPa, 43,56 MPa e 44,32 MPa respectivamente, enquanto que as misturas com fibra de polipropileno, que foram os melhores resultados 30,16 MPa, 39,22 MPa, 41,18 MPa, 42,22 MPa, 46,33 MPa e 47,42 MPa, cresceram na proporção de 30%, 36%, 40%, 53% e 57% nas mesmas idades, conforme melhor demonstrado na Tabela 11. As duas misturas com adição de fibra, em todas as idades,

foram ligeiramente superiores a mistura de controle, mostrando a eficiência das microfibras no controle da formação de fissuras na mistura ainda na fase de endurecimento, evitando-se a formação de fissuras precoces nas fases iniciais de cura do concreto até as idades mais avançadas.

A adição de microfibras às misturas alterou o modo de falha do concreto de frágil para dúctil, conforme Figura 36. Devido à ação de ponte das fibras, principalmente nas de polipropileno. Os corpos de prova não trituraram e permaneceram intactos até o término do ensaio. As misturas contendo microfibras tiveram resistência à compressão menor em uma idade jovem, porém resistência maior após um tempo de cura mais longo. Isso mostra que os efeitos de ponte da fibra podem melhorar a resistência do concreto ao longo do tempo.

Yoo et al (92) estudaram a eficiência das fibras nos compósitos cimentícios como forma de controlar a expansão compensando a retração geral, os mesmos estudaram a eficiência da mistura redutora de retração (0 - 2%). O estudo verificou que o maior teor de fibra, 2% de adição de fibra reduziu a retração em 28% aos 28 dias, ou seja, resultou em menor retração e potencial de fissuração, da mesma forma que aumentou ligeiramente a resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

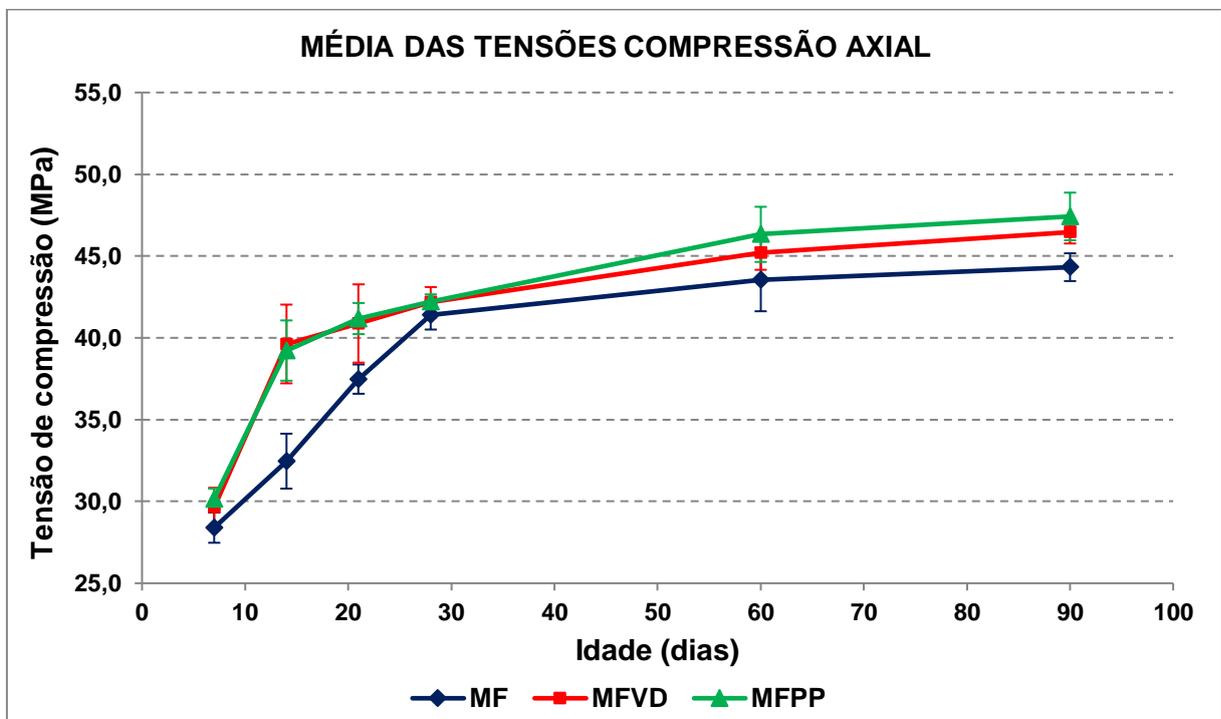


Figura 35: Média das tensões de três amostras de compressão axial concreto MR, MFV e MFPP, para as idades de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias.

Tabela 11: Média das tensões de compressão axial e desvio padrão das misturas MR, MFV e MFPP ensaiadas

Concreto convencional						
Idade (dias)	7	14	21	28	60	90
Média (MPa)	28,397	32,463	37,480	41,406	43,562	44,321
D. Padrão	0,923	1,678	0,897	0,896	1,933	0,850
Concreto com adição de fibra de vidro						
Média (MPa)	29,654	39,627	40,879	42,165	45,221	46,463
D. Padrão	1,182	2,407	2,393	0,943	1,060	0,693
Concreto com adição de fibra de polipropileno						
Média (MPa)	30,155	39,224	41,181	42,221	46,329	47,423
D. Padrão	0,629	1,842	0,950	0,438	1,686	1,457

Garcez et al (93) constataram que a adição de microfibras pode melhorar a resistência à compressão do concreto e conter a formação de microfissuras no concreto. E ainda de acordo com Bing Liu et. al. (94), as microfibras trabalham principalmente antes que as microfissuras apareçam possibilitando uma melhoria na resistência à compressão axial em até 6,08%.

Vale destacar que a adição de microfibras, principalmente nas de polipropileno, o número e a largura das microfissuras após a falha do corpo de prova diminuíram, porque as microfibras situadas nas microfissuras desempenham um papel de ponte, conforme mostrado na Figura 36.

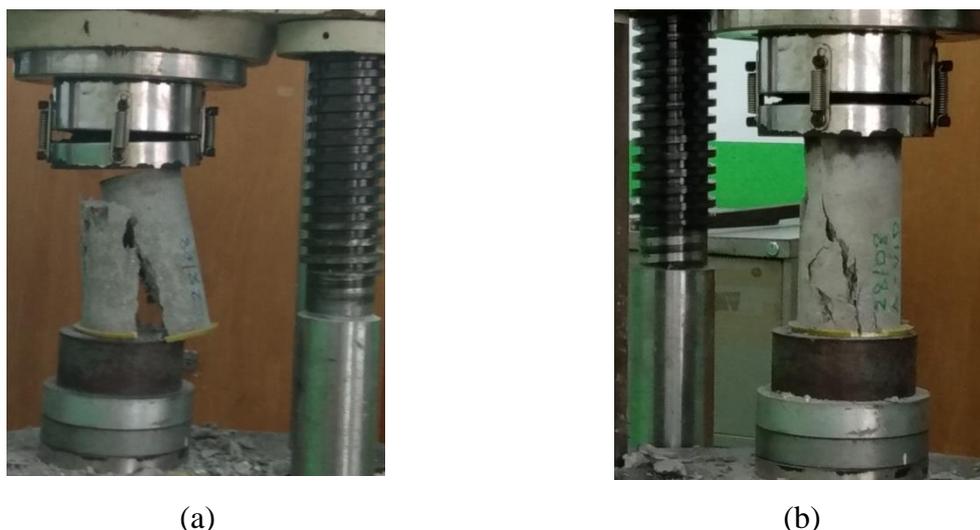


Figura 36: Característica da fratura dos concretos MR e MFPP: (a) Concreto MR fratura frágil; (b) concreto MFPP fratura dúctil.

Além disso, as rachaduras do concreto MR sem microfibra de polipropileno desenvolveram-se rapidamente e muitas rachaduras apareceram uma após a outra, mostrando a falha por fratura frágil da amostra, Figura 36 (a). No processo de ruptura das espécies com microfibra de polipropileno, Figura 36 (b), as falhas foram menos abertas e mais verticais e o desenvolvimento das trincas diminuíram, e a integridade dos corpos de prova foi melhor quando finalizado o ensaio. Os resultados mostram na mistura MFPP, a microfibra de pode inibir o desenvolvimento de fissuras internas no concreto, de forma que o concreto não se parta quando danificado.

A pesquisa de (95) que explorou as características mecânicas dos Concretos de Alto Desempenho em que a microfibra de vidro foi introduzida em proporções de volume variando de 0% a 1%, e a microfibra de polipropileno foi usada de 0 a 0,25% em misturas de substâncias cimentícias adicionais de metacaulim pozolânico e sílica demonstrou efeitos positivos em seus ensaios. As resistências à compressão de 7 e 28, tomadas como referência, aumentou com a adição de fibras em volumes percentuais, e mostrou ainda, que a inclusão de fibras binárias, ou seja, de 0 a 1% de fibra de vidro, e fibra de polipropileno a 0,25%, aumentou a resistência à compressão nas idades investigadas do cubo de 28 dias. O estudo destaca que a adição de fibras binárias fortalece a resistência à compressão do cubo da mistura, com melhores resultados obtidos com 1% de microfibra de vidro e 0,25% de microfibra de polipropileno em várias concentrações de metacaulim e sílica ativa.

As resistências à compressão da amostra cúbica de 100 mm para a mistura de referência aos 7, 28 e 90 dias de cura, são menores quando é incorporado pó de vidro em substituição a 5% do cimento Portland e microfibras de polipropileno. As resistências à compressão são ligeiramente maiores e menores, para frações de volume de 0,5% e 1%, respectivamente, em comparação a mistura de controle. A introdução de 0,5% de fibras de PP na matriz do concreto aumenta a resistência à compressão de forma insignificante. O melhor desempenho mecânico é obtido com 10% de pó de vidro como substituto do cimento e 0,5% de inclusão de fibra de microfibra de polipropileno em comparação a mistura de controle (96).

Na pesquisa de (97) as amostras de concreto foram projetadas seguindo os padrões ASTM C192M com relação a/c de 0,50 em um misturador regular. A análise não utilizou quaisquer materiais adicionais ou misturas químicas. As fibras de polipropileno foram utilizadas como percentual adicional nas quantidades de 0,5%, 1%, 1,5%, 2,0% e 2,5%. Os resultados mostraram que a adição de fibras melhora as propriedades de resistência e o

desempenho geral dos corpos de prova de concreto. O padrão de intensidade crescente começou a desaparecer após 2%. Em comparação com a análise da mistura de controle, os volumes de 1% e 2% indicaram um aumento considerável antes de reduzir para 2,5%. Em comparação com a amostra de referência, incrementos de volume de 0,5, 1, 1,5 e 2% resultaram em aumentos de amostra de 8,82%, 11,05%, 13,68% e 9,40%, respectivamente.

A tendência de queda de 2,5%, de acordo com (98), pode estar relacionado à existência de vazios em um alto percentual de fibras. Além disso, uma concentração de fibras superior a 2,5% pode resultar na piora da ligação da interface entre a fibra e a massa cimentícia.

4.3 Tensão de tração por compressão diametral

As curvas de tensões médias das três misturas de concreto estão mostradas na Figura 37. Conforme verificou-se as características comportamentais de tração nas três situações acompanham as mesmas características da compressão axial, porém com resultados mais eficientes quanto a utilização das microfibras como adição aos compósitos de concreto. Pode-se observar que para as idades de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias há uma maior dispersão no concreto convencional 3,039 MPa, 3,212 MPa, 3,036 MPa, 3,691 MPa, 3,739 MPa e 3,991 MPa, onde a média dos resultados aos 21 dias chegou muito próximo da resistência aos 7 dias. Tal dispersão pode ser mais uma vez justificada pela influência das fibras que atuam como ponte de ligação entre o agregado e a massa cimentícia, mostra a sinergia positiva para os dois tipos de microfibra. A MFV apresenta média das tensões de 3,559 MPa, 3,979 MPa, 4,016 MPa, 4,056 MPa, 4,074 MPa e 4,377 MPa, com resultados menos dispersos em comparação a MR, enquanto que a MFPP apresenta as melhores médias de tensões 3,685 MPa, 4,127 MPa, 4,104 MPa, 4,184 MPa, 4,780 MPa e 4,794 MPa e menores dispersões para mesmas idades, conforme melhor mostrado na Tabela 12.

De acordo com a Tabela 12, verificou-se que em praticamente em todas as idades o concreto convencional apresenta os maiores desvios padrões das amostras ensaiadas, enquanto que para os concretos adicionados com microfibra de polipropileno o forte efeito de ponte e a resistência à tração das microfibras resultam em propriedades mais aprimoradas. Há uma melhora na eficiência positiva do aumento no desempenho da resistência à tração, que é maior do que o aumento na resistência à compressão axial. As misturas com fibra de polipropileno cresceram na proporção de 6%, 20%, 9%, 2%, 6% e 7% em comparação ao concreto

convencional, e em relação as idades ensaiadas 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias, respectivamente, enquanto as tensões de tração cresceram na proporção de 21%, 28%, 35%, 13%, 27% e 20% para as mesmas idades.

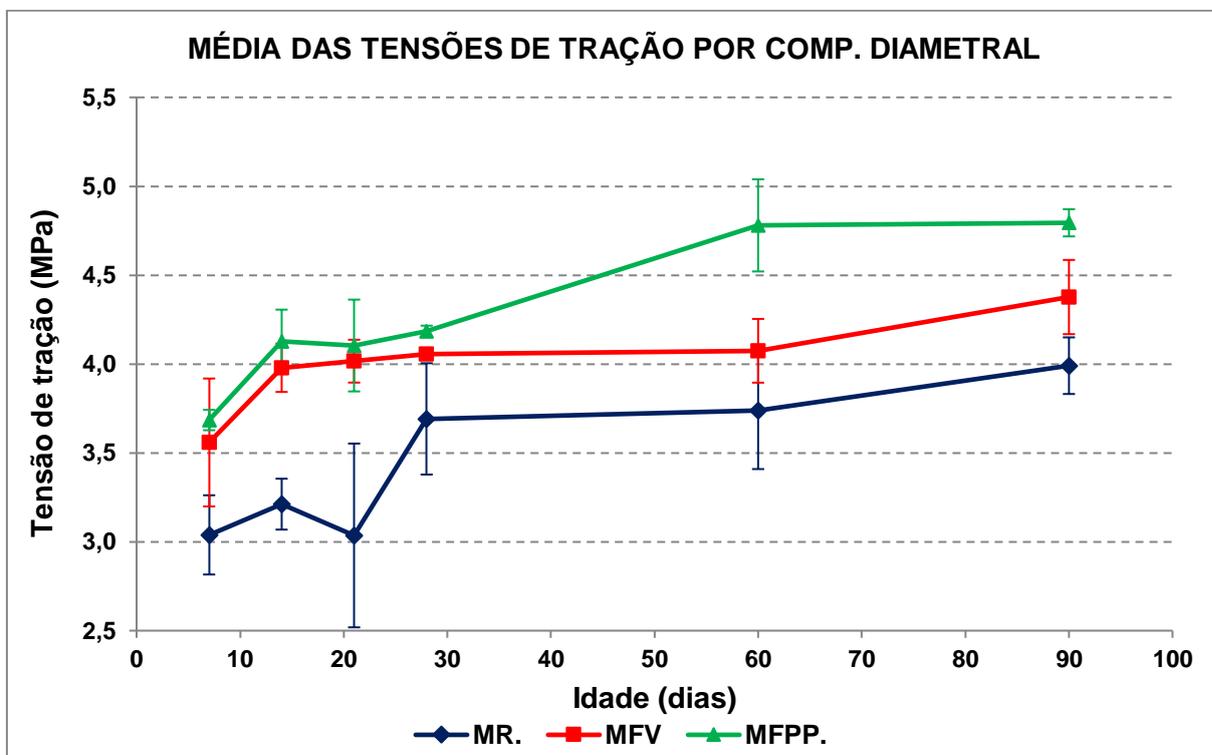


Figura 37: Média das tensões de tração por compressão diametral de três amostras para cada mistura de concreto MR, MFV e MFPP, para as idades de 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias.

Tabela 12: Média das tensões de tração por compressão diametral e desvio padrão das misturas MR, MFV e MFPP ensaiadas

Concreto convencional						
Idade (dias)	7	14	21	28	60	90
Média (MPa)	3,039	3,212	3,036	3,691	3,738	3,991
D. Padrão	0,223	0,143	0,517	0,313	0,329	0,159
Concreto com adição de fibra de vidro						
Média (MPa)	3,559	3,979	4,016	4,056	4,074	4,377
D. Padrão	0,360	0,136	0,121	0,032	0,179	0,209
Concreto com adição de fibra de polipropileno						
Média (MPa)	3,685	4,127	4,104	4,184	4,780	4,794
D. Padrão	0,065	0,202	0,292	0,036	0,293	0,087

Para os concretos adicionados com microfibras o principal padrão de falha é o arrancamento, porém outro fator bastante relevante é a quebra, as fibras de vidro estão mais submetidas ao arrancamento da matriz de cimento, por serem mais lisas apresentam tensões de tração inferiores quando comparadas as fibras de polipropileno (94), (99), (100).

Além das falhas por arrancamento e quebra, de acordo com Choi e Lee (101) a forte ligação química com a matriz de cimento leva a uma maior resistência a tração. Em suas pesquisas, ao contrário dos outros tipos de fibra, as fibras de basalto apresentaram-se ser mais eficientes na melhoria da resistência à fissuração, em comparação a outros tipos de fibras, por ser composta por minerais semelhantes aos dos materiais cimentícios.

Em comparação com os resultados de (98) os concretos com adições de fibras de polipropileno (PPE) efetivamente aumentaram de 3,237 MPa, 3,343 MPa, 3,463 MPa, 3,560 MPa e 3,730 MPa os valores de resistência à tração em conformidade com adições de 0%, 0,5%, 1%, 1,5% até 2%, porém na proporção de 2,5% a média das tensões baixou para 3,527 MPa. Conforme demonstrado na Figura 38, os corpos de prova de concreto contendo fibras de polipropileno foram muito mais significativos do que aqueles de concreto de referência que não incluía nenhum tipo de fibra. Quando ocorre a fissura, a fibra faz a ponte entre as fissuras das amostras trabalhadas sobre a transferência de carga da matriz para a fibra e a mantém, eventualmente suportando a máxima tensão de tração. A tensão transmitida melhorou a resistência à tração das misturas com fibra em relação às amostras de referência, aumentando o poder de deformação à tração da matriz de concreto.

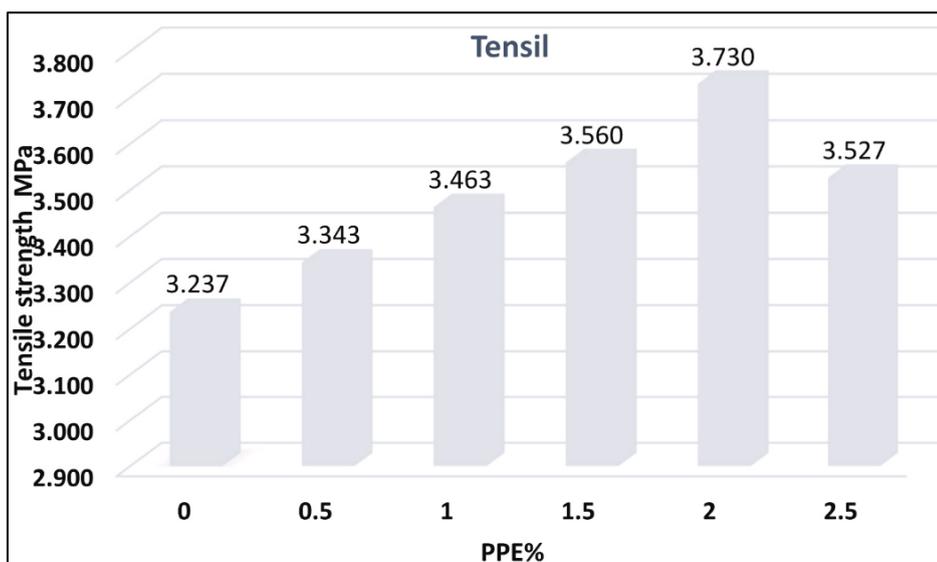


Figura 38: Média das tensões de tração com adições de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5% de fibras de polipropileno (98).

A mistura de controle 0% tinha uma resistência à tração indireta de 3,237 MPa, conforme mostrado na Figura 36, com os resultados mais altos (3,730 MPa) obtidos a 2% de PPE são os resultados mais favoráveis. No geral, o volume das amostras aumentou de 1% para 1,5 e 2%, com uma diminuição marginal na resistência à tração indireta em 2,5%.

4.4 Resistência à flexão

Como mostrado na Figura 39, fica claro a diferença significativa entre o desempenho das amostras MFPP, caracterizados por valores médios de resistência à flexão de 1,163 MPa, 1,193 MPa e 1,243 MPa, em relação as amostras de concreto referência MR, sem a adição de microfibras, caracterizados por valores médios de tensões de 0,733 MPa, 0,947 MPa e 1,017 MPa para as idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente, conforme Tabela 13. Como pode ser visto a partir desses resultados, os maiores valores de resistência à flexão e de deflexão das vigas ensaiadas foram obtidos das misturas com microfibras de polipropileno.

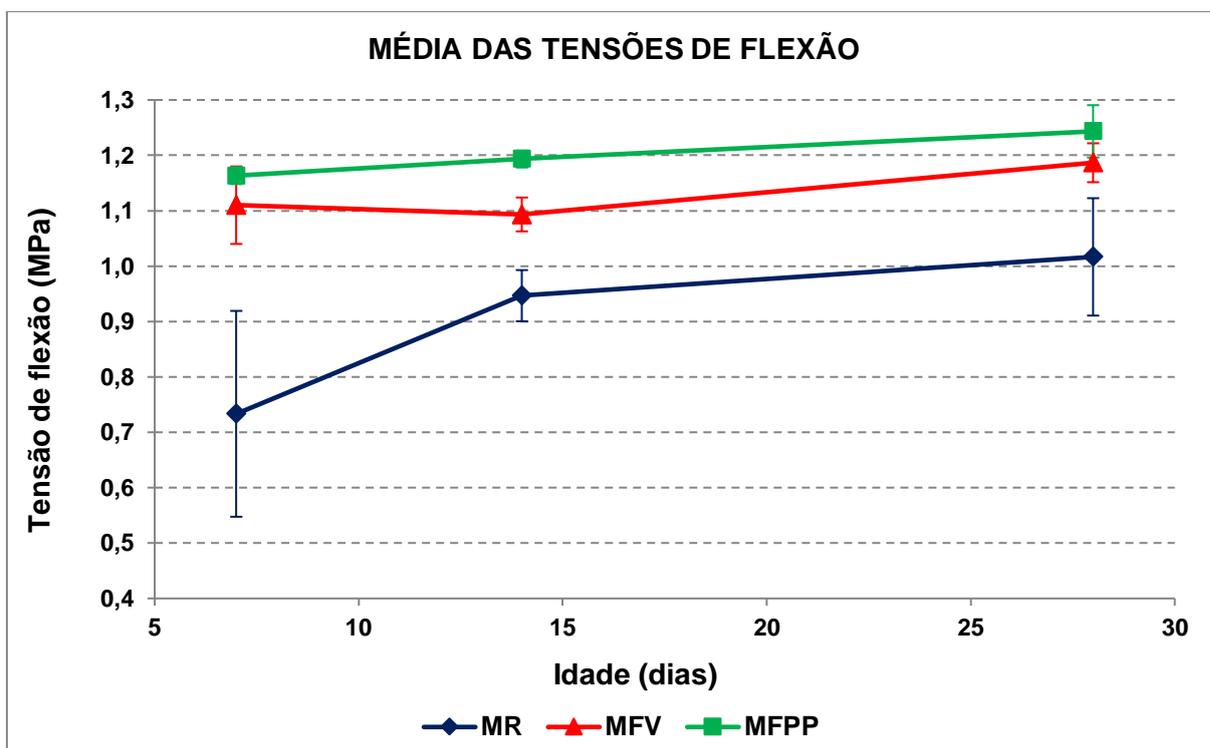


Figura 39: Média das tensões de flexão de três amostras para cada mistura de concreto MR, MFV e MFPP, para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Tabela 13: Média das tensões de flexão e desvio padrão das misturas MR, MFV e MFPP ensaiadas

Concreto convencional			
Idade (dias)	7	14	28
Média (MPa)	28,397	32,463	37,480
D. Padrão	0,923	1,678	0,897
Concreto com adição de fibra de vidro			
Média (MPa)	29,654	39,627	40,879
D. Padrão	1,182	2,407	2,393
Concreto com adição de fibra de polipropileno			
Média (MPa)	30,155	39,224	41,181
D. Padrão	0,629	1,842	0,950

As misturas adicionadas com microfibras de vidro apresentaram desempenho médio de 1,110 MPa, 1,093 MPa e 1,187 MPa. Comparando com as amostras do concreto de referência, ofereceram um aumento de 51%, 15% e 16% nas idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Ressalta-se também que a adição de microfibras permite passar de uma fratura frágil do material para um comportamento dúctil, destacando o excelente resultado do uso de tais microfibras em concreto estruturais.

Assim como verificado no trabalho de Yan et. al. (102) a Figura 40 demonstra a fratura a flexão das MR, sem adição de microfibras, que evidencia a iniciação de rachadura local onde os agregados são cisalhados e quebrados com ruptura bruta e direcional formando uma superfície de fratura pequena. Na Figura 41 (a) demonstra-se o ensaio de ruptura em seu padrão típico de fratura após a realização do ensaio.

A Figura 41 interpreta o processo de falha da mistura com adição de microfibras de polipropileno MFPP, as microfibras estão distribuídas na superfície fraturada e durante o processo de ruptura por estarem ligadas a matriz melhoram a ruptura a flexão, conforme mostrado no processo de ensaio 41 (b).

Como as MFPP melhoram a ductilidade, a resistência mecânica e aumenta a tenacidade da matriz, quando as amostras de concreto recebem carregamento externo as microfissuras se expandem e as MFPP fazem pontes entre as fissuras, aliviando a concentração de tensões na ponta da fissura e resistem ao seu aumento de propagação (102).

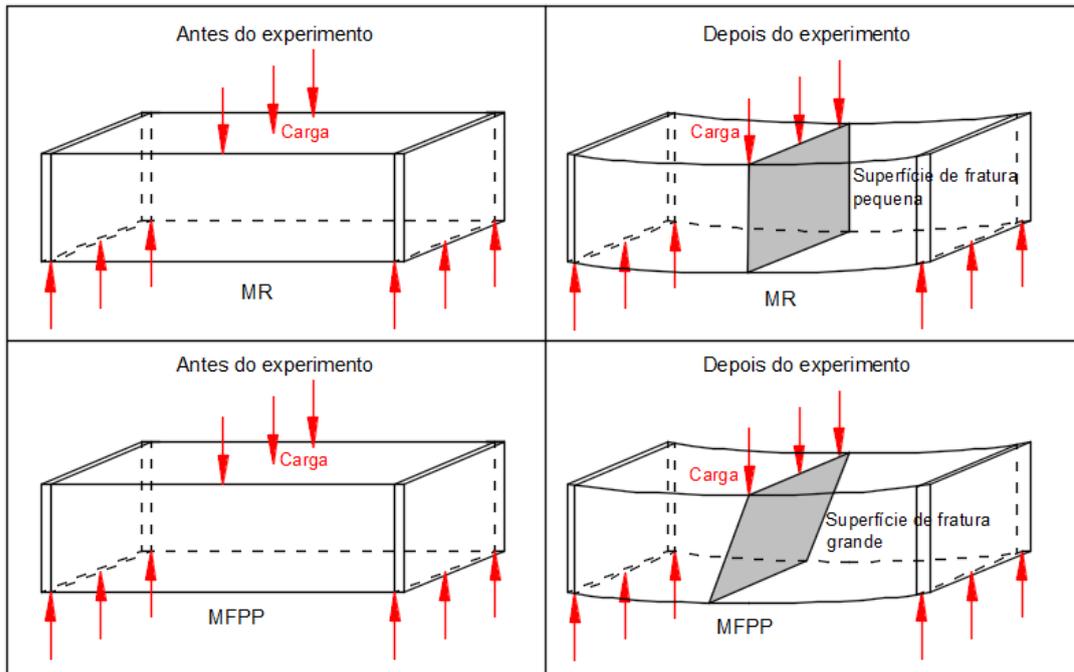
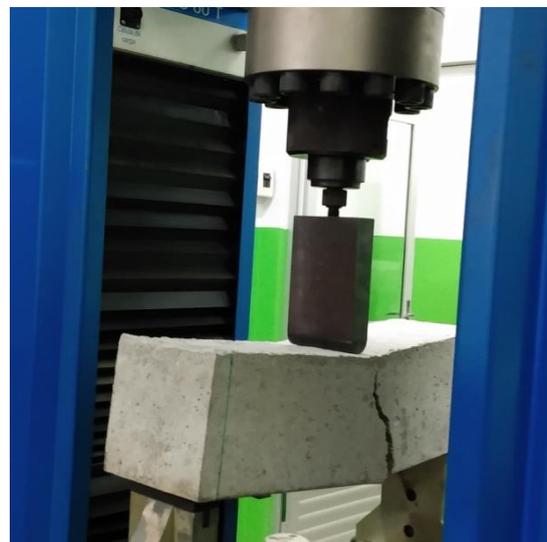


Figura 40: Análise pós-teste de amostras de mistura referência (MR) e misturas com microfibra de polipropileno (MFPP) submetidas a ensaio de flexão, (102) adaptado.



(a)



(b)

Figura 41: Característica da fratura dos concretos MR e MFPP: (a) Concreto MR fratura frágil; (b) concreto MFPP fratura dúctil.

As microfibras utilizadas aumentam a ductilidade do concreto, elevam a quantidade de energia absorvível e reduzem a abertura de fissuras, possibilitando que a resistência à flexão alcance níveis elevados em comparação a resistência a compressão. Para Ni et al (103) a ligação interfacial entre as microfibras e o cimento proporcionam maior resistência à flexão aos

compósitos de cimento.

De acordo com H. E. Yücel et al (104) o aumento do teor de microfibras eleva o valor da deflexão no meio da viga em comparação a viga de controle, e em relação a todas as idades estudadas devido ao módulo de elasticidade das fibras. Além de que, a natureza fibrosa das microfibras retarda a propagação das trincas em compósitos cimentícios e é benéfica melhorando a ductilidade (105), (106).

Em teoria das estruturas, além de comparar o resultado da tensão final de ruptura é importante também analisar a deflexão de serviço, onde a deflexão admissível é determinada pela relação do comprimento da viga por 250. Então, a deflexão de serviço (δ_s) para as misturas de concreto adicionados com microfibras satisfazem melhor os critérios de segurança e aparência estrutural, conforme demonstrado no ensaio da Figura 40.

As fissuras ocorreram apenas abaixo das cargas, no ponto central das vigas de concreto. Além disso, não houve microfissuras no sentido horizontal visíveis em todas as vigas testadas, indicando a boa aderência entre a matriz de concreto e as microfibras de vidro e polipropileno. Para S. Lee (107) a presença de microfibra no interior da matriz de concreto restringe a propagação de fissuras pela ação de ponte feita pela fibra através das fissuras, que é um comportamento dependente das propriedades físicas e quantidade da microfibra presente na mistura.

A redução da resitência à flexão nas misturas com adição de fibras de polipropileno para (78) deve-se principalmente ao teor de polipropileno que no experimento ser maior do que quando comparado com à literatura que geralmente é inferior, em média 1%

Ainda para (78), a mistura com adição de polipropileno reduziu as resistências à tração, à compressão e a flexão. As resistências mencionadas em geral diminuíram com o aumento da dosagem de microfibras. Isso se deve principalmente ao maior teor nesta pesquisa, quando comparado ao da literatura, que geralmente é menor que 1% (108), (109).

4.5 Difractometria de Raios X

O difratograma de raios-X da areia, Figura 42, a principal fase detectada é o óxido de silício, mas aparecem também o feldspato e o carbonato de cálcio. O óxido de silício representa mais de 80% do mineral presente na amostra. Também conhecido como sílica, o óxido de silício que tem a fórmula química SiO_2 , em seu estado natural, pode ser encontrado em diversas formas diferentes. Possui 17 formas cristalinas diferentes, entre elas o quartzo. A quantidade de

feldspato é significativamente menor que os outros dois grupos, porém são um grupo de minerais cuja composição química é apresentada pela fórmula $(K, Na, Ca) (Si, Al)_4 O_8$. Os silicatos de alumínio apresentam diferentes quantidades de potássio, cálcio, e sódio e eventualmente silício. São minerais que se apresentam em rochas graníticas e são os principais minerais dos pegmatitos, associados a diversos outros minerais.

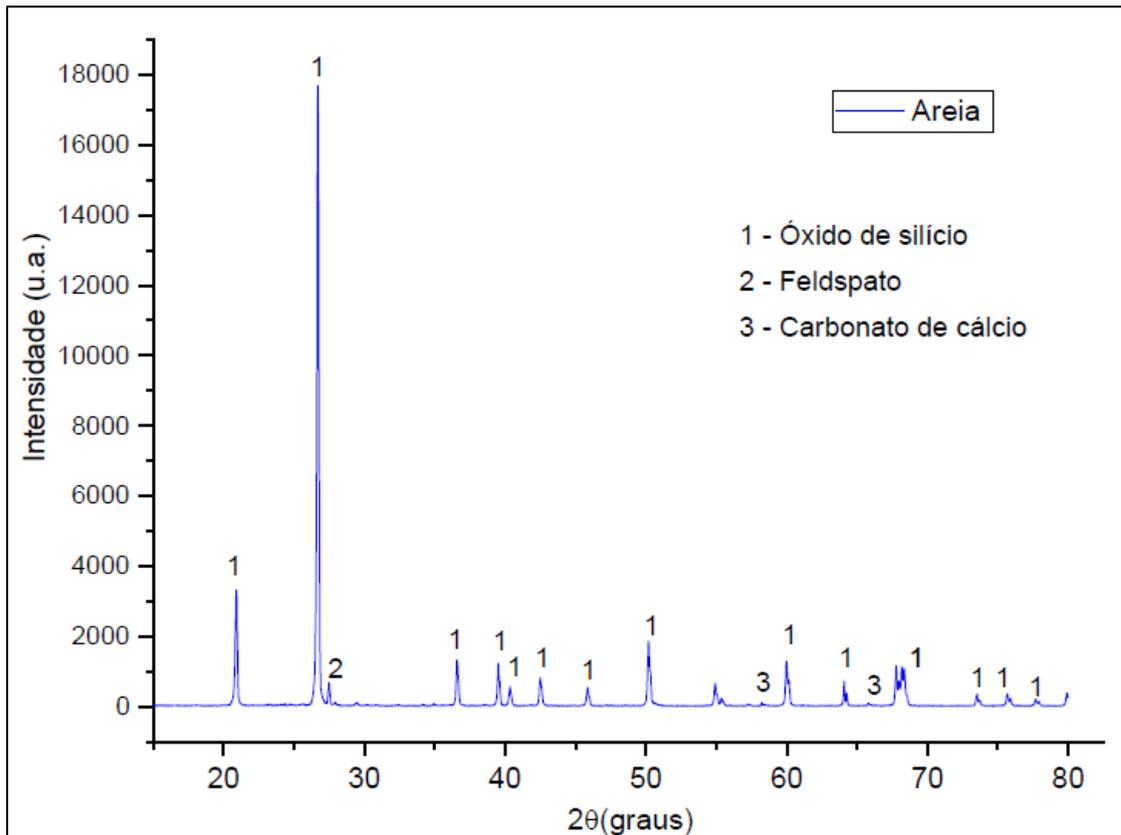


Figura 42: DRX da areia.

A composição mineral da brita 0 analisada usando DRX, onde a intensidade de difração dos picos é dominada por quartzo (2θ em 26,00), CaO_3Si (2θ em 28,00), Albita (2θ em 27,50), Microclina (2θ em 29,50), Figura 43. Houve uma evidente semelhança mineralógica entre as fases mineralógicas da areia e brita utilizadas nas composições das misturas de concreto, onde o quartzo destacou-se como a fase predominante das duas análises.

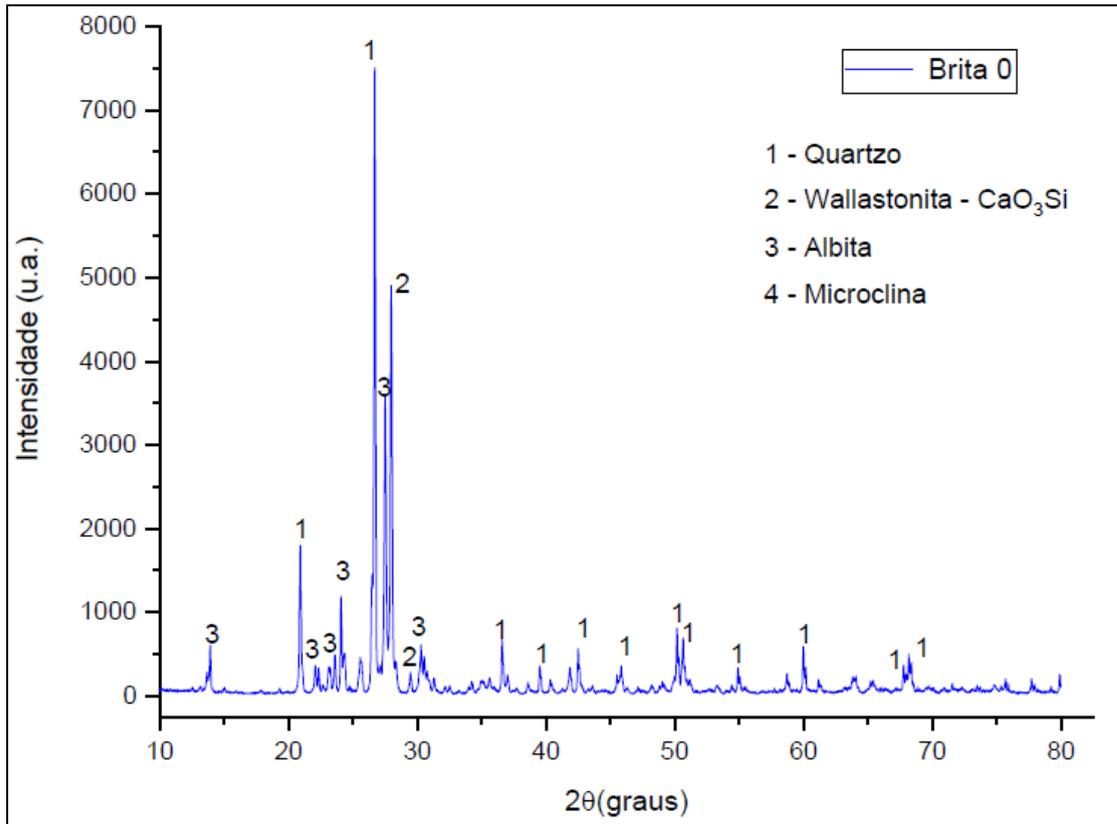


Figura 43: DRX da brita 0

A determinação experimental das fases cristalinas do cimento Portland a Figura 44 mostra o difratograma de raios X onde o quartzo apresenta-se com pico de maior intensidade. Na análise existe uma grande variação e quantidade dos minerais quartzo e silicato de cálcio, além de quantidades menores de fases alita, brownmillerita, magnesita, gesso e bimesita.

A determinação quantitativa da associação de fases em cimentos compostos hidratados é uma tarefa desafiadora devido à presença de diversas fases amorfas. Estes dizem respeito principalmente a uma ou mais fases vítreas do material cimentício suplementar anidro e do principal produto de hidratação, silicato de cálcio hidratado CSH.

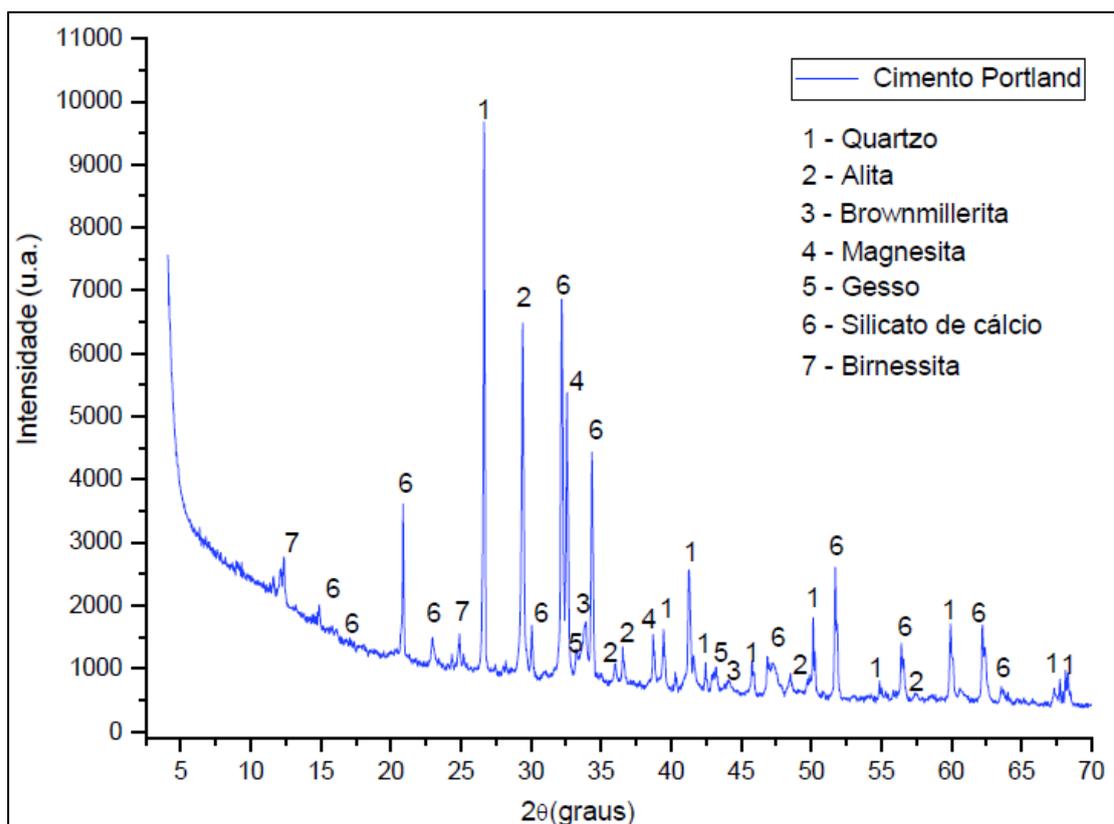


Figura 44: DRX do cimento Portland.

Como era esperado a análise por difratometria de raios X da fibra de vidro, Figura 45, não apresentou nenhuma fase cristalográfica, porém a análise por DRX foi utilizada para determinar se a presença de fibra de vidro na mistura de concreto poderia alterar a evolução microestrutural da matriz de cimento Portland, por dificultar a formação de fases ou o contrário, estimulando a formação de fases não comuns nos concretos convencionais, tendo em vista que o cimento Portland comum apresenta várias fases amorfas. Porém comparando os espectros de DRX da amostra de referência (figura 46), sem adição de fibra, e a mistura com adições de fibra (figura 48) não houve diferença na intensidade do pico ou na posição do pico. Portanto, a adição de fibra de vidro não alterou a fase de formação da matriz cimentícia aos 60 dias de cura.

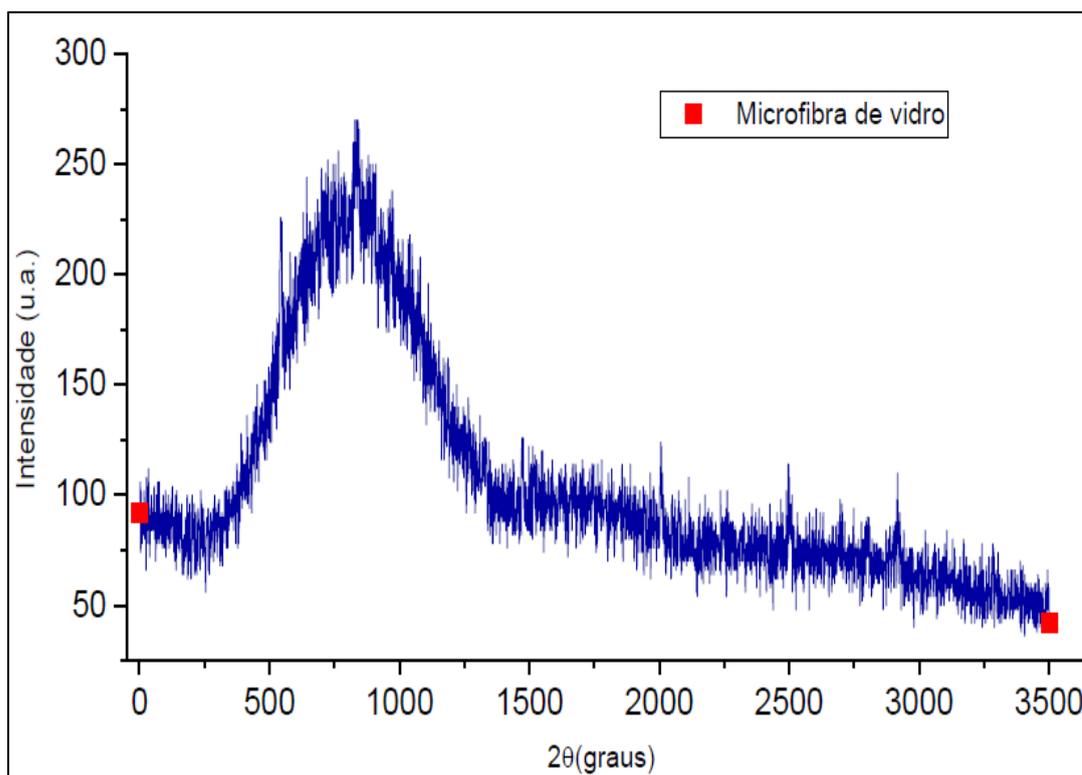


Figura 45: DRX da microfibra de vidro.

Os padrões DRX da mistura de concreto convencional para 7 dias de cura está apresentado na Figura 46. De acordo com o difratograma os picos principais são o óxido de silício (SiO_2) e carbonato de cálcio (CaCO_3). Os produtos de hidratação das fases de silicato são silicatos de cálcio hidratados, conhecido como CSH, C para CaO , S para SiO_2 e H para H_2O em nomenclatura da indústria do cimento, e ainda, hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. São os principais produtos formadores das fases de hidratação do cimento, sendo o CSH o principal responsável pela resistência dos materiais à base de cimento. Eles são a principal fase de ligação na maioria dos concretos. Pode-se entender que as fases hidróxido de carbono CH também são responsáveis em originar mais produtos CSH, o que é benéfico em termos de desenvolvimento de resistência do material a base de cimento (110), (111).

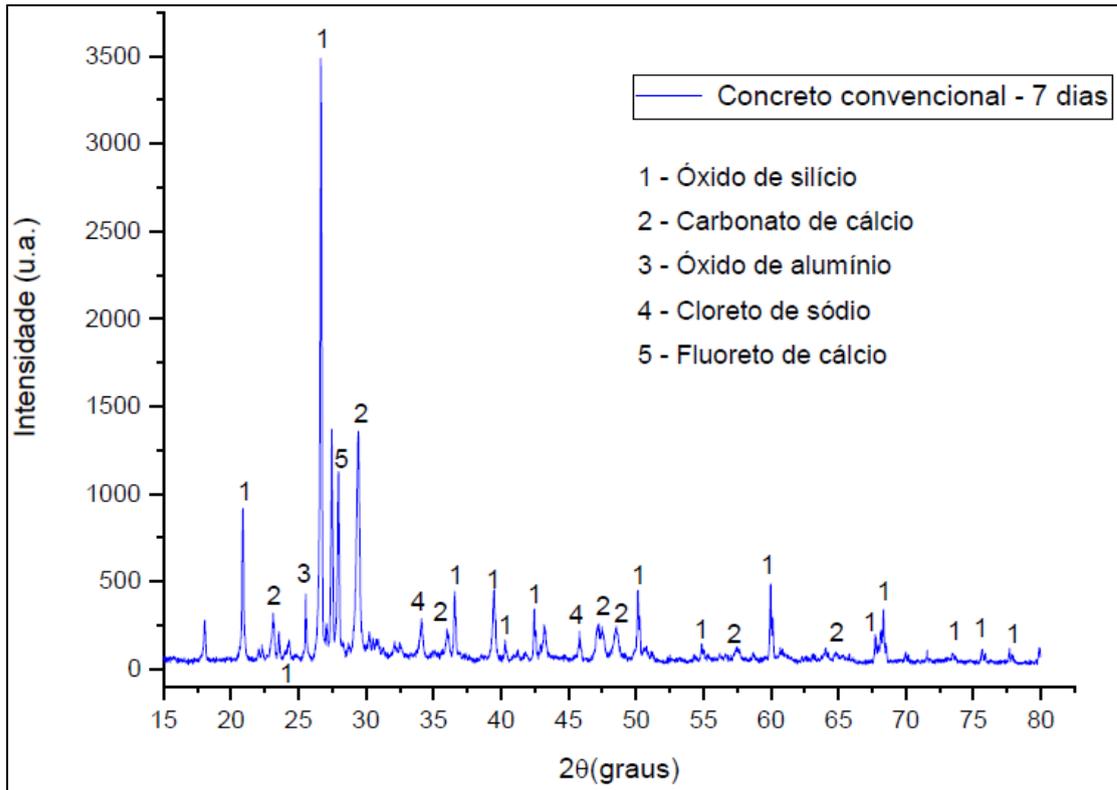


Figura 46: DRX da mistura de concreto convencional aos 7 dias de cura.

A Figura 47 mostra os padrões DRX da mistura de concreto com adição de polipropileno MFPP, após os 60 dias de cura. As posições dos picos característicos em comparação ao concreto convencional aos 7 dias de cura foram basicamente os mesmos. Os picos de óxido de silício SiO_2 e o carbonato de cálcio CaCO_3 são provenientes dos agregados graúdos e miúdos do concreto e da carbonização durante o ensaio, continuam sendo as principais fases da mistura, porém com picos de menores intensidades, quando comparados ao concreto convencional.

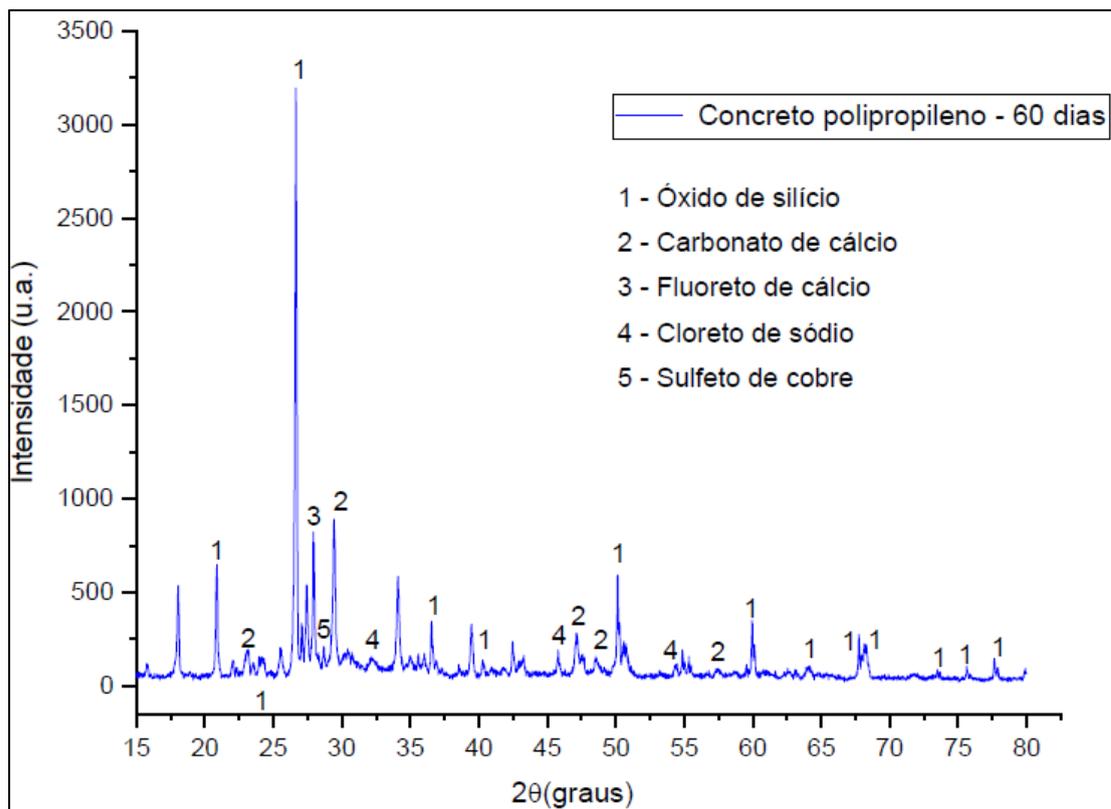


Figura 47: DRX da mistura de concreto com adição de polipropileno (MFPP) aos 60 dias de cura.

De acordo com a Figura 48 as principais fases cristalinas das amostras de concreto MR, MFV e MFPP analisadas por DRX não apresentam diferenças mineralógicas significativas nos dois produtos principais de hidratação, tanto aos 7, como aos 60 dias de cura. Todos os gráficos exibiram elementos típicos presentes na hidratação do concreto de cimento Portland como SiO_2 , CaCO_3 , Al_2O_3 , NaCl e CaF_2 . Os três gráficos de DRX apresentaram pico de maior intensidade para o SiO_2 pela composição dos seus principais materiais cimento Portland, agregado fino e agregado grosso. Também foram observados traços em intensidade muito baixas em relação as fases principais, porém não foram identificados devido à complexidade das misturas de concreto de cimento Portland.

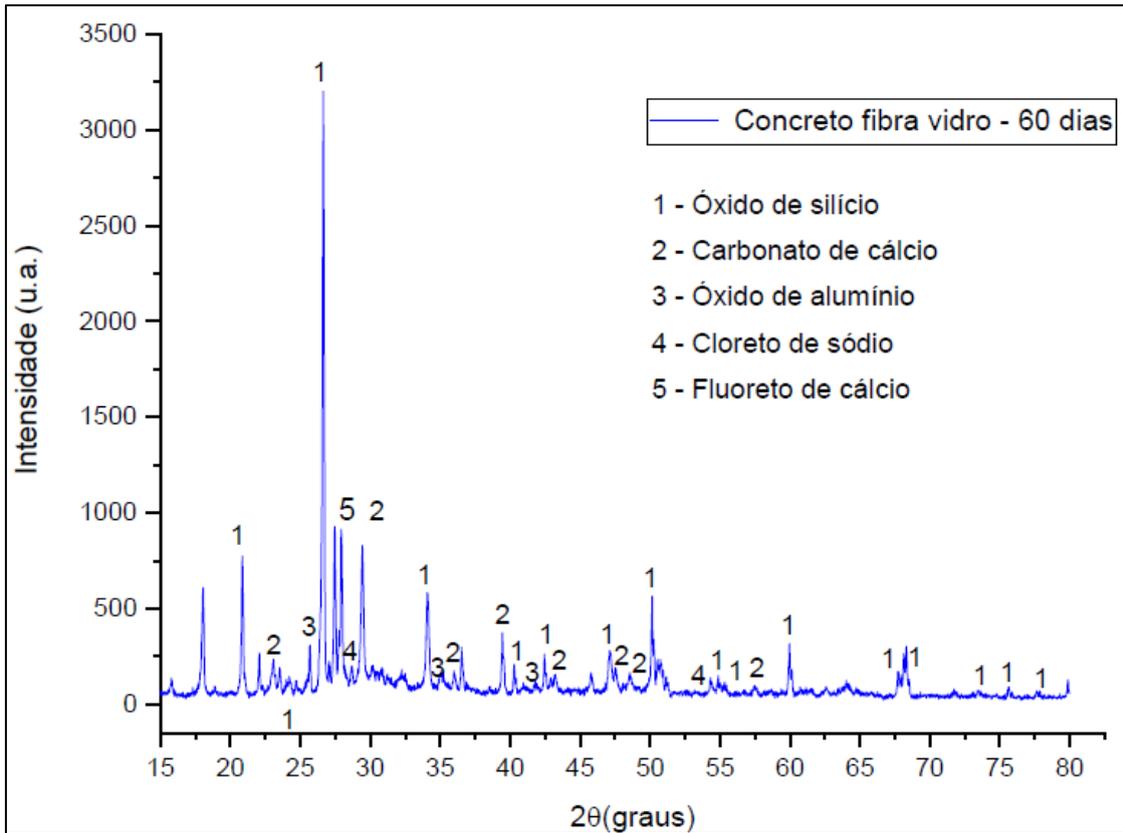


Figura 48: DRX da mistura de concreto com adição de fibra de vidro (MFV) aos 60 dias de cura.

4.6 Análise de Espectroscopia Dispersiva de Energia (EDS)

As Figuras 49, 50 e 51 nos dão uma visão geral das áreas das amostras e apresentam, respectivamente, o aspecto topográfico das misturas MR, MFV e MFPP, onde cada mistura mostra a imagem MEV com a indicação do seu respectivo gráfico de composição elementar.

Embora os resultados das imagens MEV computadorizada também possam analisar parâmetros microscópicos, como poros e tamanhos de fissuras, o MEV-EDS pode obter informações mais detalhadas, como a composição elementar hidratada e informações de distribuição de fibras. A análise química pontual elementar apresentou em todas as misturas os elementos cálcio (Ca), silício (Si), Alumínio (Al), oxigênio (O), ferro (Fe) e outras composições apresentadas na Tabela 11. Observamos que são composições que originalmente foram formadas da areia (SiO_2) e CaO, compostos que caracterizam o cimento Portland (112).

O cimento é um dos constituintes essenciais na fabricação do concreto. A composição mineralógica do clínquer é composta por alita (C_3S : Ca_3SiO_5), belita (C_2S : Ca_2SiO_4), aluminato tricálcico (C_3A : $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) e aluminoferrita tetracálcica (C_4AF :

$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_{10}\text{Fe}_2$). Durante a hidratação, o cimento reage com a água resultando na formação de diferentes hidratos. A etringita é formada a partir da reação de sulfato de cálcio, aluminato tricálcico e água. A reação dos silicatos leva à formação de portlandita (CH) e um silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo o C-S-H o primeiro elemento de ganho de resistência do concreto (113).

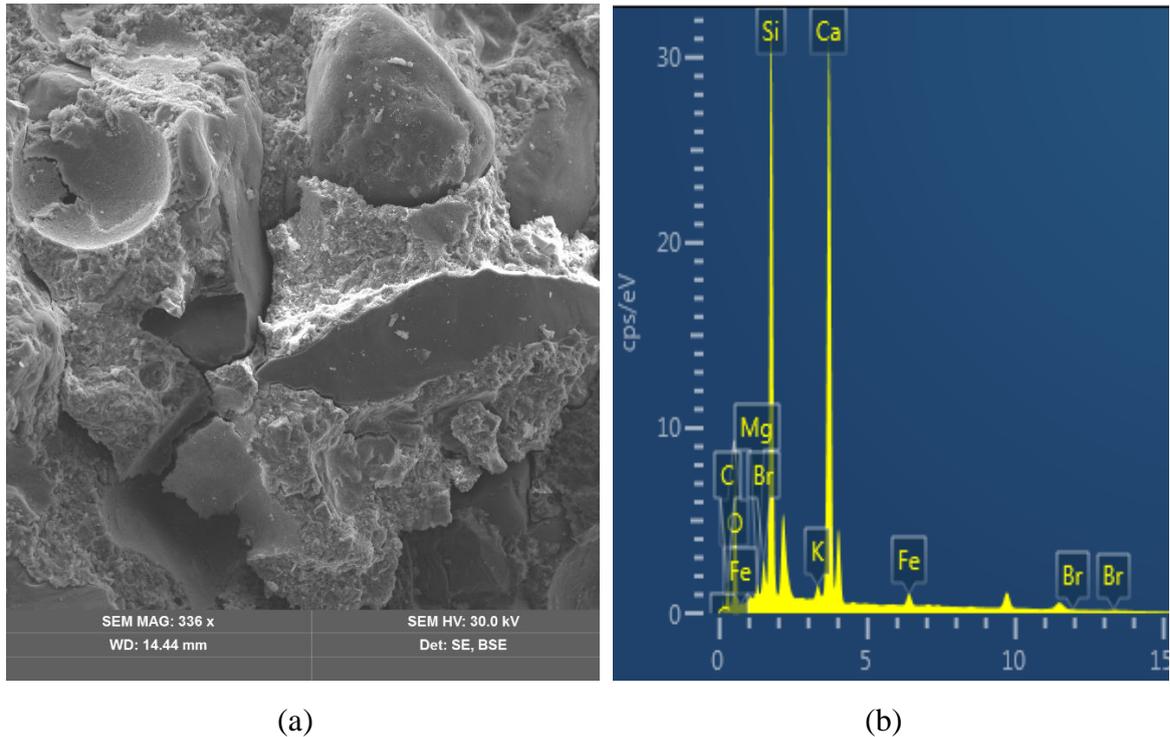
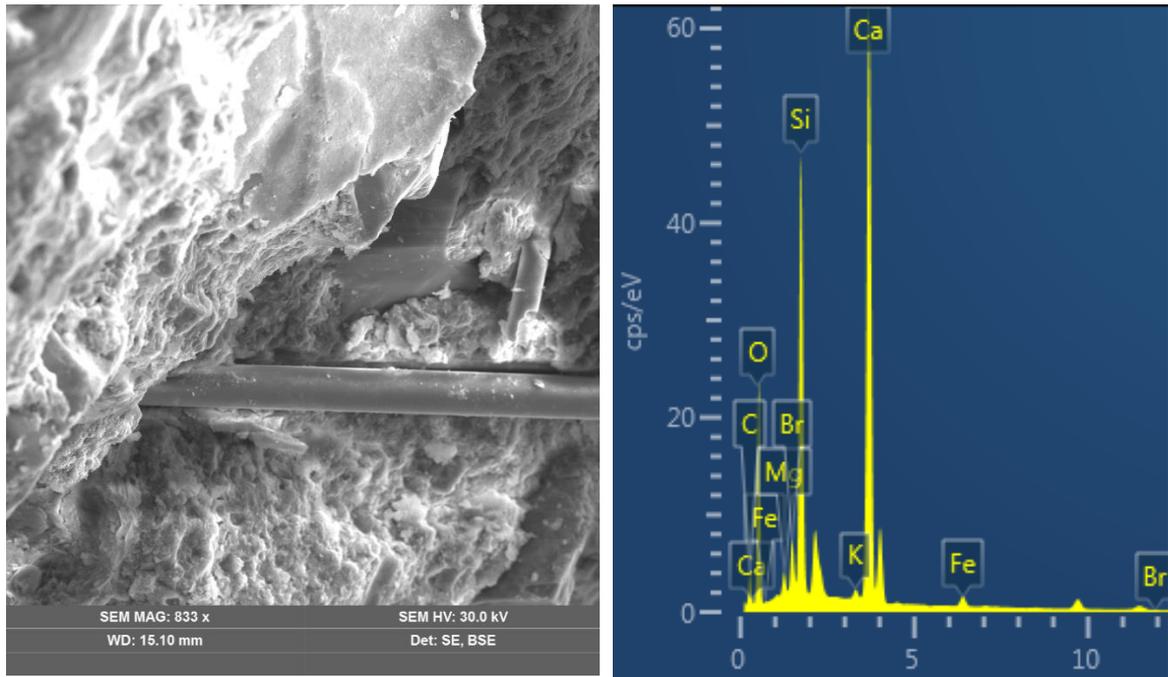


Figura 49: MEV da superfície fraturada MR: (a) MEV da superfície fraturada da mistura de concreto de referência; (b) EDS da composição elementar.



(a)

(b)

Figura 50: MEV da superfície fraturada com fibra de vidro: (a) MEV da superfície fraturada da mistura de concreto com adição de fibra de vidro; (b) EDS da composição elementar.

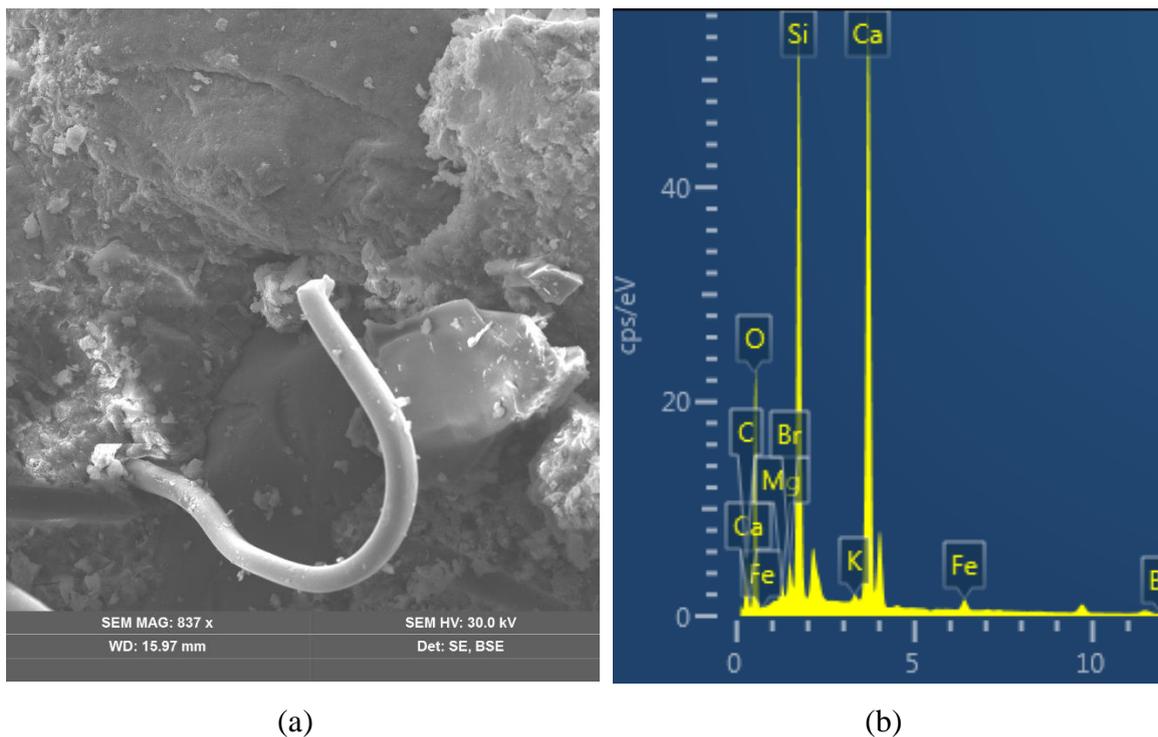


Figura 51: MEV da superfície fraturada com microfibras de polipropileno: (a) MEV da superfície fraturada da mistura de concreto com adição de microfibras de polipropileno; (b) EDS da composição elementar.

Como visto nas Figuras 49, 50 e 51 a com a possibilidade de estudar e analisar a composição química, superfície e microestrutura interna em dimensões de microns e nanômetros. As figuras mostram os aspectos microscópio e espectrocópios das misturas pesquisadas. No primeiro caso são mostradas as características morfológica do concreto como agregado, fibra, quebra da fibra, interfase, enquanto o segundo usado para estudos químicos de camadas elementares, também analisados por (114), (115).

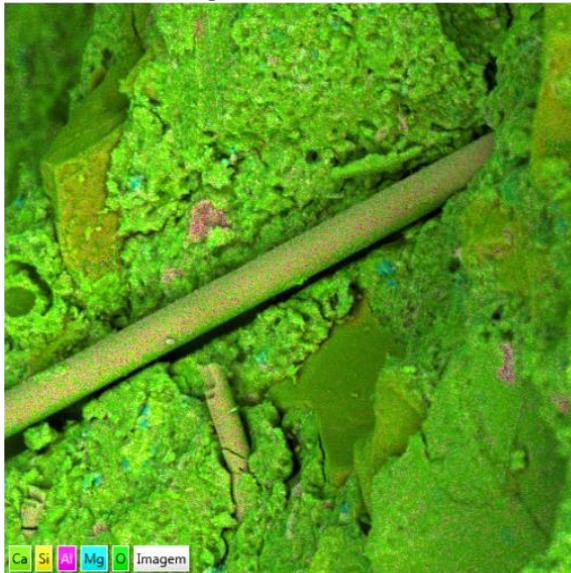
A espectroscopia de energia dispersiva de raios X de pequena área, conforme a Tabela 12 para a MR os elementos principais com peso percentual como Oxigênio = 54,92, Carbono = 15,97, Cálcio = 14,61, Silício = 12,80, Ferro = 0,69 e Magnésio = 0,62, indicando a formação de composto a base de silicato cálcio, onde o mesmo se repete para as MFV e MFPP.

Tabela 14: Espectro de soma mapeamento químico

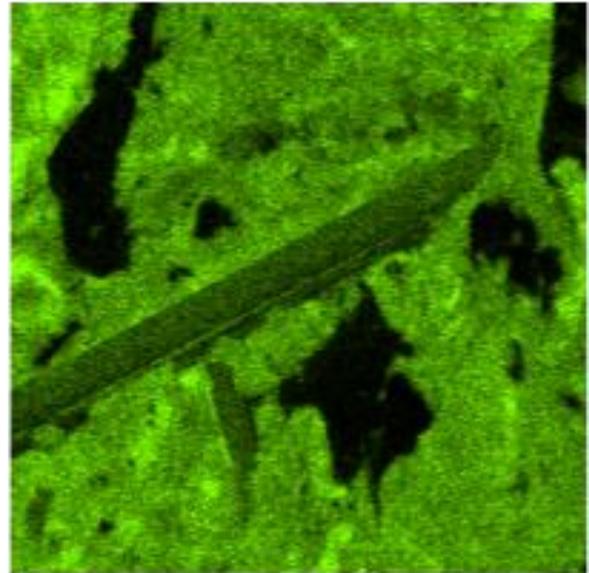
Elemento	MR Peso %	MFV Peso %	MFPP Peso %
O	54,92	59,65	55,56
C	15,97	16,45	23,21
Ca	14,61	13,53	11,06
Si	12,80	8,76	9,09
Fe	0,69	0,48	0,42
Mg	0,62	0,89	0,51
K	0,34	0,20	0,14
Br	0,05	0,04	0,02
Total	100,00	100,00	100,00

A partir da análise de EDS, como mostrado nas Figura 52 (d) e 53 (d), observa-se que há uma grande porcentagem de teor de silício e cálcio nas duas amostras MFV e MFPP. Isso confirma a formação da ligação CSH durante o processo de endurecimento dos dois tipos de concreto.

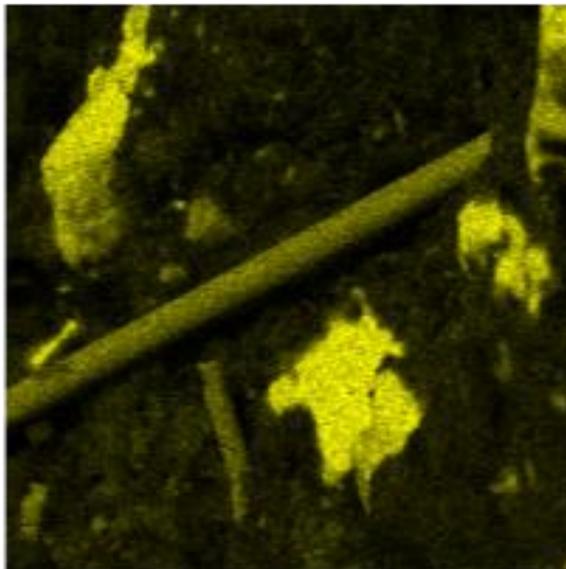
Os picos acentuados de Si e Ca, que estão associados aos produtos hidratados do cimento Portland e sua dureza, se desenvolvem por reações químicas com a água, onde entre os vários constituintes os principais são o silicato tricálcico (3CaO-SiO_2) e o silicato dicálcico (2CaO-SiO_2) (26). Como as microfibras de vidro representam aplicações típicas dos vidros consistem em silicatos não cristalinos que contêm outros óxidos, notadamente SiO_2 , CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 , conforme podemos verificar na composição elementar da Figura 53 (a). Pode-se esperar que as manchas ásperas nas superfícies das Figuras 52 (b), 52 (c), 53 (b) e 53 (c) correspondam a produtos hidratados e uma possível interação entre a fibra e a matriz, não sendo essencialmente promovida pelo atrito entre a matriz e a fibra. Na Figura 52 (a) verifica-se o rompimento e fissura da microfibra de vidro provavelmente no sentido de aplicação da carga, onde a geometria da fase dispersa, a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação das microfibras, são determinantes para a característica da ruptura e intensidade da tensão (26), (116).



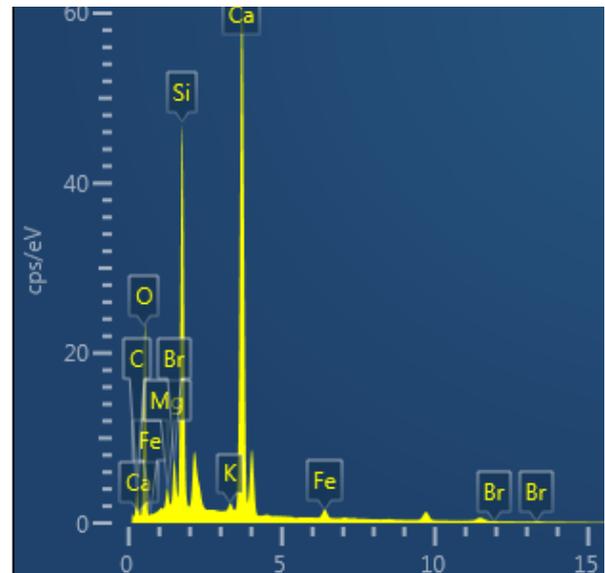
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 52: Mapeamento químico da superfície fraturada da mistura de concreto com microfibra de vidro MFV: (a) Sobreposição dos elementos químicos; (b) composição elementar de cálcio; (c) composição elementar de silício; (d) espectrograma mostrando principalmente as presenças de silício e cálcio.

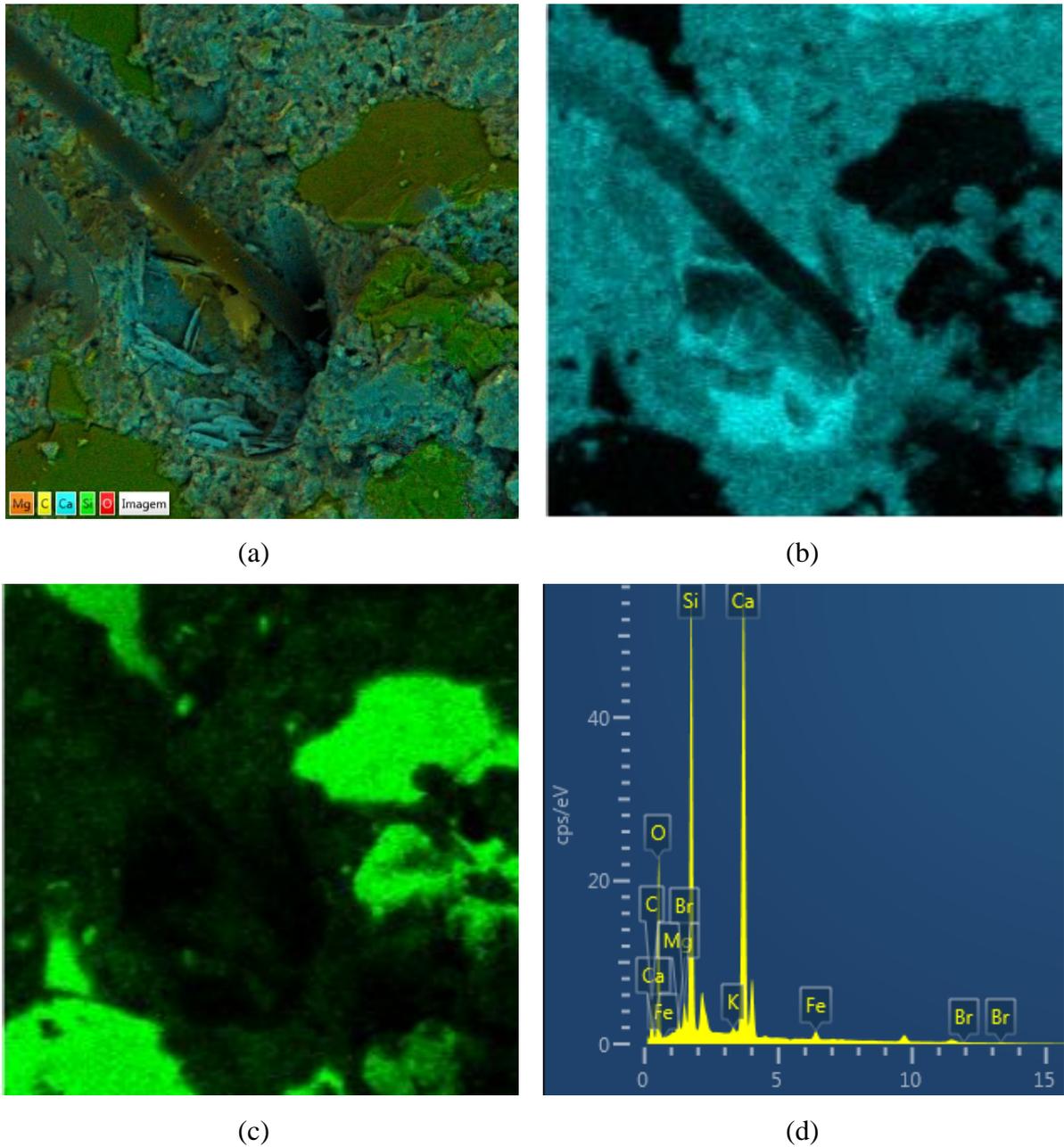


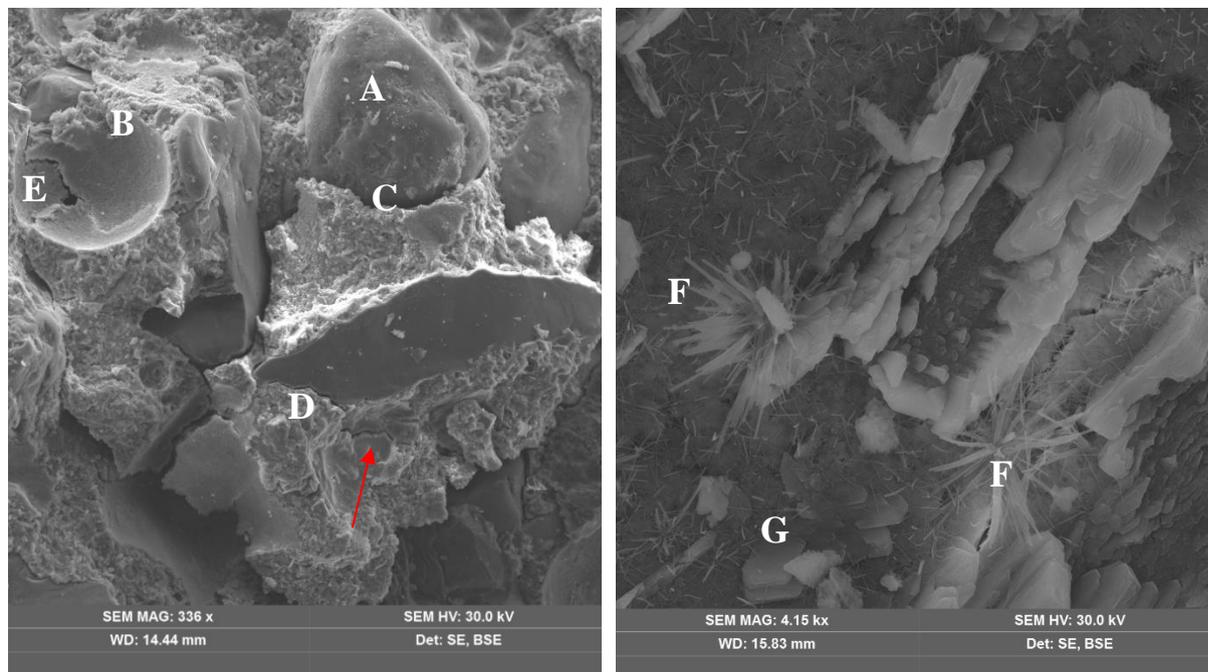
Figura 53: Mapeamento químico da superfície fraturada da mistura de concreto com microfibra de polipropileno MFPP: (a) Sobreposição dos elementos químicos; (b) composição elementar de cálcio; (c) composição elementar de silício; (d) espectrograma mostrando principalmente as presenças de silício e cálcio

4.7 Análise microestrutural (MEV)

As imagens micromorfológicas do concreto MR usando MEV são mostradas na Figura 54, observamos que ocorreu uma boa qualidade de ligação entre o agregado e a matriz de cimento, porém podem ser observadas fissuras bastante evidentes quando comparado com as

misturas de MFV e MFPP. O concreto por ser um compósito a sua resistência, qualidade e durabilidade dependem das propriedades da interface principalmente entre os agregados, as fibras e a matriz cimentícia. A boa qualidade da ligação pode favorecer a resistência do concreto pela diminuição da absorção de água.

A Figura 54 (a) mostra que através das imagens microscópicas com ampliação de 336 vezes foi observado nas letras A partícula de areia, B agregado desalojado, C quebra da interface agregado e matriz cimentícia, D formação de trinca começando na interface e se propagando para a matriz cimentícia, E vazio. Na Figura 54 (b) tem-se com ampliação de 4150 vezes as letras F representa cristais prismáticos em forma de agulha, G representa produtos cristalinos hexagonais característicos de misturas de cimento Portland.



(a)

(b)

Figura 54: Análise microestrutural (MEV) da superfície fraturada do concreto de referência MR.

Os concretos com microfibras, MFV e MFPP, apresentam microestrutura bastante semelhante, evidenciado a partir das micrografias MEV com ampliação 833x. Além disso, as fibras distribuídas dentro da matriz como microrreforços, como mostrado nas Figuras 55 (a) e (b). Foi observado a boa ligação entre as microfibras e a matriz ligante, o que melhorou o processo de transferência de tensão, melhorando assim as propriedades mecânicas. As zonas de contato entre as microfibras e a matriz de cimento estão corretamente moldadas. Não foram

observadas microfissuras visíveis nas áreas de ancoragem das microfibras MFV e MFPP e a matriz.

Uma grande quantidade de agulhas de etringita, hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (CSH) foram observados e caracterizados por espectroscopia. Isso ocorre porque o aumento da porosidade no concreto proporcionou o espaço para o crescimento de cristais de etringita e CH. A deposição dessas fases na microestrutura é bastante distinta, o CH precipita nos poros preenchidos com água, enquanto o CSH se deposita principalmente ao redor dos grãos de cimento.

Tanto na Figura 55 (a) quanto na figura 55 (b), pode-se observar que a ligação interfacial bem formada entre a pasta e a microfibra de polipropileno e a pasta e microfibra de vidro, respectivamente, fornecem resistência suficiente através das forças de atrito da superfície para melhorar as resistências mecânicas. De acordo com Yan et. al. (102) pode-se facilmente deduzir que a adição de fibras dificultou a geração e expansão de trincas atuando como eficiente absorvedor e dissipador de energia. Mostra que há um efeito de ponte na superfície de falha após a fibra ser puxada para fora da matriz. Também demonstrou a boa ligação entre as fibras e os produtos de hidratação, que resistiram à abertura de trincas no estágio de endurecimento suave das matrizes

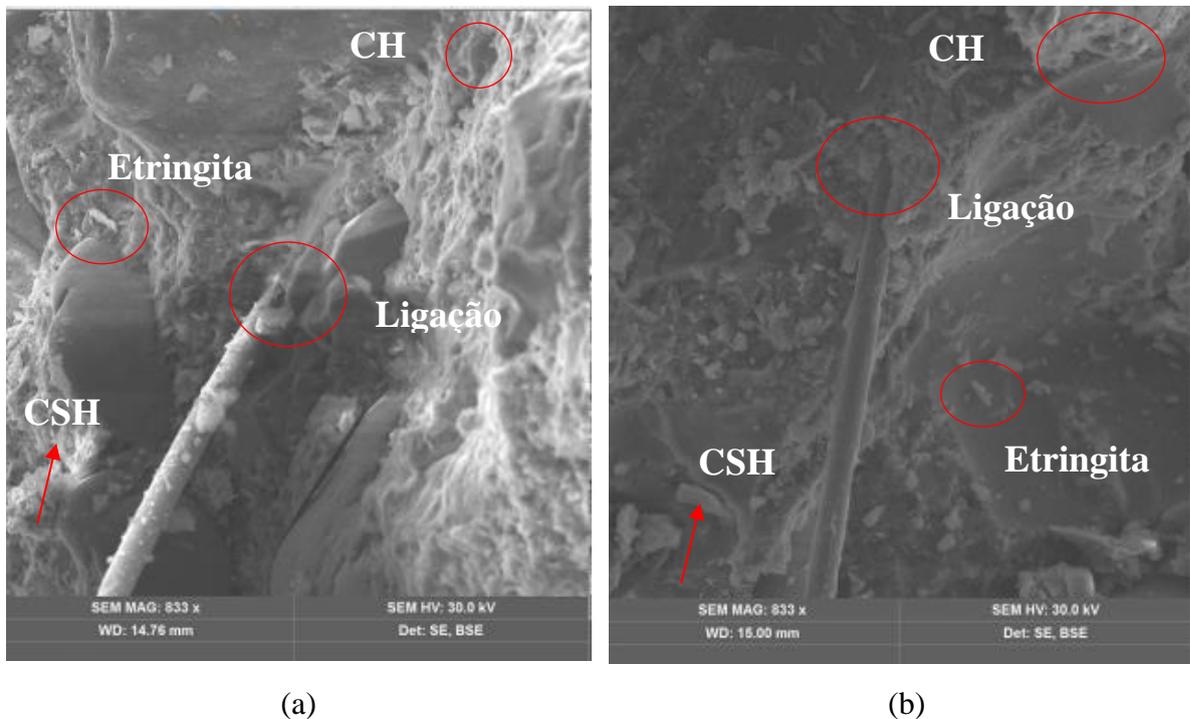


Figura 55: Análise microestrutural (MEV) das superfícies fraturadas: (a) mistura de MFPP; (b) mistura de MFV.

As Figuras 56 (a) e (b) demonstram que a distribuição dos poros não é uniforme e o tamanho varia muito. Pequenas microfissuras foram observadas nas duas misturas MFPP e MFV, que resultaram da evaporação da água durante o processo de preparação, devido as falhas do processo de adensamento, devido à severa retração por secagem e pelo próprio processo de fratura das amostras de concreto, que servem para demonstrar a sua origem e processo de propagação. Tanto as microfibras MFPP e MFV são claramente visíveis nas imagens de MEV, onde o principal modo de falha é por ruptura.

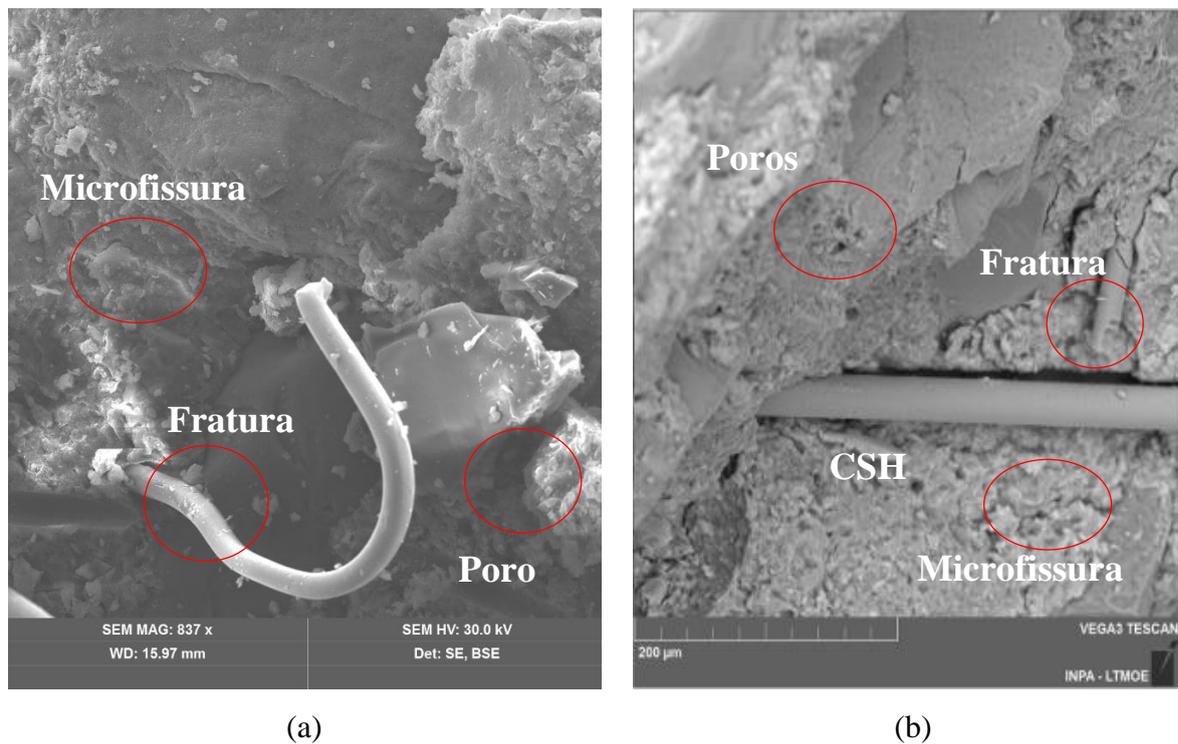


Figura 56: Análise microestrutural (MEV) das superfícies fraturadas: (a) mistura de MFPP; (b) mistura de MFV.

A superfície de fratura do material plano destaca a típica falha frágil com propagação de trincas ao longo da zona de transição interfacial entre a matriz cimentícia e o agregado Figuras 57 (a) e (b).

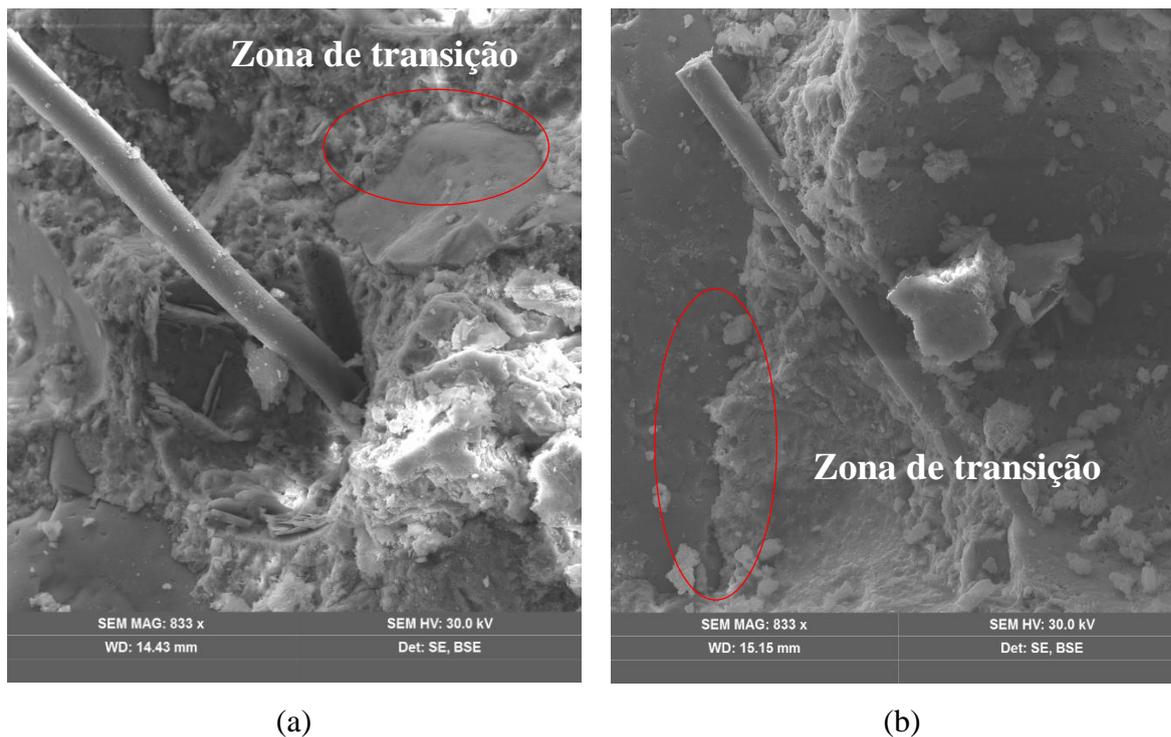


Figura 57: Análise microestrutural (MEV) das superfícies fraturadas: identificação da zona de transição (a) mistura de MFV; (b) mistura de MFPP.

No geral, é mais evidente a presença de poros, microfissuras, quebra e desagregação da matriz cimentícia e agregado, ou seja, a formação de regiões mais fracas no concreto MR, enquanto que as MFV e MFPP são capazes de interromper microfissuras em algum grau, o que pode ser mecanicamente benéfico para uma matriz de concreto, conforme o que ficou provado através dos ensaios mecânicos, conforme também é observado nos ensaios de (96).

CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a comparação de concreto de referência e concretos reforçados com microfibra de vidro e microfibra de polipropileno, através de ensaios mecânicos de compressão axial, tração da compressão diametral e resistência à flexão, além de observações de MEV/EDS de superfícies fraturadas. Com base nos resultados experimentais, as seguintes conclusões foram tiradas:

A incorporação de microfibra afetou significativamente a trabalhabilidade das misturas de MFV e MFPP. A adição de microfibras reduziu o slump das misturas em comparação as misturas de referência.

Em geral, a incorporação de microfibras aumentou progressivamente a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e resistência à flexão de ambos os tipos de concreto em comparação ao concreto de referência.

A média das tensões das três misturas MR, MFV e MFPP para todos os ensaios analisados tensão axial, tensão por compressão diametral e tensão de flexão aumentaram continuamente para todas as idades analisadas 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias. As misturas com adição de fibra foram superiores a mistura de referência, mostrando a eficiência das microfibras no controle da formação de fissuras ainda na fase de cura inicial.

As resistências à compressão axial aos 7 e 90 dias para as misturas MR, MFV e MFPP tiveram valores de 28,40 MPa e 44,32 MPa; 29,66 e 46,46; 30,16 e 47,42, respectivamente. As mesmas características de aumento de resistência também se mantiveram nas tensões de tração e de flexão.

A adição de microfibras alterou o modo de falha do concreto de frágil para dúctil. O processo de ruptura das MFPP foram menos abertas e mais verticais e o desenvolvimento das trincas diminuíram, a integridade dos corpos de prova foi melhor quando finalizado o ensaio.

As microfibras adicionadas ao concreto agiram de forma eficaz na diminuição da dispersão dos resultados de tração por compressão diametral. Comprovando que a microfibra atua como ponte de ligação na massa cimentícia impedindo a propagação de fissuras.

A análise de MEV/EDS indicou a interação física entre as microfibras de vidro e de polipropileno com a matriz cimentícia das misturas.

As misturas com microfibras de polipropileno foram as que apresentaram os melhores resultados para tensão axial, tensão de tração e flexão em praticamente todas as médias analisadas, além de melhorar as resistências mecânicas, melhoraram a ductilidade dos corpos

de prova. Uma boa ligação entre as MFPP e a matriz foi notada nas imagens de MEV, o que melhorou o processo de transferência de tensão e melhorou as propriedades mecânicas.

As análises de microestrutura demonstraram a ligação interfacial bem formada entre a pasta e as microfibras de vidro e polipropileno, que forneceram resistência suficiente através das forças de atrito da superfície das fibras e a matriz cimentícia das misturas. As análises de MEV também mostraram que há um efeito de ponte na superfície de falha após a fibra ser puxada para fora da matriz, além da boa ligação entre as fibras e os produtos de hidratação, que resistiram à abertura de trincas no estágio de endurecimento suave das misturas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J. R. Pereira. Análise comparativa entre métodos de avaliação do controle de fissuras por microfibras de polipropileno em concreto autoadensável. Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. Limeira, SP 2020.
- (2) J. Markovic, High-Performance Hybrid-Fibre Concrete, DUP Science DUP, Delft, 2006.
- (3) F. Altmann, V. Mechtcherine, Durability design strategies for new cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 54 (2013) 114–125.
- (4) D. Snoeck, N. De Belie. From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing – A review. *Construction and Building Materials* 95 (2015) 774–787, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.018>.
- (5) S. Kakooei, H. M. Akil, M. Jamshidi, J. Rouhi, The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials* 27 (2012), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015>.
- (6) D.Y. Yoo, N. Banthia, Y.S. Yoon, Effectiveness of shrinkage-reducing admixture in reducing autogenous shrinkage stress of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 64 (2015) 27–36, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.005>.
- (7) American Concrete Institute. Manual of concrete practice: part 5. ACI. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. (ACI 544.2R-96). ACI Committee 544. Detroit, USA, 2002.
- (8) EN 14889-2:2008. Fibres for Concrete - Part 2: Polymer Fibres - Definitions, Specifications and Conformity, (2008).
- (9) A. Bentur, A. Mindess. Fibre reinforced cementitious composites. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.
- (10) H.L. Dinh, J. Liu, Dominic E.L. Ong, J.H. Doh, A sustainable solution to excessive river sand mining by utilizing by-products in concrete manufacturing: A state-of-the-art review, *Cleaner Materials*, Volume 6, 2022, ISSN 2772-3976. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100140>.
- (11) A. M. Neville, J. J. Brooks, Tecnologia do concreto, tradução Ruy Alberto Cremonini, 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-8260-071-9.

- (12) ACI Committee Report 116R, Cement and Concrete Terminology, AGI Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
- (13) American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, v.04.02 (Concrete and Mineral Aggregates), Philadelphia, PA, 2005.
- (14) CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais. P. Kumar Mehta & Paulo J.M. Monteiro. Revisores e Coordenadores. Nicole Pagan Hasparyk, Paulo Helene & Vladimir Antonio Paulon São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p. 18,6 x 23,3 cm.
- (15) N. Roussel, Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes. *Mater Struct* 40, 1001–1012 (2007). <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9313-2>.
- (16) M. Pacione, Dubai, *Cities*, Volume 22, Issue 3, 2005, Pages 255-265, ISSN 0264-2751, <https://doi.org/10.1016/j.cities.2005.02.001>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275105000107>).
- (17) Wissam Merzoug, Samia Chergui, Mustapha Cheikh Zouaoui, The impact of reinforced concrete on the modern-day architectural heritage of Algeria, *Journal of Building Engineering*, Volume 30, 2020, 101210, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101210>.
- (18) Kathleen James-Chakraborty, Reinforced concrete in Louis Kahn's National Assembly, Dhaka: Modernity and modernism in Bangladeshi architecture, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 3, Issue 2, 2014, Pages 81-88, ISSN 2095-2635, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.01.003>.
- (19) Steffen Lehmann, An environmental and social approach in the modern architecture of Brazil: The work of Lina Bo Bardi, *City, Culture and Society*, Volume 7, Issue 3, 2016, Pages 169-185, ISSN 1877-9166, <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2016.01.001>.
- (20) Moncef L. Nehdi, Only tall things cast shadows: Opportunities, challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings, *Construction and Building Materials*, Volume 48, 2013, Pages 80-90, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.051>.
- (21) Raju Sharma, Jeong Gook Jang, Prem Pal Bansal, A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on engineering properties of ultra-high- performance concrete, *Journal of Building Engineering*, Volume 45, 2022, 103314, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103314>.

- (22) R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount *Construct. Build. Mater.*, 65 (2014), pp. 140-150, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063>.
- (23) T. Ahmed, M. Elchalakani, A. Karrech, M. Dong, M.S. Mohamed Ali, H. Yang ECO-UHPC with high-volume class-F fly ash: new insight into mechanical and durability properties *J. Mater. Civ. Eng.*, 33 (2021), pp. 1-20, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003726](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003726).
- (24) SH Park, DJ Kim, GS Ryu, KT Koh, Comportamento à tração do concreto reforçado com fibras híbridas de ultra alto desempenho *Cimento Concr. Compos.* 34 (2012), pp. 172-184, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009>.
- (25) DJ Kim, SH Park, GS Ryu, KT Koh Comportamento flexural comparativo de concreto reforçado com fibras de ultra alto desempenho híbrido com diferentes macrofibras *Construir. Construir. Mater.*, 25 (2011), pp. 4144- 4155, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051>.
- (26) William D. Callister, Jr., David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução / Rethwisch; tradução Sergio Murilo Stamile Soares. - 9. ed. - [Reimpr.]. - Riode Janeiro: LTC, 2018.
- (27) V.C. Li, On engineered cementitious composites (ECC), *J. Adv. Concr. Technol.* 1 (3) (2003) 215–230.
- (28) G. Yıldırım, O. Oztürk, A. Al-Dahawi, A. Afsın Ulu, M. Şahmaran, Self-sensing capability of engineered cementitious composites: effects of aging and loading conditions, *Contr. Build. Mater.* 231 (2020).
- (29) Y. Zhou, S. Zheng, X. Huang, B. Xi, Z. Huang, M. Guo, Performance enhancement of green high-ductility engineered cementitious composites by nano-silica incorporation, *Contr. Build. Mater.* 281 (2021).
- (30) K.-Q. Yu, J.-T. Yu, J.-G. Dai, Z.-D. Lu, S.P. Shah, Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018).
- (31) J.S. Lawler, T. Wilhelm, D. Zampini, S.P. Shah, Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar, *Mater. Struct.* 36 (3) (2003).

- (32) N.M.P. Low, J.J. Beaudoin, Mechanical properties of high performance cement binders reinforced with wollastonite microfibers, *Cem. Concr. Res.* 22 (5) (1992).
- (33) J.J. Beaudoin, N.M.P. Low, The flexural toughness and ductility of Portland cement-based binders reinforced with wollastonite fibers, *Cem. Concr. Res.* 24 (2) (1994).
- (34) V. Dey, R. Kachala, A. Bonakdar, B. Mobasher, Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 82 (2015).
- (35) M. Maruta, T. Kanda, S. Nagai, Y. Yamamoto, New high-rise RC structure using pre-cast ECC coupling beam, *Concr. J.* 43 (2005).
- (36) S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, N. Sivakugan, Use of macro plastic fibres in concrete: a review, *Constr. Build. Mater.* 93 (2015) 180–188, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015>.
- (37) Kumar, B.N.N., Rao, R.V.N., Kumar, G.B. Development of Normal Strength and High Strength Self Curing Concrete and Self Compacting Concrete Using Sodium Polyacrylate As A Polymer. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology (JSRST)*. v.3, n.3, pp.568-576, 2017.
- (38) Fernanda de Andrade Salgado, Flávio de Andrade Silva, Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review, *Journal of Building Engineering*, Volume 52, 2022, 104452, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>.
- (39) Laerte Melo Barros, Concreto de alta resistência a partir de matérias primas amazônicas e vidro reciclado. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais Área de Concentração Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de materiais, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016).
- (40) Miguel Bravo, Jorge de Brito, Jorge Pontes, Luís Evangelista, Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *Journal of Cleaner Production*, Volume 99, 2015, Pages 59-74, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>.
- (41) Aitcin, Pierre-Claude, Concreto de alto desempenho, tradução Geraldo G. Serra, São Paulo: Pini, 2000.

- (42) Ana Mafalda Matos, F.A.N. Silva, A.C. Azevedo, J.F. Marins, J.M.P.Q. Delgado, Alkali-reactivity of Pernambuco east shear zone coarse concrete aggregates: An experimental discussion, *Construction and Building Materials*, Volume 344, 2022, 128239, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128239>.
- (43) T. Scheiden, N. Oneschkow, Influence of coarse aggregate type on the damage mechanism in high-strength concrete under compressive fatigue loading *Structural Concrete*, 20 (4) (2019), pp. 1212-1219.
- (44) Atsushi Ueno, Yuko Ogawa, Influence of coarse aggregate shape on optimum fineto total aggregate ratio using a virtual voids-ratio diagram in concrete compaction, *Cement and Concrete Composites*, Volume 106, 2020, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103463>.
- (45) E.D. Sneed, R.L. Folk, Pebbles in the lower Colorado river, Texas a study in particle morphogenesis *J. Geol.*, 66 (1958), pp. 114-150, 10.1086/626490.
- (46) James F. Shackelford. *Ciência dos materiais*. 6 ed. São Paulo: Geográfica Editora, 2010.
- (47) Karen L. Scrivener, André Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future, *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 7, 2011, Pages 651-665, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>.
- (48) Jérôme Claverie, Qianqian Wang, Siham Kamali-Bernard, Fabrice Bernard, Assessment of the reactivity and hydration of Portland cement clinker phases from atomistic simulation: A critical review, *Cement and Concrete Research*, Volume 154, 2022, 106711, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106711>.
- (49) E.M. Junior, Sustainable development and cement and concrete industries, PhD thesis, Université de Sherbrooke; 2003.
- (50) J Hill, J.H Sharp, The mineralogy and microstructure of three composite cements with high replacement levels, *Cement and Concrete Composites*, Volume 24, Issue 2, 2002, Pages 191-199, ISSN 0958-9465, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00041-5).
- (51) Dan Wang, Jun Chang, Wajahat Sammer Ansari, The effects of carbonation and hydration on the mineralogy and microstructure of basic oxygen furnace slag products, *Journal of CO₂ Utilization*, Volume 34, 2019, Pages 87-98, ISSN 2212-9820, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.06.001>.

- (52) Arvaniti, E.C., Juenger, M.C.G., Bernal, S.A. et al. Physical characterization methods for supplementary cementitious materials. *Mater Struct* 48, 3675–3686 (2015). <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0430-4>.
- (53) W.E. Ellis Jr. For durable concrete, fly ash does not "replace" cement *Concr. Int.*, 14 (7) (1992), pp. 47-51
- (54) Quanlin Niu, Naiqian Feng, Jing Yang, Xiaoyan Zheng, Effect of superfine slag powder on cement properties, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 4, 2002, Pages 615-621, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00730-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00730-X).
- (55) Y. Liu, Z. Zhang, G. Hou, P. Yan Preparation of sustainable and green cement-based composite binders with high-volume steel slag powder and ultrafine blast furnace slag powder (incompleta)
- (56) Yongxiang Zhou, Zengqi Zhang, Effect of fineness on the pozzolanic reaction kinetics of slag in composite binders: Experiment and modelling, *Construction and Building Materials*, Volume 273, 2021, 121695, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121695>.
- (57) Wengui Li, Chu Long, Vivian W.Y. Tam, Chi-Sun Poon, Wen Hui Duan, Effects of nanoparticles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 142, 2017, Pages 42-50, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.051>.
- (58) Zhigang Zhu, John L. Provis, Huisu Chen, Quantification of the influences of aggregate shape and sampling method on the overestimation of ITZ thickness in cementitious materials, *Powder Technology*, Volume 326, 2018, Pages 168-180, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.008>.
- (59) Yu Zhou, Shaochang Pu, Fanghui Han, Hongbo Zhang, Zengqi Zhang, Effect of ultrafine slag on hydration heat and rheology properties of Portland cement paste, *Powder Technology*, Volume 405, 2022, 117549, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117549>.
- (60) Qianping Ran, Ponisseril Somasundaran, Changwen Miao, Jiaping Liu, Shishan Wu & Jian Shen (2010) Adsorption Mechanism of Comb Polymer Dispersants at the Cement/Water Interface, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 31:6, 790- 798, DOI: 10.1080/01932690903333580.

- (61) Bing Ma, Ming Ma, Xiaodong Shen, Xuerun Li, Xiaodong Wu, Compatibility between a polycarboxylate superplasticizer and the belite-rich sulfoaluminate cement: Setting time and the hydration properties, *Construction and Building Materials*, Volume 51, 2014, Pages 47-54, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.028>.
- (62) Ch. Schröfl, M. Gruber, J. Plank, Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC), *Cement and Concrete Research*, Volume 42, Issue 11, 2012, Pages 1401-1408, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.08.013>.
- (63) I Aiad, S Abd El-Aleem, H El-Didamony, Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 11, 2002, Pages 1839-1843, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00886-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00886-4).
- (64) Manuel Ilg, Johann Plank, Non-adsorbing small molecules as auxiliary dispersants for polycarboxylate superplasticizers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 587, 2020, 124307, ISSN 0927-7757, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124307>.
- (65) W. H. Glaville, A. R. Collins, D. D. Matthews. The grading aggregates and workability of concret. *Road Research Technical*, Paper n° 5, HMSO. London (1947).
- (66) ACI Committee Report 116R-90, *Cement and Concrete Terminology*, Detroit. USA, (1990).
- (67) J. Newman, B.S. Choo *Advanced Concrete Technology Set, Volume-1 Concrete Properties* Butterworth-Heinemann, England (2003).
- (68) Jinglong Gao, Andy Fourie, Spread is better: An investigation of the mini-slump test, *Minerals Engineering*, Volume 71, 2015, Pages 120-132, ISSN 0892-6875, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.001>.
- (69) Zichen Lu, Jiayun Lu, Zhiwei Liu, Zhenping Sun, Dietmar Stephan, Influence of water to cement ratio on the compatibility of polycarboxylate superplasticizer with Portland cement, *Construction and Building Materials*, Volume 341, 2022, 127846, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127846>.
- (70) Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. ABNT NBR 6118:2014, 238 páginas ISBN 978-85-07-04941-8.

- (71) Associação Brasileira de Normas Técnicas. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpo de prova. ABNT NBR 5738:2015, 9 páginas ISBN 978-85- 07-05405-4.
- (72) Associação Brasileira de Normas Técnicas. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT NBR 5739:2018, 9 páginas ISBN 978-85-07-07531-8.
- (73) Asselanis, J., Aïcin, P.-C and Mehta, P.K. (1989) Influences of curing conditions on de compressive strength and elastic modulus of very high strength concrete. Cement Concrete and Aggregate Summer, 80-83.
- (74) Y. Ding, J.-G. Dai, C.-J. Shi, Mechanical properties of alkali-activated concrete: a state-of-the-art review, Constr. Build. Mater., 127 (2016), pp. 68-79.
- (75) Associação Brasileira de Normas Técnicas. Concreto – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. ABNT NBR 7222:2011, 5 páginas ISBN 978-85-07-02788-1.
- (76) Carvalho, R. C. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014, 4 edição, São Carlos: EdUFSCar, 2019. 415 páginas. ISBN 978-85-7600-356-4.
- (77). Bijo MD, Sujatha Unnikrishnan, Mechanical strength and impact resistance of hybrid fiber reinforced concrete with coconut and polypropylene fibers, Materials Today: Proceedings, Volume 65, Part 2, 2022, Pages 1873-1880, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.048>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322033193>).
- (78). Zhu Yuan, Yanmin Jia, Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study, Construction and Building Materials, Volume 266, Part A, 2021, 121048, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121048>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182033052X>)
- (79) Mendes, T. M., Repette, W. L. and Reis, P. J.. Effects of nano-silica on mechanical performance and microstructure of ultra-high performance concrete. Cerâmica [online]. 2017, v. 63, n. 367 [Accessed 27 December 2022], pp. 387-394. Available from: <<https://doi.org/10.1590/0366-69132017633672037>>. ISSN 1678-4553.

- (80) K.L. Scrivener, T. Füllmann, E. Gallucci, G. Walenta, E. Bermejo, Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods, *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 9, 2004, Pages 1541-1547, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.014>.
- (81) L. Bleicher, J. M. Sasaki. Introdução à difração de raios X em cristais. Universidade Federal do Ceará, 2000.
- (82) K. Habel, M. Viviani, E. Denarié, E. Brühwiler, Development of the mechanical properties of an UltraHigh performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) *Cement Concr. Res.*, 36 (7) (2006), pp. 1362-1370, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.009>.
- (83) Doo-Yeol Yoo, Kyung-Hwan Min, Joo-Ha Lee, Young-Soo Yoon, Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age, *Construction and Building Materials*, Volume 73, 2014, Pages 357-365, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.097>.
- (84) Ruijun Wang, Ningning Yu, Yang Li, Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review, *Construction and Building Materials*, Volume 242, 2020, 118164, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>.
- (85) Ruijun Wang, Ningning Yu, Yang Li, Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review, *Construction and Building Materials*, Volume 242, 2020, 118164, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>.
- (86) A.M. Soliman, M.L. Nehdi, Effect of natural wollastonite microfibers on early age behavior of UHPC, *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (7) (2012).
- (87) R.I. Khan, W. Ashraf, Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development, *Constr. Build. Mater.* 218 (2019).
- (88) K. Mandel, H. Funke, M. Lindner, S. Gelbrich, L. Kroll, T. Schwarz, Recipe development of low-cost wollastonite-based phosphate cements, *Constr. Build. Mater.* 189 (2018).
- (89) Figueiredo, A. D., *Concreto reforçado com fibras. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. São Paulo, 2011. 248 p.*
- (90) Resende, F. M. Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de

concretos de alta resistência normal e de alto desempenho. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

(91) Anteneh Tibebe, Eyob Mekonnen, Leevesh Kumar, Jifara Chimdi, Hunde Hailu, Natif Fikadu, Compression and workability behavior of chopped glass fiber reinforced concrete, *Materials Today: Proceedings*, Volume 62, Part 8, 2022, Pages 5087-5094, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.427>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322010902>)

(92) D.Y. Yoo, N. Banthia, Y.S. Yoon, Effectiveness of shrinkage-reducing admixture in reducing autogenous shrinkage stress of ultra-high-performance fiberreinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 64 (2015) 27–36, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.005>.

(93) E. Oliari Garcez, M. Ikramul Kabir, A. Macleod, M. Subhani, K. Ghabraie Self-Compacting concrete reinforced with twisted-bundle macro-synthetic fiber *Appl. Sci.*, 9 (12) (2019), p. 2543, [10.3390/app9122543](https://doi.org/10.3390/app9122543).

(94) Bing Liu, Xuanyu Zhang, Junpeng Ye, Xiaoyan Liu, Zhiheng Deng, Mechanical properties of hybrid fiber reinforced coral concrete, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 16, 2022, e00865, ISSN 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00865>.

(95). Sachin Patil, H Sudarsana Rao, Vaishali. G. Ghorpade, The influence of metakaolin, silica fume, glass fiber, and polypropylene fiber on the strength characteristics of high performance concrete, *Materials Today: Proceedings*, 2022, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.051>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322068882>).

(96). Atena Asgarian, Naeim Roshan, Mansour Ghalehnovi, The Strength, Microstructure, and ecological assessment of concrete mix incorporating waste glass powder and polypropylene fiber, *Construction and Building Materials*, Volume 371, 2023, 130726, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130726>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823004373>)

(97). Ahmed Abd El Aal, Gamil M.S. Abdullah, S.M. Talha Qadri, Abotalib Z. Abotalib, Abdullah Othman, Advances on concrete strength properties after adding polypropylene fibers from health personal protective equipment (PPE) of COVID-19: Implication on waste management and sustainable environment, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*,

Volume 128, 2022, 103260, ISSN 1474-7065, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103260>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147470652200153X>)

(98). Mohammadhosseini, Hossein, ASM Abdul Awal, and Jamaludin B. Mohd Yatim. "The impact resistance and mechanical properties of concrete reinforced with waste polypropylene carpet fibres." *Construction and Building Materials* 100.143 (2017): 147-157.

(99) Gao-Jie Liu, Er-Lei Bai, Jin-Yu Xu, Ning Yang, Teng-jiao Wang, Dynamic compressive mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios at high strain rates, *Construction and Building Materials*, Volume 261, 2020, 119995, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119995>.

(100) Mehran Khan, Mingli Cao, Majid Ali, Effect of basalt fibers on mechanical properties of calcium carbonate whisker-steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 192, 2018, Pages 742-753, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.159>.

(101) J.I. Choi, B.Y. Lee, Bonding properties of basalt fiber and strength reduction according to fiber orientation, *Materials*, 8 (2015), pp. 6719-6727.

(102) P. Yan, B. Chen, S. Afgan, M. A. Haque, M. Wu, J. Han, Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre, *Construction and Building Materials*, Volume 279, 2021, 122489, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122489>.

(103) T. Ni, L. Zhang, B. Yuan Influence of wollastonite or plant fiber on performance of autoclaved cement concrete; *Applied Mechanics Materials*., 99 (100) (2011), pp. 692-695.

(104) H. E. Yücel, H. Ö. Öz, M. Güneş, Y. Kaya, Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers with two different high aspect ratios, *Construction and Building Materials*, Volume 306, 2021, 124921, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124921>.

(105) A.M. Soliman, M.L. Nehdi, Effect of natural wollastonite microfibers on early-age behavior of UHPC, *J. Mater. Civ. Eng.*, 24 (7) (2012), pp. 816-824.

(106) S. Kwon, T. Nishiwaki, H. Choi, H. Mihashi, Effect of wollastonite microfiber on Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites based on application of multi-

scale fiber-reinforcement system, *J. Adv. Concr. Technol.*, 13 (7) (2015), pp. 332-344.

(107) S. Lee Effect of nylon fiber addition on the performance of recycled aggregate concrete *Appl. Sci.*, 9 (2019), p. 767.

(108). Kiachehr Behfarnia, Amir Behravan, Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels, *Materials & Design*, Volume 55, 2014, Pages 274-279, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.075>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913009278>)

(109). Mohseni, Ehsan, et al. "Polypropylene fibre reinforced cement mortars containing rice husk ash and nano-alumina." *Construction and Building Materials* 111 (2016): 429-439.

(110). Kunio Matsui, Jun Kikuma, Masamichi Tsunashima, Tetsuji Ishikawa, Shin-ya Matsuno, Akihiro Ogawa, Masugu Sato, In situ time-resolved X-ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: Influence of silica source reactivity and Al addition, *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 5, 2011, Pages 510-519, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.022>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611000366>).

(111). Nicoletta Marinoni, Alessandro Pavese, Marco Voltolini, Marco Merlini, Long-term leaching test in concretes: An X-ray powder diffraction study, *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 8, 2008, Pages 700-705, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.05.004>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946508000565>).

(112). Nonat, A. L'hydratation des ciments. La durabilité des bétons, p. 25-50, 2008.

(113). Duc Chinh Chu, Joelle Kleib, Mouhamadou Amar, Mahfoud Benzerzour, Nor-Edine Abriak, Determination of the degree of hydration of Portland cement using three different approaches: Scanning electron microscopy (SEM-BSE) and Thermogravimetric analysis (TGA), *Case Studies in Construction Materials*, Volume 15, 2021, e00754, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00754>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002692>).

(114). Arif Ulu, Ali Ikbal Tutar, Ahmet Kurklu, Ferit Cakir, Effect of excessive fiber reinforcement on mechanical properties of chopped glass fiber reinforced polymer concretes, *Construction and Building Materials*, Volume 359, 2022, 129486, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129486>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822031427>)

(115). Shuai Cao, Di Zheng, Erol Yilmaz, ZhenYu Yin, GaiLi Xue, FuDou Yang, Strength development and microstructure characteristics of artificial concrete pillar considering fiber type and content effects, *Construction and Building Materials*, Volume 256, 2020, 119408, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119408>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820314136>).

(116) Z. Wu, C. Shi, K. H. Khayat, Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape, *Composites Part B: Engineering*, Volume 174, 2019, 107021, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836819311357>).