



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

CAROLINE MARÇÃO WOLF DE GOES

**DOSAGEM ATRAVÉS DO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO HÍBRIDO**

CAMPINAS

2022

CAROLINE MARÇÃO WOLF DE GOES

**DOSAGEM ATRAVÉS DO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO HÍBRIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada a
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo da Unicamp, para obtenção do
título de Mestra em Engenharia Civil, na área
de Estruturas e Geotécnica.

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Carlos de Almeida

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA CAROLINE
MARÇÃO WOLF DE GOES E ORIENTADA PELO PROF. DR.
LUIZ CARLOS DE ALMEIDA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

G553d Goes, Caroline Marcão Wolf de, 1990-
Dosagem através do empacotamento de partículas e avaliação do comportamento mecânico de concreto de ultra-alto desempenho híbrido / Caroline Marção Wolf de Goes. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Luiz Carlos de Almeida.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Concreto de ultra alto desempenho. 2. Concreto reforçado com fibras. 3. Pozolanas. I. Almeida, Luiz Carlos de, 1953-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Design through particle packing and evaluation of the mechanical behavior of hybrid ultra-high performance concrete

Palavras-chave em inglês:

Ultra-high performance concrete

Fiber reinforced concrete

Pozzolans

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Luiz Carlos de Almeida [Orientador]

Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol

Lia Lorena Pimentel

Data de defesa: 21-01-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9768-1356>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/2953734705245714>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

DOSAGEM ATRAVÉS DO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO HÍBRIDO

Caroline Marção Wolf de Goes

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Luiz Carlos de Almeida

Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol

Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Dra. Lia Lorena Pimentel

Pontifícia Universidade Católica de Campinas

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 21 de janeiro de 2022.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável (...) para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido a vida e por ter me dado sabedoria e força para essa etapa tão desafiadora.

Ao meu marido, Rafael, meu maior incentivador, pela compreensão, paciência, ajuda, amor e por todo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus pais, Marcelino e Maria Inês, pelo amor incondicional, compreensão e incentivo em todos os momentos. E além disso, por terem me ajudado intensamente durante o ano de 2020 e permitido que eu pudesse me dedicar totalmente à pesquisa.

À minha irmã, Danielle, aos meus sogros, Claudia e Nelson, aos meus cunhados, Rodrigo, Janaína, Rodrigo e Renato, e à minha sobrinha, Laura, aos grandes amigos, Ana, André, Théo, Deborah, Fernanda, Jonathan, Inna, e Lennin pelo carinho e torcida, e compreensão pelas minhas ausências para me dedicar a essa pesquisa.

Aos meus queridos avós, Orlando, Elza (in memoriam), Miguel (in memoriam) e Iolanda (in memoriam) que devido ao exemplo de determinação e força, contribuíram para que eu me empenhasse nesse desafio para deixá-los orgulhosos.

Ao Curtis e Rielle pelo apoio, torcida e por me motivarem a atingir mais um degrau em minha carreira.

Ao grande mestre, Prof. Dr. Luiz Carlos de Almeida, por me proporcionar essa oportunidade, pela confiança e por me transmitir sua experiência sempre com muita atenção.

Ao Prof. Dr. Pablo Augusto Krah, que me transmitiu muito conhecimento e experiência. Por sempre me incentivar, ajudar. Por sempre ter paciência e disponibilidade em me auxiliar e ensinar durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein, por sempre estar disposto a ajudar e transmitir conhecimento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Geotécnica da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, pela oportunidade de cursar o mestrado.

Aos professores Dr. Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol e Dra. Lia Lorena Pimentel, por aceitarem participar da comissão examinadora desta pesquisa.

Ao colega de pesquisa, Carlos A. Benedetty Torres, pela amizade, dicas e troca de conhecimento, e principalmente, pela ajuda e paciência na realização de ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Estrutura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, especialmente, ao Luciano.

A prof. Dr. Lia L. Pimentel e aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção (em especial, ao Igor) da Faculdade de Engenharia Civil da PUC (Campinas), pela ajuda na realização de ensaios no início do desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP - Campinas, pela realização de ensaios e atenção.

Às empresas pela atenção em minhas solicitações e dúvidas e pela doação de materiais, tornando possível o desenvolvimento da pesquisa: Votorantim Cimentos (em especial ao Fausto, Vicente, Leonardo e Lineu); Elkem Materials South America LTDA; Beneficiamento de Minérios Rio Claro (BMRC) (em especial ao Murilo); Grace Construction Products (em especial a Danila e Carolina); Kuraray South America (em especial a Laisa); Metacaulim do Brasil; Temper Vidros (em especial à Sandra); e a Pozzofly.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (88887.597172/2021-00).

A todos, que direta e indiretamente me ajudaram a concluir este trabalho, os meus mais sinceros agradecimentos!

RESUMO

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é uma nova geração de concreto que possui alta resistência à compressão, superior a 120 MPa, e maior durabilidade. Sua dosagem se baseia na utilização de materiais com granulometrias finas (tipicamente entre 0.20 e 600 μm) e de técnicas de empacotamento das partículas, para minimizar a porosidade e obter uma microestrutura densa. Pode ser aplicado em reforço de estruturas, elementos arquitetônicos, torres eólicas, obras marítimas, e, principalmente, em obras de infraestrutura. Uma das principais vantagens do uso do CUAD é possibilitar a redução das dimensões dos elementos estruturais, o tempo de execução de estruturas e o custo (dependendo da estrutura). Apesar de ao longo da história ter sido produzido com alto teor de cimento, a utilização de materiais cimentícios, como metacaulim e resíduos industriais (sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno) para substituir parte do cimento tem sido estudada para reduzir o impacto ambiental e o custo do concreto.

As fibras conferem alta ductilidade e tenacidade ao concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF). Normalmente, apenas um tipo de fibra é adicionado em sua composição, sendo a fibra de aço a mais utilizada por ter alta resistência e alto módulo de elasticidade. Porém, a combinação de fibras de diferentes tipos, formatos, propriedades ou funcionalidades tem sido investigada, pois o desempenho de um concreto híbrido tende a ser superior ao desempenho de um concreto composto com apenas uma fibra.

O objetivo da pesquisa foi desenvolver um traço de CUADRF híbrido utilizando fibras de aço de 13 mm de comprimento e 0.20 mm de diâmetro e fibras de álcool polivinílico de 6 mm de comprimento e 0.20 mm de diâmetro. Foram utilizados materiais disponíveis no mercado brasileiro, exceto as fibras de aço, com o intuito de auxiliar e incentivar a aplicação desse concreto na infraestrutura do país e contribuir para a elaboração de normas e recomendações nacionais. A primeira etapa do trabalho experimental consistiu na caracterização dos materiais (morfologia, densidade, granulometria e componentes químicos). Na segunda etapa, através do empacotamento de partículas produziu-se diferentes traços de CUAD que foram avaliados quanto à fluidez, porosidade e resistência à compressão. Esses traços foram separados em três combinações de materiais, diferenciando-se pelo uso de pó de quartzo, cinza volante e metacaulim. Na terceira etapa, o traço de melhor desempenho produzido na etapa anterior foi analisado com fibras. Nesta etapa, parte da água de amassamento foi substituída por gelo para melhorar a fluidez e o tempo de pega. Foram desenvolvidos três traços, sendo um sem fibras (CUAD referência), e dois CUADRF, sendo um com apenas fibras de aço (volume de 2%) e outro híbrido (volume de 1.5% de fibras de aço e 0.50% de fibras de álcool polivinílico).

Os traços de CUAD compostos com cinza volante e metacaulim obtiveram resistência à compressão superior aos traços de CUAD com pó de quartzo, porque são pozolanas de alta reatividade. Verificou-se que adição do superplastificante em duas etapas favoreceu a fluidez. Devido as partículas da cinza volante serem esféricas resultou no aumento da fluidez e redução da relação água/aglomerante. Para a idade de 140 dias, o traço de CUADRF com 2% de fibras de aço obteve 146.01 MPa de resistência à compressão e o traço de CUADRF híbrido obteve 123.94 MPa. A adição de fibras ao CUAD aumentou significativamente a resistência à tração na flexão. O uso de fibras retas de aço com tratamento na superfície permitiu a obtenção de uma alta aderência entre fibra-matriz. Apesar da substituição de parte das fibras de aço por fibras de álcool polivinílico ter resultado na redução das resistências à compressão e à tração na flexão, a aplicação do CUADRF híbrido permite a construção de estruturas com menor probabilidade de corrosão, maior resistência ao incêndio e menor custo. Os resultados mostram um potencial para que o CUADRF seja produzido nacionalmente e com facilidade, devido a ampla variedade de matéria-prima disponível no Brasil, em condições de cura em temperatura ambiente e processos convencionais de moldagem. Adicionalmente, analisou-se analiticamente modelos inversos para obter as curvas de tensão de tração por abertura de fissuras. Essas curvas podem ser utilizadas em projetos e modelos de elementos finitos.

Palavras-chave: concreto de ultra-alto desempenho, concreto reforçado com fibras híbrido, empacotamento de partículas, materiais cimentícios suplementares

ABSTRACT

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is a new generation of concrete with high compressive strength, greater than 120 MPa, and high durability. The mix design is based on fine granulometry materials (between 0.20 and 600 μm) and particle packing techniques, minimizing porosity and obtaining a dense microstructure. UHPFRC can be applied in retrofit structures, architectural elements, wind towers, maritime works, and more specifically, for infrastructure works. One of the main advantages of using UHPC is the possibility to reduce the dimensions of structural elements, the execution time of structures, and the cost (depending on the structure). Although it has been produced with a high cement content over the years, cementitious materials, such as metakaolin and industrial waste (silica fume, fly ash, blast furnace slag) can replace part of the cement to reduce environmental impact and concrete cost.

The fibers provide high ductility and toughness to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). Usually, only one type of fiber is added in its composition, which steel fiber being the most used because it has high strength and a high modulus of elasticity. However, the combination of fibers of different types, shapes, properties, or functionalities has been investigated, as the performance of a hybrid concrete tends to be superior to the performance of a concrete with only one fiber.

The research aimed to develop a hybrid UHPFRC blending steel fibers 13 mm long and 0.20 mm in diameter and polyvinyl alcohol fibers 6 mm long and 0.20 mm in diameter. Materials available in the Brazilian market were used, except for steel fibers, to help and encourage the application of this concrete in the country's infrastructure and contribute to the elaboration of national standards and recommendations. The first stage of the experimental work consisted of the materials' characterization (morphology, density, granulometry, and chemical components). In the second stage, different UHPC mixes were produced by the particle packing and were evaluated in terms of fluidity, porosity, and compressive strength. These mixes were separated into three material combinations, distinguished by using quartz powder, fly ash, and metakaolin. In the third step, the best performance mix produced in the previous step was analyzed with fibers. In this step, part of the kneading water was replaced by ice to improve fluidity and set time. Three mixes were developed, one without fibers (reference UHPC), and two UHPFRC, one with only steel fibers (volume of 2%) and another hybrid (volume of 1.5% of steel fibers and 0.50% of polyvinyl alcohol fibers).

The UHPC mixes composed of fly ash and metakaolin obtained higher compressive strength than the UHPC mixes with quartz powder because they are pozzolans with high reactivity. The addition of the superplasticizer in two stages favored fluidity. Because the fly ash particles are spherical, it resulted in an increase in fluidity and a reduction in the water/binder ratio. At the age of 140 days, the UHPFRC mix with 2% steel fibers obtained 146.01 MPa of compressive strength, and the hybrid UHPFRC mix obtained 123.94 MPa. The addition of fibers to UHPC significantly increased the flexural tensile strength. Straight steel fibers with surface treatment allowed obtaining a high adhesion between fiber-matrix. Although the substitution of part of the steel fibers for polyvinyl alcohol fibers has resulted in the reduction of the compressive and tensile strengths in bending, the application of the hybrid UHPFRC allows the construction of structures with less probability of corrosion, higher resistance to fire, and less cost. The results show potential for UHPFRC to be produced nationally and efficiently, due to the wide variety of raw materials available in Brazil, under curing conditions at room temperature and conventional molding processes. Additionally, inverse models were analyzed analytically to obtain the curves of tensile stress-opening cracks. These curves can be used in designs and finite element models.

Keywords: ultra-high-performance concrete, hybrid fiber reinforced concrete, particle packing, supplementary cementitious materials

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pont Du Diable construída com CUADRF na França, (AFGC, 2013)	17
Figura 2: Cronologia da normatização de CUAD/CUADRF no mundo.....	24
Figura 3: Ponte para pedestres e ciclistas construída com CUADRF em Sherbrooke, (AFGC, 2013) ..	24
Figura 4: Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras, (MEDEIROS, 2012) ...	25
Figura 5: Diâmetro e área superficial específica de materiais utilizados para produzir diferentes concretos, (Adaptado de SOBOLEV; GUTIÉRREZ (2005) e VAN DAMME (2018)).....	26
Figura 6: Interação entre superplastificantes com cimento e sílica ativa, (Adaptado de SCHRÖFL; GRUBER; PLANK, 2012)	34
Figura 7: Resistência à compressão em função da relação água/aglomerantes para diferentes tipos de concreto, (Adaptado de FIB (2009) apud EIDE e HISDAL (2012)).....	35
Figura 8: Esquerda: Fibras de aço retas com $l_f = 6$ mm e $d_f = 0.16$ mm. Direita: Fibras de aço retas com $l_f = 13$ mm e $d_f = 0.2$ mm (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a)	37
Figura 9: Fibras de PVA (FENG et al., 2018).....	38
Figura 10: Comportamento típico à compressão para CUAD e CUADRF (Adaptado de MISHRA; SINGH, 2019).....	40
Figura 11: Curva típica tensão-deformação à tração de concreto convencional e de alto desempenho reforçados com fibras, (Adaptado de NAAMAN, 2003)	44
Figura 12: Curvas tensão-deformação de tração para CUADRF com fibras de aço e híbrido (a) Macrofibras de aço retas (b) Macrofibras de aço com ganchos nas extremidades (c) Macrofibras de aço torcidas (Adaptado de CHUN; YOO, 2019)	45
Figura 13: Desempenho à tração de macrofibras torcidas e microfibras retas de aço (Adaptado de PARK et al., 2012).....	46
Figura 14: Curva típica carga-deflexão para ensaio de resistência à flexão por 4 pontos (Adaptado de YU; SPIESZ; BROUWERS, 2016)	48
Figura 15: Curvas carga-deflexão para (a) CUADRF híbrido com fibras com ganchos e retas (b) CUADRF híbrido com fibras torcidas e retas de aço (Adaptado de YOO et al., 2017)	49
Figura 16: Efeito da hibridização de fibras de aço e de polipropileno na resistência à flexão de CUADRF (Adaptado de YU et al. (2014))	50
Figura 17: Principal conceito do CUADRF híbrido (MARKOVIC, 2006).....	51
Figura 18: Orientação das fibras menores entre as extremidades do molde combinadas com fibras maiores (1) e quando somente elas são utilizadas (2) (Adaptado de MARKOVIC, 2006).....	54
Figura 19: Curvas tensão-deformação de tração na flexão para CUADRF aos 28 dias (Adaptado de YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a)	54
Figura 20: Comparação da dosagem ótima entre concreto convencional e CUAD (Adaptado de MISHRA; SINGH, 2019).....	57
Figura 21: Efeito da quantidade e do tamanho de partículas na eficiência do empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição incompatível de tamanhos de partículas (ROY; SCHEETZ; SILSBEE, 1993)	58
Figura 22: Efeito parede e efeito de afastamento, (DE LARRARD; SEDRAN, 2002).....	59
Figura 23: Ilustração da porosidade interna de partículas: (a) ausência de poros, (b) fechada, (c) aberta (Adaptado de GERMAN (1989) apud RIVA (2010))	60
Figura 24: Fluxograma principal do programa experimental	69
Figura 25: Analisador de Tamanho de Partículas por Difração à Laser, Mastersizer-3000, Esquerda: Via Seca, e Direita: Via úmida.....	71
Figura 26: Curvas referentes % passante acumulada - diâmetro dos materiais	72
Figura 27: Curvas de frequência-diâmetro das partículas das amostras analisadas	73
Figura 28: Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de Energia Dispersiva de Raio-X	73
Figura 29: (a) Metalizador, Sputter Coater EMITECH, (b) Amostras revestidas com ouro para análise microscópica (1. Areia, 2. Cinza volante, 3. Metacaulim, 4. Pó de quartzo e 5. Sílica ativa).....	74

Figura 30: Imagens da MEV para areia fina (a) Zoom de 100 x e (b) Zoom de 300 x	75
Figura 31: Imagens da MEV para cimento (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 2000 x	75
Figura 32: Imagens da MEV para cinza volante (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 3000 x.....	75
Figura 33: Imagens da MEV para metacaulim (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 3000 x.....	76
Figura 34: Imagens da MEV para pó de quartzo (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 2000 x.....	76
Figura 35: Imagens da MEV para sílica ativa (a) Zoom de 10000 x e (b) Zoom de 30000 x	76
Figura 36: (a) Homogeneização da mistura de cinza volante com aglomerante, (b) Colocação da cinza volante na prensa para gerar a pastilha, (c) Pastilhas de sílica ativa, metacaulim e cinza volante	78
Figura 37: (a) Equipamento de Fluorescência de Raios-X, (b) Amostra de sílica ativa no recipiente para posterior análise	78
Figura 38: Curvas para modelo de A&Am e traços investigados e seus respectivos coeficientes de determinação para (a) Combinação 1 (b) Combinação 2 (c) Combinação 3	86
Figura 39: Frações volumétricas dos materiais utilizadas no empacotamento de partículas de cada mistura (a) Traços da Combinação 1, (b) Traços da Combinação 2, e (c) Traços da Combinação 3 .	87
Figura 40: Molde utilizado no ensaio de miniabatimento	92
Figura 41: Etapas de ensaio para determinar índice de vazios, massa específica e absorção de água por imersão (a) Colocação dos cps na estufa; (b) Imersão e fervura em água; Medição da massa dos cps (c) Após fervura em balança hidrostática, e (d) após imersão e fervura	94
Figura 42: Dimensões do corpo de prova e configuração do ensaio de flexão por 3 pontos.....	96
Figura 43: (a) Configuração dos furos na placa acrílica para fixar as fibras de aço para ensaio de pullout, (b) moldagem em uma extremidade, deixando o concreto fluir até a outra extremidade (c) corpo de prova moldado.....	98
Figura 44: Ilustração do aparato para realizar ensaio de pullout (Adaptado de KRAHL et al., 2020a)	99
Figura 45: Espalhamento obtido para os traços (a) PQ-6, (b) CV-5 e (c) MT-5, (d) REF, (e) FBA e (f) HIB.....	101
Figura 46: Espalhamento obtido para todos os traços investigados na pesquisa.....	102
Figura 47: Comparação entre espalhamento e relação a/aglom para os traços desenvolvidos para (a) Combinação 1, (b) Combinação 2 e (c) Combinação 3.....	103
Figura 48: Relação entre índice de vazio e espalhamento para os traços de CUAD/CUADRF com (a) pó de quartzo, (b) cinza volante e (c) metacaulim	108
Figura 49: Superfícies das amostras de CUAD com (a) pó de quartzo, (b) cinza volante e (c) metacaulim	111
Figura 50: Comparação da resistência à compressão em função da relação a/aglom para os traços da (a) Combinação 1; (b) Combinação 2; e (c) Combinação 3	113
Figura 51: Comparação da resistência à compressão em função do índice de vazios para (a) traços da Combinação 1, (b) traços da Combinação 2 e (c) traços da Combinação 3	114
Figura 52: Comparação da resistência à compressão em função do coeficiente de determinação (R^2) para os traços da (a) Combinação 1, (b) Combinação 2 e (c) Combinação 3	116
Figura 53: Ruptura dos corpos de prova durante ensaio de tração na flexão para (a) REF (b) FBA e (c) HIB.....	118
Figura 54: Curvas carga – CMOD para os traços REF aos 70 dias e FBA e HIB aos 30 dias	120
Figura 55: Micrografia do traço (a) REF, (b) FBA e (c) HIB	122
Figura 56: Micrografia da interação entre a fibra de aço e a matriz híbrida	122
Figura 57: Fibra de aço em processo de arrancamento durante o ensaio	124
Figura 58: Mecanismo de arrancamento da fibra em uma matriz de concreto	125
Figura 59: Curvas médias de carga-deslizamento para as Séries 1 e 2	127
Figura 60: Curvas de tensão de aderência média estática versus deslizamento normalizado das fibras de aço retas em CUADRF híbrido.....	127
Figura 61: Curva de P-s para concreto convencional e CUADRF	128
Figura 62: Comportamento à tração de concretos reforçados com fibras.....	130
Figura 63: Definição da rótula plástica	131
Figura 64: Distribuição de tensão e deformação na seção fissurada	132

Figura 65: Relação entre dw e dy	132
Figura 66: Força resultante em área dA da região de concreto fissurado.....	133
Figura 67: Força resultante em área dA da região de concreto não fissurado.....	134
Figura 68: Distribuição de tensões e deformação/abertura de fissura de dois incrementos subsequentes	138
Figura 69: Obtenção da integral de w_i a w_{i+1}	139
Figura 70: Lei de pós-fissuração σ_f-w_{max} para os traços de CUADRF com fibras de aço e híbrido aos 30 dias	141
Figura 71: Leis constitutivas de pós-fissuração simplificadas: (a) Método rígido-plástico, (b) Método linear (linhas contínuas e tracejadas referem-se ao comportamento de amolecimento e endurecimento pós-fissuração, respectivamente)	142
Figura 72: Diagrama carga-CMOD	142
Figura 73: Curva $\sigma-w$ para os traços FBA e HIB (a) Modelo linear (b) Modelo rígido plástico.....	144
Figura 74: Curvas $\sigma-w$ para os modelos de análise inversa estudados os traços (a) FBA e (b) HIB	145
Figura 75: Resistência residual e deformação à tração obtidas através do ensaio de pullout.....	147
Figura 76: Curvas obtidas para o ensaio de empacotamento dos agregados	171
Figura 77: Placa de vidro e molde para ensaio de fluidez pelo método de Kantro	173
Figura 78: Aparência do concreto (a) após adição dos materiais secos e água e (b) após colocação do superplastificante, (c) Espalhamento do CUAD-SC.....	174
Figura 79: Curvas para modelo modificado A&A e traços mais aproximados ao modelo para a Combinação 1	177
Figura 80: Curvas para modelo modificado A&A e traços mais aproximados ao modelo para a Combinação 2	178
Figura 81: Curvas para modelo modificado A&A e traços mais aproximados ao modelo para a Combinação 3	178
Figura 82: Traços com (a) pó de quartzo (b) cinza volante e (c) metacaulim	179
Figura 83: Fluidez obtida para os traços que foram avaliados quanto à resistência à compressão durante a primeira moldagem de CUAD: (a) A.2, (b) A.3.1, (c) A.5.1, (d) A.6, (e) B.1.3, (f) B.3.3, (g) B.5.3, (h) C.1.1, (i) C.5.1 e (j) C.7.1	181
Figura 84: Análise da variação da temperatura do concreto ao longo de um período de 1 hora.....	186
Figura 85: Fluxograma para produzir um traço de CUAD/CUADRF	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos de consumo dos materiais utilizados para produzir CUADRF, (GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015).....	27
Tabela 2: Principais cimentos utilizados na composição de CUAD	29
Tabela 3: Propriedades das fibras mais utilizadas na composição de CUADRF	36
Tabela 4: Principais propriedades do concreto convencional e do CUAD (MISHRA; SINGH, 2019)..	39
Tabela 5: Pesquisas que se basearam no modelo modificado de A&A.....	68
Tabela 6: Componentes químicos do cimento, sílica ativa, cinza volante e metacaulim.....	79
Tabela 7: Combinações de materiais para o desenvolvimento do CUAD	82
Tabela 8: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 1	84
Tabela 9: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 2	85
Tabela 10: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 3	85
Tabela 11: Traços unitários para as misturadas desenvolvidas	89
Tabela 12: Resultados de miniabatimento para CUAD/CUADRF.....	91
Tabela 13: Resultados para os ensaios conforme ABNT NBR 9778:2005.....	106
Tabela 14: Resultados da resistência à compressão aos 7, 28 e 161 dias para os traços de CUAD	109
Tabela 15: Resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 140 dias para os traços finais (REF, FBA e HIB).....	110
Tabela 16: Comparação entre o trabalho de KRAHL e a presente pesquisa	117
Tabela 17: Cargas e resistências à tração na flexão na primeira fissura e na ruptura para REF, FBA e HIB.....	118
Tabela 18: Valores médios dos parâmetros residuais de resistência à tração na flexão	120
Tabela 19: Resultados do ensaio de arrancamento das fibras retas de aço	123
Tabela 20: Resistência residual e deformação à tração obtidas pelo ensaio de pullout	147
Tabela 21: Estimativa de custo dos traços REF, FBA e HIB	148
Tabela 22: Granulometria dos agregados utilizados no ensaio de empacotamento	170
Tabela 23: Resultados obtidos no ensaio de empacotamento de agregados	171
Tabela 24: Resultados obtidas no ensaio de resistência à compressão para CUAD de São Carlos	174
Tabela 25: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 1	176
Tabela 26: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 2	176
Tabela 27: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 3	177
Tabela 28: Resultados do ensaio de auto-adensabilidade para Combinação 1	180
Tabela 29: Resultados do ensaio de auto-adensabilidade para Combinação 2	180
Tabela 30: Resultados do ensaio de auto-adensabilidade para Combinação 3.....	180

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. OBJETIVO GERAL	18
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3. METODOLOGIA	19
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2. CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO	22
2.1. HISTÓRICO E DEFINIÇÕES	22
2.2. MATERIAIS	26
2.2.1. CIMENTO	28
2.2.2. SÍLICA ATIVA	29
2.2.3. CINZA VOLANTE	30
2.2.4. METAUCALIM	31
2.2.5. AGREGADOS	32
2.2.6. FÍLERS	33
2.2.7. ADITIVOS	33
2.2.8. ÁGUA	34
2.2.9. FIBRAS	35
2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS	39
2.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	40
2.3.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE	42
2.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	42
2.3.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	47
2.4. CUADRF HÍBRIDO	50
3. EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	57
3.1. MODELOS DE EMPACOTAMENTO	61
3.2. MODELOS DISCRETOS	61
3.2.1. MODELO DE FURNAS	62
3.2.2. MODELO DE DE LARRARD E SEDRAN	63
3.3. MODELOS CONTÍNUOS	63
3.3.1. MODELO DE FULLER E THOMPSON	63
3.3.2. MODELO DE ANDREASSEN & ANDERSEN	64
3.3.3. MODELO DE ANDREASSEN & ANDERSEN MODIFICADO	65
3.4. DOSAGEM DE CONCRETO UTILIZANDO O MODELO A&Am	66
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	70
4.1.1. DENSIDADE DOS MATERIAIS	70
4.1.2. GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS	71
4.1.2.1. VIA SECA	71
4.1.2.2. VIA ÚMIDA	72

4.1.3.	MICROSCOPIA DOS MATERIAIS	73
4.1.4.	COMPONENTES QUÍMICOS	77
4.1.4.1.	ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)	77
4.1.4.2.	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	77
4.2.	DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DO CUAD	80
4.2.1.	TRAÇOS INVESTIGADOS DO CUAD	80
4.2.2.	PROCEDIMENTO DE MISTURA	90
4.3.	PROPRIEDADES	91
4.3.1.	MINIABATIMENTO	91
4.3.2.	ÍNDICES DE VAZIOS, MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA	92
4.3.3.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	94
4.3.4.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	95
4.3.5.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	95
4.3.6.	MICROSCOPIA DOS PRISMAS	97
4.3.7.	PULLOUT	97
5.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	101
5.1.	FLUIDEZ	101
5.2.	ÍNDICE DE VAZIOS	105
5.3.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	109
5.4.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	117
5.5.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	117
5.6.	MICROSCOPIA DOS PRISMAS	120
5.7.	PULLOUT	123
6.	ESTUDO ANALÍTICO	129
6.1.	ANÁLISE INVERSA DE TRAÇÃO	129
6.1.1.	NF P 18-470	130
6.1.2.	FIB MODEL CODE	141
6.1.3.	ATRAVÉS DO PULLOUT	145
6.2.	ANÁLISE DE CUSTO	147
7.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	149
7.1.	CONCLUSÕES	149
7.2.	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	152
8.	REFERÊNCIAS	154
	ANEXO I – EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS PARA AGREGADOS	170
	ANEXO II – TRAÇO CUAD-SC	172
	ANEXO III – PRÉ DOSAGEM DOS TRAÇOS DE CUAD	176
	ANEXO IV – ROTINA DE CÁLCULO PARA O TRAÇO DE CUADRF HÍBRIDO (HIB).....	182
	ANEXO V – TEMPERATURA DO CONCRETO	186
	ANEXO VI – FLUXOGRAMA PARA PRODUZIR UM TRAÇO DE CUAD/CUADRF	188

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto, por ser um material fácil de ser moldado, permitir uma ampla variedade de formatos e de aplicações, desde em pavimentação até em estruturas, apresentando alta resistência mecânica e alta durabilidade. Porém, este material apresenta algumas limitações, como a rápida propagação de fissuras quando submetido aos esforços de tração e a baixa capacidade de deformação. Além disso, a indústria de materiais de construção é a terceira maior emissora de gás carbônico (CO_2), devido, principalmente, aos materiais cimentícios. Somente a produção do cimento é responsável por 7% do CO_2 emitido no planeta (YU et al., 2017). Por isso, visando a demanda do mercado e por técnicas construtivas mais sustentáveis, foram desenvolvidos concretos especiais.

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) e o concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF) foram desenvolvidos nos anos 2000, favorecidos pela criação de aditivos superplastificantes nos anos 1980 e a partir do Concreto de Pós Reativos desenvolvido por Richard e Cheyrezy (1995). Sua utilização efetiva na construção civil é recente, desde anos 2000, quando foi possível desenvolver esse concreto em larga escala. Para obter alta resistência e durabilidade, a dosagem do CUAD deve ser preparada para obter uma microestrutura homogênea com baixa porosidade utilizando empacotamento de partículas e redução dos diâmetros dos materiais (RICHARD; CHEYREZY, 1995). O CUAD apresenta durabilidade muito superior ao concreto convencional (BEHLOUL et al., 2008), devido sua matriz ser altamente densa, sendo sua matriz praticamente impermeável a dióxido de carbono, cloretos, sulfatos (DU et al., 2021).

O CUADRF possui resistência à compressão superior a 120 MPa, maior ductilidade, tenacidade e durabilidade, devido a presença de fibras. A sua aplicação permite aos engenheiros projetar elementos estruturais com seções esbeltas com peso próprio reduzido ideal para estruturas sujeitas a zonas sísmicas (AFGC, 2013), (CHAO et al., 2016), pois o modo de fissuração à flexão no CUADRF muda completamente, melhorando o confinamento e evitando o desgaste precoce do concreto e flambagem da armadura, resultando numa maior resistência às forças sísmicas (CHAO et al., 2016); que podem suportar altos carregamentos mecânicos e ambientes agressivos e que apresentem maior durabilidade em comparação com concreto

convencional, devido sua baixa porosidade (YANG et al., 2019), (AFGC, 2013). Pode ser aplicado em pontes e viadutos (AFGC, 2013), (MARTÍNEZ, 2017), (ZHOU et al., 2018), em elementos de edificações (AUBRY et al., 2013), (CHEN et al., 2016), (CHEN et al., 2017), estruturas pré-fabricadas e suas conexões (GRAYBEAL, 2010), e arranha-céus (WEI et al., 2021). E se mostra promissor para ser utilizado em túneis, torres de turbinas eólicas e usinas de energia nuclear (DU et al., 2021). Um exemplo da aplicação de CUAD comercial reforçado com fibras de aço, DUCTAL®, foi na construção do tabuleiro de uma ponte de pedestres na França, com 68 m de vão, finalizada em 2009 (Figura 1) (BEHLOUL et al., 2008). O DUCTAL pode ser produzido utilizando apenas fibras de aço, ou fibras orgânicas (fibras de álcool polivinílico, mais conhecida como PVA, poly-vinyl alcohol) ou com a combinação de ambas as fibras (BEHLOUL et al., 2008).



Figura 1: Pont Du Diable construída com CUADRF na França, (AFGC, 2013)

O CUADRF pode ser composto com duas ou mais fibras de diferentes tipos, formatos, dimensões, respostas ou funcionalidade (sendo denominado híbrido) e tende a apresentar melhores resultados em relação ao CUADRF composto por um único tipo de fibra, devido a sinergia. O CUADRF híbrido tende a gerar um aumento da ductilidade e na absorção de energia de tração do concreto (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YOO; KIM, 2019a). Essa melhora é devido ao mecanismo de reforço e da melhora da aderência mecânica através da deformação das fibras (MENG; KHAYAT, 2018a).

Além da redução do peso da estrutura, o CUAD apresenta maior durabilidade e menor necessidade de manutenção; redução no tempo de construção, por alcançar resistência já nas primeiras idades, reduzindo tempo de cura do concreto na forma; redução de custo, e aspecto positivo ao meio ambiente por utilizar materiais cimentícios provenientes de resíduos industriais, como sílica ativa (YU et al., 2017), cinza volante (LIU et al., 2012), (RANDL et al., 2014), cinza de casca de arroz (VAN TUAN et al., 2011), escória de alto forno (ABDULKAREEM et al., 2018), (PYO; KIM; KIM, 2016), e metacaulim (MO; GAO; SU, 2021). Os

materiais cimentícios suplementares apresentam, quimicamente, alta quantidade de dióxido de silício (sílica, SiO_2) e / ou óxido de cálcio (CaO) reativo, o que pode promover a hidratação do cimento por meio de reações pozolânicas e / ou hidráulicas, principalmente quando a relação água/aglomerante é extremamente baixa, como é o caso do CUAD (DU et al., 2021). A utilização dos materiais cimentícios suplementares pode otimizar a estrutura de poros de CUAD e tornar a zona de transição mais densa por meio de seu preenchimento físico e pela reação pozolânica (ZHOU et al., 2021).

Por existir poucos estudos sobre CUAD e não ter aplicação em larga escala no Brasil, e principalmente, por existir poucos estudos sobre CUADRF híbrido, é de grande importância desenvolver o CUADRF híbrido (com fibras de aço e fibras de álcool polivinílico) utilizando materiais disponíveis no mercado brasileiro. Espera-se que a pesquisa possa auxiliar na aplicação desse concreto na infraestrutura e no desenvolvimento de normas e recomendações sobre esse tipo de concreto no Brasil.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver diferentes traços de concreto de ultra-alto desempenho, sendo um sem fibras (CUAD) e dois com fibras (CUADRF), sendo um com a adição de apenas fibra de aço retas de 13 mm de comprimento e 0.20 mm de diâmetro, e outro com a combinação das fibras de aço com fibras de álcool polivinílico de 6 mm de comprimento e 0.20 mm de diâmetro (traço híbrido).

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo principal do projeto de pesquisa, foram necessárias algumas etapas específicas, como:

- Através do empacotamento de partículas, produzir diferentes traços de concreto de ultra-alto desempenho variando a combinação de materiais;
- Produzir concreto de ultra-alto desempenho com adição de fibras de aço, verificando a influência delas nas propriedades de auto-adensabilidade e mecânicas do concreto;

- Identificar a influência da combinação das fibras de aço e de álcool polivínico no CUADRF nos estados fresco e endurecido, através das propriedades de fluidez, porosidade, e mecânicas de compressão e tração do concreto e tenacidade;
- Comparação dos resultados entre o concreto sem fibras, concreto com fibras de aço e concreto híbrido;
- Realizar ensaios de microscopia após a ruptura dos corpos-de-prova para avaliar os mecanismos de degradação mecânica.
- A partir do ensaio de resistência à tração na flexão, realizar a análise inversa para obter a curva de tensão de tração por abertura de fissura (σ -w) para o traço de CUADRF (com apenas fibras de aço e híbrido) seguindo as normas (NF P 18-470, 2016) e (FIB MC2010, 2013).
- Após obtenção das curvas de tensão de tração por abertura de fissura (σ -w) para os traços de CUADRF, fazer uma comparação entre os modelos de análise inversa.
- Através do ensaio de pullout, realizar uma análise numérica para obter a curva de tensão de tração residual pela deformação.
- Estimar o custo para produzir 1 m³ de concreto para os traços de CUAD e CUADRF com apenas fibras de aço e híbrido.

1.3.METODOLOGIA

De forma sucinta, a metodologia utilizada neste trabalho pode ser descrita da seguinte forma:

- Realização de uma ampla revisão bibliográfica de trabalhos realizados sobre concreto de ultra-alto desempenho e empacotamento de partículas
- Desenvolvimento de uma análise experimental. Nessa etapa, foram elaboradas, inicialmente, apenas composições de concreto de ultra-alto desempenho. E a partir da composição de melhor desempenho, produziu composições com fibras, sendo uma com

2% de fibras de aço e outra combinando 1,5% de fibras de aço e 0,50% de fibras de álcool polivinílico. Com o objetivo de investigar o comportamento mecânico desses traços.

- Realização de um estudo analítico, para obter a curva de resistência à tração por abertura de fissura, através de uma análise inversa seguindo os modelos das normas NF P 18-470 (2016) e FIB MC2010 (2013).
- Realização de um estudo analítico, para obter a curva de resistência à tração residual pela deformação, através dos resultados do ensaio de pullout das fibras de aço seguindo LIM; PARAMASIVAM; LEE (1987) e LOK; PEI (1998).
- Elaboração de uma estimativa do custo para produzir 1 m³ de concreto para os traços finais de CUAD/CUADRF.
- Conclusões sobre a produção do concreto de ultra-alto desempenho, bem como as vantagens da utilização de modelos de empacotamento de partículas para dosar concreto e da utilização de materiais cimentícios, além disso, recomendação sobre a produção e aplicação desse concreto no Brasil.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está apresentada da seguinte forma:

No capítulo 1, fez-se uma breve introdução do trabalho, mencionando a importância do estudo, além disso, estão descritos os objetivos gerais e específicos, a metodologia e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão dos principais trabalhos utilizados como base para o desenvolvimento da pesquisa. Essa revisão foi feita sobre o concreto de ultra-alto desempenho (sem e com fibras, e híbrido), descrevendo-se o histórico, principais normas e recomendações, materiais que são empregados em sua composição e suas propriedades mecânicas.

No capítulo 3, apresenta-se uma revisão sobre empacotamento de partículas, detalhando os principais modelos de empacotamento e qual foi utilizado para a pesquisa para realização da dosagem do concreto de ultra-alto desempenho.

No capítulo 4 é abordado o programa experimental desenvolvido na presente pesquisa.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados experimentais da caracterização dos materiais, do desenvolvimento do CUAD/CUADRF e do pullout de fibras de aço embutidas no CUADRF híbrido.

No capítulo 6, estão apresentadas as análises inversas realizadas para obter as curvas de tensão de tração por abertura de fissura obtidas a partir dos resultados dos ensaios de tração na flexão seguindo NF P 18-470 (2016) e FIB MC2010 (2013), e a curva de resistência de tração residual por deformação obtida a partir dos resultados do ensaio de pullout seguindo LIM; PARAMASIVAM; LEE (1987) e LOK; PEI (1998). Além disso, é apresentada uma estimativa para a produção dos traços finais de CUAD/CUADRF produzidos na presente pesquisa.

Finalmente, no capítulo 7, apresentaram-se as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

2.1. HISTÓRICO E DEFINIÇÕES

Nos anos 1930, iniciou-se diversos estudos para aprimorar a resistência à compressão do concreto. Na década de 1960, era possível produzir concreto com resistência à compressão entre 15 e 20 MPa. Após dez anos, com a utilização de redutores de água, foi possível triplicar a resistência do concreto, porém, os redutores ainda não eram eficazes para reduzir a relação água/aglomerante (AZMEE; SHAFIQ, 2018). E a partir dos anos 1980, com o uso de altas taxas de redutores de água, denominados superplastificantes (SP), foi possível reduzir a relação água/aglomerante para 0.30 para a produção de concreto com maior resistência, valor que para a época não era muito aceito. Por isso, o desenvolvimento do concreto de ultra-alto desempenho pode ser dividido em quatro fases:

- Antes de 1980: a produção de CUAD era restrita em laboratórios e necessitava de métodos específicos, como mistura à vácuo e cura térmica, devido a falta de tecnologia. Roy, Gouda e Bobrowsky (1972) desenvolveram um concreto com resistência à compressão de até 510 MPa, porém, a produção consumia muita energia e não era fácil de ser realizada.
- Nos anos 1980: Birchall, Howard e Kendall (1981) desenvolveram o cimento livre de macro defeitos, que consistia na utilização de polímeros para preencher os vazios e remover os defeitos da pasta de cimento, e atingiram resistência à compressão de 200 MPa e resistência à tração na flexão entre 60 e 70 MPa (YOO; BANTHIA, 2016). Porém, utilizaram matérias-primas caras e métodos específicos, como laminação do material, passando-o por rolos; e possuía grande fluência (AZMEE; SHAFIQ, 2018). Apesar da redução da porosidade aumentar a resistência à compressão, reduzia-se a ductilidade, e a adição de fibras reduzia a fluidez (GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015).

Bache (1981) desenvolveu o cimento denso com partículas ultrafinas com resistência à compressão entre 120 e 270 MPa. Este concreto consistia no empacotamento dos vazios entre o cimento e as partículas ultrafinas, na baixa relação água/cimento (a/c), da ordem de 0.16, e no alto teor de superplastificante. Porém, para reduzir a fragilidade do material, foram

utilizadas fibras de aço, o que resultou em um material com microestrutura densa, com alta resistência, maior durabilidade e alta ductilidade. Porém, ainda apresenta problemas de fluidez (AZMEE; SHAFIQ, 2018).

- Nos anos 1990: Richard e Cheyrezy (1995) desenvolveram o concreto de pós reativos (CPR) precursor do CUADRF. Os principais conceitos desse concreto são: aumento da homogeneidade devido a ausência de agregados graúdo; utilização de técnicas de empacotamento de partículas; aumento da microestrutura através da cura térmica; aumento da ductilidade através da incorporação de fibras de aço; e no procedimento de mistura e moldagem mais próximos de modelos existentes. Além disso, o concreto continha um alto teor de aglomerantes (cimento e sílica ativa), relação a/c entre 0.15 e 0.19 e superplastificante. Os autores produziram dois traços, RPC200 e RPC800, os quais atingiram resistência à compressão de até 230 MPa e 810 MPa, respectivamente.
- Após anos 2000: além da alta resistência à compressão, o CPR deveria apresentar outras excelentes propriedades, por isso, alterou-se o nome para CUAD e CUADRF (AZMEE; SHAFIQ, 2018). Como, normalmente, é necessário utilizar um alto teor de cimento, o que aumenta o valor do concreto e causa grande impacto ambiental, pesquisadores estão desenvolvendo dosagens de CUAD mais sustentáveis utilizando adições minerais, como cinza volante, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno e metacaulim (AZMEE; SHAFIQ, 2018), (GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015), (DU et al., 2021).

Pode-se dizer que o desenvolvimento do CUAD ocorreu devido a criação de superplastificantes, do uso de sílica ativa e de técnicas de empacotamento de partículas, que permitiram reduzir a porosidade do concreto e relação água/aglomerante, resultando, consequentemente, em um concreto com boa fluidez, alta resistência à compressão e impermeabilidade (DU et al., 2021). Apesar do custo de produção do CUAD ser, normalmente, 20 vezes o valor do concreto convencional (WILLE; BOISVERT-COTULIO, 2015) devido ao alto teor de cimento, o custo da sua aplicação tende a ser inferior em comparação com estruturas em concreto convencional que requerem uma seção transversal maior (CHEN; YU; TANG, 2020). O CUAD pode ser considerado um material mais sustentável devido à sua maior durabilidade, fatores ecológicos, benefícios econômicos e recursos de reciclagem para uma variedade de aplicações (CHEN; YU; TANG, 2020).

A primeira recomendação criada para o CUAD foi feita pela Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC). Desde então, diversos países têm desenvolvido suas normas e recomendações. A Figura 2 apresenta a cronologia de normas e recomendações para produção e projetos de CUAD e CUADRF por diversos países. Mesmo com as recomendações existentes, não há uma padronização, apesar de já terem diversas pesquisas e aplicações do CUAD e CUADRF no mundo (ZHANG; ZHAO, 2017), (ZHOU et al., 2021). Além disso, no Brasil não há muito estudo, aplicação e norma, por isso, a importância dessa pesquisa.

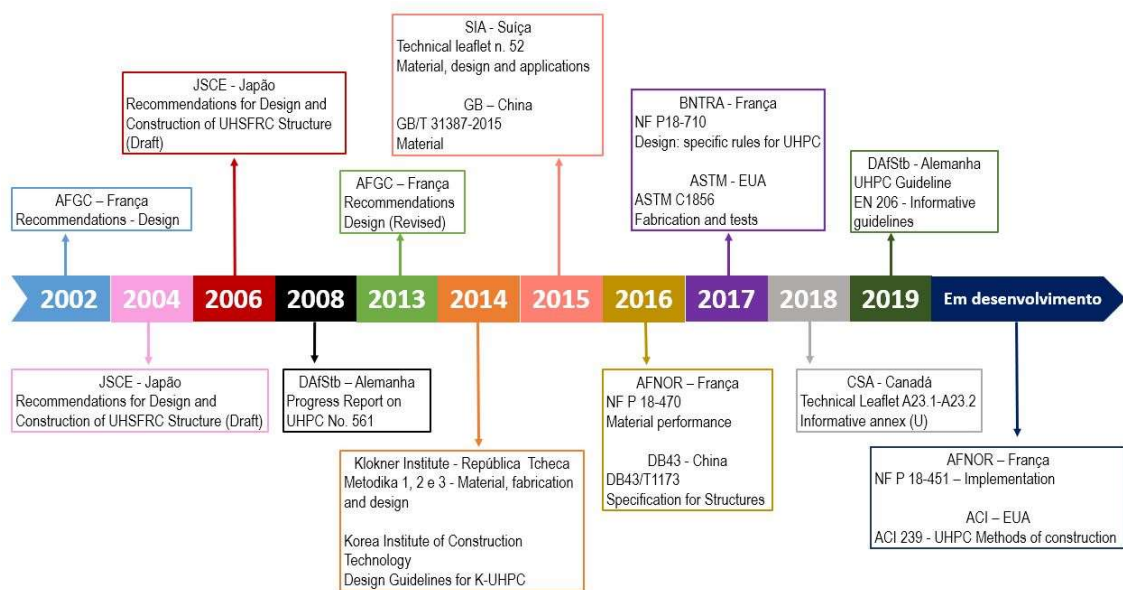


Figura 2: Cronologia da normatização de CUAD/CUADRF no mundo

A primeira grande estrutura em CUADRF construída foi a ponte de pedestres e ciclistas sobre o Rio Magog na cidade de Sherbrooke no Canadá em 1997 (Figura 3). Os banzos superiores e inferiores foram feitos com peças de CUAD pré fabricadas e protendidas com resistência à compressão de 200 MPa (BLAIS; COUTURE, 1999).



Figura 3: Ponte para pedestres e ciclistas construída com CUADRF em Sherbrooke, (AFGC, 2013)

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é uma nova geração de material cimentício que possui alta resistência à compressão, normalmente, superior a 120 MPa e durabilidade (ASTM C1856, 2017), e quando é incorporado com fibras de aço, possui alta ductilidade e tenacidade, devendo obter resistência à compressão superior a 150 MPa de acordo com as normas japonesa JSCE (2006) e francesa AFGC (2013) ou superior a 180 MPa segundo a norma coreana KICT (2014).

Pode-se dizer que CUADRF combina três tecnologias: concreto de ultra-alto desempenho que é um concreto que possui microestrutura densa e com alta resistência à compressão; concreto autoadensável que é um concreto que flui devido ao seu próprio peso sem ter a necessidade de ser vibrado; e concreto reforçado com fibras, em que as fibras são responsáveis por transferir tensões quando o material é submetido ao esforço de tração e resultam no aumento da ductilidade.

A utilização das fibras ao concreto é um mecanismo interessante, pois elas agem como uma ponte de transferência de tensões, aumentando a energia associada à ruptura do material e restringindo a propagação e abertura de fissuras. No concreto sem fibras, a fissura representa uma barreira à propagação de tensões de tração, estão representadas pelas linhas de tensão nas extremidades da fissura na Figura 4, e se caso essa tensão supere a resistência à tração da matriz, ocorrerá a ruptura abrupta do material (comportamento frágil). A incorporação de fibras, com resistência à tração e módulo de elasticidade adequados, fará o material deixar de ter comportamento frágil (MEDEIROS, 2012).

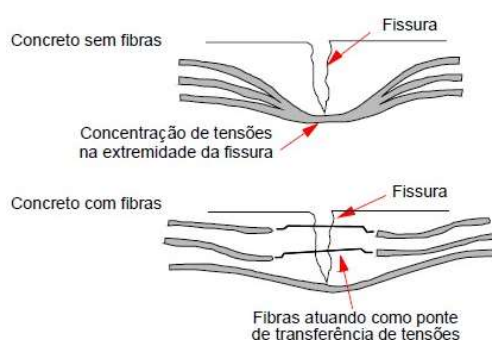


Figura 4: Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras, (MEDEIROS, 2012)

Dependendo das características das fibras, elas podem atuar nas microfissuras, causando um atraso no processo de coalescência e podem gerar um aumento da resistência à tração do compósito, ou sobre as fissuras maiores, no trecho pós-pico de resistência, ocasionando um aumento significativo da energia de fratura associada à ruptura do material e incrementando a ductilidade e tenacidade (MILLER, 2008).

A combinação de fibras (hibridização) de diferentes tipos (POORHOSEIN; NEMATZADEH, 2018) ou tamanhos (PARK et al., 2012) ou funcionalidades (MENG; KHAYAT, 2018a) tem sido estudado para melhorar o comportamento à tração, tenacidade e ductilidade do CUADRF em relação ao CUADRF produzido com um único tipo de fibra (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (MENG; KHAYAT, 2018a), (FENG et al., 2018), (YOO; KIM, 2019a).

2.2. MATERIAIS

A seleção dos materiais para a produção do concreto de ultra-alto desempenho é um dos fatores mais importantes para o comportamento do concreto. Para que sejam obtidas alta resistência e durabilidade, a dosagem do CUAD deve apresentar três objetivos: obtenção de uma microestrutura homogênea com baixa porosidade; redução do tamanho dos diâmetros dos materiais; e obtenção de um empacotamento de partículas denso (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

O CUAD pode ser composto por cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia, superplastificantes, água, podendo ter outras adições minerais, como metacaulim e cinza volante. No caso do CUADRF, há a adição de fibras. A Figura 5 compara os diâmetros e as áreas superficiais das partículas de diferentes materiais utilizados para produzir diferentes tipos de concreto. A Tabela 1 apresenta os intervalos típicos do peso e volume dos materiais utilizados para a produção de CUADRF. É possível observar: a alta quantidade de areia, baixo teor de água; uso de sílica para substituir parte do cimento e pó de quartzo para preencher os vazios do cimento.

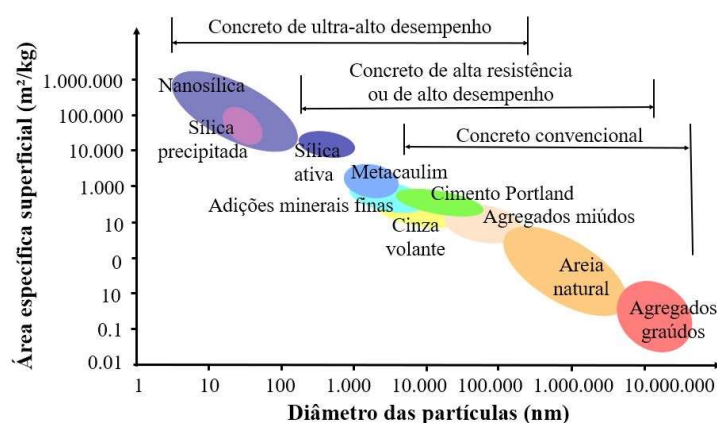


Figura 5: Diâmetro e área superficial específica de materiais utilizados para produzir diferentes concretos, (Adaptado de SOBOLEV; GUTIÉRREZ (2005) e VAN DAMME (2018))

Tabela 1: Valores típicos de consumo dos materiais utilizados para produzir CUADRF, (GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015)

Materiais	Peso (kg/m³)	Volume (%)
Cimento	693-1114	22-35
Sílica ativa	116-273	5-13
Pó de quartzo	0-208	0-9
Areia	733-1340	28-51
Fibras	79-234	1-3
Superplastificantes	14-40	1.4-4
Água	140-240	14-24

Para produzir o CUAD, a relação a/c é normalmente baixa quando comparada aos outros concretos. O intervalo típico da relação a/c para o CUAD está entre 0.14 e 0.20 (SHI et al., 2015). Valores excepcionais desta relação já foram utilizados, como 0.124 (CHEN et al. 2019) e superior a 0.40 (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b), obtendo resistência à compressão de até 215 e 135 MPa, respectivamente. Além disso, normalmente, por ser necessário um alto teor de cimento, a utilização de adições minerais tem sido estudada para tentar reduzir o custo e, principalmente, o impacto ambiental. Diferentes materiais cimentícios estão sendo analisados para complementar ou substituir o cimento, como escória de alto forno, sílica ativa, cinza volante, pozolanas naturais (JUENGER; SIDDIQUE, 2015), cinza de casca de arroz (VAN et al., 2014) e fillers (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b).

Através de uma combinação adequada de adições minerais pode-se aumentar o empacotamento de partículas, a fluidez, e reduzir a retração e o calor de hidratação da mistura (JUNGWIRTH et al., 2016). Isso ocorre, pois com a redução da quantidade de cimento, reduz-se, conseqüentemente, o composto C_3S na mistura que é responsável pela rápida reatividade do cimento em água (MISHRA; SINGH, 2019). Além disso, materiais com partículas esféricas, como cinza volante e sílica ativa, podem propiciar uma menor demanda de água, pois possuem menor área específica e a esfericidade ajuda na interação entre partículas, uma vez que diminui o atrito e favorece o movimento pela forma, que resulta em uma maior fluidez para um mesmo consumo de água (LOPES, 2019), (ZHOU et al., 2021).

As adições minerais, como cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, exibem três efeitos (químico, físico e sinérgico) ao mesmo tempo, quando incorporadas em misturas binárias, ternárias e quaternárias na composição de concretos. O efeito físico ou filler acontece devido ao refinamento dos poros e do aumento da nucleação de produtos hidratados e do aumento da eficácia da relação água/cimento,

resultando no aumento do empacotamento de partículas (DESCHNER et al., 2012), (ISAIA; GASTALDINI; MORAES, 2003) e densificam o concreto (NGUYEN; THAI; NGO, 2021). O efeito químico ocorre devido a reação pozolânica onde há o consumo da portlandita, também conhecida como cal hidratada (hidróxido de cálcio na forma cristalina, Ca(OH)_2) e a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (DESCHNER et al., 2012), sendo que a composição mineralógica de cada material é o principal fator para este efeito. A reatividade e a morfologia das partículas dos materiais cimentícios suplementares são os principais fatores que afetam a dosagem do CUAD (ZHOU et al., 2021).

A combinação de diferentes tipos de adições minerais produz o efeito sinérgico, isto é, apresenta maior resistência em comparação com um concreto sem adições minerais (ISAIA; GASTALDINI; MORAES, 2003), (CHU; KWAN, 2019). Diversos autores verificaram o efeito sinérgico entre misturas binárias, ternárias e quaternárias com adições minerais na produção do CUAD (ARORA et al., 2018), (HUANG et al., 2017a), (ZHANG; ZHAO, 2017).

2.2.1. CIMENTO

O cimento é um aglomerante hidráulico produzido a partir da moagem de clínquer Portland. É um dos materiais mais importantes para o desenvolvimento do CUAD, pois influencia na resistência, no calor de hidratação e na retração. Porém, para reduzir a quantidade de água, a formação de etringita (mineral gerado na hidratação do cimento, porém, quando de forma tardia, pode gerar fissuras no concreto) e o calor de hidratação. O cimento deve ter um teor de aluminato tricálcico (C_3A) inferior a 8% e um baixo teor alcalino (SAKAI et al., 2008), além disso, para o CUAD deve ter uma finura moderada (WILLE; NAAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011). A importância de se escolher um cimento com baixo teor de C_3A é devido a sua rápida reação em contato com água, podendo causar um tempo de início de pega indesejável (SANTOS, 2004), além disso, com a hidratação, a área superficial das partículas aumenta, ocasionando o aumento da demanda de água para envolver suas partículas durante a mistura, no aumento da viscosidade e na redução da relação a/c (WILLE; NAAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011), (WILLE; BOISVERT-COTULIO, 2015). Wille; Naaman; Parra-Montesinos (2011) estudaram a influência de quatro diferentes tipos de cimento com relação a resistência à compressão e fluidez no CUAD, e para os autores, o cimento de melhor desempenho tinha uma finura moderada, um baixo teor de C_3A igual a 5% e alto teor de silicato tricálcico (C_3S).

A Tabela 2 apresenta algumas referências dos principais cimentos utilizados na composição de CUAD, bem como os teores de seus principais componentes, que são determinantes da reologia de um cimento (SANTOS, 2004). Para a produção do CUAD, normalmente, utilizam-se cimentos com alta resistência inicial. O cimento CPV ARI deve obter resistência à compressão de 34 MPa aos 7 dias (ABNT NBR 16697, 2018), além disso, possui granulometria menor em relação aos outros tipos de cimento, contribuindo com a redução da porosidade do concreto. A alta resistência inicial desse cimento é obtida devido ao modo de sua produção, pois o clínquer passa por uma otimização da sua composição e a finura da moagem do cimento é aumentada, permitindo que ao reagir com água obtenha elevadas resistências mais rapidamente, além disso, possui um teor de C_3A em torno de 7% (SANTOS, 2004).

Tabela 2: Principais cimentos utilizados na composição de CUAD

Cimento	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	Referência
	(%)				
CPV ARI	52.24	15.07	1.89	8.52	Livi; Repette (2019)
CEM I 52.5	67.8	16.6	4	7.2	Abdulkareem et al., (2018)
CEM I 42.5 R	-	-	0	-	Randl et al. (2014)
ASTM Type I	74	-	< 5	-	Wille; Kim; Naaman, (2011)
ASTM Type II/V	59	17	4	15	Wille; Boisvert-Cotulio (2015)
ASTM Type III	65.23	7.33	8.85	8.4	Meng; Valipour; Khayat (2017)
Otimizado	71.2	10.4	6.4	6.7	Shin et al. (2019)

2.2.2. SÍLICA ATIVA

As partículas de sílica ativa são captadas por filtro manga, onde passam os gases gerados da queima do ferrosilício (é uma pozolana subproduto da fabricação de ferro). É composta basicamente por óxido de silício (SiO_2) e possui alta reatividade (ABNT NBR 13956-1, 2012). Suas partículas, normalmente, são esféricas e possuem granulometria fina, com diâmetros entre 0.2 e 0.5 μm no estado amorfo (SHIN et al., 2019), (SHI et al., 2015). Por apresentar alta área específica superficial (Figura 5) pode aumentar a demanda de água (JUENGER; SIDDIQUE, 2015). A sílica ativa possui quatro funções na mistura de CUAD (SHIN et al., 2019).

- Efeito de microfiller: no estado fresco, suas partículas preenchem os vazios entre a água e o cimento; e no estado endurecido, preenchem os vazios gerados durante a hidratação, aumentando a resistência e durabilidade do concreto.
- Reatividade pozolânica: reação entre os componentes da sílica e hidróxido de cálcio produzindo C-S-H.
- Matriz densificada: com sua adição reduz-se os poros finos. O C-S-H produzido possui uma baixa taxa de CaO/SiO_2 (óxido de cálcio / dióxido de silício) de 1.2 a 1.4, o que contribui para o desenvolvimento da resistência, resultando numa microestrutura densa.
- Redução da viscosidade: a sílica ativa não possui C_3A em sua composição.

Na composição do CARDIFRC®, Benson e Karihaloo (2005) substituíram 20% do cimento por sílica ativa e obtiveram resistência à compressão acima de 185 MPa. Para Wille, Naaman e Parra-Montesinos (2011) a dosagem ótima de sílica ativa foi de 25% com relação ao peso do cimento para produzir CUAD, atingindo resistência à compressão superior a 171 MPa. Além disso, os autores verificaram que a utilização de sílica ativa com partículas medianas, de, aproximadamente, 1.2 μm , resultou na diminuição da área superficial e na redução da demanda de água. Para Wu, Khayat e Shi (2019) a dosagem ótima para sílica ativa foi entre 10 e 15% com relação ao peso do cimento na composição do CUAD, pois apresentou melhor aderência entre fibra-matriz e nas propriedades mecânicas do CUAD. Ragalwar et al. (2016) e Ragalwar et al. (2020) utilizaram o empacotamento de partículas para desenvolver CUAD baseando-se no modelo de Andreasen e Andersen modificado, restringindo o teor de sílica ativa entre 0.20 a 0.35 e 0.15 e 0.35, respectivamente, com relação ao peso do cimento e obtiveram resistência à compressão acima de 130 MPa.

2.2.3. CINZA VOLANTE

A cinza volante é subproduto da queima do carvão mineral utilizado para girar as caldeiras em uma termoeletrica. Os gases da queima do carvão passam por um filtro manga onde são captadas suas partículas. Possuem atividade pozolânica (ABNT NBR 12653, 2014). Uma grande quantidade de cinza volante é gerada, sendo que 80% é descartada em aterro (AMRAN et al., 2021), por isso, a importância em ser

reaproveitada. Como as suas partículas são esféricas, auxilia o movimento das partículas dos componentes durante a mistura, reduzindo a resistência ao atrito e aumentando a fluidez (SUN; YAN; ZHAN, 2003), (AMRAN et al., 2021). Além disso, como a cinza volante tem menor taxa de reação de hidratação, possibilita a redução de fissuras térmicas internas do concreto. É evidente a sua vantagem, pois CUAD e CUADRF possuem maior calor de hidratação comparado ao concreto convencional (AGHDASI; HEID; CHAO, 2016). Além disso, a cinza volante pode mitigar o encolhimento induzido por auto-dessecação porque possibilita que mais água livre esteja disponível para reter a umidade relativa na solução de poros (DU et al., 2021).

Yu et al. (2017) substituíram 30% do cimento por cinza volante na produção de CUADRF e obtiveram resistência à compressão superior a 100 MPa aos 28 dias. Meng, Valipour e Khayat (2017) desenvolveram dois traços de CUAD com adição de cinza volante. O primeiro traço era composto por 55% de cimento, 40% de cinza volante e 5% de sílica ativa e obtiveram resistência à compressão aos 28 dias de 124 MPa sob cura normal e 168 MPa sob cura térmica. O segundo, composto por 60% de cinza volante e 40% de cimento obtiveram resistência à compressão de 120 MPa com cura normal e 136 MPa com cura térmica. Meng; Khayat (2017) desenvolveram um traço com 55% de cimento, 40% de cinza volante e 5% de sílica ativa, e obtiveram resistência à compressão entre 95 e 125 MPa e resistência à flexão entre 20 e 35 MPa. Randl et al. (2014) substituíram 45% do cimento por cinza volante no CUAD e atingiram resistência à compressão de 124.7 MPa aos 28 dias.

2.2.4. METAUCALIM

Além da preocupação com o impacto ambiental em relação ao uso do cimento, os pesquisadores tem procurado outros materiais cimentícios para a composição de concretos, como alternativa para substituir a sílica ativa, pois por este ser um resíduo é um material instável, não há controle sobre suas propriedades, a sua disponibilidade está reduzindo (SONG et al., 2018), além disso, é um material de alto custo e de coloração escura (TAFRAOUI et al., 2009). Um material que vem se destacando para a substituição de sílica ativa é o metacaulim, pois tem o tamanho de partículas e reatividade similares à sílica ativa. O metacaulim é produzido a partir da queima de caulim, sendo este um dos minerais mais abundantes do planeta (TAFRAOULI et al., 2009) e com isso, permite a obtenção das propriedades desejadas a partir de um processo controlado (POON; KOU; LAM, 2006). Além disso, possui baixo custo e coloração branca (vantagem estética)

(TAFRAOULI et al., 2009). É uma pozolana de alta reatividade (ABNT NBR 15894-1, 2010). Normalmente, possui 55% SiO_2 e de 40 a 45% de Al_2O_3 (POON; KOU; LAM, 2006).

O metacaulim apresenta desempenho mecânico equivalente ao da sílica ativa e pode substituí-la na produção de CUAD, porém, deve-se aumentar o tempo de mistura (TAFRAOUI et al., 2009). Song et al. (2018) substituíram parte de sílica ativa por metacaulim na composição de CUAD. O traço de melhor desempenho continha 60% de sílica ativa e 40% de metacaulim e obtiveram resistência à compressão de, aproximadamente, 160 MPa e resistência à tração na flexão superior a 35 MPa. De acordo com os autores, essa combinação gerou uma hidratação rápida do cimento, a retração pôde ser limitada e resultou em uma microestrutura otimizada e densa.

Além de melhorar as propriedades mecânicas do concreto, o metacaulim otimiza a zona de transição do concreto. A adição de metacaulim é mais eficiente do que a adição de sílica ativa com relação a hidratação cinética do cimento na composição CUADRF. Entretanto, o metacaulim pode aumentar a retração e a viscosidade do CUADRF, resultando em microfissuras e bolhas de ar (SONG et al., 2018). O grande interesse no uso de metacaulim nessa pesquisa, se deve ao fato de que quase toda (95%) a reserva de caulim no mundo está localizada em apenas quatro países: Estados Unidos (53%), Ucrânia (7%) e Índia (7%) e no Brasil (28%), sendo que as reservas no Brasil possuem altíssima alvura e pureza (MÁRTIRES, 2009).

2.2.5. AGREGADOS

O agregado para compor o CUAD deve possuir alta resistência mecânica, distribuição bem graduada do tamanho das partículas e isento de qualquer contaminante (argila, aditivo) para que não afete a hidratação, a resistência, a densidade e a porosidade do concreto (MISHRA; SINGH, 2019). Diferentemente de outros tipos de concreto, a composição do CUAD possui materiais com partículas pequenas para que seja possível a obtenção de uma microestrutura densa com baixa porosidade. Por isso, utiliza-se agregados miúdos, normalmente, areia de quartzo com diâmetro entre 150 a 600 μm (SHI et al., 2015), (AZMEE; SHAFIQ, 2018). Entretanto, agregados graúdos estão sendo empregados para reduzir o custo do CUAD (ARORA et al., 2018), (LI; YU; BROUWERS, 2018), (CHEN et al., 2019) (ALSALMAN; DANG; MICAH HALE,

2017). Porém, o agregado graúdo deve ter diâmetro de partícula inferior a 10 mm e resistência superior a matriz do CUAD (SHIN et al., 2019).

2.2.6. FÍLERS

Como, normalmente, o teor de cimento é alto e a relação água/aglomerante é muito baixa na composição de CUAD, nem todos os grãos do cimento são hidratados. Por isso, de acordo com Yu, Spiesz e Brouwers, (2014b) a utilização de materiais (fílers) mais baratos, como pó de quartzo e de calcário para substituir parte do cimento na produção do CUAD é benéfica, pois aumenta a eficiência do cimento, melhora a fluidez e aumenta a eficiência das fibras de aço e do aglomerante em CUADRF. Além disso, não há uma mitigação das propriedades mecânicas do CUAD com a substituição de parte do cimento por fílers (DU et al., 2021). O uso de fílers para substituir parte do cimento se deve tanto à economia quanto à sustentabilidade (LIU; WEI; GUO, 2021). O pó de quartzo é um filer inerte na composição do CUAD. Sua distribuição granulométrica é entre 0.1 e 100 μm (SHI et al., 2015). É composto por mais de 97% de SiO_2 . As partículas do pó de quartzo utilizados na composição de CUAD possuem diâmetro médio entre 0.91 μm (PACHECO et al., 2018) e 14.6 μm (VAN et al., 2014). O efeito de nucleação dos fílers influencia o grau de hidratação nas primeiras idades, gerando um aumento da resistência à compressão nas primeiras idades (LIU; WEI; GUO, 2021).

2.2.7. ADITIVOS

O CUAD pode apresentar baixa fluidez e habilidade passante, por isso, é necessário o uso de modificadores de viscosidade e/ou superplastificantes. O superplastificante permite uma elevada redução da quantidade de água no concreto, sem alterar a consistência no estado fresco e gera uma melhora na fluidez (ABNT NBR 11768, 2011). O uso de superplastificante à base de policarboxilato é de maior eficiência para a produção de CUAD (COURTIAL et al., 2013). Entretanto, diversas pesquisas indicam que o superplastificante policarboxilato à base de metacrilato tem interação significativa com o cimento e sílica, enquanto, superplastificante policarboxilato a base de éter alílico é mais compatível e efetivo com sílica ativa (SCHRÖFL; GRUBER; PLANK, 2012). A Figura 6 ilustra qualitativamente os processos que ocorrem nas duas superfícies

minerais do cimento e da sílica na formulação do CUAD. Quando se aplica superplastificante policarboxilato à base de éster metacrílico, ocorre a absorção nas superfícies do cimento e da sílica ativa em proporção quase semelhante, enquanto o superplastificante policarboxilato à base de éter alílico é concentrado nas superfícies das partículas de sílica. (KHAYAT et al., 2019), (SCHRÖFL; GRUBER; PLANK, 2012).

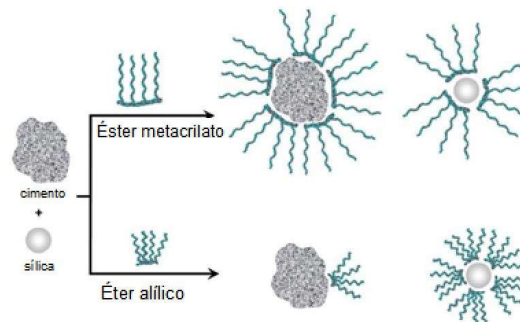


Figura 6: Interação entre superplastificantes com cimento e sílica ativa, (Adaptado de SCHRÖFL; GRUBER; PLANK, 2012)

A adição gradual e retardada do superplastificante pode aumentar a fluidez do CUAD, com isso, a relação a/c pode ser reduzida, o que, conseqüentemente, resultará no aumento da resistência e da durabilidade (TUE; MA; ORGASS, 2008), (FERDOSIAN; CAMÕES, 2016). Quando uma porcentagem de água é introduzida no cimento, as partículas de cimento se dissolvem na água e ficam prontas para adsorver as partículas do superplastificante. O SP dispersa as partículas de cimento e libera água. Após esse processo, uma porcentagem de água, que parece não estar envolvida na reação com o cimento inteiramente, permanece como água livre resultando em maior efeito de fluidificação. (FERDOSIAN; CAMÕES, 2016).

2.2.8. ÁGUA

A água é essencial para produção do concreto por possuir duas funções fundamentais: química, onde ocorrem as reações de hidratação; e física, determinação das características reológicas para a manipulação do concreto (CASTRO, 2007). Quando as partículas de cimento entram em contato com água, elas tendem a se aglomerar devido às forças capilares de Van der Waals (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009), (RAUCCI et al., 2018). Essas aglomerações alteram a reologia do sistema, pois modificam a distribuição granulométrica efetiva e absorvem água no seu interior (RAUCCI et al., 2018). Além disso, alteram

o empacotamento, e conseqüentemente, a microestrutura do material, resultando em micro defeitos, por isso, devem ser evitadas para garantir a obtenção de misturas dispersas (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009), (RAUCCI et al., 2018).

A Figura 7 apresenta a resistência à compressão em função da relação $a/aglom$ para diferentes tipos de concreto. Observa-se uma diferença significativa entre o CUAD e concreto convencional. O CUAD possui, normalmente, relação $a/aglom$ entre 0.15 e 0.25 com resistência à compressão entre 150 a 310 MPa, enquanto, o concreto convencional, possui relação $a/aglom$ entre 0.40 e 0.70 e resistência à compressão de até 50 MPa. Um detalhe importante na dosagem de concreto é que o teor de água do aditivo deve ser considerado no cálculo da relação a/c (GETTU et al., 2006), (TUE; MA; ORGASS, 2008), pois caso haja um teor adicional de água na mistura, irá influenciar na porosidade, e conseqüentemente, na resistência e na durabilidade do concreto.

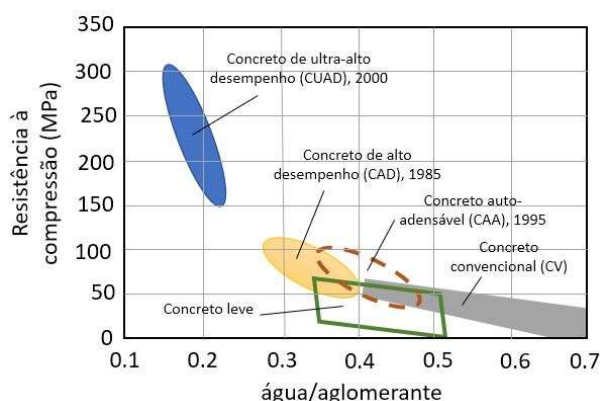


Figura 7: Resistência à compressão em função da relação água/aglomerantes para diferentes tipos de concreto, (Adaptado de FIB (2009) apud EIDE e HISDAL (2012))

2.2.9. FIBRAS

A utilização de fibras como reforço para concreto não é para aumentar a resistência de tração, mesmo que possa ocorrer uma melhora, mas, para controlar a propagação de fissuras e alterar o comportamento do concreto após a fissuração, aumentando a ductilidade do material, ou seja, a capacidade de absorção de energia. Existem diversos tipos de fibras, como aço, vidro, poliméricas e naturais, sendo que cada tipo tem a sua funcionalidade. Normalmente, para o CUADRF são utilizadas fibras de aço e de carbono, por estes tipos de fibras possuírem maior resistência à tração em comparação com outros tipos de fibras (SHI

et al., 2015). A Tabela 3 apresenta os principais tipos de fibras utilizados para a produção de CUADRF, bem como suas propriedades, como foram utilizadas e as propriedades mecânicas aos 28 dias.

Tabela 3: Propriedades das fibras mais utilizadas na composição de CUADRF

Material	Propriedades da fibra				Propriedades CUAD				Referência
	ft (MPa)	E (GPa)	lf (mm)	df (mm)	Comp.	fc (MPa)	fct (MPa)	ff	
Aço	2600	-	13	0.2	U	200	14	-	(Wille; Naaman; Parra-Montesinos, 2011)
	-	-	-	-	H	136.5	-	-	(Yu; Spiesz; Brouwers, 2016)
	-	-	6	0.16	H	207	12	-	(Benson; Karihaloo, 2005)
PVA	966	25.50	6	0.011	H	120.75	12.18	-	(Poorhosein; Nematzadeh, 2018)
	-	-	-	-	U	113.0	88.67	-	
	1400	-	8	0.038	H	160	-	23.40	(Meng; Khayat, 2018a)
	-	-	12	0.2	H	158	-	-	(Sanchayan; Foster, 2013)
	270	3	19	0.03	H	107.76	-	28.77	(Feng et Al., 2018)
PP	-	-	6	0.012	H	-	-	-	(Pacheco et Al., 2018)
	-	3.5	12	0.025	U	94.60	7.7	5.8	(Smarzewski; Barnat-Hunek, 2018)
	-	-	-	-	H	144.70	13.50	9.80	
	-	-	8	0.015	H	-	-	25	(Yu et Al., 2014)
PE	3000	100	18	0.02	U	121.5	17.42	27.68	(Yu et Al., 2018)
	3030	88	12	0.31	H	191.7	15.2	-	(Yoo; Kim, 2019)
C	30000	240	-	0.0001	U	175	> 7	> 8.17	(Meng; Khayat, 2016)

Propriedades da fibra: ft – resistência à tração; E – módulo de elasticidade; lf – comprimento; df – diâmetro
Resistências do concreto: fc – resistência à compressão; fct – resistência à tração; ff – resistência à flexão
Utilização de apenas um tipo de fibra (U); Hibridização de fibras (H)
Fibras: PVA - Álcool polivinílico, PP – Polipropileno, PE – Polietileno, C - Carbono

Para garantir a dispersão das fibras (distribuição uniforme) e a orientação das fibras durante a moldagem é preciso ter uma alta fluidez (alto valor de slump). Entretanto, a adição de fibras aço pode reduzir a fluidez do CUADRF e aumentar a incorporação de ar no estado fresco e a porosidade no estado endurecido, devido o atrito da fibra, forças coesivas e mudanças no esqueleto da estrutura (BUTTIGNOL; SOUSA; BITTENCOURT, 2017). Por isso, Yu, Spiesz e Brouwers (2014a) sugerem que para a dosagem do CUADRF deve ser feito o empacotamento de partículas e utilizar um baixo teor de cimento, para que seja possível reduzir o efeito negativo da adição de fibras de aço.

Como o CUADRF possui alto teor de cimento e granulometria otimizada, pode apresentar pequenos poros e microfissuras com tamanho diretamente proporcional ao tamanho dos agregados (RICHARD; CHEYREZY, 1995) e uma matriz cimentícia densificada na zona de transição (KRAHL, 2018), (MISHRA; SINGH, 2019). Para aumentar a interação fibra-matriz no CUADRF podem ser utilizadas fibras com

alta área superficial, pois tendem a ter uma melhor aderência adesional e friccional, ou fibras com revestimento na superfície, como cobre, latão e outros metais (KRAHL, 2018), (WU; KHAYAT; SHI, 2018).

2.2.9.1. FIBRAS DE AÇO

As fibras de aço apresentam alto módulo de elasticidade, por isso, melhoram algumas características do concreto, como tenacidade, resistência à tração na flexão, resistência ao impacto e à fadiga (MEDEIROS, 2012) e a ductilidade do concreto. São utilizadas em elementos estruturais, como estruturas hidráulicas (barragens, vertedouros), e não estruturais, como pavimentos de aeroportos e rodovias, revestimentos de túneis, revestimentos lançados para estabilização de taludes (MILLER, 2008). A Figura 8 apresenta dois tipos fibras de aço retas mais utilizadas na composição de CUADRF: 6 mm de comprimento e 0,16 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento e 0,20 mm de diâmetro.



Figura 8: Esquerda: Fibras de aço retas com $l_f = 6$ mm e $d_f = 0.16$ mm. Direita: Fibras de aço retas com $l_f = 13$ mm e $d_f = 0.2$ mm (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a)

Segundo Martínez (2017), para garantir o comportamento dúctil do CUADRF para os esforços de compressão e tração, deve-se utilizar fibras entre 1 a 3% do volume do concreto. As fibras mais comuns para o CUADRF são fibras de aço retas com comprimento variando entre 6 e 20 mm e esbeltez superior a 65 para aumentar o atrito entre fibra-matriz, e inferior a 80 para aumentar a fluidez, entretanto, fibras torcidas e com ganchos nas extremidades também são adicionadas. Segundo o autor, o uso de combinações de fibras de diferentes tipos e quantidades de fibras resultam na melhora do comportamento à tração.

2.2.9.2. FIBRAS DE PVA

As fibras de álcool polivinílico (polyvinyl alcohol, PVA) (Figura 9), normalmente, possuem resistência à tração entre 1600 e 2500 MPa. Entre as fibras poliméricas, as fibras de PVA apresentam maiores resistência à tração e módulo de elasticidade, e por isso, são mais indicadas para materiais cimentícios. Por serem mais baratas do que fibras de polietileno e fibras de aço, são atrativas para o reforço de concretos (LI; WANG; WU, 2001). Possuem superfície química especial, pois são hidrofílicas, interagem com a água, tendo uma forte interação com a matriz cimentícia, e isso resulta na limitação do efeito de múltiplas fissuras e na redução do enrijecimento de tração do compósito (SHEN et al., 2008). São macias para facilitar sua colocação no concreto, e são flexíveis para que não quebrem durante a moldagem (SHEN et al., 2008).



Figura 9: Fibras de PVA (FENG et al., 2018)

Poorhosein e Nematzadeh (2018) analisaram o efeito do uso de fibras de aço e fibras de PVA e hibridização dessas fibras nas propriedades do CUADRF. A incorporação de fibras de PVA reduziu a fluidez do concreto quando utilizada exclusivamente ou no CUADRF híbrido em comparação com o CUADRF com fibras de aço, pois as fibras de PVA geram consistência e coesão ao concreto. Como as fibras de PVA possuem alto fator de forma, elas não influenciam na resistência à tração, pois são incapazes de restringirem a propagação das microfissuras. O modo de ruptura do CUAD é frágil, a incorporação de fibras de PVA e a hibridização melhorou o modo de ruptura, gerando sinais antes de romper, pois as fibras foram capazes de evitar a propagação e abertura de fissuras.

Meng e Khayat (2018a) produziram CUADRF híbrido com fibras de aço retas com $l_f = 13$ mm e $d_f = 0.2$ mm e fibras de PVA com $l_f = 8$ mm e $d_f = 38$ μ m. A substituição de fibras de aço por fibras de PVA no CUADRF reduziu a fluidez, pois as fibras de PVA absorvem mais água, entretanto, aumentou a viscosidade

e não influenciou a resistência à compressão e a resistência à flexão comparado com os CUADRF híbridos com fibras de aço. Os resultados indicaram que o uso de 0.5% de fibras de PVA reduziu efetivamente a retração autógena e, assim, o risco de fissuras no CUAD, pois as fibras de PVA atuaram nas microfissuras e evitaram a propagação das fissuras nas primeiras idades.

Aghdasi (2019) estudou a mistura de fibras de PVA e de aço na composição de CUADRF. O autor verificou que os compósitos híbridos apresentaram múltiplas fissuras e comportamento de enrijecimento após a primeira fissura, pois as fibras de PVA e macrofibras de aço foram capazes de controlar as fissuras em micro e macroescala, respectivamente.

Park et al. (2019) investigaram a resistência ao fogo de CUADRF híbrido com fibras de aço e PVA. Os autores reportaram que a fragmentação explosiva do CUADRF foi evitada com a adição de fibras de PVA e sua eficácia aumentou com o aumento do volume de fibras de PVA.

2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas do CUAD são influenciadas pelos componentes do concreto, pela otimização do empacotamento de partículas, relação água/cimento (a/c), teor de superplastificantes e pela condição de cura. A Tabela 4 compara as principais características entre o concreto convencional e o CUAD.

Tabela 4: Principais propriedades do concreto convencional e do CUAD (MISHRA; SINGH, 2019)

Propriedades	Concreto convencional	CUAD
Resistência à compressão	15 a 40 MPa	≥ 150 MPa
Resistência à tração	≤ 5 MPa	≤ 15 MPa
Resistência à flexão	≤ 6 MPa	≤ 40 MPa
Ductilidade	-	Muito alta
Carga impacto	Fraca	Muito forte
Resistência à abrasão	Fraca	Forte como rocha
Impermeabilidade	Penetração de cloreto e carbonatação	Quase nenhuma

2.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Segundo Spasojević (2008) o comportamento do CUAD sob esforços à compressão é caracterizado por: alta resistência (> 150 MPa); alto módulo de elasticidade (entre 50 a 70 GPa), representado pela parte linear da curva tensão-deformação; limite de linearidade da curva tensão-deformação corresponde entre 70 a 80% da resistência à compressão; o coeficiente de Poisson permanece constante até 70 a 80% da resistência à compressão; o modo de ruptura é extremamente frágil. O CUAD pode atingir alta resistência à compressão acima de 70 MPa nas primeiras 24 horas (KARMACHARYA; CHAO, 2019). Já para o CUADRF, a parte linear referente ao comportamento da matriz, também possui módulo de elasticidade entre 50 a 70 GPa; parte não linear antes da ruptura; comportamento de amolecimento após a ruptura, correspondente a deformação localizada. As curvas tensão-deformação de compressão são similares para CUAD e CUADRF (Figura 10), a diferença entre elas ocorre após a ruptura do concreto, pois no CUADRF, as fibras conseguem conter a propagação das fissuras e aumentam a ductilidade (ENAMI, 2017), (MISHRA; SINGH, 2019).

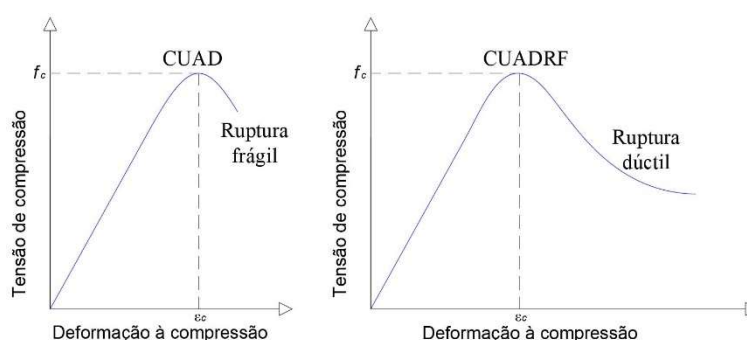


Figura 10: Comportamento típico à compressão para CUAD e CUADRF (Adaptado de MISHRA; SINGH, 2019)

Zhang e Zhao (2017) verificaram a sinergia entre composições ternárias e quaternárias de materiais cimentícios, substituindo o cimento em até 50% por materiais cimentícios suplementares: pó de calcário, cinza de casca de arroz, sílica ativa e caulim. A resistência à compressão aos 7 dias foi de 99 MPa para o CUAD referência (apenas com sílica ativa), 98 MPa para o CUAD com pó de calcário e sílica ativa, 97 MPa para o CUAD com pó de calcário e sílica ativa e caulim. Para os autores, isso ocorreu porque a sílica ativa tem o efeito fíler, resultando no aumento da resistência nas primeiras idades; e pela alta substituição do cimento por pó de calcário e pelo efeito de diluição do caulim e sua lenta reação pozolânica. Entretanto, para

a resistência à compressão aos 28 dias, todos os grupos, exceto com a adição de cinza de casca de arroz, obtiveram valores próximos ao CUAD referência.

Mesmo que a adição de fibras tenha maior eficiência sob esforços de tração, ela pode aumentar a resistência à compressão, por conter a propagação e abertura de fissuras (YOO et al., 2017). Em CUADRF híbridos, devido ao efeito combinado das fibras em restringir a propagação e abertura de fissuras, a resistência à compressão pode apresentar um aumento (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2016), (YOO et al., 2017). Porém, para não ter efeito contrário, deve-se tomar cuidado com adição de fibras para não aumentar o ar incorporado e deve-se dispersá-las uniformemente (YOO et al., 2017). A substituição de fibras de aço por fibras poliméricas (como polipropileno e polietileno) em combinações híbridas em CUADRF, tende a reduzir a resistência à compressão, pois as fibras poliméricas possuem maior fator de forma, dificultando a dispersão ser homogênea. A seção transversal, por sua vez, fica mais fraca devido a concentração de fibras, resultando na ruptura prematura sob esforços de compressão, além disso, possuem baixo módulo de elasticidade (SMARZEWSKI; BARNAT-HUNEK, 2018), (YOO; KIM, 2019a).

Para a determinação da resistência à compressão para CUAD/CUADRF, normalmente, é realizada seguindo as normas de concreto convencional, como a (ASTM C39/C39M – 21, 2021) e (BS EN 12390-3:2019, 2019), porém, podem ser necessárias algumas pequenas modificações (RUSSEL; GRAYBEAL, 2013). Diferentes formatos e tamanhos de corpos de prova podem ser utilizados, como cubos (ABDULKAREEM et al., 2018), (GRUNEWALD et al., 2013) e cilindros (GRAYBEAL, 2006), (KRAHL, 2018). O uso de corpos de prova cúbicos tende a apresentar resistência à compressão ligeiramente maior em comparação com corpos de prova cilíndricos (GRAYBEAL, 2006).

De acordo com Du et al. (2021), o aumento da resistência à compressão pode ser obtido através da redução da porosidade e pela densificação dos produtos de hidratação. A redução da relação da água/aglomerante e a otimização da distribuição granulométrica dos materiais que irão compor o UHPC são duas maneiras que diminuem a porosidade. Além disso, a refinamento dos poros da microestrutura do CUAD também contribui para a redução da porosidade. Esse refinamento pode ser realizado ao promover a hidratação do cimento, ou ainda, substituir parte do cimento que não é hidratado por materiais cimentícios. A densificação dos produtos hidratados pode ser realizada através da aplicação da cura térmica e/ou promoção da reação pozolânica para fortalecer a matriz do CUAD e a zona de transição.

2.3.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para o CUADRF, o módulo de elasticidade é admitido igual para compressão e tração (AFGC, 2013), e normalmente, fica dentro de um intervalo de 40 a 70 GPa (RUSSEL; GRAYBEAL, 2013). O ensaio para determinar o módulo de elasticidade que tem sido mais utilizado é de acordo com ASTM C469/C469M:2014 com corpos de prova cilíndricos (GRAYBEAL, 2006), (MENG; VALIPOUR; KHAYAT, 2017), (SMARZEWSKI; BARNAT-HUNEK, 2018).

Smarzewski, Barnat-Hunek (2018) reportaram que o módulo de elasticidade é influenciado significativamente pela adição de fibras. A incorporação de fibras de aço gera um aumento do módulo de elasticidade, pois as fibras de aço possuem um alto módulo de elasticidade. Já a adição de fibras sintéticas, como polipropileno e PVA, causa uma redução do módulo de elasticidade, porque essas fibras possuem baixo módulo de elasticidade (SMARZEWSKI; BARNAT-HUNEK, 2018), (POORHOSEIN; NEMATZADEH, 2018).

2.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A resistência à tração do CUAD é muito superior a do concreto convencional, além disso, o CUAD pode suportar mais tensão após o aparecimento da primeira fissura (RUSSEL; GRAYBEAL, 2013). A resistência à tração de CUADRF geralmente é o dobro em comparação com do CUAD (MISHRA; SINGH, 2019). Segundo Wille e Naaman (2012), o CUADRF é tipicamente caracterizado com resistência à tração entre 10 e 15 MPa com deformação máxima de tração entre 0.002 e 0.003. Wille, El-Tawil e Naaman (2014) desenvolveram um CUADRF com deformação máxima de tração entre 0.0039 e 0.0049. Enquanto, Park et al. (2019) obtiveram um CUADRF com alta ductilidade com deformação máxima de tração de 0.0141.

O desenvolvimento do CUAD foi possível devido a evolução da matriz e da fibra e do entendimento da interação entre eles, resultando em um compósito com maiores valores de resistência, tenacidade, absorção de energia, rigidez, durabilidade e resistência à corrosão (KRAHL, 2018). O CUAD resiste à tensão de tração por meio da ação do composto entre a matriz e as fibras incorporadas, sendo que a transmissão de forças entre esses dois componentes ocorre por meio da aderência interfacial (HUNG; EL-TAWIL; CHAO, 2021). O desempenho à tração do CUADRF é influenciado por alguns fatores: resistência,

rigidez, formato, fator de forma, coeficiente de Poisson das fibras; resistência, rigidez e retração da matriz; e pelas propriedades físico-químicas e aderência entre a fibra e matriz (KIM et al., 2011).

A presença de fissuras pode tornar o CUAD vulnerável à entrada de umidade e íons indesejados, resultando em deterioração acelerada. Portanto, é essencial aumentar a resistência à fissuração e a tenacidade à fratura do CUAD (MENG; KHAYAT, 2016). Por isso, é realizada a incorporação de fibras, principalmente, a de aço, para que as fibras atravessem as fissuras, controlando a propagação e abertura das fissuras, resultando no aumento da resistência, da ductilidade e da durabilidade do CUAD (WU; KHAYAT; SHI, 2018), (HUNG; EL-TAWIL; CHAO, 2021), (AHMAD; KHAN; SMARZEWSKI, 2021).

O CUADRF é um material que apresenta um comportamento de deformação por endurecimento, pois sua resistência à tração última é maior que a resistência à tração de fissuração (WILLE; EL-TAWIL; NAAMAN, 2014), que resulta na formação de múltiplas fissuras até atingir a resistência à tração última (WILLE et al., 2012), devido a utilização de uma quantidade adequada de fibras na composição do CUADRF, permitindo a redistribuição das tensões de tração internas em todo o corpo de prova após o aparecimento da primeira fissura (AGHDASI; HEID; CHAO, 2016). A curva típica de tensão-deformação referente a resistência à tração de compósitos cimentícios com fibras (NAAMAN, 2003), (Figura 11), também representa o comportamento à tração do CUADRF (PARK et al., 2012), (WILLE; KIM; NAAMAN, 2011). Essa curva pode ser dividida em três trechos (NAAMAN, 2003), (SPASOJEVIĆ, 2008), (WILLE; KIM; NAAMAN, 2011), (WILLE; EL-TAWIL; NAAMAN, 2014):

- I. Fase elástica: corresponde a resistência à tração da matriz. Nesta fase, a tensão aumenta linearmente com a deformação. O ponto A é denominado tensão de fissuração (σ_{cc}), a qual é obtida pela relação entre o módulo de elasticidade (E_{cc}) e a deformação elástica referente a fissuração (ϵ_{cc}). Nesse ponto, as fibras desempenham o papel de transferir tensões nestas regiões, contendo a abertura de fissuras.
- II. Fase de enrijecimento (*strain-hardening*): nesta fase, ocorrem múltiplas fissuras, a largura das fissuras é pequena e a deformação é inelástica. Essa fase é representada pela energia dissipada por unidade de volume $g_{f,A}$, que corresponde a área da fase II. O ponto B é denominado tensão última de tração (σ_{pc}), obtida pela relação entre o módulo de elasticidade (E_{pc}) e a deformação inelástica (ϵ_{pc}). Nesse ponto, as fibras não possuem resistência

suficiente, sofrem deslizamentos, e o concreto se rompe. Essa fase é, principalmente, influenciada pelas fibras e pela aderência entre fibra-matriz (NAAMAN, 2003).

- III. Fase de amolecimento (*strain-softening*): com a ruptura do material surge a fissura localizada e o amolecimento acontece, isto é, mesmo com a diminuição do carregamento, a deformação continua aumentando. A abertura da fissura principal (localizada) começa a aumentar. É caracterizada pela energia dissipada por área superficial da fissura $G_{f,B}$, que corresponde a área da fase III.

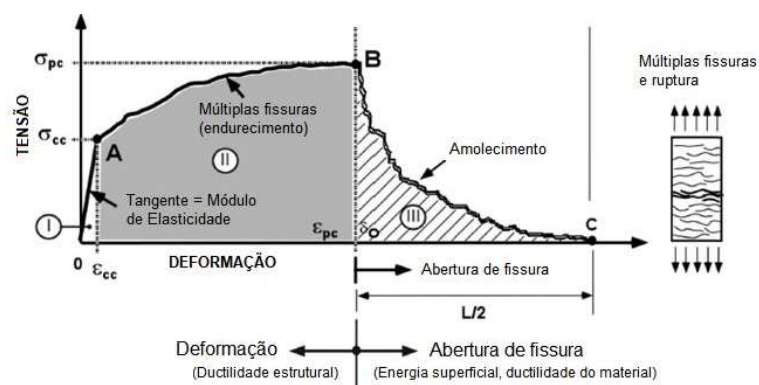


Figura 11: Curva típica tensão-deformação à tração de concreto convencional e de alto desempenho reforçados com fibras, (Adaptado de NAAMAN, 2003)

Segundo Wille, El-Tawil e Naaman (2014), o ensaio de tração direta é o mais apropriado para obtenção dos três estágios do comportamento à tração sem a utilização de sistemas computacionais para obtenção de todo o comportamento, em relação ao ensaio de flexão e tração indireta (compressão diametral). Tanto o formato do corpo de prova como o sistema para prender o corpo de prova para a execução do ensaio, influenciam significativamente nos resultados do ensaio nas três fases do comportamento (WILLE; EL-TAWIL; NAAMAN, 2014). Para a execução desse ensaio, diversos tipos de corpos de prova têm sido utilizados, como formato “osso de cachorro” (Dogbone), prismas e cilindros com e sem entalhe. Corpos de prova em formato de osso de cachorro com uma maior seção transversal em direção às extremidades pode ajudar a reduzir a tensão de contorno e evitar a ruptura nas extremidades (QIAO; HONMA; KOJIMA, 2019). Como a capacidade de resistência pré e pós-fissuração são propriedades centrais a serem medidas no CUAD e são superiores ao concreto convencional, para determinar a resistência à tração do CUAD, normas de concreto convencional não são aplicáveis, já que geralmente fornecem apenas um valor de resistência à primeira fissura (LARSEN; THORSTENSEN, 2020). A norma mais utilizada para determinação da resistência à tração direta para o

CUAD é a JSCE (2008), com corpos de prova em formato de osso de cachorro (YU et al., 2018), (YOO; KIM, 2019a).

A capacidade de deformação é um índice que avalia quantitativamente a ductilidade, e é importante, pois quanto maior o valor, maior será a carga que a estrutura irá suportar sem colapsar (CHUN; YOO, 2019). Os autores utilizaram microfibras retas de aço (ss, lf/df 12/0.20) combinando com um tipo de macrofibra, sendo retas (S, lf/df 30/0.30), com ganchos nas extremidades (H, lf/df 30/0.375) e torcidas (T, lf/df 30/0.30) para produzir traços híbridos de CUADRF. A Figura 12 a, b e c comparam o desempenho à tração para o CUADRF com apenas microfibras retas e CUADRF híbridos combinando microfibras retas e macrofibras retas, microfibras retas com macrofibras com ganchos e microfibras retas com macrofibras torcidas, respectivamente. De acordo com os autores, não houve uma melhora para hibridização com fibras retas, por elas terem o mesmo mecanismo de arrancamento. Para os autores, a hibridização com macrofibras torcidas ou com ganchos combinadas com microfibras retas foi mais eficaz em aumentar o desempenho à tração, pois essas macrofibras tendem a causar mais degradação à matriz.

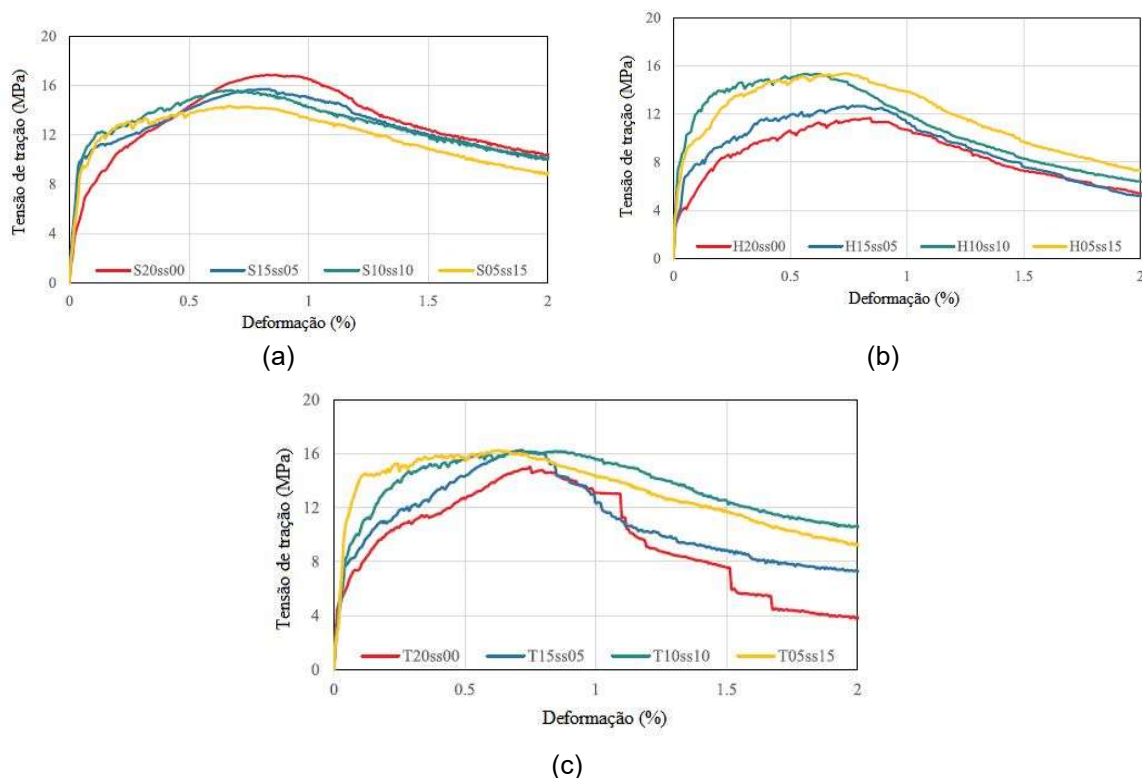


Figura 12: Curvas tensão-deformação de tração para CUADRF com fibras de aço e híbrido (a) Macrofibras de aço retas (b) Macrofibras de aço com ganchos nas extremidades (c) Macrofibras de aço torcidas

(Adaptado de CHUN; YOO, 2019)

Quando são combinadas macro e microfibras de aço na composição do CUAD, o formato da curva tensão-deformação de tração depende das macrofibras e a adição de microfibras influencia no comportamento de endurecimento da deformação e na formação de múltiplas fissuras (PARK et al., 2012). Segundo os autores, a combinação com macrofibras de aço torcidas e microfibras retas apresentou o melhor desempenho à tração, obtendo 18.6 MPa de resistência à tração, 0.00064 de deformação e abertura média de fissura de 3.8 mm, pois as fibras de aço torcidas, produziram uma pressão de contato mais alta e mais danos na interface entre a fibra-matriz para ativar a resistência de aderência mecânica. A Figura 13 apresenta o desempenho do CUADRF híbrido com fibras torcidas e microfibras retas e do CUADRF com apenas fibras torcidas.

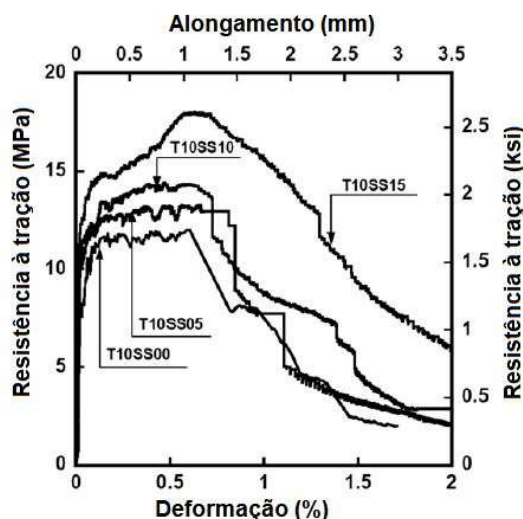


Figura 13: Desempenho à tração de macrofibras torcidas e microfibras retas de aço (Adaptado de PARK et al., 2012)

Poorhosein e Nematzadeh (2018) verificaram que o CUADRF com adição somente de fibras de aço ($l_f = 25\text{mm}$) ou hibridização de fibras de aço com fibras de PVA ($l_f = 6\text{mm}$) aumentaram a resistência à tração em 56% e 42%, respectivamente. Segundo os autores, isso ocorreu devido às fibras de aço terem formato ondulado e ganchos nas extremidades, o que proporcionou maior aderência no concreto sob tensões de tração e evitaram a propagação de fissuras contínuas.

Qiao, Honma e Kojima (2019) verificaram que a adição de microfibras retas de aço (l_f/d_f 13/0.16) na composição de CUAD com macrofibras de aço com ganchos nas extremidades (l_f/d_f 30/0.38) aumentou a resistência à tração, devido às fibras conterem a propagação das fissuras eficientemente. Além disso, a

substituição de macrofibras com ganchos por microfibras retas mitigou os mecanismos de degradação da matriz referente ao arrancamento das macrofibras com ganchos. O CUAD com 1.5% de microfibras e 1% de macrofibras com ganchos nas extremidades obteve o melhor desempenho, com resistência à tração superior a 15 MPa e deformação superior a 0.0005.

2.3.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

O desempenho à tração na flexão do CUADRF é influenciado pelos mesmos fatores que o desempenho à tração, como as características das fibras, as características da matriz, e a interação entre a matriz e a fibra (KIM et al., 2011).

O ensaio para determinar resistência à tração na flexão é mais fácil de ser executado do que o ensaio de tração direta, por isso, normalmente, são os mais realizados para o CUAD, podendo ser feito por três ou quatro pontos (LARSEN; THORSTENSEN, 2020). Para o CUAD, as normas mais aplicadas são referentes aos concretos reforçados com fibras como (ASTM C1609/C1609M-19, 2005) e (ASTM C1018 -97, 1998) ou materiais cimentícios como (EN 196-1, 2016), porém, existe uma norma francesa para CUADRF (NF P 18-470, 2016). Para realizar o ensaio de tração na flexão, são utilizados corpos de prova prismáticos, podendo ser de diferentes dimensões, como 40 x 40 x 160 mm (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c) e 150 x 150 x 450 mm (KRAHL et al., 2019). A resistência à tração na flexão pode variar entre 5.7 MPa (SMARZEWSKI; BARNAT-HUNEK, 2018) e 141 MPa (RICHARD; CHEYREZY, 1995) devido a composição do concreto, da moldagem, da condição de cura (WANG et al., 2015) e a dimensão do corpo de prova. Quanto maior o corpo de prova, menor é a resistência (MAGUREANU et al., 2010), (VITEK; COUFAL; ČÍTEK, 2013).

Um compósito cimentício reforçado com fibras pode apresentar um comportamento de deformação por endurecimento ou por amolecimento, sendo que o de endurecimento é considerado mecanicamente mais eficiente. Porém, um material que apresenta deformação por endurecimento apresenta comportamento de deslocamento por endurecimento, enquanto o material que apresenta comportamento de deformação por amolecimento pode obter comportamento de deslocamento por endurecimento (*deflection-hardening*) ou por amolecimento (*deflection-softening*) (NAAMAN; REINHARDT, 2006), (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). A curva típica de carga-deflexão obtida através de ensaio de resistência à

flexão por quatro pontos para CUADRF está apresentada na Figura 14 e pode ser dividida em três zonas (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2016), (MENG; KHAYAT, 2017), como segue:

1. Fase elástica – o carregamento aumenta linearmente com relação ao deslocamento;
2. Fase de fissuração ou enrijecimento – o carregamento aumenta com o deslocamento em uma inclinação menor que a zona anterior, e é acompanhada pela ocorrência de múltiplas fissuras na superfície inferior da viga ensaiada. Com o início da fissuração, as fibras transmitem as tensões de tração na flexão e limitam o aumento das fissuras, até que o carregamento último seja atingido. Quando as fibras não conseguem mais conter a abertura da fissura, ocorre a fissura localizada e o carregamento diminui, iniciando a terceira zona;
3. Fase pós-fissuração ou amolecimento – após o aparecimento da fissura localizada, o material continua suportando um carregamento, porém, mesmo com a redução do carregamento, o deslocamento continua aumentando.

O ponto inicial da fissura da matriz é denominado limite de proporcionalidade (LOP) e o ponto onde é obtido a resistência à tração na flexão última é denominado Módulo de Ruptura (MOR).

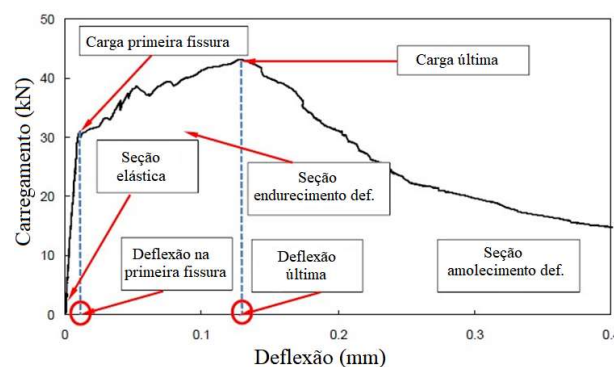


Figura 14: Curva típica carga-deflexão para ensaio de resistência à flexão por 4 pontos (Adaptado de YU; SPIESZ; BROUWERS, 2016)

Segundo Meng e Khayat (2017), o desempenho à tração na flexão do CUAD pode ser melhorado a partir do controle das propriedades reológicas do concreto antes da adição de fibras. A distribuição e a dispersão das fibras estão relacionadas diretamente com o desempenho à tração na flexão, pois com uma distribuição uniforme de fibras é possível controlar a fissuração do concreto. A reologia do concreto pode

influenciar essas características, pois, por exemplo, a viscosidade plástica pode aumentar ou reduzir a dispersão das fibras. Pois, o aumento da viscosidade, aumenta o ar incorporado ao concreto.

Yoo et al. (2017) estudaram o comportamento à tração na flexão de CUADRF com apenas um tipo de fibras, sendo fibras retas de aço (SS, l_f/d_f 19.5/0.20), fibras com ganchos nas extremidades (H, l_f/d_f 30/0.38) e fibras torcidas de aço (T, l_f/d_f 30/0.30), e também a hibridização de fibras retas de aço com fibras com ganchos ou torcidas. A Figura 15 apresenta os resultados referente ao desempenho à flexão para os traços desenvolvidos pelos autores. É possível verificar que a substituição de fibras de aço com ganchos por fibras retas melhorou o comportamento à tração na flexão, de acordo com os autores, isso ocorreu, pois, as fibras retas possuem maior fator de forma em comparação com as fibras com ganchos e porque a formação de fissuras foi limitada entre a matriz e fibra com ganchos. O CUADRF híbrido com 1% de fibras torcidas e 1% de fibras retas (T1.0-S1.0) apresentou o melhor comportamento à tração na flexão, porque esta combinação minimizou as desvantagens das fibras torcidas (T) e retas (S). Segundo os autores, a desvantagem da fibra reta é a menor resistência ao arrancamento do que a fibra torcida, e para as fibras torcidas, são fissuras geradas na matriz, que limitam o desenvolvimento total da resistência ao arrancamento da fibra e levam a uma redução mais acentuada da resistência ao arrancamento após o pico e maior perturbação de alinhamento da fibra em comparação com fibras retas.

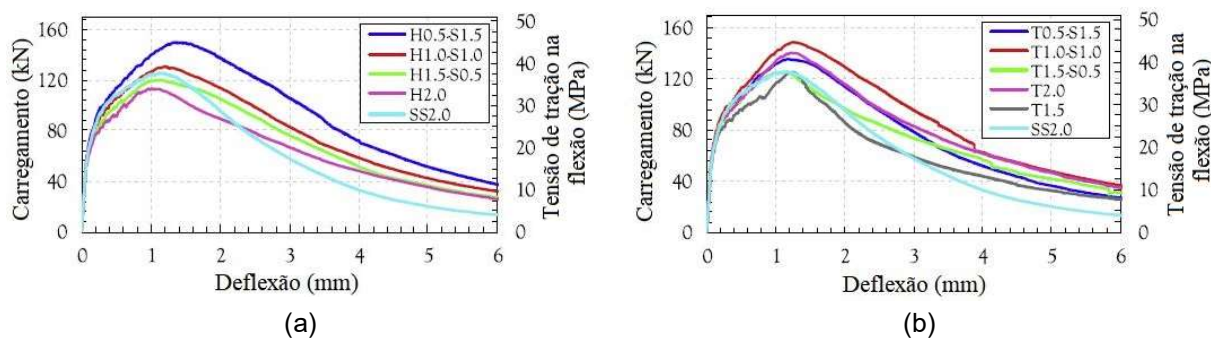


Figura 15: Curvas carga-deflexão para (a) CUADRF híbrido com fibras com ganchos e retas (b) CUADRF híbrido com fibras torcidas e retas de aço (Adaptado de YOO et al., 2017)

Yu et al. (2014) utilizaram fibras de polipropileno (FPP, l_f/d_f 8/0.15) e fibras de aço (FA, l_f/d_f 13/0.2) para desenvolver traços de CUADRF híbrido variando o volume das fibras. Os autores verificaram que os traços híbridos apresentaram melhor desempenho à tração na flexão e ductilidade comparado ao traço com apenas fibras de aço, devido às fibras de polipropileno conterem propagação das microfissuras e as fibras de

aço conterem a propagação das microfissuras. A Figura 16 apresenta o comportamento dos traços desenvolvidos pelos autores.

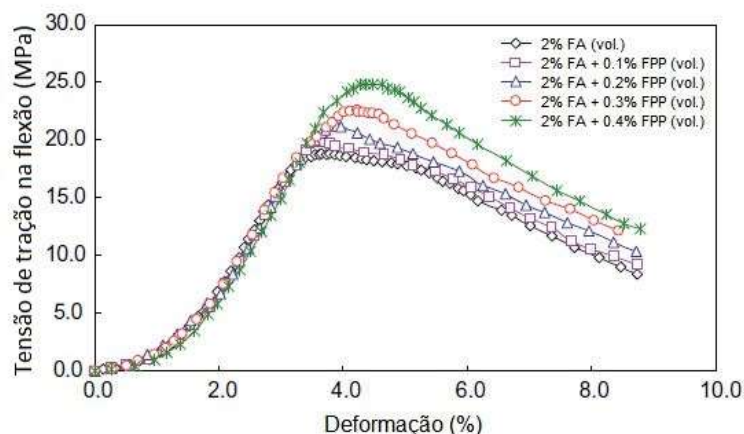


Figura 16: Efeito da hibridização de fibras de aço e de polipropileno na resistência à flexão de CUADRF (Adaptado de YU et al. (2014))

2.4. CUADRF HÍBRIDO

O processo de fratura de tração do concreto começa quando as microfissuras são geradas nos primeiros instantes quando o concreto é submetido ao esforço de tração, e normalmente, aparecem na zona de transição mais fraca entre as fibras e os agregados. Podem possuir comprimento similar ao diâmetro dos agregados, e a profundidade é de ordem de microns (por exemplo, de 1 a 5 μm). As microfissuras são formadas a partir da união das microfissuras e representam descontinuidades maiores, espalham-se pelas superfícies e são maiores que a superfície do agregado; o comprimento pode ser tal que cubra toda a seção transversal do corpo de prova (denominadas fissuras transversais) ou parte da seção; a largura pode variar entre microns (por exemplo, 5 a 10 μm) até valores muito maiores (VAN MIER, 1997), (VAN MIER (2004A) *apud* MARKOVIC (2006)).

A Figura 17 ilustra o principal conceito da hibridização de CUADRF para a combinação de fibras de diferentes tamanhos, que está diretamente relacionado com a energia da fratura. As microfibras conseguem conter a propagação das microfissuras mais eficientemente, resultando na formação de múltiplas fissuras e no aumento da resistência à tração (1), pois elas são mais finas e em maior quantidade em comparação com as macrofibras, para um mesmo volume de fibras. Enquanto, as macrofibras são eficazes em conterem a propagação das microfissuras resultando no aumento da ductilidade (capacidade de deformação por tração) (2) (MARKOVIC, 2006), (PARK et al., 2012).

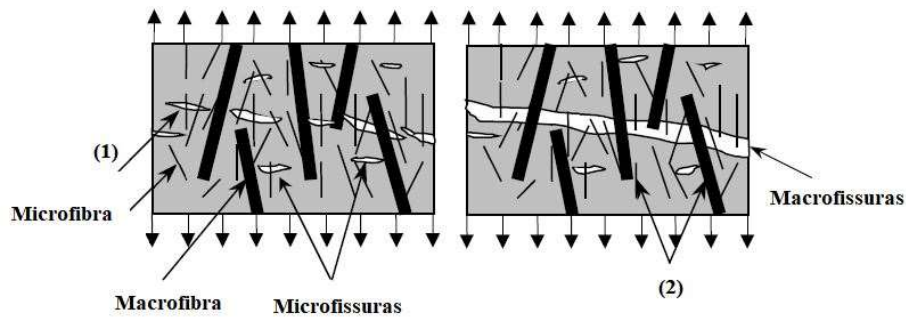


Figura 17: Principal conceito do CUADRF híbrido (MARKOVIC, 2006)

Hibridização é a combinação de fibras de diferentes formatos ou tipo ou dimensões, que resulta no aprimoramento do desempenho do concreto (KHAN; ABBAS; FARES, 2017). É uma ótima solução para aumentar a resistência à tração e ductilidade de um concreto (MARKOVIC, 2006). Resulta em sinergia, isto é, o desempenho da hibridização é superior ao desempenho individuais de cada fibra, e pode ocorrer para resposta, dimensões e funcionalidade das fibras (BANTHIA; GUPTA, 2004):

- Baseada na resposta das fibras: uma fibra é mais forte e mais rígida, tornando o compósito mais resistente à primeira fissura e aumentando o carregamento último, e a outra fibra é mais flexível, providenciando maior tenacidade e capacidade de deformação na zona pós-ruptura.
- Referente às dimensões das fibras: uma fibra de menor comprimento deverá resistir as microfissuras atrasando a coalescência e aumentando a resistência à tração do compósito, e a outra fibra de maior comprimento deverá impedir a propagação de macrofissuras, aumentando a tenacidade da fratura do compósito.
- Referente a funcionalidade das fibras: uma fibra é utilizada para aumentar as propriedades no estado fresco e nas primeiras idades da mistura (retração plástica e facilidade de produção) e a outra fibra é para aumentar as propriedades mecânicas.

Na literatura encontram-se muitos estudos com diversas combinações de fibras com variados tipos de materiais constituintes das fibras, variados formatos e dimensões em diferentes tipos de concreto, para o CUADRF ainda precisa ser mais investigado. A primeira aplicação de diferentes tipos de fibras em uma mistura de concreto, foi proposta por Rossi et al. (1987) *apud* Markovic (2006), como o denominado concreto reforçado com fibras multimodais. Um dos CUADRF híbridos mais conhecidos é o CARDIFRC®, desenvolvido e patenteado por Benson e Karihaloo (2005) na Cardiff University no Reino Unido. Este concreto

é composto por mais de 900 kg/m³ de aglomerantes (cimento e sílica ativa), fibras de aço curtas de 6 e de 13 mm de comprimento (l_f) e 0.16 mm de diâmetro (d_f) (revestidas em latão para evitar corrosão), areia, superplastificantes e água. As fibras menores aumentaram a resistência à tração simples e na flexão, e as fibras maiores aumentaram a tenacidade.

Markovic (2006) desenvolveu CUADRF híbrido utilizando fibras retas curtas de aço com l_f variando entre 6 e 13 mm e macrofibras de aço com ganchos nas extremidades com l_f entre 30 e 60 mm, todas com resistência à tração (f_t) de 2500 MPa. O concreto obteve resistência à compressão entre 100 e 130 MPa. O concreto híbrido com 2% de macro e microfibras obteve 40 MPa de resistência à tração na flexão, enquanto, o concreto com 2% de microfibras, obteve 25 MPa. A resistência à tração máxima foi entre 10 a 12 MPa, obtida para o concreto híbrido com 2% de fibras, e para o concreto com apenas 3% microfibras, obteve 15 MPa. Segundo o autor, em todas as hibridizações, as microfibras foram eficientes para conterem a propagação das microfissuras (criadas no início do carregamento de tração) e aumentar a resistência à tração, enquanto as macrofibras atuaram nas macrofissuras e aumentaram a ductilidade.

Kim et al. (2011) analisaram o desempenho à flexão de CUADRF combinando uma macrofibra de aço com uma microfibra de aço (l_f/d_f de 13/0.2). Os autores utilizaram quatro macrofibras de aço por vez, sendo uma reta (l_f/d_f de 30/0.3), duas com ganchos das extremidades (l_f/d_f de 30/0.375 e l_f/d_f de 62/0.775), e uma torcida (l_f/d_f de 30/0.3). O volume de macrofibras foi fixado em 1%, enquanto o de microfibras variou entre 0, 0.5, 1 e 1.50%. O desempenho à flexão (deslocamento e tenacidade) do CUADRF híbrido foi superior ao CUADRF com apenas microfibra de aço. Segundo os autores, a melhora na resistência à tração na flexão, capacidade de deslocamento e tenacidade foi influenciada pelo tipo de macrofibras e pelo volume de microfibras. A ordem do desempenho à flexão (tensão, deslocamento e energia absorvida) do concreto híbrido, utilizando 1% de macrofibras e 1.5% de microfibras, de acordo com os tipos de macrofibra foi: fibras com ganchos (l_f/d_f de 62/0.775) > torcidas (l_f/d_f de 30/0.3) > retas longas (l_f/d_f de 30/0.3) > fibras com ganchos (l_f/d_f de 30/0.375).

Park et al. (2012) analisaram o efeito da hibridização de microfibra reta de aço (l_f/d_f 13/0.20) com macrofibra de aço no comportamento à tração de CUADRF com resistência à compressão de 200 MPa. Os autores utilizaram quatro macrofibras: uma reta (l_f/d_f 30/0.30), duas com ganchos nas extremidades (l_f/d_f 30/0.375 e (l_f/d_f 62/0.775) e uma torcida (l_f/d_f 30/0.30). Segundo os autores, o formato da curva tensão-deformação à tração depende, principalmente, das macrofibras, entretanto, as microfibras influenciam na

deformação por endurecimento e na formação de múltiplas fissuras. A hibridização com microfibras de aço e macrofibras torcidas apresentaram o melhor desempenho, com tensão de ruptura à tração de 18.6 MPa, deformação de 0.64% e espaçamento médio entre as fissuras de 3.8 mm, de acordo com os autores, isso ocorreu, porque as macrofibras não uniformes (não retas) geram maior degradação na matriz em relação as macrofibras retas longas, devido a interação entre a fibra e matriz para ativar aderência mecânica. Os autores relataram que a tensão de ruptura à tração é mais influenciada pela adição de microfibras do que a tensão de formação da primeira fissura, pois as microfibras favorecem o aparecimento de múltiplas fissuras, ao conterem a propagação das microfissuras.

Ghafari, Costa e Julio (2013) avaliaram o efeito da porcentagem volumétrica de dois tipos de microfibras de aço (l_f/d_f 13/0.2 e l_f/d_f 10/.15) na fluidez e resistência à tração na flexão em CUADRF híbrido tendo 150 MPa de resistência à compressão. De acordo com os autores, o volume máximo de fibras híbridas deve ser de 2.5% para obter uma boa fluidez. Utilizando um volume de 2.5% da microfibra de 10 mm e 1% da microfibra de 13 mm, os autores obtiveram uma CUADRF com a maior resistência à tração na flexão de 42 MPa. Além disso, eles observaram que a hibridização resultou no aperfeiçoamento do desempenho do CUADRF em comparação com o CUADRF com apenas um tipo de fibras. Para os autores, para que o CUADRF híbrido atenda os critérios de auto-adensabilidade, o volume total de microfibras de aço deve ser de 1.75%.

Yu, Spiesz e Brouwers (2014a) analisaram a fluidez, as propriedades estáticas e a resistência ao impacto de concreto de ultra-alto desempenho híbrido com duas fibras de aço retas (FAI l_f/d_f 13/0.2 e FAc l_f/d_f 6/0.16). Os autores utilizaram um volume total de fibras de 2% em relação ao volume do concreto, variando o volume entre as microfibras de 0.5, 1 e 1.5%. Os autores observaram que a adição de microfibras em CUADRF com macrofibras, tende a aumentar a fluidez do concreto, pois as fibras maiores irão funcionar como uma barreira para as fibras menores e podem resistir a rotação das fibras menores (Figura 18), e vice-versa. A resistência à compressão foi maior para os traços híbridos, de acordo com os autores, foi devido as fibras conterem a propagação das fissuras. A Figura 19 apresenta as curvas tensão-deformação de flexão dos traços desenvolvidos pelos autores. É possível verificar que os traços híbridos apresentaram os melhores desempenhos, pois as microfibras atuaram para conter a propagação das microfissuras e as macrofibras contém a propagação das macrofissuras. O CUADRF híbrido de melhor desempenho foi com a adição de

1.5% de fibras longas (FAI) e 0.5% de fibras curtas (FAc), que obteve 30.9 MPa de resistência à tração na flexão e 141.5 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

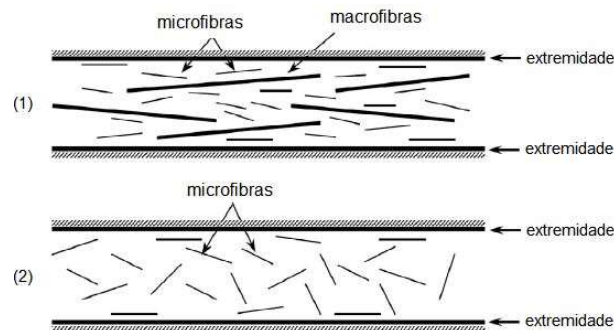


Figura 18: Orientação das fibras menores entre as extremidades do molde combinadas com fibras maiores (1) e quando somente elas são utilizadas (2) (Adaptado de MARKOVIC, 2006)

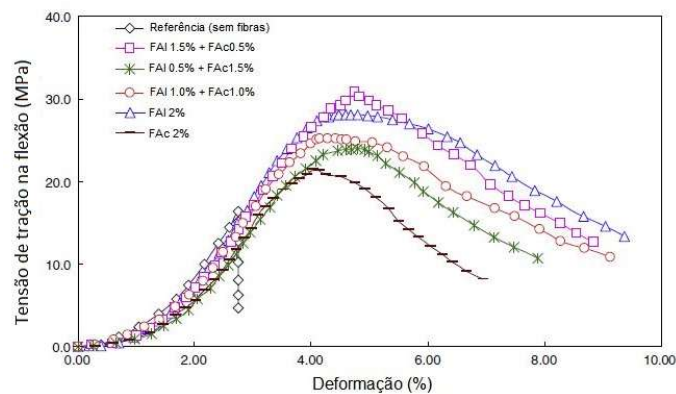


Figura 19: Curvas tensão-deformação de tração na flexão para CUADRF aos 28 dias (Adaptado de YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a)

Tran e Kim (2017) analisaram a sinergia sob esforços de tração simples sob altas taxas de deformação entre CUADRF híbrido com 1% de fibras de aço longa e 0.5% de fibras curtas de aço e CUADRF com 1.5% de apenas um tipo de fibra de aço. Os autores utilizaram fibras longas de 30 mm torcida, com ganchos nas extremidades e retas, e fibras retas curtas de 13 mm. As fibras curtas foram retas, sendo uma com $l_f = 19$ e $d_f = 0.2$ e a outra $l_f = 13$ mm e $d_f = 0.2$ mm. Os traços apresentaram comportamento de deformação por endurecimento, com múltiplas microfissuras e alta resistência à tração de até 12.4 MPa, deformação de tração de até 0.71%, tenacidade de até 75.1 kJ/m³ e energia da fratura de até 35 kJ/m². O concreto contendo 1% de macrofibras longas e 0.50% de microfibras apresentou maior efeito sinérgico com relação a capacidade de deformação e tenacidade sob altas taxas de deformação e a maior resistência à tração sob altas taxas de deformação e obteve 32.6 MPa, 1.87%, 412.6 kJ/m³ e 31.3 kJ/m², de resistência à tração, capacidade de deformação, tenacidade e energia da fratura, respectivamente. Para os autores, este

concreto é promissor para ser aplicado em infraestrutura por aumentar a resistência ao impacto e carga de explosão e por ter um custo relativamente baixo.

Para melhorar o desempenho à tração do CUADRF, Yoo e Kim (2019) substituíram parte das fibras de aço por fibras de polietileno (lf/df 12/0.031). O CUADRF foi composto por um único tipo de fibras de aço e um tipo de fibra de polietileno. Os autores utilizaram fibras retas pequenas de aço (lf/df 13/0.2), fibras retas maiores de aço (19.5/0.2) e fibras torcidas de aço (lf/df 30/0.30). A tensão de tração simples reduziu com o aumento da substituição das fibras de aço por fibras de polietileno, pois as fibras de polietileno por terem maior fator de forma, se tornam mais difíceis de serem distribuídas uniformemente, e geram uma seção mais fraca. Porém, a capacidade de deformação e a capacidade de absorção de energia para o CUADRF híbrido foi superior ao CUADRF com apenas fibras de aço.

Chun e Yoo (2019) investigaram o efeito da hibridização do CUAD com uma macrofibra e uma microfibra de aço no comportamento de arrancamento e tração. Para isso, utilizaram microfibras retas de aço (ss, lf/df 12/0.20) combinando com um tipo de macrofibra, sendo retas (S, lf/df 30/0.30), com ganchos nas extremidades (H, lf/df 30/0.375) e torcidas (T, lf/df 30/0.30). A resistência de aderência aumentou para o concreto híbrido com macrofibras retas e reduziu para as fibras com ganchos e torcidas, devido ao aumento da área de aderência. De acordo com os autores, o desempenho à tração simples melhorou com a hibridização de macrofibras com ganchos ou torcidas com as microfibras retas, devido a limitação dos mecanismos de degradação na matriz.

O CUADRF híbrido com fibras de aço também pode apresentar aumento da resistência ao cisalhamento, tenacidade no pico do cisalhamento com taxa estática e sob altas taxas de deformação em comparação com CUADRF com apenas um tipo de fibras de aço (HOAN; THUONG, 2019). Além disso, a hibridização de fibras, sendo um delas sintética, tende a aumentar a resistência ao fogo do CUADRF (PARK et al., 2019). O CUADRF pode apresentar fragmentação explosiva grave devido a dois mecanismos, processo termo-mecânico no qual é gerada uma tensão de tração perpendicular a face aquecida, devido o nível de temperatura induzir o nível de dilatação térmica do material; e o processo termo-hidral no qual a fragmentação ocorre devido aos campos de pressão de vapor que se formam na porosidade do concreto, isto é, com o aumento da temperatura parte da água é evaporada e gera pressão entre os poros do concreto (KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000).

A adição de fibras de aço permite reduzir a retração autógena do CUADRF, pois as fibras de aço não se retraem e possuem alto módulo de elasticidade em comparação com a matriz (MENG; KHAYAT, 2018a). Entretanto, (MENG; KHAYAT, 2018a) reportaram que a utilização de fibras aço com fibras de PVA, pôde reduzir mais retração autógena em comparação com CUADRF com apenas fibras de aço. Isso ocorre, pois, as fibras de PVA consegue controlar a propagação das microfissuras nas primeiras idades.

Devido a microestrutura do CUAD apresentar baixa porosidade, quando esse concreto é submetido ao fogo e altas temperaturas, a liberação de pressão de vapor pode ser prejudicada (CHEN; YU; TANG, 2020). As fibras de aço quando expostas a altas temperaturas são arrancadas ou se rompem após a carga máxima, porém, as fibras sintéticas derretem e proporcionam uma passagem de escape para o vapor, liberando a pressão acumulada e mantem uma certa resistência residual (CHEN; YU; TANG, 2020). Por isso, é interessante a combinação de fibras de aço e sintéticas, como polipropileno (CHEN; YU; TANG, 2020) e PVA (LI et al., 2016), (PARK et al., 2019) no CUADRF.

O CUAD apresenta maior resistência ao congelamento-descongelamento em comparação com concreto convencional (TAI et al., 2020), (HASNAT; GHAFOORI, 2021), devido a baixa porosidade (XINCHENG; JIXIN; MILESTONE, 2012). Porém, acredita-se que hibridização de fibras de aço e de PVA possa aumentar a resistência ao congelamento-descongelamento do CUADRF. (XIE et al., 2021) investigaram o comportamento ao congelamento-descongelamento para um concreto convencional com fibras de aço e de PVA. Os autores verificaram que as fibras de PVA apresentaram boa resistência ao congelamento-descongelamento com 150 ciclos e com 175 ciclos, apresentaram uma superfície levemente descascada e irregular. Porém, as fibras de aço quando expostas aos 50 ciclos, começaram a descascar mesmo com a presença de revestimento de cobre, e ao aumentar o número de ciclos, a deterioração foi ainda maior, severamente corroídas. Por isso, a inclusão de fibras híbridas pode aproveitar as vantagens de cada tipo de fibra e aumentar a resistência ao gelo e a tenacidade à flexão do concreto (LUO; WANG; NIU, 2020).

A hibridização com microfibras traz vantagens adicionais ao concreto, pois causa o efeito de preenchimento, que resulta na redução da porosidade; aumenta a resistência de aderência entre cimento e agregado, devido a modificação da interface; e melhora a resistência de aderência entre fibra-matriz (AHMAD; KHAN; SMARZEWSKI, 2021).

3. EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O objetivo da dosagem do CUAD é minimizar o número de poros e microfissuras na matriz (MISHRA; SINGH, 2019). Para isso, normalmente, são utilizados métodos de empacotamento de partículas para otimizar a distribuição do tamanho das partículas dos materiais constituintes do concreto. O empacotamento de partículas é a seleção apropriada da proporção e dos tamanhos dos materiais para que os vazios grandes sejam preenchidos por partículas médias, que os vazios médios sejam preenchidos por partículas pequenas, e assim por diante (MCGEARY, 1961). A Figura 20 faz uma comparação da otimização da mistura entre concreto convencional e CUAD.

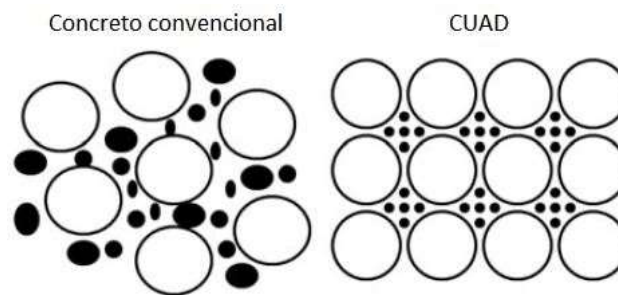


Figura 20: Comparação da dosagem ótima entre concreto convencional e CUAD (Adaptado de MISHRA; SINGH, 2019)

A eficiência do empacotamento (P_e) é a relação entre o volume de sólidos (V_s) e o volume total (V_t) da mistura, sendo o volume total a soma do volume de sólidos (V_s) mais o volume dos vazios (V_v) (Equação 1) (FUNK; DINGER, 1994). A densidade ou fator de empacotamento (P_f) pode ser calculado através da eficiência de empacotamento conforme Equação 2, em porcentagem (%) (FUNK; DINGER, 1994). A porosidade (P_0) é o volume de vazios entre as partículas de um sistema e pode ser calculada conforme Equação 3 (FUNK; DINGER, 1994).

$$P_e = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_s}{(V_s + V_v)} \quad \text{Equação 1}$$

$$P_f = \frac{P_e}{100\%} \quad \text{Equação 2}$$

$$P_0 = 100\% (1 - P_f) \quad \text{Equação 3}$$

O uso de um modelo de empacotamento de partículas é importante para o desenvolvimento de um concreto com proporções racionais dos materiais e reduzir o número de ensaios experimentais para encontrar a proporção ideal entre os materiais (RAGALWAR et al., 2020). Utilizando técnicas de empacotamento na produção de CUAD, é possível reduzir a porosidade e a quantidade de água necessária (quantidade mínima) (RANDL et al., 2014) para preencher os vazios da mistura, resultando no desenvolvimento de uma microestrutura densa e homogênea, na redução da quantidade de aglomerantes (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c) e na melhora nas propriedades mecânicas (HÜSKEN; BROUWERS, 2008), (WANG et al., 2019).

Segundo Riva (2010), existem dois sistemas de empacotamento, um denominado monodisperso que é um sistema composto por grãos esféricos de tamanho uniforme em estado de empacotamento aberto (densidade mínima) (Figura 21-a); e o polidisperso que é constituído por uma distribuição gradual do tamanho dos grãos, onde os grãos menores preenchem os espaços vazios entre os grãos maiores em uma sucessão ideal, conduzindo a densidade máxima (ou empacotamento) (Figura 21-b) (FUNK; DINGER, 1994). A Figura 21-c e Figura 21-d apresentam sistemas onde estão faltando partículas pequenas e grandes, respectivamente. A Figura 21-e apresenta um sistema em que a segunda maior partícula é muito grande para preencher os vazios entre as maiores partículas, resultando no menor empacotamento. Por isso, tanto o tamanho das partículas quanto a proporção dos materiais são importantes para a eficiência do empacotamento (ROY; SCHEETZ; SILSBEE, 1993).

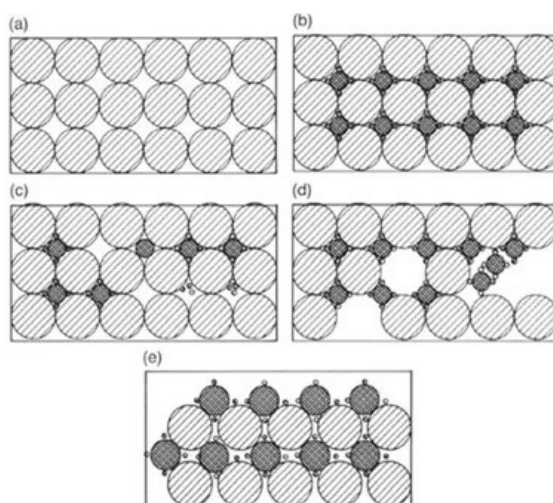


Figura 21: Efeito da quantidade e do tamanho de partículas na eficiência do empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição incompatível de tamanhos de partículas (ROY; SCHEETZ; SILSBEE, 1993)

Através da otimização da distribuição de partículas dos materiais secos do concreto é possível aumentar a quantidade dos materiais cimentícios suplementares sem ocasionar perdas nas propriedades nas primeiras idades (JUENGER; SIDDIQUE, 2015). A escolha dos aglomerantes para a composição do CUAD deve ser determinada a partir do empacotamento de partículas, pois devido a relação $a/aglom$ ser muito baixa, pode reduzir a hidratação do cimento (ARORA et al., 2018).

Os componentes do concreto possuem diferentes morfologias, podendo ser esférica, irregular ou lamelar. Quanto mais esféricas forem as partículas dos materiais, maior será o empacotamento, pois elas provocam menor atrito entre as suas superfícies (LOPES, 2019).

Com relação a granulometria das partículas, podem ocorrer dois efeitos em uma mistura, o efeito de parede e o efeito de afastamento (Figura 22). Se em uma mistura existir dois materiais que possuem os diâmetros das partículas muito diferentes, pode ocorrer o efeito parede, pois a superfície de contato das partículas maiores funcionará como um plano de contato com as partículas mais finas, e assim, aumentará os vazios entre as regiões próximas à superfície das partículas maiores. O efeito de afastamento ocorre quando partículas finas são inseridas em uma composição de partículas de diâmetros maiores e não são grandes o suficiente para preencher os vazios entre as partículas de diâmetros maiores, aumentando a taxa de vazios da mistura (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

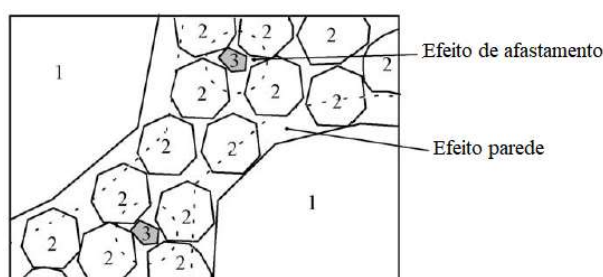


Figura 22: Efeito parede e efeito de afastamento, (DE LARRARD; SEDRAN, 2002)

As partículas muito finas tendem a se aglomerar e formar fragmentos em contato com líquido (WILLE; NAAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011), aumentando o diâmetro efetivo da composição, reduzindo o número de partículas, aumentando a porosidade (FUNK; DINGER, 1994), e conseqüentemente, reduzindo o empacotamento. As partículas finas possuem atração de Van der Waals (interação atrativa entre as moléculas de duas partículas), porque são numerosas e estão mais próximas uma das outras, por isso, se

aglomeram mais facilmente (FUNK; DINGER, 1994). Portanto, a dispersão de partículas deve ser feita de maneira apropriada. Por exemplo, durante a produção do concreto, os materiais secos devem ser misturados antes da adição de água e superplastificantes (WILLE; NAAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011) para que a curva de distribuição granulométrica não se altere.

Apesar das leis de empacotamento desconsiderar os poros internos das partículas e considerarem as partículas tendo ausência de poros, se em uma composição, as partículas tiverem poros abertos, isso acarretará na redução do empacotamento (RIVA, 2010). O empacotamento de uma composição pode ser modificada devido a porosidade interna das partículas (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). As partículas podem ter porosidade interna totalmente densa (isenta de poros) (Figura 23 a), porosidade interna fechada (Figura 23 b), porosidade interna aberta (Figura 23 c). O máximo empacotamento pode ser obtido para composições com partículas com ausência de poros e com a menor porosidade possível, porém, essas partículas não são as mais comuns. As partículas com porosidade interna fechada são semelhantes às densas para efeito de distribuição granulométrica, porém, geram uma densidade de empacotamento menor. Já as partículas com porosidade interna aberta, absorvem mais líquidos devido aos seus poros, necessitando de uma maior quantidade de líquidos na mistura e resultando em um menor empacotamento em comparação com os outros tipos de porosidade.

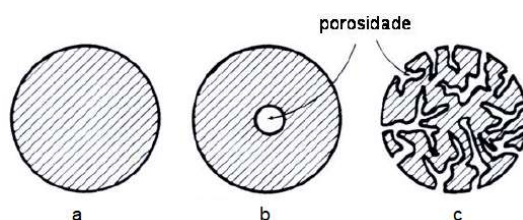


Figura 23: Ilustração da porosidade interna de partículas: (a) ausência de poros, (b) fechada, (c) aberta (Adaptado de GERMAN (1989) apud RIVA (2010))

Se em uma determinada composição existir uma diferença significativa entre as densidades dos componentes, a compactação da mistura deverá ser feita cuidadosamente para que não ocorra segregação, pois pode ocasionar diferentes níveis de densidade de empacotamento na mistura prejudicando o desempenho da composição (OLIVEIRA et al. (2000) *apud* OLIVEIRA, (2013)).

O modo de inserção dos materiais também pode influenciar no empacotamento. Por isso, deve ser feita de maneira equilibrada a partir de uma técnica de compactação, por exemplo, vibração, para que os

vazios dos grãos maiores sejam preenchidos pelos grãos menores, obtendo assim, o empacotamento máximo (LOPES, 2019).

Diferentes modelos de empacotamento de partículas têm sido utilizados para otimizar a distribuição granulométrica do CUAD, como o Modelo de Empacotamento Compressível (ARORA et al., 2018), o Modelo de Suspensão Sólida (DE LARRARD; SEDRAN, 1994), e o modelo de Andreasen e Andersen modificado (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c), sendo este um modelo contínuo e o mais utilizado, por isso, será revisado neste trabalho. Normalmente, o teor de aglomerantes é alto para a produção de CUAD, porém, utilizando essa técnica é possível reduzir significativamente esse teor (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b).

3.1.MODELOS DE EMPACOTAMENTO

Existem dois tipos de modelos de empacotamento, discretos e contínuos. Porém, para este trabalho será discutido, principalmente, o modelo contínuo de Andreasen e Andersen modificado por ser o mais utilizado para dosagem de CUAD.

3.2.MODELOS DISCRETOS

Este modelo considera uma mistura com dois ou mais tamanhos de partículas, dentro de um intervalo de tamanho, onde as partículas maiores formam o esqueleto granular e os seus vazios devem ser preenchidos por partículas menores, e assim por diante, na ordem decrescente do tamanho das partículas, entretanto, considera que as partículas para um mesmo material sejam todas do mesmo tamanho (monodispersas) (FUNK; DINGER, 1994).

A primeira publicação sobre empacotamento de partículas para concreto foi escrita por Feret em 1892 (DE LARRARD; SEDRAN, 1994), onde foi apresentado que o empacotamento dos agregados afetavam as propriedades do concreto no estado endurecido, e para o pesquisador, a obtenção da máxima resistência à compressão só ocorreria com a obtenção da mínima porosidade entre os grãos dos materiais constituintes do concreto (HÜSKEN; BROUWERS, 2008), (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). O conceito fundamental

do modelo de Feret era que cada tamanho de partícula ocupasse todo o espaço possível dentro do volume disponível no sistema (KUMAR; SANTHANAM, 2003), (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

3.2.1. MODELO DE FURNAS

No século seguinte, em 1928, Furnas desenvolveu um modelo no qual o máximo empacotamento de partículas ocorreria em composições binárias, considerando que as partículas de um mesmo material seriam todas do mesmo tamanho (monodispersas), entretanto, a produção de um sistema com partículas monodispersas é muito difícil de ser obtida (FUNK; DINGER, 1994). Alguns anos depois, Furnas (1931) aperfeiçoou a sua teoria e apresentou que o empacotamento máximo ocorreria com três ou mais tamanhos de partículas discretas presentes em um mistura e que a densidade seria obtida em função das quantidades e tamanhos de partículas presentes na composição. Segundo o autor, o máximo empacotamento de partículas originava-se de uma progressão geométrica e pode ser calculado pela Equação 4 (FURNAS, 1931).

$$\frac{CPFT}{100} = \left(\frac{r^{\log D_P} - r^{\log D_S}}{r^{\log D_L} - r^{\log D_S}} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D_P (%); D_P é o diâmetro da partícula (μm); D_S é o diâmetro da menor partícula; D_L é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas. Para Furnas (1931), para que um concreto apresentasse a melhor combinação de resistência, durabilidade e economia, os materiais deveriam ser selecionados de modo a preencher o máximo de vazio possível, por isso, estendeu a sua solução discreta de multicomponentes para distribuição contínua (FUNK; DINGER, 1994), (HÜSKEN; BROUWERS, 2008).

3.2.2. MODELO DE DE LARRARD E SEDRAN

De Larrard e Sedran (1994) desenvolveram o Modelo Linear de Empacotamento de Partículas a partir do modelo de suspensões multimodais de Mooney (1951). As funções desse modelo descrevem a interação entre interações binárias entre as classes de tamanho dos materiais utilizados. Devido ao caráter linear, o modelo foi aprimorado por De Larrard e Sedran (1994) que introduziram o conceito de densidade de empacotamento virtual, sendo essa a densidade máxima de empacotamento, e que só é possível ser obtida se as partículas forem colocadas uma a uma, sem alterar o seu formato (DE LARRARD; SEDRAN, 2002), e esse novo modelo foi denominado Modelo de Suspensão Sólida. Esse modelo também foi aperfeiçoado (DE LARRARD; SEDRAN, 2002), denominado Modelo de Empacotamento Compressível. A alteração foi feita com a introdução de um índice de compactação. Este índice considera a diferença entre a densidade real de empacotamento e a densidade virtual de empacotamento e, portanto, caracteriza o processo de colocação dos materiais. Porém, esses modelos calculam o empacotamento de mistura com partículas com apenas um tamanho (monodispersas) para realizar uma previsão do empacotamento de mistura com partículas com vários tamanhos (HÜSKEN; BROUWERS, 2008), além disso, a inclusão de partículas finas a esses modelos é complicada, pois é difícil determinar a fração de empacotamento desses materiais e suas combinações (YU et al., 2014).

3.3. MODELOS CONTÍNUOS

O modelo considera que em um sistema de distribuição de partículas possa existir todos os tamanhos de partículas possíveis para um mesmo material (polidisperso) (FUNK; DINGER, 1994).

3.3.1. MODELO DE FULLER E THOMPSON

Fuller e Thompson (1907) propuseram um modelo contínuo de empacotamento de partículas em que a máxima densidade é conhecida como curva ideal de “Fuller” (KUMAR; SANTHANAM, 2003), (RIZWAN; AHMAD; BIER, 2012), (MANGULKAR; JAMKAR, 2013), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b). Segundo os autores, as propriedades do concreto são influenciadas pelo empacotamento dos agregados (YU; SPIESZ;

BROUWERS, 2014b). O máximo empacotamento da mistura é obtido a partir da distribuição contínua de partículas e pode ser obtido pela Equação 5 (FULLER; THOMPSON, 1907).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D}{D_{\text{máx}}} \right)^q \quad \text{Equação 5}$$

Onde, CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (μm); $D_{\text{máx}}$ é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); q é o coeficiente de distribuição. Para obtenção do empacotamento pelo modelo de Fuller e Thompson o valor de q deveria ser igual a 0.50 (HÜSKEN; BROUWERS, 2008), (RIZWAN; AHMAD; BIER, 2012), e posteriormente, esse valor foi alterado para 0.45 (MANGULKAR; JAMKAR, 2013). Esse modelo tem sido utilizado na dosagem de mistura de pavimentação de rodovias para minimizar a porosidade entre os grãos (KUMAR; SANTHANAM, 2003), (MANGULKAR; JAMKAR, 2013), (RIZWAN; AHMAD; BIER, 2012).

3.3.2. MODELO DE ANDREASSEN & ANDERSEN

A partir dos trabalhos de Furnas (1931) e Fuller e Thompson (1907), Andreasen (1930) desenvolveu o modelo denominado Andreasen & Andersen (A&A). Esse modelo utiliza a mesma expressão (Equação 5) do modelo de Fuller e Thompson (1907). Porém é considerado como uma teoria semi-empírica, pois o máximo empacotamento ocorreria a partir de uma condição de similaridade entre duas partículas de tamanhos bem diferentes (FUNK; DINGER, 1994). A condição de similaridade seria atendida quando a região ao redor dessas partículas de diferentes tamanhos fosse similar. A verificação dessa condição de similaridade era realizada através de fotografias, e as ampliações deveriam apresentar as partículas com um mesmo tamanho nas fotografias. Andreasen e Andersen verificaram que o valor de q deveria estar entre 0.33 e 0.50, ou seja, inferior ao valor proposto por Fuller e Thompson (1907) (FUNK; DINGER, 1994), (RIZWAN; AHMAD; BIER, 2012). Portanto, a diferença entre o modelo de Andreasen & Andersen e o modelo de Furnas está no valor do coeficiente de distribuição e que para utilizar esse modelo era necessário que ocorresse a condição de similaridade.

3.3.3. MODELO DE ANDREASSEN & ANDERSEN MODIFICADO

Os modelos apresentados anteriormente não consideravam as partículas mínimas no cálculo do empacotamento, o que não remete com a realidade, pois em uma mistura existe um tamanho mínimo finito que, também, afeta o empacotamento (FUNK; DINGER, 1994). Por isso, em 1980, Funk e Dinger desenvolveram o modelo de Andreasen & Andersen modificado (A&Am), baseando-se nos modelos de Furnas e de Andreasen e Andersen, incluindo o fator de proporcionalidade que não existia na equação de Furnas e o tamanho da menor partícula que não era considerado na equação de Andreasen e Andersen. Pode ser obtido através da Equação 6 (FUNK; DINGER, 1994).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D (%); D é o diâmetro da partícula (μm); $D_{\min}$ é o diâmetro da menor partícula; $D_{\max}$ é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); q é o coeficiente de distribuição. Ainda em 1980, Funk e Dinger utilizaram simulações computacionais para demonstrar a influência do valor do coeficiente de distribuição no empacotamento e verificaram que o empacotamento máximo ocorreria para $q = 0.37$ (FUNK; DINGER, 1994).

O coeficiente de distribuição influencia no empacotamento por determinar a proporção entre partículas finas e grossas da composição (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a). A redução do valor de q aumenta a quantidade de partículas finas, influenciando diretamente a interação entre as partículas, e quando combinado com água resulta em líquido viscoso (VANDERLEI, 2004). Valores altos, como $q > 0.50$, levam a uma composição com maior porcentagem de agregados graúdos, enquanto, valores menores, como q menor que 0.25, resultam em misturas com maior porcentagem de partículas finas (HÜSKEN; BROUWERS, 2008). Alguns pesquisadores recomendam que para concreto de alto desempenho e concreto convencional, o valor de q esteja entre 0.25 e 0.30 dependendo da fluidez desejada. Para concreto com maior fluidez, como concreto auto-adensável, o valor de q deve ser < 0.23 , e para concreto compactado de rolo, o valor de q deve ser > 0.32 (KUMAR; SANTHANAM, 2003), (MANGULKAR; JAMKAR, 2013). Por isso, esse fator deve ser analisado para a composição do CUAD.

3.4.DOSAGEM DE CONCRETO UTILIZANDO O MODELO A&Am

O modelo de Andreasen & Andersen modificado tem sido utilizado para otimização da dosagem dos materiais para a produção de concreto convencional e concreto leve (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b) e também para concreto de ultra-alto desempenho (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b), (RAGALWAR et al., 2020). É a partir da obtenção da curva do modelo A&Am, que as proporções dos materiais são determinadas. Para isso, a curva do modelo calculada de acordo com a Equação 6, deverá ser considerada como a ser atingida. Sendo que as proporções dos componentes do concreto são ajustadas até que a curva da mistura se sobreponha à curva ideal do modelo. A curva da mistura será calculada conforme Equação 7 (RAGALWAR et al., 2020) através de uma otimização de algoritmos baseada no método dos mínimos quadrados.

$$P_{mist} = \sum_{i=1}^n v_i PSD_i \quad \text{Equação 7}$$

Onde P_{mist} é o somatório da distribuição de partículas de todos os componentes do concreto, n é o número de componentes, v_i é a razão entre o volume do material pelo volume total de todos os materiais; e PSD é a distribuição do tamanho de partícula do componente.

São necessárias que sejam feitas restrições nas proporções dos materiais durante o cálculo da mistura do concreto, pois, segundo Ragalwar et al. (2020), o cálculo sem restrições pode gerar proporcionamento irreal dos materiais. Quando a diferença entre a curva da mistura e a curva ideal, expressa pela Equação 8, for a menor possível, então, essa mistura será considerada a melhor para composição do concreto (HÜSKEN, 2010).

$$S = \sum_{j=1}^m \left(P_{mist}(D_j) - P_{ideal}(D_j) \right)^2 \quad \text{Equação 8}$$

Onde S é a somatória dos quadrados dos resíduos; D diâmetro da partícula; P_{mist} é a curva referente à combinação dos materiais do concreto; e P_{ideal} é a curva referente ao modelo de Andreasen e Andersen modificado.

Uma das formas de avaliar a qualidade do ajuste da curva é através do coeficiente de determinação (R^2) e pode ser calculado conforme a Equação 9. Esse coeficiente é a correlação entre a curva do modelo (curva ideal) e a curva da mistura (HÜSKEN, 2010).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \left(P_{mist} \left(D_{j_i}^{i+1} \right) - P_{ideal} \left(D_{j_i}^{i+1} \right) \right)^2}{\sum_{j=1}^m \left(P_{mist} \left(D_{j_i}^{i+1} \right) - \overline{P_{mist}} \right)^2} \quad \text{Equação 9}$$

Com o uso do empacotamento de partículas na produção do CUAD é possível produzir um concreto com uma alta resistência à compressão, com maior durabilidade, melhora na resistência ao congelamento e descongelamento, maiores resistências aos produtos químicos e a alta penetração (WILLE; NAAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011).

A Tabela 5 apresenta algumas pesquisas que utilizaram o modelo de A&Am para o desenvolvimento do CUAD e CUADRF, com o valor utilizado para o coeficiente de distribuição e o desempenho à compressão obtido para o concreto. A maioria das pesquisas se basearam no coeficiente de distribuição utilizado por Yu, Spiesz e Brouwers, (2014c) sendo q igual a 0.23.

O interesse na utilização do modelo de Andreasen e Andersen modificado para a composição de CUAD/CUADRF se deve ao fato desse modelo incluir os diâmetros mínimos e máximos existentes em uma composição e ser mais condizente com a realidade de uma mistura. Além disso, através da utilização do modelo é possível reduzir o impacto ambiental (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015a), (RAGALWAR et al., 2016), (YU et al., 2017), (WANG et al., 2019), e obter um teor de aglomerantes, significativamente, baixo, como, por exemplo 440 kg/m³ (YU et al., 2014), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c) para produzir CUAD/CUADRF.

Tabela 5: Pesquisas que se basearam no modelo modificado de A&A

Referência	Traço	q	f _c (MPa)		
			14 (dias)	28	3 (meses)
Arunothayan et al. (2019)	CUAD	0,23	125,4	-	-
	CUADRF		156,4	-	-
Christ (2019)	CUAD	0,20	-	102	120
	CUADRF		-	127	-
Christ et al. (2019)	-	0,20	-	160	-
El-Tawil et al. (2018)	-	0,20 a 0,25	-	169,2	-
El-Tawil et al. (2020)	-	0,22 a 0,25	-	192	-
Krahl (2018)	CUAD	0,23	-	131,5	-
	CUADRF		-	150,5	-
Kumar et al. (2020)	-	0,1 a 0,2	-	160	-
Li; Yu; Brouwers (2018)	-	0,22	-	142	-
Meng (2017)	-	0,23	-	126	-
Meng, Valipour e Khayat (2017)	-	0,23	-	124	-
Pacheco et al. (2018)	-	-	-	228	-
Ragalwar et al. (2020)	-	-	-	143,8	-
Song et al. (2018)	-	0,23	-	155	-
Tai et al. (2020)	-	0,22	-	150	-
Wang et al. (2019)	-	-	-	133	-
Yu et al. (2014)	-	0,23	-	140	-
Yu; Spiesz; Brouwers (2014)	-	0,23	-	118	128
Yu et al. (2017)	-	0,23	-	125	-
Yu, Spiesz e Brouwers (2015)	-	0,23	-	142	-
Yu; Spiesz; Brouwers (2016)	-	0,23	-	140	-
Yu; Spiesz; Browers (2014b)	-	0,23	-	140	-
Yu et al. (2016)	-	0,23	-	135	-
Yu; Spiesz; Brouwers, (2014c)	-	0,23	-	135	-

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em três etapas: caracterização dos materiais, desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho e desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras híbrido (Figura 24). Na primeira etapa, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, como granulometria, densidade, componentes existentes nos materiais e análise da morfologia das partículas. A segunda etapa consistiu no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho utilizando diferentes combinações de materiais, realizando-se a dosagem através do empacotamento de partículas com base no modelo de Andreasen & Andersen modificado. Com a obtenção do CUAD, escolheu-se o de melhor desempenho referente a auto-adensabilidade, índice de vazios e resistência à compressão, e iniciou-se a terceira etapa que consistiu no desenvolvimento do CUADRF. Nessa etapa, foram produzidos três traços, sendo um sem fibras (referência), um somente com fibras de aço e outro híbrido (fibras de aço e PVA). Os traços foram avaliados quanto à auto-adensabilidade e propriedades mecânicas. Além disso, realizou-se o ensaio de pullout para fibras metálicas embutidas no CUADRF híbrido.

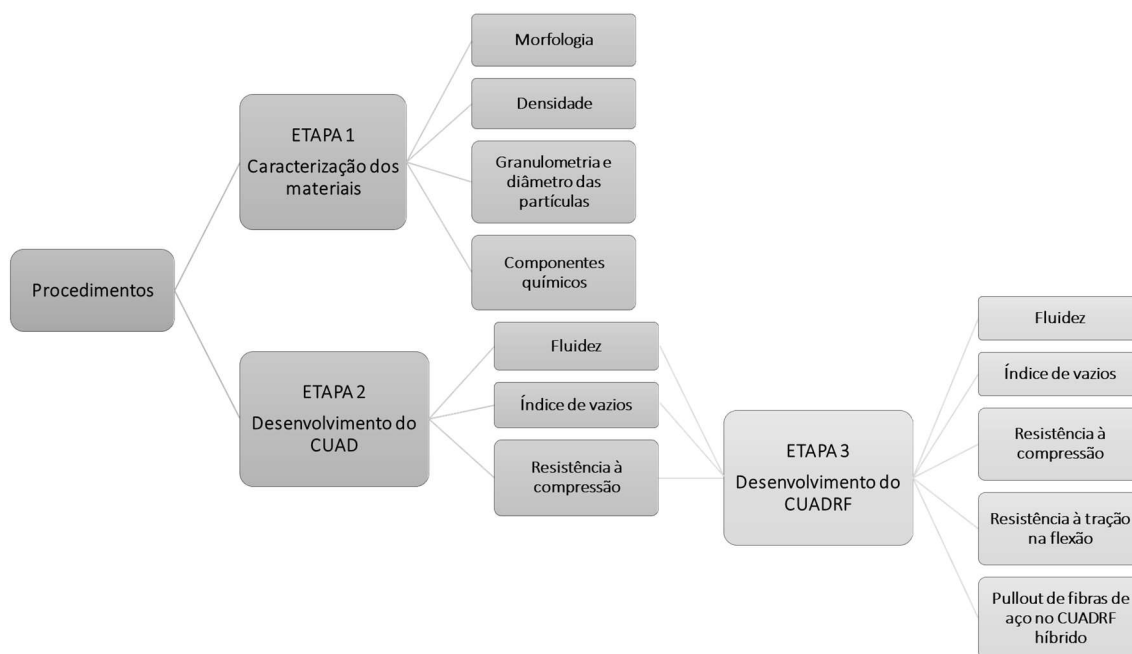


Figura 24: Fluxograma principal do programa experimental

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa, utilizou-se materiais disponíveis no mercado brasileiro, com exceção das fibras de aço. Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) da marca Votorantim modelo Obras Especiais; sílica ativa não densificada da marca Elkem; areia fina com diâmetro máximo de 0.42 mm de acordo com o fornecedor; pó de quartzo com diâmetro máximo de 0.074 mm de acordo com o fornecedor; cinza volante, classificada como Classe C (ABNT NBR 12653:2014) pelo fornecedor; metacaulim HP Ultra da marca Metacaulim do Brasil; superplastificante à base de policarboxilato, denominado ADVA Flow 880, da marca GCPAT, com densidade entre 1.08 a 1.12 g/cm³, teor de sólidos entre 44 a 48 %; fibras de aço revestidas de cobre de $l_f = 13$ mm, $d_f = 200$ μ m, 2850 MPa de resistência à tração, 200 GPa de módulo de elasticidade e densidade igual a 7.8 g/cm³; fibras de álcool polivinílico, denominadas RF400, com $l_f = 6$ mm, $d_f = 200$ μ m, 975 MPa de resistência à tração, 27 GPa de módulo de elasticidade, densidade igual a 1.3 g/cm³ e com ponto de fusão de 240 °C, aproximadamente.

Para caracterizar os materiais realizou-se a Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) para análise da morfologia; Análise do Tamanho de Partículas por Difração à Laser para obter as curvas granulométricas; Fluorescência de Raios-X para determinar os componentes presentes nos materiais; e para determinar a densidade, realizou-se o ensaio de Picnometria a gás Hélio. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da UNICAMP.

4.1.1. DENSIDADE DOS MATERIAIS

A densidade real dos materiais foi determinada através da picnometria a gás Hélio. Para realizar o ensaio, pesou-se a amostras entre 1 a 5 g em um porta-alumínio utilizando uma balança analítica da marca Gehaka, modelo AG 200 (São Paulo, Brasil). Após a pesagem, a amostra foi inserida no picnômetro a gás He, marca Micrometrics, modelo AccuPyc 1330 (Norcross, USA). Para determinar a densidade, são feitas duas medições de pressão: após a inserção da amostra no equipamento, é aplicada uma pressão com o gás He, e quando o sistema entra em equilíbrio, faz-se a primeira medição da pressão. Em seguida, abre-se uma válvula de expansão, e após o sistema entrar em equilíbrio, mede-se essa nova e segunda pressão. Através de equações matemáticas, faz-se a determinação do volume da amostra e sua densidade, utilizando os valores das suas pressões. O equipamento faz a medição e o cálculo automaticamente. O volume real que a

amostra ocupa excluindo-se os poros é definido como a densidade real da amostra. Os materiais obtiveram as seguintes densidades: cimento 3.097 g/cm³; areia 2.655 g/cm³; sílica ativa 2.465 g/cm³; pó de quartzo 2.659 g/cm³; cinza volante 2.125 g/cm³ e o metacaulim 2.677 g/cm³.

4.1.2. GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

Para verificar a distribuição granulométrica dos materiais utilizou-se o Analisador de Tamanho de Partículas por Difração à Laser – Mastersizer-3000 da marca Malvern Instruments, modelo MAZ3000 (Worcestershire, U.K.) (Figura 25). O funcionamento do sistema iniciou-se com as Unidades de dispersão de amostras, são elas que asseguram a chegada das partículas na área de medição do equipamento denominado Bancada óptica. Este equipamento emite um feixe de laser nas partículas da amostra dispersa. A intensidade da luz difundida pelas partículas é medida por detectores espalhados em posições estratégicas. Então, o software do equipamento, além de controlar o processo, faz a análise dos dados de espalhamento para assim calcular a distribuição do tamanho das partículas. O modelo matemático empregado foi o de Mie, que considera que as partículas sejam esféricas e não opacas, levando em conta a difração e difusão da luz na partícula e no meio. A primeira leitura foi feita no branco (vazio) e então foram feitas dez leituras das partículas para cada amostra.



Figura 25: Analisador de Tamanho de Partículas por Difração à Laser, Mastersizer-3000, Esquerda: Via Seca, e Direita: Via úmida

4.1.2.1. VIA SECA

A areia, o cimento, a cinza volante, o metacaulim e o pó de quartzo foram analisados por via seca. Utilizou-se a Unidade Via Seca AERO S para levar os materiais para o analisador. Esta unidade vibra para que o material se disperse e vá até o analisador, e para obter uma maior dispersão utilizou-se ar comprimido. A vibração do equipamento foi de 50 % e a pressão para areia, cinza e metacaulim foi de 2 bar, e para o cimento e o pó de quartzo foi de 3.5 bar.

4.1.2.2. VIA ÚMIDA

A análise da sílica ativa foi realizada em via úmida, pois o material estava com aglomerados difíceis de serem dispersados na Via Seca. Primeiro, testou-se em qual meio líquido a amostra iria se dispersar mais (água destilada, isopropanol e álcool etílico), sendo que o de melhor eficiência foi a água destilada. Foram feitas diversas tentativas para verificar se a sílica ativa estava se dispersando. A sílica ativa foi inserida em bquer com água destilada e levada a Lavadora Ultrassônica da marca Maxiclean modelo 1600 A durante 15 min para se dispersar. Para analisar se as partículas estavam se dispersando, utilizou-se o Microscópio Ótico da marca Leica, modelo DMLM (Cambridge, Inglaterra). Com auxílio de pipeta pingou-se entre 1 e 2 gotas da amostra dispersa em água em lâmina de vidro, e com uma lamínula espalhou-se a amostra. O material foi inserido na Unidade Via úmida Hidro EV, ficando no ultrassom por 20 min para se dispersar mais, e então, foi levado até o analisador.

As curvas granulométricas dos materiais estão apresentadas na Figura 26 e na Figura 27, sendo para porcentagem passante e frequência, respectivamente. Os diâmetros médios obtidos para os materiais foram: cimento 11.7 μm , areia foi 215 μm , cinza volante 79.3 μm , pó de quartzo 34.8 μm , metacaulim 19.4 μm e da sílica ativa 4.33 μm . É possível verificar que a sílica ativa é o menor componente granular tendo um diâmetro pequeno suficiente para preencher os vazios entre o cimento e pó de quartzo (também utilizada no trabalho de Oliveira (2019)); cimento e cinza volante; e cimento e metacaulim.

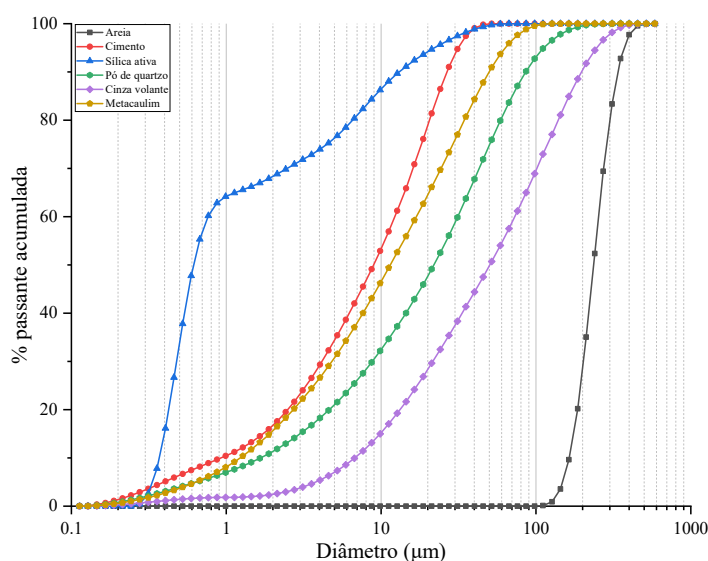


Figura 26: Curvas referentes % passante acumulada - diâmetro dos materiais

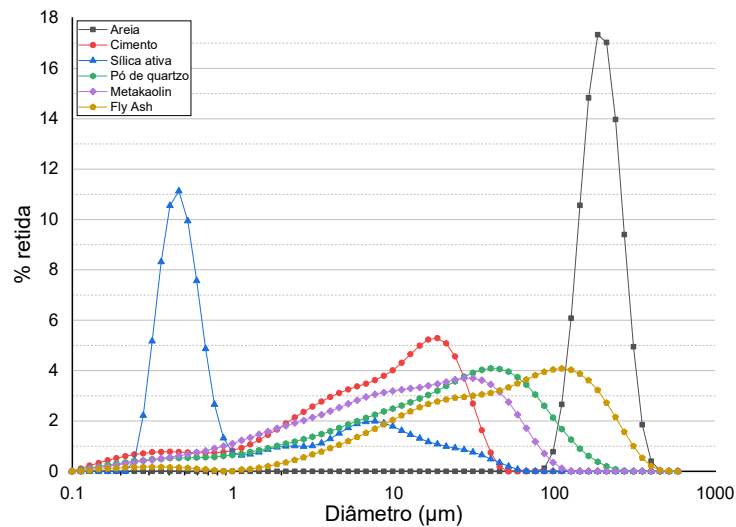


Figura 27: Curvas de frequência-diâmetro das partículas das amostras analisadas

4.1.3. MICROSCOPIA DOS MATERIAIS

Foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com detector de Energia Dispersiva de raios x (EDS), modelo do MEV Leo 440i, modelo do EDS 6070 da marca Leo Electron Microscopy/Oxford (Cambridge, Inglaterra) (Figura 28) para verificar a morfologia da areia, cimento, cinza volante, pó de quartzo, metacaulim e sílica ativa. Esta técnica consiste na varredura da superfície de uma amostra através de um feixe de elétrons, produzido por emissão termiônica (filamento de tungstênio no LRAC). A interação entre o feixe de elétrons e os elétrons da camada de valência dos elementos presentes nas amostras permite a geração de diversos sinais coletados por detectores, e estes sinais são utilizados tanto para a formação de imagens (referentes a morfologia ou topografia), quanto para análise de componentes da amostra (podendo ser determinada por detecção de raios-x), realizada para verificação dos componentes químicos do cimento.



Figura 28: Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de Energia Dispersiva de Raio-X

Para o preparo do ensaio, cada amostra foi espalhada sobre uma lâmina de vidro, pressionada levemente e manualmente contra o porta-amostra de alumínio (Al) (stub) que continha uma fita dupla face de carbono para fixação da amostra. Após a fixação do material, retirou-se o excesso com leves batidas no stub e foi colocado em um suporte. Em seguida, as amostras foram levadas para metalizador, Sputter Coater EMITECH, Modelo: K450 (Kent, Reino Unido) (Figura 29 a). Primeiramente, deixou-se as amostras no vácuo por 15 minutos, depois iniciou-se o processo de metalização com pressão em torno de 0.15 mbar e corrente entre 10 e 15 mA por 2 minutos, e em seguida, ativou-se o plasma para que se realizasse o revestimento de uma fina camada ($200 \text{ \AA} = 20 \text{ nm}$) de ouro (Au) nas amostras (Figura 29 b). Tanto a fita de carbono quanto a camada de ouro emitem elétrons, garantindo uma melhor análise entre o feixe de elétrons do equipamento e os elétrons de cada amostra. Para a realização do ensaio, colocou-se as amostras no equipamento de microscopia com voltagem de 20 kV e corrente de 200/50 mA (para o cimento a corrente foi de 50 mA), gerou-se vácuo dentro do equipamento e iniciou-se a varredura da amostra. As Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 apresentam as imagens da MEV para areia, cimento, cinza volante, metacaulim, pó de quartzo e sílica ativa, respectivamente.

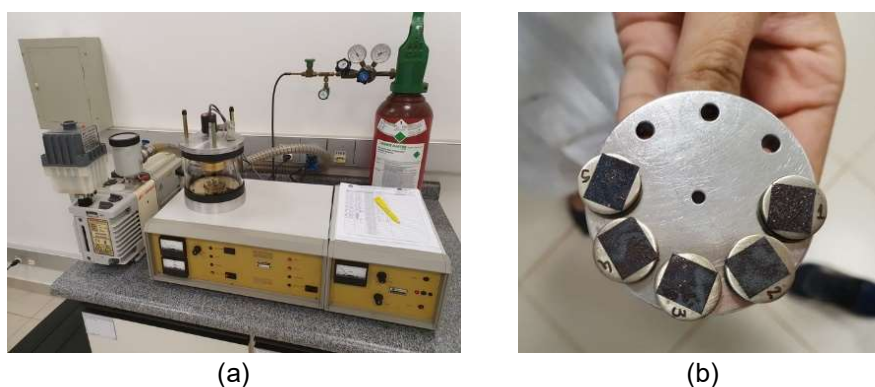


Figura 29: (a) Metalizador, Sputter Coater EMITECH, (b) Amostras revestidas com ouro para análise microscópica (1. Areia, 2. Cinza volante, 3. Metacaulim, 4. Pó de quartzo e 5. Sílica ativa)

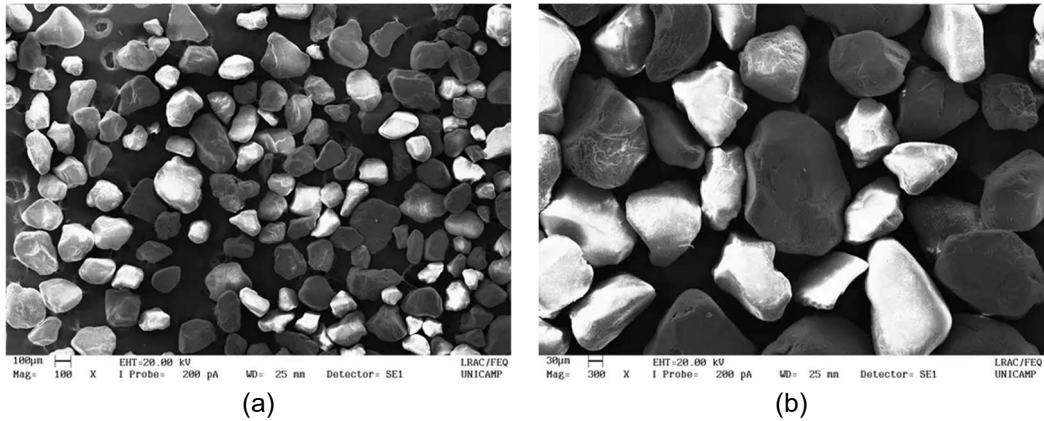


Figura 30: Imagens da MEV para areia fina (a) Zoom de 100 x e (b) Zoom de 300 x

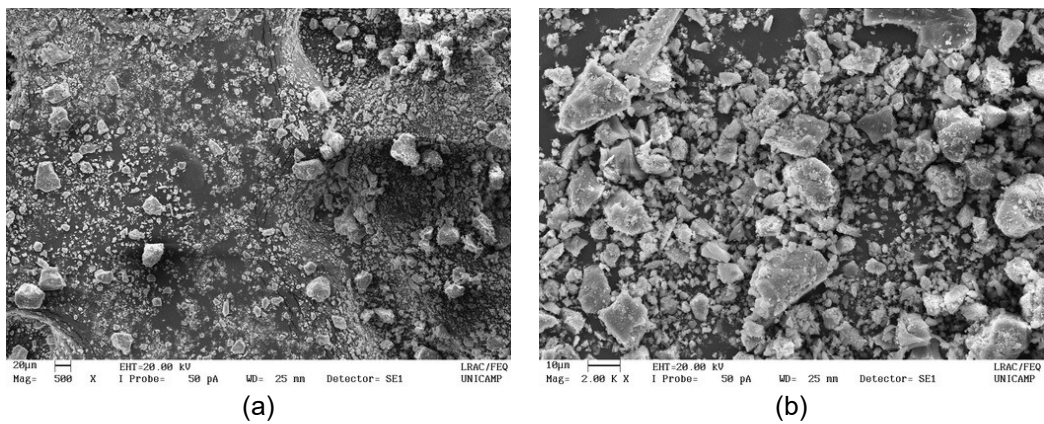


Figura 31: Imagens da MEV para cimento (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 2000 x

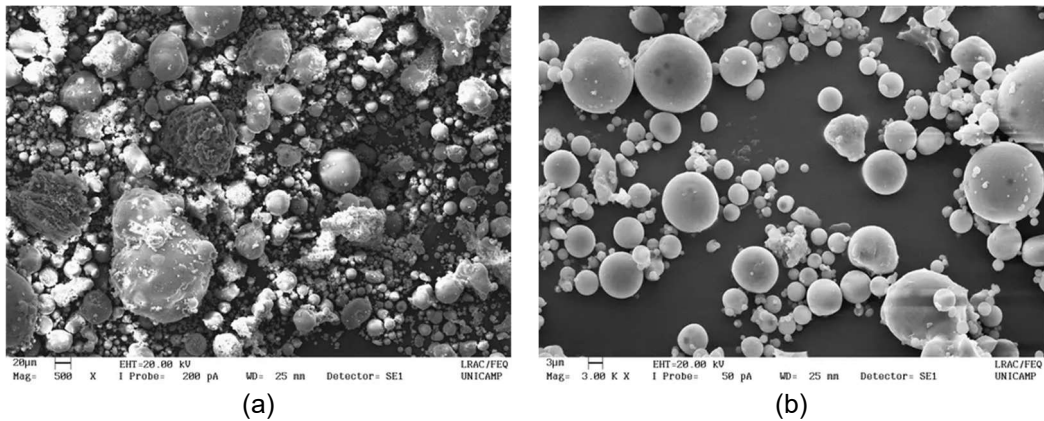


Figura 32: Imagens da MEV para cinza volante (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 3000 x

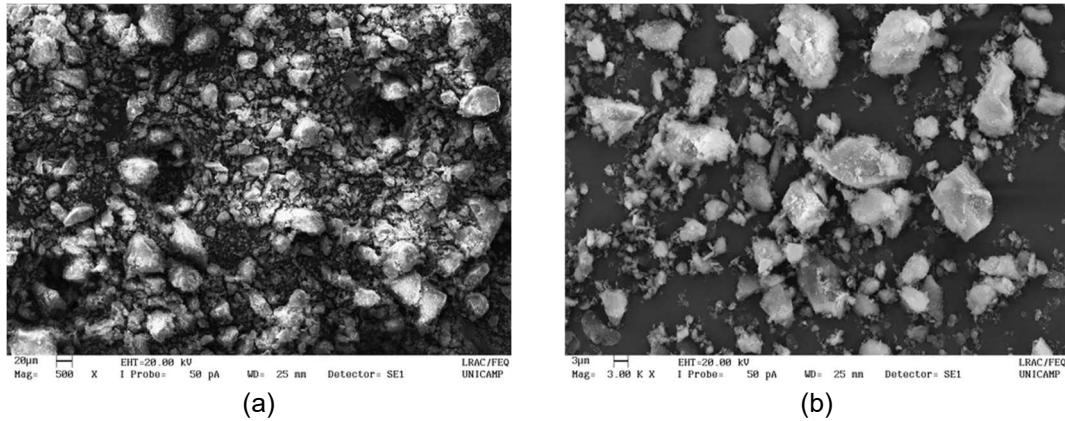


Figura 33: Imagens da MEV para metacaulim (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 3000 x

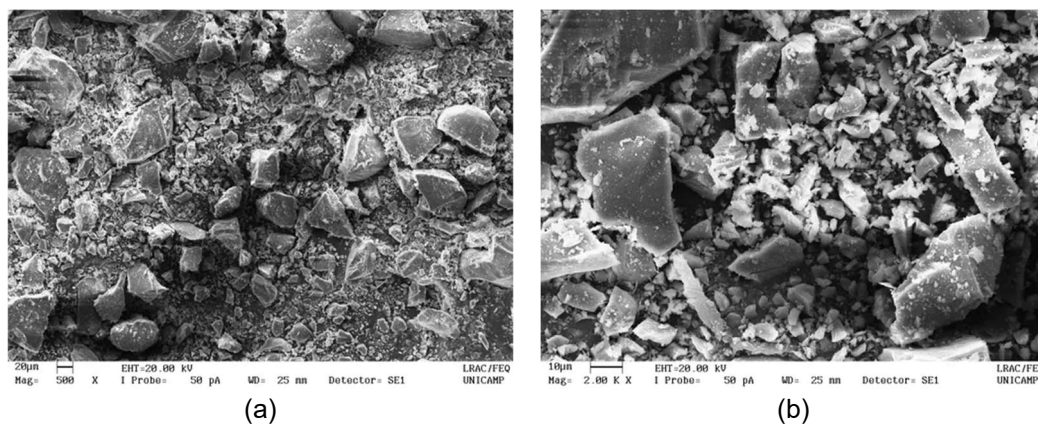


Figura 34: Imagens da MEV para pó de quartzo (a) Zoom de 500 x e (b) Zoom de 2000 x

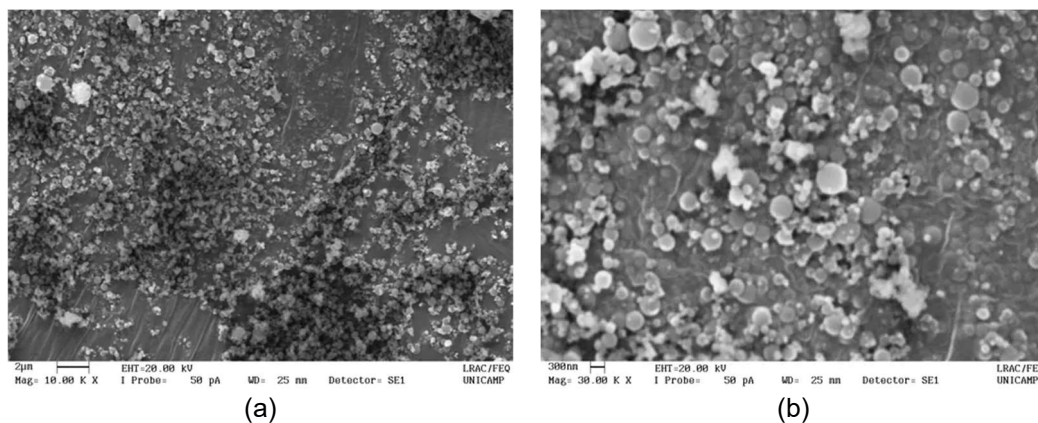


Figura 35: Imagens da MEV para sílica ativa (a) Zoom de 10000 x e (b) Zoom de 30000 x

Analisando as imagens, é possível verificar que a cinza volante e a sílica ativa possuem partículas esféricas, enquanto, a areia, o cimento, o metacaulim e o pó de quartzo possuem partículas angulares. Como as partículas de cinza volante são esféricas e maiores que da sílica ativa, possuem menor área superficial específica e necessitarão de uma menor quantidade de água em comparação com a sílica

ativa (LE et al., 2015), além disso, devido sua esfericidade, suas partículas irão se movimentar no concreto reduzindo a resistência ao atrito das partículas de cimento, que resultará na melhora da fluidez da mistura (SUN; YAN; ZHAN, 2003). A sílica ativa por ser não densificada também apresenta partículas esféricas e densas, portanto, pode aumentar a capacidade de preenchimento e diminuir a viscosidade do concreto devido ao "efeito de rolamento de esferas" e menor demanda de água (LE et al., 2015). Suas partículas esféricas tendem a agir como lubrificante no concreto fresco, aumentando a fluidez (VAN TUAN et al., 2011).

4.1.4. COMPONENTES QUÍMICOS

4.1.4.1. ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)

Esse ensaio permite a obtenção de microanálises elementares da amostra. Um feixe de elétrons interage com a amostra, podendo deslocar elétrons das camadas mais internas dos átomos, ionizando-os, que quando voltam para o estado fundamental, emitem raios X característicos. O ensaio foi realizado para obtenção dos elementos químicos do cimento. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

4.1.4.2. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Essa técnica foi realizada para determinar os componentes da cinza volante, do metacaulim e da sílica ativa. Para realizá-la foi necessário criar uma pastilha de cada amostra. Para isso, pesou-se aproximadamente 0.5 g das amostras e adicionou-se 10% de aglomerante, MaxxiWax 1000 da marca Oregon Labware, lote OR-P7756E, que não interfere na análise do material, mas auxilia na compactação do material para obtenção da pastilha. Após a pesagem, fez a homogeneização de cada mistura em um almofariz e pistilo de ágata por aproximadamente 5 minutos (Figura 36 a). Para fazer a pastilha, utilizou-se uma prensa hidráulica da marca AMEF, modelo AP-25T, e foram aplicados 20 T de pressão e o tempo de prensagem foi de 10 s. Primeiro, colocou-se, aproximadamente, 4 g do aglomerante para fazer a base da pastilha e depois a mistura do material analisado com o aglomerante. A Figura 36-b apresenta a geração da pastilha de cinza volante utilizando a prensa hidráulica. A Figura 36-c apresenta as pastilhas de sílica ativa (cinza claro), metacaulim (bege) e cinza volante (cinza escuro).

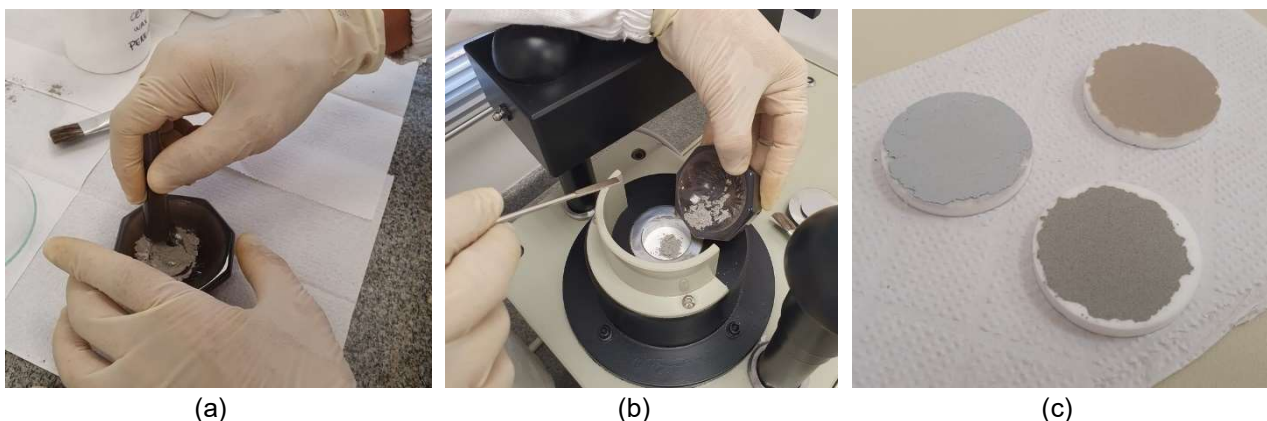


Figura 36: (a) Homogeneização da mistura de cinza volante com aglomerante, (b) Colocação da cinza volante na prensa para gerar a pastilha, (c) Pastilhas de sílica ativa, metacaulim e cinza volante

Depois, as pastilhas prensadas foram levadas ao equipamento de Fluorescência de Raios-X da marca Panalytical, modelo Axios 1KW (Figura 37 a). A Figura 37 b apresenta como a amostra é colocada no equipamento para análise. No equipamento há um tubo que incide um feixe de raios X na amostra, que faz com que a energia específica, característica de cada elemento químico, seja emitida e a partir dos valores apresentados, são sugeridos elementos químicos presentes na amostra. Com o auxílio do software Omnian, o resultado foi apresentado na forma de varreduras, possibilitando avaliar os picos de fluorescência de cada composto químico das amostras ensaiadas. Os resultados foram apresentados de forma semiquantitativa sobre a composição química elementar de cada amostra obtidos a partir dos parâmetros fundamentais do equipamento e gerados em uma leitura única. A Tabela 6 apresenta as porcentagens dos componentes químicos obtidos no ensaio de Fluorescência de Raio x para sílica ativa, metacaulim e cinza volante, e pelo MEV-EDS para o cimento.

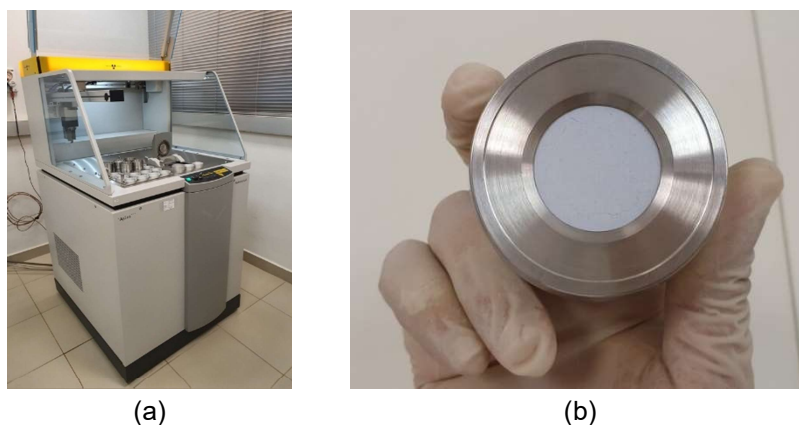


Figura 37: (a) Equipamento de Fluorescência de Raios-X, (b) Amostra de sílica ativa no recipiente para posterior análise

Tabela 6: Componentes químicos do cimento, sílica ativa, cinza volante e metacaulim

Componentes químicos	Cimento	Sílica ativa	Cinza volante (%)	Metacaulim
Al ₂ O ₃	3.51	0.25	26.8	36.59
BaO	-	-	0.01	-
CaO	68.98	0.29	1.68	0.14
CeO ₂	-	-	0.07	0.06
Cl	-	0.22	-	-
Co ₃ O ₄	-	-	0.01	0.01
Cr ₂ O ₃	-	-	0.02	-
CuO	-	-	0.02	0.01
Fe ₂ O ₃	2.48	0.07	5.03	3.15
Ga ₂ O ₃	-	-	0.01	0.01
K ₂ O	1.19	1.98	3.36	2.03
MgO	3.45	0.59	0.90	0.58
MnO	-	0.02	0.04	0.03
Na ₂ O	-	0.42	0.83	0.10
Nb ₂ O ₅	-	-	0.003	0.01
NiO	-	-	0.01	-
P ₂ O ₅	-	0.35	0.12	0.14
PbO	-	-	0.02	0.004
Rb ₂ O	-	0.004	0.02	0.01
SO ₃	3.85	0.081	0.56	0.04
SiO ₂	16.43	95.73	59.09	55.56
SrO	-	0.002	0.02	0.01
TiO ₂	0.14	-	1.24	1.43
V ₂ O ₅	-	-	0.04	0.04
ZnO	-	-	0.04	0.01
ZrO ₂	-	-	0.05	0.05

A partir da Equação 10, desenvolvida por Bogue (1955), é possível estimar a porcentagem de aluminato tricálcico (C₃A) presente no cimento Portland.

$$\%C_3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69(Fe_2O_3)$$

Equação 10

Para o cimento utilizado nessa pesquisa, o valor de C₃A foi de 5.11%. Este composto reage instantaneamente com a água, liberando muito calor de hidratação e forma a etringita (MEHTA; MONTEIRO, 2006). O enrijecimento (perda de consistência), o endurecimento (solidificação da pasta) e o desenvolvimento

inicial de resistência ocorrem devido a precipitação da etringita (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Por isso, é importante que o cimento tenha um baixo teor de C_3A para a produção de CUAD.

A sílica ativa utilizada na pesquisa atende aos requisitos referentes aos componentes químicos especificados pela ABNT NBR 13956-1:2012. Os componentes químicos obtidos para o metacaulim estão de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15894-1:2010. A cinza volante utilizada na pesquisa é classificada como Classe C e atende aos requisitos químicos estabelecidos na ABNT NBR 12653:2014.

4.2. DETERMINAÇÃO DO TRAÇO DO CUAD

O desenvolvimento do CUAD pode ser complexo, pois, primeiramente os materiais devem ser escolhidos de acordo com sua granulometria e funcionalidade. Em seguida, a dosagem deve ser feita a partir do empacotamento de partículas. A relação a/c e o teor de superplastificante devem ser definidos para melhor atender a reologia e propriedades mecânicas desejadas. Por isso, antes de desenvolver o traço do CUAD, realizou-se ensaios com agregados (areias e brita) para avaliar o empacotamento de partículas de uma forma genérica (ANEXO I). Além disso, para entender o comportamento do CUAD, produziu-se um CUAD já desenvolvido por um grupo de pesquisadores da Universidade de São Paulo e está descrito como foi feita a reprodução do traço no ANEXO II.

Para desenvolver o traço do concreto de ultra-alto desempenho híbrido, primeiramente, caracterizou-se os materiais, depois, desenvolveu-se diferentes traços de CUAD com diferentes combinações de materiais, e os traços foram avaliados quanto à fluidez e resistência à compressão. A partir do traço de CUAD de melhor desempenho, desenvolveu-se o traço de CUADRF híbrido. Para caracterizar o CUADRF, avaliou-se a fluidez, Índice de vazios, resistência à compressão, e resistência à tração na flexão. Além disso, para verificar a eficiência das fibras de aço, realizou-se o ensaio de pullout para o CUADRF híbrido.

4.2.1. TRAÇOS INVESTIGADOS DO CUAD

As proporções dos materiais para produzir o CUAD foram calculadas utilizando uma rotina de cálculos a partir do modelo matemático “Método dos Mínimos Quadrados”, utilizando Equação 6, Equação 7 e Equação 8. O pacote computacional Microsoft Excel serviu para inclusão de dados, como as curvas

granulométricas dos materiais, e aquisição de dados. Utilizou-se o valor do coeficiente de distribuição (q) igual a 0.23 por ser o mais utilizado na literatura. Além disso, a metodologia consistiu na realização do empacotamento de partículas e obtenção das proporções, volume e massas dos materiais de maneira direta e interligada conforme Hüsken e Brouwer (2008) e Hüsken (2010). O cálculo do consumo dos materiais foi realizado através da otimização de algoritmos.

Como citado anteriormente, u_i é a razão entre o volume de um material ($V_{sol,i}$) pelo volume total de todos os ingredientes secos ($V_{sol,tot}$) e calculada através da Equação 11 (HÜSKEN; BROUWERS, 2008).

$$v_i = \frac{V_{sol,i}}{V_{sol,tot}} \quad \text{Equação 11}$$

É necessário colocar algumas restrições para o cálculo do volume dos materiais. O volume de cada material seco não pode ser negativo (Equação 12) (HÜSKEN; BROUWERS, 2008). O volume total dos materiais secos é o somatório dos volumes de cada material seco e deve ser igual a 1 (Equação 13) (HÜSKEN; BROUWERS, 2008).

$$V_{sol,i} > 0 \quad \text{Para } i = 1, 2, \dots, m \quad \text{Equação 12}$$

$$V_{sol,tot} = \sum_{k=1}^{m-2} v_{sol,i} = 1 \quad \text{Equação 13}$$

Além disso, outro parâmetro considerado foi o volume total do concreto (V_{con}), incluindo água ($V_{água}$), o ar (V_{ar}) e superplastificante (V_{sp}) para 1 m³ de concreto fresco (Equação 14) (HÜSKEN; BROUWERS, 2008).

$$V_{con} = V_{tot,sol} + V_{água} + V_{ar} + V_{sp} = 1 \text{ m}^3 \quad \text{Equação 14}$$

Para o cálculo da mistura do concreto, são necessárias restrições nas proporções dos materiais, pois, segundo Ragalwar et al. (2020), sem restrições pode gerar proporcionamento irreal dos materiais. Pode ser restrito, por exemplo, o teor de cimento ou o intervalo das proporções dos materiais em relação a massa de cimento. Por isso, fez-se uma revisão na literatura sobre as proporções comumente utilizadas na produção do CUAD. E a partir dessa revisão, restringiu-se as proporções de cada material no sistema desenvolvido, e assim, foram obtidas as proporções de cada material para cada combinação de CUAD. Outro parâmetro que foi verificado após a obtenção das curvas de empacotamento foi o coeficiente de determinação (Equação 9).

O pó de quartzo, a cinza volante e o metacaulim apresentaram distribuição granulométrica similar, por isso, decidiu-se utilizá-los separadamente, realizando três diferentes combinações de CUAD conforme estão apresentadas na Tabela 7. Inicialmente, desenvolveu-se diferentes traços de CUAD dentro da mesma combinação, variando as proporções dos materiais para verificar a eficiência do empacotamento. Inicialmente, foram analisados 10 traços de CUAD, sendo 4 para a combinação 1 e três para a combinação 2 e para combinação 3. Após a obtenção da resistência à compressão aos 7 dias, escolheu-se um traço de melhor desempenho de cada combinação, e alterando-se algumas restrições, produziu-se 3 novos traços de CUAD. Novamente, a partir dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias, produziu-se outros 3 traços de CUAD, sendo um para cada combinação, alterando-se algumas restrições. A partir dos últimos 3 traços de CUAD, escolheu-se o de melhor desempenho à compressão para ser estudado com fibras.

Tabela 7: Combinações de materiais para o desenvolvimento do CUAD

Combinação	Materiais
1	Pó de quartzo + areia + Aglomerantes (Cimento e sílica ativa)
2	Areia + Aglomerantes (Cimento + sílica ativa + cinza volante)
3	Areia + Aglomerantes (Cimento + sílica ativa + metacaulim)

Identificou-se os traços com pó de quartzo como PQ, com cinza volante como CV, e com metacaulim como MT. Já os traços finais analisados foram denominados REF (sem fibras, sendo o mesmo traço CV-5, porém, em sua composição, parte da água foi substituída por gelo), FBA (com fibras de aço) e HIB (híbrido). O traço com apenas fibras de aço (FBA) foi composto com um volume de fibras de 2% (por ser o mais utilizado e recomendado na literatura) e para o traço híbrido (HIB) utilizou-se o volume de fibras de aço de 1.5% e de fibras de álcool polivinílico de 0.50% (como feito por Feng et al. (2018) e Meng e Khayat (2018a)).

No cálculo do empacotamento de partículas para todos os traços foram fixadas as seguintes restrições: teor de ar incorporado igual a 4% do volume total de concreto; teor de superplastificante igual a 5% em relação massa do cimento (ou teor de sólidos do superplastificante igual a 2.20% a massa do cimento). Para o teor de água, considerou-se a água presente no superplastificante. Entretanto, inseriu-se outras restrições para cada traço investigado para analisar a eficiência do empacotamento. A rotina de cálculo realizada para o traço de CUADRF híbrido (HIB) está apresentada no ANEXO IV.

Para o CUAD, normalmente, o teor de cimento é entre 800 e 1000 kg/m³, o que aumenta o custo de produção, o calor de hidratação e estabilidade dimensional (retração e resistência à fratura) (SHI et al., 2015) e resulta numa rápida hidratação (YAZICI et al., 2010). Por isso e devido ao estudo de (KRAHL, 2018), o teor de cimento para essa pesquisa foi definido entre o limite inferior de 800 e o valor máximo de 890 kg/cm³, e o uso dos materiais cimentícios suplementares como substituição de parte do cimento, como cinza volante e metacaulim, foi feito para reduzir o calor de hidratação e a retração (YAZICI et al., 2008), (BAJABER; HAKEEM, 2020).

Realizou-se uma revisão na literatura para encontrar uma relação entre o consumo do cimento e o valor da resistência à compressão. Foi possível fazer as seguintes observações:

- Quanto maior o teor de cimento, maior será a resistência à compressão. Abdulkareem et al. (2018), Huang et al. (2017b), Li et al. (2020) realizaram diferentes dosagens de CUAD modificando o teor de cimento e reportaram que para maiores quantidades de cimento, maior foi a resistência à compressão.
- É comum que o CUAD seja composto com altos teores de cimento acima de 1000 kg/m³. Pode-se destacar o trabalho de Talebinejad et al. (2004), onde os autores utilizaram 2105 kg/m³ de cimento e atingiram resistência à compressão de até 325 MPa; Hirschi e Wombacher (2008) utilizaram 1050 kg/m³ de cimento e obtiveram 180 MPa de resistência à compressão; e Huang et al. (2017b), obtiveram resistência à compressão de aproximadamente 150 MPa aos 28 dias utilizando 1251.2 kg/m² de cimento.
- Porém, um alto teor de cimento pode não resultar em um CUAD com resistência à compressão excepcional, por exemplo, Feng et al. (2018) utilizaram um teor de cimento de 1165.9 kg/m³, mas atingiu máxima resistência à compressão de 115.66 MPa utilizando 2%

de fibras de aço. Isso porque a resistência à compressão vai depender do tipo do cimento, da distribuição granulométrica dos materiais, materiais cimentícios utilizados, da relação água/aglomerante e da condição de cura.

- Atualmente, o consumo médio de cimento para o desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho está em torno de 780 kg/m³. Essa redução no consumo de cimento é devido ao custo do cimento encarecer o concreto e para reduzir o impacto ambiental através da substituição do cimento por materiais cimentícios.
- Destaca-se que alguns autores utilizaram baixos teores de cimento como 325.3 (HUANG et al., 2017b), 332 kg/m³ (YAZICI et al., 2008), 376 kg/m³ (YAZICI et al., 2010) e entre 384.5 e 480.6 kg/m³ (SBIA et al., 2017), e obtiveram CUAD com excelentes resistência à compressão de até 110 MPa, 202 MPa, 251 MPa, 201.2 MPa, respectivamente. Sendo que (YAZICI et al., 2008) e (SBIA et al., 2017) utilizaram cura térmica, (YAZICI et al., 2010) utilizaram cura térmica em autoclave e (HUANG et al., 2017b) utilizaram cura em temperatura ambiente com isolamento das amostras para proteger contra a perda de umidade.

Para obter o intervalo das frações volumétricas dos materiais, fez-se uma revisão em diversos artigos sobre CUAD e CUADFR. Portanto, a partir da combinação de materiais e com a revisão das proporções de materiais, utilizou-se as restrições apresentadas na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 para a Combinação 1, Combinação 2 e Combinação 3, respectivamente, para todos os traços de CUAD e CUADRF analisados na presente pesquisa.

Tabela 8: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 1

Traços	Frações volumétricas		Cimento (kg/m ³)	a/aglom
	Silica	Pó de quartzo		
PQ-1	-	-	-	0.25
PQ-2	≤ 0.05	≤ 0.20	-	0.22
PQ-3	-	-	800.0	0.22
PQ-4	-	-	800.0	0.25
PQ-5	-	-	-	0.22
PQ-6	≤ 0.05	≤ 0.20	-	0.19

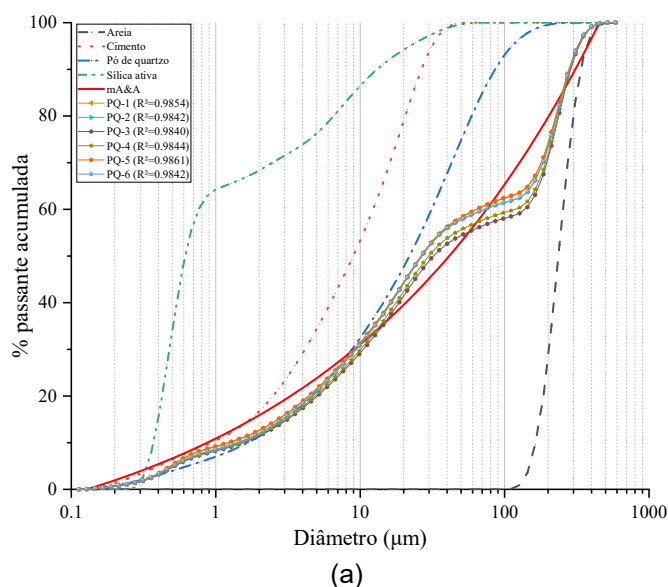
Tabela 9: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 2

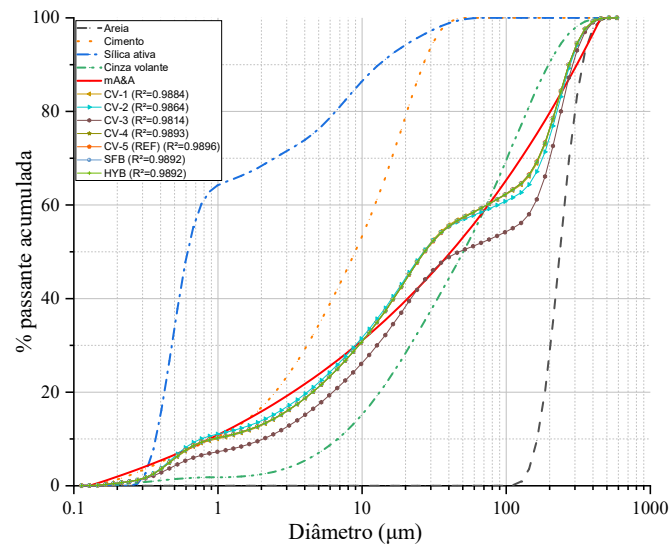
Traços	Frações volumétricas		Cimento (kg/m³)	a/aglom	Vol. fibras (%)	
	Silica	Cinza volante			Aço	PVA
CV-1	-	-	800.0	0.18	-	-
CV-2	-	≤ 0.20	800.0	0.18	-	-
CV-3	≤ 0.05	≤ 0.20	800.0	0.18	-	-
CV-4	-	-	800.0	0.15	-	-
CV-5 (REF)	-	-	800.0	0.14	-	-
FBA	-	-	800.0	0.14	2.0	-
HIB	-	-	800.0	0.14	1.5	0.5

Tabela 10: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 3

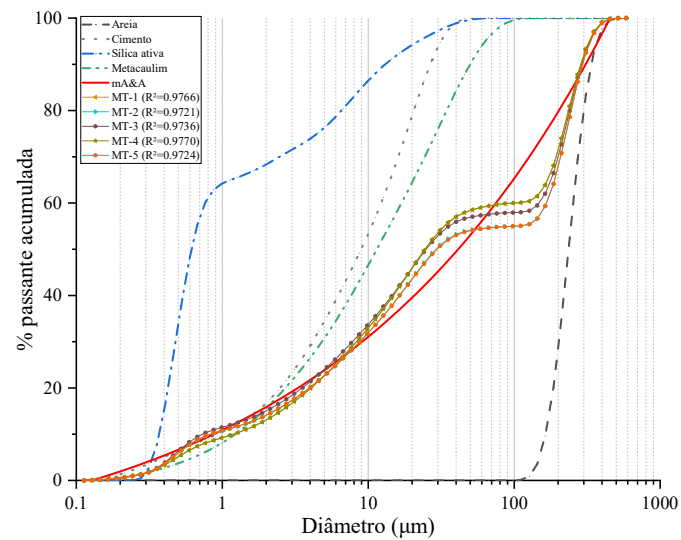
Traços	Frações volumétricas		Cimento (kg/m³)	a/aglom
	Metacaulim	Areia		
MT-1	-	-	800	0.22
MT-2	-	≥ 0.45	800	0.22
MT-3	≤ 0.10	≤ 0.43	800	0.22
MT-4	-	-	800	0.20
MT-5	-	≥ 0.45	800	0.19

As Figura 38-a, b e c apresentam as granulometrias de cada material utilizado nas misturas, as curvas para o modelo de A&Am e para os traços desenvolvidos para a Combinação 1, Combinação 2 e Combinação 3, respectivamente. O eixo x está em escala logarítmica. Verifica-se que as curvas de cada traço estão muito parecidas com as curvas do modelo.





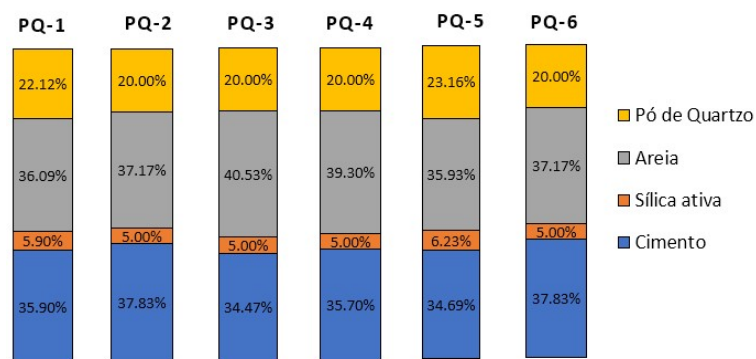
(b)



(c)

Figura 38: Curvas para modelo de A&Am e traços investigados e seus respectivos coeficientes de determinação para (a) Combinação 1 (b) Combinação 2 (c) Combinação 3

A Figura 39 apresenta as variações das proporções (ou frações volumétricas) dos materiais para cada tipo de combinação obtidas no cálculo do empacotamento de partículas.



(a)

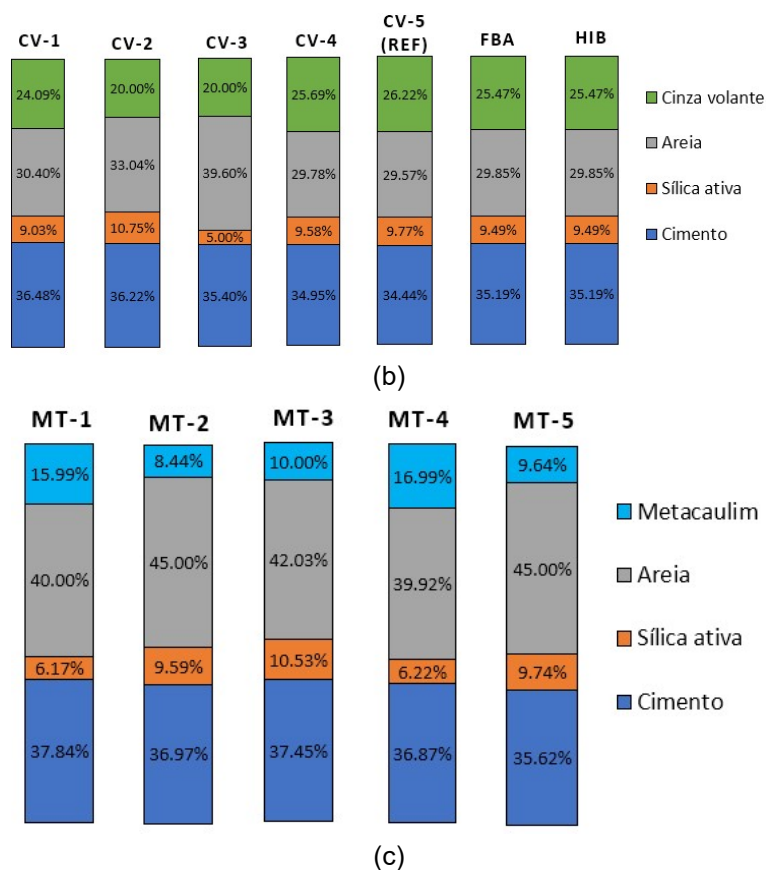


Figura 39: Frações volumétricas dos materiais utilizadas no empacotamento de partículas de cada mistura

(a) Traços da Combinação 1, (b) Traços da Combinação 2, e (c) Traços da Combinação 3

Para a Combinação 1 (utilizando pó de quartzo), inicialmente, desenvolveu-se quatro traços PQ-1, PQ-2, PQ-3 e PQ-4. Para o traço PQ-1 não foi colocada restrição e a relação $a/aglom$ foi de 0.25, o traço PQ-2 restringiu-se a proporção da sílica e do pó de quartzo, com $a/aglom$ igual a 0.22. Para o traço PQ-3 e PQ-4, fixou-se o valor do cimento em 800 kg/m^3 , enquanto a relação $a/aglom$ foi de 0.22 e 0.25, respectivamente. O traço PQ-5 foi similar ao traço PQ-1, porém com $a/aglom$ igual a 0.22, para tentar aumentar o desempenho à compressão. Para desenvolver o último traço PQ-6 e obter uma maior resistência à compressão, analisou-se o desempenho à compressão aos 7 dias dos traços anteriores, e por isso, esse traço foi similar ao traço PQ-2, porém com relação $a/aglom$ de 0.19.

Para combinação com cinza volante (Combinação 2), primeiramente, foram criados os traços CV-1, CV-2 e CV-3. Para o traço CV-1, fixou-se um consumo de cimento de 800 kg/m^3 e relação $a/aglom$ de 0.18. Restringiu-se a proporção da cinza volante para o traço CV-2 com relação $a/aglom$ de 0.18. A cinza volante e a areia foram restritas para o traço CV-3 e relação $a/aglom$ também foi de 0.18. Os traços CV-4 e

CV-5 são similares ao traço CV-1, pois esse traço apresentou o maior coeficiente de determinação e a maior resistência à compressão aos 7 dias, porém, a relação a/aglom para CV-4 e CV-5 foi de 0.15 e 0.14, respectivamente. Para os traços FBA e HIB tiveram como referência o traço CV-5, incluindo apenas as fibras no cálculo como exceção.

Os traços MT-1, MT-2 e MT-3 foram desenvolvidos primeiramente para a Combinação 3. Apenas o consumo de cimento de 800 kg/m³ e a relação a/aglom de 0.22 foram colocadas para o traço MT-1. Para o traço MT-2, restringiu-se a proporção da areia e a relação a/aglom foi de 0.22. Restringiu-se a proporção do metacaulim e da areia para o traço MT-3 (Tabela 10), e a a/aglom também foi de 0.22. Com o intuito de obter um traço com maior resistência à compressão, MT-4 foi similar ao traço MT-1, porém com relação a/aglom de 0.20, pois MT-1 apresentou o maior coeficiente de determinação. Entretanto, foi necessário desenvolver o traço MT-5, que foi similar ao traço MT-2 por este ter apresentado maior resistência à compressão aos 7 dias, porém, com relação a/aglom de 0.19 para o traço MT-5.

Além disso, é possível observar que o traço CV-5 apresentou o maior valor para R². Quanto mais próximo de 1 é o coeficiente de determinação, mais próxima a curva da mistura está da curva ideal do modelo de Andreasen e Andersen modificado, o que indica que esse traço obteve um melhor empacotamento em comparação com todos os outros traços.

A Tabela 11 apresenta o consumo de cada material por m³ de concreto para os traços investigados nesta pesquisa.

Tabela 11: Traços unitários para as misturadas desenvolvidas

Materiais (kg/m³)	Traços										CV-5 (REF)	FBA	HIB	MT-1	MT-2	MT-3	MT-4	MT-5
	PQ-1	PQ-2	PQ-3	PQ-4	PQ-5	PQ-6	CV-1	CV-2	CV-3	CV-4								
Cimento	800.00	861.50	800.00	800.00	800.00	887.90	800.00	800.00	800.00	800.00	800.00	800.00	800.00	800.00	800.00	800.00	800.0	800.0
Sílica ativa	104.70	90.60	92.40	89.20	114.30	93.40	157.65	188.94	89.95	174.58	180.57	171.76	171.76	103.82	165.23	178.99	107.4	174.1
Areia	689.50	725.50	806.60	754.90	710.30	747.80	571.56	625.57	767.36	584.27	588.80	581.82	581.82	724.98	834.81	769.67	742.5	866.4
Pó de Quartzo	423.20	391.00	398.60	384.60	458.50	403.00				-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cinza volante	-	-	-	-	-	-	362.56	303.12	310.16	403.51	417.94	397.36	397.36	-	-	-	-	-
Metacaulim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	292.26	157.83	184.66	318.6	187.1
SP	40.00	43.10	40.00	40.00	40.00	44.40	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.0	40.0
Água	203.80	185.30	173.90	199.90	178.70	161.60	215.24	210.17	193.62	184.31	173.39	169.28	169.28	240.74	224.67	233.60	222.8	198.2
Água total	226.20	209.50	196.30	222.30	201.10	186.40	237.64	232.57	216.02	206.71	195.79	191.68	191.68	263.14	247.07	256.00	245.2	220.6
Fibras aço	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	156.00	117.00	-	-	-	-	-
Fibras PVA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.50	-	-	-	-	-
a/aglom total	0.25	0.22	0.22	0.25	0.22	0.19	0.18	0.18	0.18	0.15	0.14	0.14	0.14	0.22	0.22	0.22	0.20	0.19
a/c total	0.283	0.243	0.245	0.278	0.251	0.210	0.30	0.29	0.27	0.258	0.245	0.240	0.240	0.329	0.309	0.320	0.307	0.276
sp/c*	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%

*A proporção do teor de sólidos do superplastificante para o teor de cimento foi de 2,30%

4.2.2. PROCEDIMENTO DE MISTURA

Utilizou-se um misturador de eixo de rotação vertical com capacidade de 20 litros. Após a pesagem de todos os materiais. Os materiais secos foram misturados em velocidade baixa por 2 min para desaglomerar suas partículas (GRAYBEAL, 2006), (TAFRAOUI et al., 2009), (CHEN et al., 2019).

Em seguida, adicionou-se o superplastificante com quase toda a água. Uma pequena parte da água foi utilizada para limpar o recipiente do superplastificante, e logo, foi adicionada e tudo foi misturado em velocidade baixa até a formação do concreto. Porém, para melhorar a fluidez do CUAD, o superplastificante passou a ser adicionado em duas etapas (AİTCIN, 2000). Na primeira etapa, adicionou-se a água com metade do superplastificante, misturando por 4 min em velocidade baixa. Na segunda etapa, adicionou-se a segunda metade do superplastificante e todos os materiais foram misturados em velocidade baixa até a obtenção do concreto.

Durante a moldagem do CUAD observou-se que a pega ocorria rapidamente, por isso para produzir o CUAD (Referência) e CUADRF, decidiu substituir parte da água de amassamento por gelo triturado para reduzir o calor de hidratação do cimento (AİTCIN, 2000), (VIAPIANA, 2016). Em um primeiro momento, substituiu-se 50% da massa de água por gelo. Porém, devido ao uso das fibras foi necessário aumentar a substituição para 2/3 de gelo e 1/3 de água. Depois do empacotamento é obtido a massa de água necessária para a mistura. A partir daí, foi separado a massa de água e de gelo. Primeiramente, misturou-se a água com o gelo triturado. Em seguida, adicionou-se cerca de 90% da mistura de água com gelo e 50% da quantidade de superplastificante ao recipiente que estavam os materiais secos, e em seguida, todos os materiais foram misturados por 4 min em velocidade baixa. Depois, adicionou-se a segunda metade do superplastificante, e a fim de se retirar o máximo possível do resto de superplastificante do seu recipiente, utilizou-se os 10% restantes da mistura de água com gelo; e, em seguida tudo foi misturado em velocidade baixa até a obtenção do concreto. Para cada traço, o tempo para formação do concreto foi diferente.

Após a formação do concreto, misturou-se tudo por mais 1 min em velocidade baixa para que todo o material se soltasse da bacia. Aumentou-se a velocidade para distribuir uniformemente os materiais e para desaglomerar o máximo possível, misturando por 2 min para os traços de CUAD e 5 min para os traços com gelo na composição. Misturou-se por um tempo maior para garantir o derretimento do gelo (GODART; DIVET, 2017). A energia do misturador, a temperatura ambiente (26,5°C) e a reação do cimento ser exotérmica, são os motivos para ocorrer o derretimento do gelo antes do início da pega, e a inspeção visual

foi realizada comprovando que nenhum fragmento de gelo fosse detectado. Para os concretos que utilizaram gelo em sua composição, mediu-se a temperatura durante um período de 1 hora e o modo de execução do ensaio e resultados estão apresentados no ANEXO V. E por fim, misturou-se por mais 1 min em velocidade baixa e deixou-se o concreto descansar por 30 s para garantir a eliminação de bolhas. Por fim, as fibras foram adicionadas durante um período de no máximo 2:30 min, e misturou-se tudo por mais 1 min em velocidade alta para garantir a dispersão das fibras (GRAYBEAL, 2006; TAFRAOUI et al., 2009). Para os traços PQ-5, PQ-6, CV-4, CV-5, MT-4, MT-5, REF, FBA e HIB, utilizou-se a mesa vibratória para compactação do concreto e redução de bolhas (LI et al., 2016), (LIU; WEI; GUO, 2021). Apesar dos traços serem auto-adensáveis, a vibração externa foi realizada apenas para melhor análise da porosidade dos traços.

4.3. PROPRIEDADES

4.3.1. MINIABATIMENTO

O primeiro parâmetro para caracterizar o CUAD foi analisar sua auto-adensabilidade através do miniabatimento, já utilizado por outros autores para o CUAD ou CUADRF (Tabela 12). Outro método utilizado para verificar a fluidez do CUAD é o método de *flow table* (mesa de fluidez) (GRAYBEAL, 2006), (POORHOSEIN; NEMATZADEH, 2018), (ARUNOTHAYAN et al., 2019).

Tabela 12: Resultados de miniabatimento para CUAD/CUADRF

Referência	Espalhamento (mm)
Ghafari; Costa; Julio (2013)	240 a 260
Li; Yu; Brouwers (2018)	114 a 400
Meng; Khayat (2016) / Meng; Khayat (2018)	280 ± 5
Meng; Khayat (2017)	270 a 290
Meng; Valipour; Khayat (2017)	280 ± 10
Ragalwar et al. (2020)	100 a 330
Ragalwar et al. (2016)	200 a 300
Wang et al. (2019)	105 a 280
Wille; Naaman; Parra-Montesinos (2011)	150 a 366
Wille et al. (2012)	275 a 365
Yu et al. (2017)	283 a 310
Yu; Spiesz; Brouwers (2014c)	225 a 337.5
Yu et al. (2016)	85

Para realizar o ensaio utilizou-se um molde metálico em formato de tronco de cone com o diâmetro inferior interno medindo 10 cm, diâmetro superior interno medindo 7 cm e altura medindo 6 cm (Figura 40), mesmo molde utilizado por EFNARC (2002) e ABNT NBR 13320:2012 e similar ao molde utilizado

pela ASTM C230/C230M (2020), espátula, paquímetro, placa de vidro e pano úmido. Para executar o ensaio, primeiramente o mini tronco-cônico e a placa de vidro foram umedecidos e sem nenhuma vibração preencheu-se o tronco-cônico e deu-se leve batidas para eliminar bolhas de ar; levantou-se o tronco-cônico em um único movimento; aguardou-se o espalhamento cessar e fez-se duas medições perpendiculares do diâmetro do espalhamento. O miniabatimento de cada traço é calculado pela média aritmética de duas medições perpendiculares. Para ser considerado auto-adensável deve-se obter 240 mm de espalhamento de acordo com a EFNARC (2002).



Figura 40: Molde utilizado no ensaio de miniabatimento

Durante construções em grande escala, especialmente em temperaturas elevadas, a fluidez do CUAD se reduz rapidamente, e este problema está atribuído, principalmente, à hidratação inicial de materiais cimentícios (DU et al., 2021). Para melhorar a fluidez é necessário retardar ou reduzir a taxa de hidratação dos materiais cimentícios, e para isso, pode ser realizada a substituição da água por gelo e o uso de materiais cimentícios suplementares, como cinza volante e metacaulim, e filers, como pó de quartzo, para substituir cimento e sílica ativa (DU et al., 2021).

4.3.2. ÍNDICES DE VAZIOS, MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os poros são os principais microdefeitos do concreto, com dimensões variando da ordem de milímetros a nanômetros. São classificados por ordem crescente de grandeza como poros gel (ou microporos ou poros de intercamadas), poros capilares e macroporos (ar incorporado). Os poros em gel são originados pelos vazios existentes entre os produtos da hidratação. Os poros capilares são os espaços ocupados inicialmente pela água de amassamento em excesso que antes do processo de hidratação afastam os grãos de cimento fazendo com que os cristais em crescimento preencham ou não os espaços disponíveis. Os

macroporos são os vazios de ar incorporados acidentalmente ou não durante a mistura do concreto (FORNASIER, 1995).

Existem diferentes métodos para obter a porosidade permeável do concreto, saturação em água fria, saturação em água fervente e saturação à vácuo, sendo o último de maior precisão (SAFIUDDIN; HEARN, 2005). Devido a facilidade e disponibilidade, o ensaio de porosidade foi realizado conforme ABNT NBR 9778:2005 através da saturação em água. Como a principal característica do CUAD é sua baixa porosidade obtida através do empacotamento de partículas, decidiu-se avaliar a eficácia do empacotamento, realizando-se o ensaio para determinar o índice de vazios, absorção de água e densidade para os traços. Para cada traço, foram moldados três corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. O ensaio para obtenção do índice de vazios do CUAD também foi realizado por Yu et al. (2014), Yu, Spiesz e Brouwers (2015), Yu, Spiesz e Brouwers (2014b), Yu, Spiesz e Brouwers (2014c), porém, por diferentes métodos.

A absorção de água (A), em porcentagem, pode ser calculada pela Equação 15 (ABNT NBR 9778:2005, 2005). O Índice de vazios (I_v), em porcentagem, pela Equação 16 (ABNT NBR 9778:2005, 2005). Através da Equação 17, Equação 18 e Equação 19 (ABNT NBR 9778:2005, 2005) é possível determinar a massa específica da amostra seca (ρ_s), massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) e massa específica real da amostra (ρ_r), respectivamente.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Equação 16}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 17}$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 18}$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Equação 19}$$

A Figura 41 apresenta o esquema para realização do ensaio para determinação do índice de vazios, absorção de água e massa específica do CUAD conforme ABNT NBR 9778:2005.

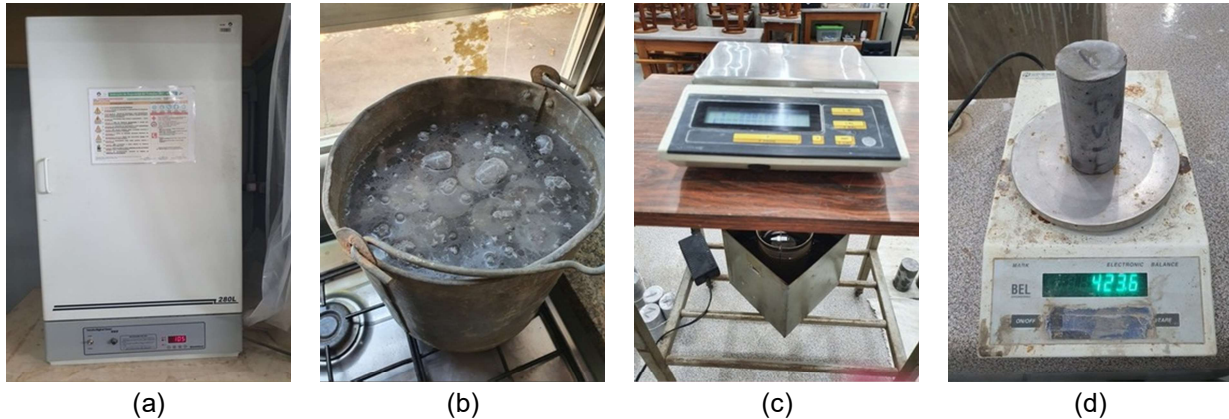


Figura 41: Etapas de ensaio para determinar índice de vazios, massa específica e absorção de água por imersão (a) Colocação dos cps na estufa; (b) Imersão e fervura em água; Medição da massa dos cps (c) Após fervura em balança hidrostática, e (d) após imersão e fervura

4.3.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Todos os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura em água em temperatura ambiente, mesmo feito por outros autores, devido sua praticidade (SPASOJEVIĆ, 2008), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c), (MENG; KHAYAT, 2017), (WU; KHAYAT; SHI, 2019). Para determinar a resistência à compressão, realizou-se o ensaio de compressão através da ABNT NBR 5739:2018 com corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura utilizando uma máquina de ensaio universal. Todos os corpos de prova foram retificados com o uso de um disco diamantado e limpos antes da realização do ensaio. A Equação 20 apresenta o cálculo da resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018).

$$f_c = \frac{4F}{\pi x D^2} \quad \text{Equação 20}$$

Onde f_c é a resistência à compressão, em Megapascals; F é a força máxima alcançada, em Newtons; D é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.

O módulo de elasticidade foi caracterizado e determinado a deformação através de dois clip-gages numa resistência equivalente a 40% da resistência última, de acordo com a norma sul coreana para CUAD (KICT, 2014). Cada um desses instrumentos mede a deformação longitudinal no material para um comprimento de 50 mm. O módulo pode ser calculado conforme a Equação 21 (KICT, 2014).

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad \text{Equação 21}$$

Onde E_c é o módulo de elasticidade, σ_2 é a resistência à compressão correspondente a 40% da resistência última de compressão, σ_1 é a tensão de compressão correspondente à 10% da tensão última de

compressão, ε_2 é a deformação correspondente à tensão σ_2 , ε_1 é a deformação correspondente à tensão σ_1 . Porém, considerando as características de alta resistência à compressão do CUAD, (GRAYBEAL, 2006) propõe que o módulo de elasticidade também pode ser obtido utilizando-se a resistência e a deformação correspondentes a 10% e 30% da resistência à compressão máxima do CUAD/CUADRF.

4.3.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a determinação da resistência à tração indireta (compressão diametral) seguiu-se os procedimentos conforme a norma ABNT NBR 7222:2011. Foram utilizados três corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura e ensaiados aos 56 dias. O ensaio foi realizado com controle de deslocamento com velocidade de 0,005 mm/s até o rompimento do corpo de prova e realizado apenas para o traço REF. A Equação 22 apresenta o cálculo da resistência à tração por compressão diametral de acordo NBR 7222:2011.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad \text{Equação 22}$$

Onde $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração indireta (MPa); F é a força máxima obtida no ensaio (N); d o diâmetro do corpo de prova (mm); l é o comprimento do corpo de prova (mm).

4.3.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Como o CUADRF é um tipo de concreto auto-adensável, a distribuição das fibras é influenciada pelo processo de moldagem e afeta significativamente o desempenho à tração na flexão (YOO et al., 2017). Por isso, para garantir a boa orientação das fibras, a moldagem dos corpos de prova foi realizada em uma extremidade deixando o concreto fluir até a outra extremidade, preenchendo-se por completo o corpo de prova (AFGC, 2013). A resistência à tração na flexão foi determinada seguindo a NF P 18-470 (2016) e AFGC (2013), através do ensaio de flexão por 3 pontos (flexão centrada) com entalhe na face inferior do prisma. Para isso, foram moldados três prismas de 70 x 70 x 280 mm por idade, sendo 28 e 56 dias, para cada traço. Após a desmoldagem, os prismas foram mantidos em cura úmida em temperatura ambiente até a realização do ensaio.

O entalhe foi realizado na parte central em uma das faces laterais do prisma que estava contra a forma durante a moldagem. A altura do entalhe foi de 6.5 mm, aproximadamente, (metade do comprimento da maior fibra utilizada, (NF P 18-470, 2016) e quase 10% da altura do prisma, permitindo uma localização

eficiente da fissura, minimizando o risco de fissura fora da área do entalhe (AFGC, 2013)), e a largura de 4.3 mm, aproximadamente (diferente das normas (3.0 mm para NF P 18-470 (2016) e menor que 2.0 mm para AFGC (2013)), devido ao disco de serra disponível no laboratório).

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios marca Times Group modelo WDW-100E com capacidade de 100 kN. O prisma foi suportado nas duas faces laterais, sendo que o sistema de suporte e aplicação de carga era constituído por um ponto fixo e pontos móveis (apoios sobre roletes), para limitar a força axial hipotética, e o vão entre os apoios será de 210 mm. Foram coladas chapas metálicas de alumínio, de 3 x 19 x 70 mm, na região dos apoios para evitar o esmagamento do concreto (TARIFA CRESPO, 2012).

Para realizar o ensaio, um extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“clip gage”) foi fixado na face inferior tracionada do prisma para medir a abertura da fissura. Durante a realização do ensaio, o clip gage foi mantido até a abertura da fissura atingir 3.8 mm (por estar próximo ao CMOD máximo de 3.5 mm que deve ser analisado (VANDERWALLE L, 2003), (FIB MC2010, 2013)).

Foi realizado um pré-carregamento com intensidade muito baixa, controlada pelo “clip gage”, porém, será considerado no resto do ensaio. Após o pré-carregamento, continuou-se o ensaio, utilizando-se uma taxa de carregamento constante de 0.25 ± 0.1 mm / min para os traços com fibras (NF P 18-470, 2016), (AFGC, 2013) e para o traço sem fibras será de 0.05 mm/min devido ao comportamento frágil (SMARZEWSKI; BARNAT-HUNEK, 2018), A Figura 42 apresenta as dimensões do prisma e a configuração do ensaio.

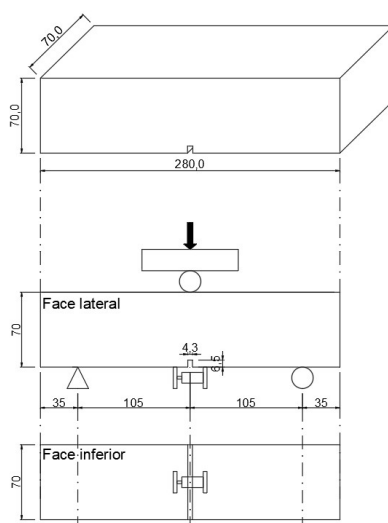


Figura 42: Dimensões do corpo de prova e configuração do ensaio de flexão por 3 pontos

Através desse ensaio, são obtidas as curvas de carga-CMOD e as resistências à tração na flexão para primeira fissura e para ruptura. A resistência à flexão (σ_{ct}) pode ser obtida através da Equação 23 (SMARZEWSKI; BARNAT-HUNEK, 2018):

$$\sigma_{ct} = \frac{3FL}{2b(h - a_0)^2} \quad \text{Equação 23}$$

Onde, F é a carga de ruptura; L é o vão entre os apoios; b é a largura do prisma; h é a altura do prisma; a_0 é a altura do entalhe.

4.3.6. MICROSCOPIA DOS PRISMAS

Após a realização do ensaio de determinação da resistência à tração na flexão, os corpos de prova prismáticos fraturados foram armazenados e identificados para realização da microscopia para os traços REF, FBA e HIB. O objetivo do ensaio foi analisar os mecanismos de degradação dos corpos de prova, bem como orientação e alinhamento das fibras.

Para realizar esse ensaio, cortou-se uma parte do prisma, com dimensões de 15 x 35 x 35 mm, aproximadamente. Essas amostras foram condicionadas em estufa a 105 °C por pelo menos 12 horas para reduzir o teor de água na mistura, em seguida foram fixadas em porta amostras específico utilizando fita dupla face de Carbono, levadas para recobrimento metálico (ouro, Au); sendo, por fim, levadas ao equipamento de microscopia eletrônica por varredura para análise. Os equipamentos utilizados foram os mesmos utilizados para a microscopia dos materiais relatados no item 5.1.4.

4.3.7. PULLOUT

Para verificar a aderência entre as fibras de aço e o CUADRF híbrido, realizou-se o ensaio de pullout (ou arrancamento) das fibras de aço aos 56 dias. Para isso, foram moldados dois corpos de prova em formato de prisma com 70 x 70 x 280 mm, que foram denominadas como série 1 e 2. O ensaio foi realizado apenas para o traço de CUADRF híbrido, por existir poucos estudos com este tipo de ensaio para concretos com fibras, e principalmente, para um traço híbrido. Para fixar as fibras, utilizou-se uma placa acrílica com dimensões de 5 x 70 x 280 mm. Como as fibras de aço utilizadas na pesquisa possuem 13 mm de comprimento, o comprimento de embutimento das fibras no concreto foi de 8 mm. Foram feitos 18 furos na

placa com uma broca de 1 mm de diâmetro. A Figura 43 a apresenta a configuração dos furos feitos na placa para fixar as fibras de aço, e as Figura 43 b, c e d apresentam as etapas para moldagem dos corpos de prova para realizar o ensaio de pullout das fibras de aço para o traço HIB.

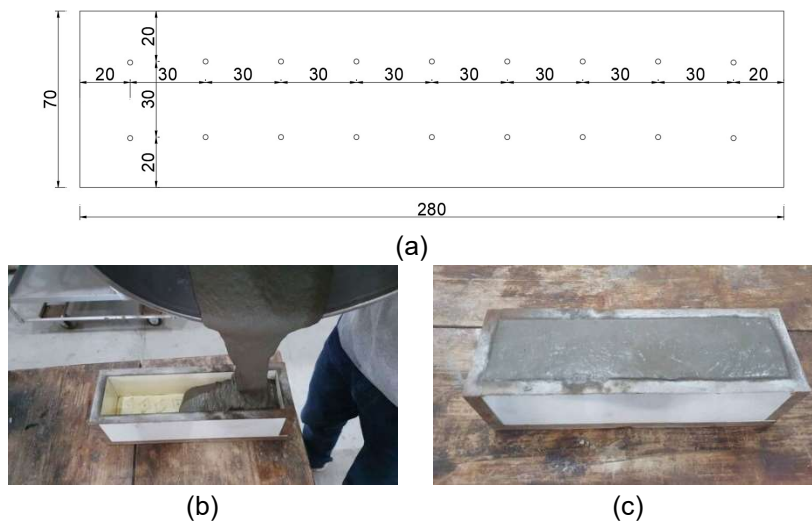


Figura 43: (a) Configuração dos furos na placa acrílica para fixar as fibras de aço para ensaio de pullout, (b) moldagem em uma extremidade, deixando o concreto fluir até a outra extremidade (c) corpo de prova moldado

Utilizou-se um dispositivo portátil, ilustrado na Figura 44, desenvolvido por Krahl et al. (2020), Krahl et al. (2020a), Krahl et al. (2021). Para a realização do ensaio, a máquina foi apoiada em três pontos na superfície do prisma conferindo estabilidade para aplicação da força de arrancamento. Ressalta-se que não há normalização para ensaio de pullout de fibra, e por isso, o ensaio foi realizado conforme Krahl et al. (2020), Krahl et al. (2020a), Krahl et al. (2021). A velocidade de arrancamento das fibras será de 0.005 mm/s. O deslocamento será aplicado através de um conjunto de fuso de esferas e motor de passo, que possibilitará o avanço do cabeçote móvel com resolução acima de 0.001 m e erro máximo de 0.01 mm. A aquisição de dados foi feita com frequência de 4 Hz, sendo utilizada célula de carga de 500 N. A garra prenderá a fibra intimamente à superfície da matriz, diminuindo a medida da deformação elástica da extremidade livre da fibra. Além disso, uma articulação conecta a garra à célula de carga.

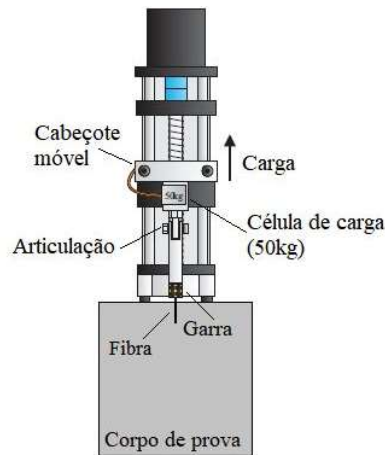


Figura 44: Ilustração do aparato para realizar ensaio de pullout (Adaptado de KRAHL et al., 2020a)

Após a realização do ensaio, é possível obter as curvas de força de arrancamento (P) versus deslizamento (s). Os parâmetros típicos que podem ser derivados de tais grandezas são a resistência média de aderência (τ_{av}), a tensão máxima da fibra ($\sigma_{f,máx}$) e o trabalho de arrancamento (W_p). A obtenção desses parâmetros permite entender as propriedades interfaciais entre fibra e matriz.

A resistência média de aderência (τ_{av}), considera o comprimento inicial de embutimento para calcular as tensões interfaciais (L_E), a carga máxima de arrancamento ($P_{máx}$) e o diâmetro da fibra (d_f) conforme a Equação 24 (WILLE; NAAMAN, 2010).

$$\tau_{av} = \frac{P_{max}}{\pi d_f L_E} \quad \text{Equação 24}$$

A resistência máxima da fibra ($\sigma_{f,máx}$) pode ser calculada conforme a Equação 25 (WILLE; NAAMAN, 2010), dividindo-se a carga máxima de arrancamento pela área transversal da fibra. Esse parâmetro é interessante pois estima a eficácia do uso da fibra.

$$\sigma_{f,máx} = \frac{4P_{máx}}{\pi d_f^2} \quad \text{Equação 25}$$

A energia dissipada durante o arrancamento (em N.mm), devido ao trabalho de arrancamento (W_p), possibilita o entendimento sobre a tenacidade e a ductilidade que as fibras fornecem ao composto. A área sob a curva de carga versus deslizamento representa o trabalho realizado durante a retirada, que pode ser calculado de acordo com a Equação 26 (WILLE; NAAMAN, 2010).

$$W_p = \int_0^{L_E} P(s)ds \quad \text{Equação 26}$$

A resistência equivalente (σ_{eq}) é outro indicador do desempenho de tração do CUADRF, calculada pela Equação 27 (KRAHL et al., 2021). Esta abordagem assume uma distribuição constante de tensão de cisalhamento ao longo da interface fibra-matriz (KRAHL et al., 2021).

$$\sigma_{eq} = \frac{4P_{máx}}{\pi d_f^2} \quad \text{Equação 27}$$

O fator de eficiência da fibra pode ser obtida pela Equação 28, a partir da resistência máxima da fibra ($\sigma_{f,máx}$) e da resistência à tração média das fibras dada pelo fabricante (f_t) (CHUN; YOO, 2019).

$$\mu = \frac{\sigma_{f,máx}}{f_t} \quad \text{Equação 28}$$

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo trata-se dos resultados e discussões provenientes do programa experimental (caracterização dos concretos, ensaio de arrancamento de fibras de aço e microscopia de corpos de prova) realizado nessa pesquisa.

Inicialmente, para definir quais traços de CUAD seriam moldados, realizou-se uma pré-dosagem baseada na melhor fluidez para o traço com a menor relação $a/aglom$. Esse procedimento foi realizado para as três diferentes combinações de materiais (PQ, CV e MT). O modo de execução e resultados estão descritos no ANEXO III. A partir do desenvolvimento de diferentes traços de CUAD, escolheu-se o de melhor desempenho para ser analisado com fibras. Os traços de CUAD foram analisados quanto à fluidez, índice de vazios, absorção de água e resistência à compressão. Os traços finais (REF, FBA, HIB) foram analisados quanto à fluidez, índice de vazios, absorção de água, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e microscopia.

5.1. FLUIDEZ

A Figura 45 apresenta o espalhamento obtido para os principais traços investigados: PQ-6, CV-5, MT-5, REF, FBA e HIB obtido através do ensaio de miniabatimento. Lembrando que os traços REF, FBA e HIB foram produzidos com a substituição de parte da água por gelo.

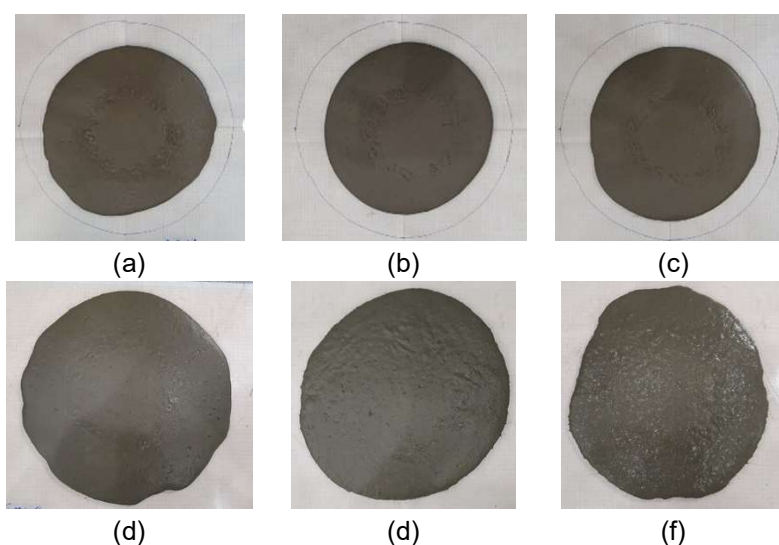


Figura 45: Espalhamento obtido para os traços (a) PQ-6, (b) CV-5 e (c) MT-5, (d) REF, (e) FBA e (f) HIB

A Figura 46 apresenta o espalhamento para todos os traços investigados. Os primeiros traços de cada combinação obtiveram fluidez acima de 240 mm, indicando que eram auto-adensáveis conforme EFNARC (2002). Porém, apesar de não todos os traços terem atingido este valor, verificou-se que os traços ficaram fluidos o suficiente para serem moldados sem a necessidade de equipamentos, por isso, decidiu-se prosseguir com o estudo. Como o CUAD possui baixa relação a/aglom, pode se tornar pegajoso, por isso, os materiais cimentícios suplementares, como sílica ativa e cinza volante, podem contribuir para o controle de sua reologia, através do efeito de fluidificar a mistura (AİTCIN, 1995).

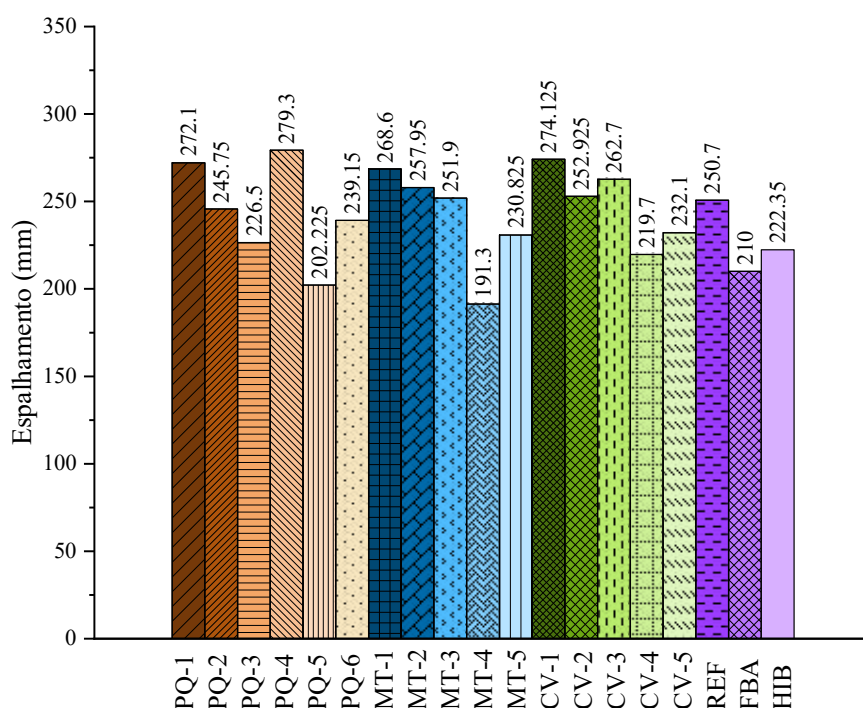


Figura 46: Espalhamento obtido para todos os traços investigados na pesquisa

As Figura 47 a, b e c apresentam os valores do espalhamento em função da relação a/aglom para cada combinação.

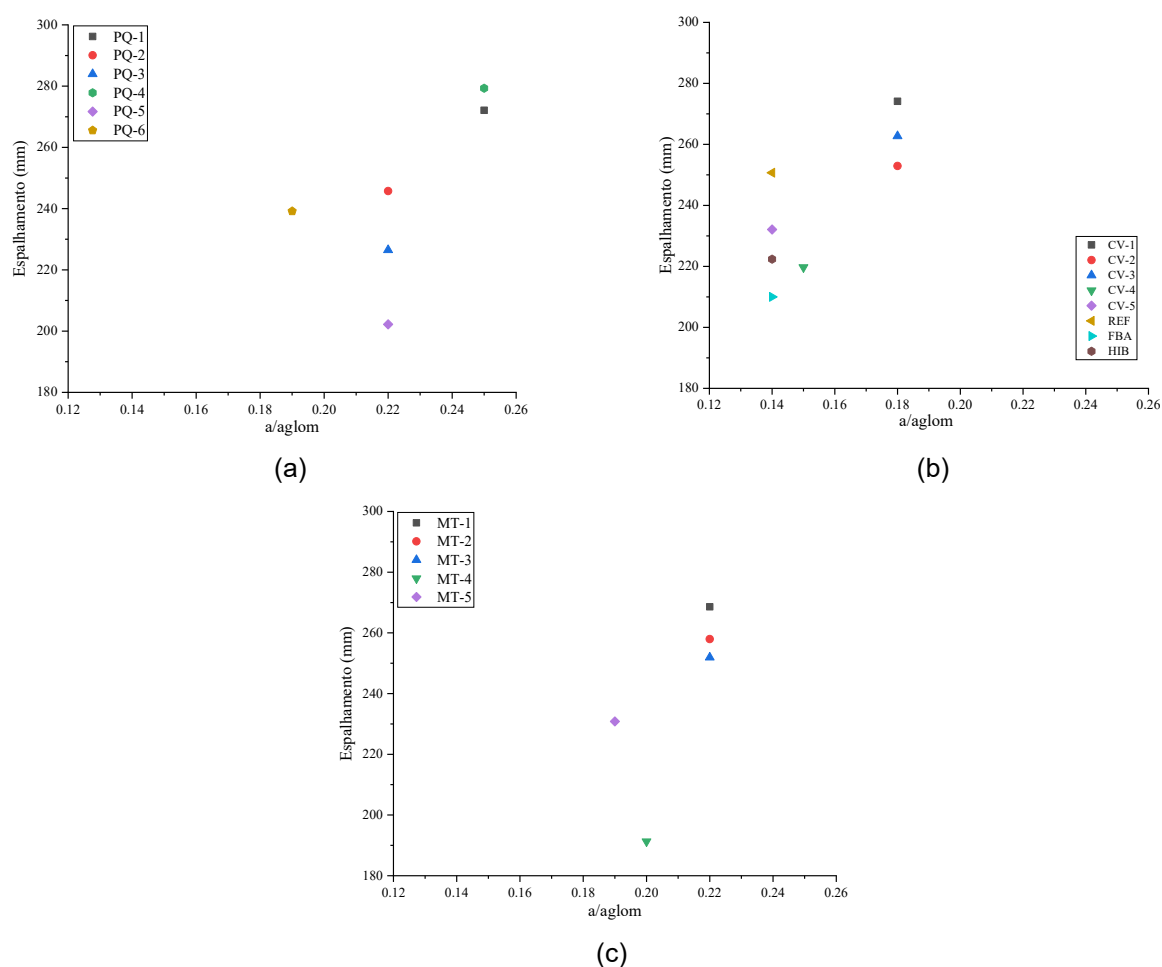


Figura 47: Comparação entre espalhamento e relação $a/aglom$ para os traços desenvolvidos para (a) Combinação 1, (b) Combinação 2 e (c) Combinação 3

Analisando o valor da fluidez para os últimos traços de CUAD de cada combinação de materiais (PQ-6, CV-5 e MT-5), percebe-se um aumento da fluidez (entre 5 e 20%), apesar desses traços terem uma menor relação $a/aglom$ comparada aos outros traços da mesma combinação. Isso só foi possível, devido ao modo de adição tardia do superplastificante. Porque quanto mais tarde o superplastificante for adicionado, menos ele irá interagir com os produtos de hidratação inicial, as moléculas do superplastificante não irão competir com o sulfato de cálcio para se combinar com o C_3A do cimento, e assim, quase todas as moléculas da segunda parte do superplastificante poderão ser utilizadas para fluidificar o concreto (AÏTCIN, 2000), (TUE; MA; ORGASS, 2008). Além disso, como o princípio do uso de superplastificante é a capacidade de aumentar a água livre, aumentando a fluidez, a partir da criação do potencial zeta, ou seja, suas partículas criam forças repulsivas entre os grãos de cimento, que irão deflocular as partículas de cimento e liberar a água presa dentro deles (MISHRA; SINGH, 2019). Portanto, a adição gradual de SP pode aumentar a dispersão de SP e aumentar a fluidez (TUE; MA; ORGASS, 2008).

A boa fluidez dos traços contendo pó de quartzo (PQ) se deve ao fato de que os materiais inertes fornecem um efeito de diluição no cimento e efeito lubrificante, que faz com que ocorra um deslocamento da água dos vazios entre os grãos maiores, levando a uma menor demanda de água e maior fluidez (LIU; WEI; GUO, 2021).

Apesar do metacaulim absorver mais água livre no CUAD devido à microestrutura em camadas (Figura 33), o que pode reduzir a fluidez e, conseqüentemente, aumentar os macrodefeitos da estrutura interna do CUAD (SONG et al., 2018), na presente pesquisa observou-se que os traços com metacaulim apresentaram boa fluidez, porém inferior aos traços com pó de quartzo e cinza volante.

Analisando as combinações entre si, verifica-se que os traços com cinza volante (combinação 2) apresentaram melhor fluidez em comparação com os traços das outras combinações, apesar dos traços com cinza volante terem menor relação *a/aglom.* Essa melhora da fluidez com o uso da cinza volante é devido às partículas da cinza volante serem esféricas (Figura 32), que auxiliam a movimentação dos materiais, sem ocasionar atrito, e permite a redução na quantidade de água (SBIA et al., 2017). Além disso, a cinza volante possui menor taxa de hidratação, o que gera menos floculação por hidratação e resulta no aumento da fluidez (SANKAR; RAMADOSS, 2021). O aumento da fluidez do CUAD devido a adição de cinza volante também foi reportado por (AGHDASI et al., 2015), (SBIA et al., 2017).

O traço REF apresentou um aumento da fluidez de 8%, aproximadamente, em comparação com o traço CV-5. Ambos os traços são a mesma mistura, porém, para REF parte da água foi substituída por gelo e, por conta disso, o tempo de mistura foi aumentado para garantir o derretimento do gelo. (HIREMATH; YARAGAL, 2017) também observou que o tempo de mistura influencia na fluidez do CUAD. Entretanto, com a redução da temperatura do concreto a partir da utilização do gelo foi possível aumentar o tempo da fluidez e do tempo de pega do CUAD, comportamento também observado por (HAUG; SANDVIK, 1988) para concreto convencional.

A adição de fibras reduziu a fluidez dos traços de CUADRF, em 15% para FBA e 12% para HIB em comparação com o traço CUADRF sem fibras (REF). Essa redução pode ser explicada devido ao formato das fibras de aço ser mais alongado em comparação com os agregados e a área de superfície no mesmo volume ser maior, aumentando as forças coesivas entre as fibras e a matriz, e também por elas serem rígidas, alterarem a estrutura do esqueleto granular e separam as partículas que são relativamente grandes em

comparação com o comprimento da fibra (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014^a). Além disso, as fibras de PVA por serem hidrofílicas, resultam na redução de água para hidratar os materiais secos (MENG; KHAYAT, 2018a) e possuem alta área específica superficial (FENG et al., 2018). Além disso, as aglomerações de fibras podem reduzir a fluidez, pois a adição de fibras pode aprisionar ar (LARSEN; THORSTENSEN, 2020), pois as microfibras têm menor dispersão (POURJAHANSHAH; MADANI, 2021).

É possível verificar que o CUADRF híbrido (HIB) apresentou melhor fluidez em comparação com o CUADRF com apenas fibras de aço (FBA). A substituição de macrofibras por microfibras aumentando a fluidez também foi observada por (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (WU et al., 2017), (GHANEM; BOWLING; SUN, 2021). Isso pode ter ocorrido devido às fibras de aço por serem maiores que as fibras de PVA atuarem como barreiras físicas, impedindo a rotação das fibras de PVA e reduzindo a resistência do fluxo do concreto (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015b). Da mesma maneira, como as fibras de PVA são menores, elas podem aumentar o efeito-parede e restringir a rotação das fibras de aço (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015b).

5.2. ÍNDICE DE VAZIOS

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para o ensaio realizado conforme ABNT NBR 9778:2005 para determinar o índice de vazios (I_v), a absorção de água por imersão (A), a massa específica da amostra seca (ρ_s), a massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) e a massa específica real da amostra (ρ_r). Pode-se observar que as densidades para o CUADRF são maiores do que para o CUAD, isso se deve à adição de fibras com altas densidades. O mesmo comportamento foi observado por (ARUNOTHAYAN et al., 2019), (AL-MWANES; AGAYARI, 2021).

Comparando os traços com o mesmo empacotamento, PQ-5 com PQ-2, PQ-6 com PQ-1, CV-4 com CV-1, CV-5 com CV-1, CV-5 com CV-4, MT-4 com MT-1 e MT-5 com MT-2, pode-se observar que o índice de vazios e a absorção de água por imersão foram reduzidos. Essa redução ocorreu devido à redução da relação $a/aglom$, pois quanto maior a quantidade de água, maior será a porosidade, pois o excesso de água de amassamento afasta os grãos do cimento antes da hidratação, gerando os poros capilares (FORNASIER, 1995), (RAUCCI et al., 2018), e conseqüentemente, pode reduzir a resistência e durabilidade do concreto; e também devido ao uso da mesa vibratória para moldar PQ-5, PQ-6, CV-4, CV-5, MT-4 e MT-

5, que ajudou o preenchimento dos vazios entre grãos maiores por grãos menores, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade de empacotamento. (RAGALWAR et al., 2016), (SOHAIL et al., 2018), (LIU et al., 2020) também observaram esse comportamento. Para os traços com pó de quartzo, comparando PQ-5 com PQ-1 e PQ-6 com PQ-2, a redução para o índice de vazio foi de 16% e 26% e para a absorção de água foi de 18% e 27%, respectivamente. Comparando as misturas usando cinza volante, CV-4 para CV-1, CV-5 para CV-1 e CV-5 para CV-4, as reduções para o índice de vazio foram de 10%, 21% e 13%, e para a absorção de água foram 11%, 22% e 12%, respectivamente. E comparando as misturas com metacaulim MT-4 para MT-1 e MT-5 para MT-2, a redução foi de 8% e 6% para o índice de vazios e 9% e 8% para a absorção de água, respectivamente.

Tabela 13: Resultados para os ensaios conforme ABNT NBR 9778:2005

Traço	Iv (%)	A (%)	ps	psat (g/cm³)	pr
PQ-1	5.23	2.37	2.21	2.26	2.33
PQ-2	4.59	2.05	2.24	2.29	2.35
PQ-3	4.24	1.91	2.22	2.27	2.32
PQ-4	5.10	2.31	2.21	2.26	2.33
PQ-5	4.41	1.95	2.26	2.31	2.37
PQ-6	3.39	1.50	2.26	2.29	2.34
MT-1	6.40	3.00	2.13	2.20	2.28
MT-2	5.15	2.40	2.14	2.19	2.26
MT-3	5.42	2.54	2.14	2.19	2.26
MT-4	5.91	2.73	2.17	2.23	2.30
MT-5	4.85	2.22	2.19	2.24	2.30
CV-1	5.13	2.48	2.07	2.12	2.19
CV-2	5.21	2.51	2.08	2.13	2.19
CV-3	5.73	2.75	2.08	2.14	2.21
CV-4	4.65	2.22	2.10	2.14	2.20
CV-5	4.05	1.94	2.09	2.13	2.18
REF	2.58	1.28	2.02	2.05	2.07
FBA	2.32	1.06	2.19	2.21	2.24
HIB	5.34	2.56	2.09	2.14	2.20

O uso de filers como o pó de quartzo contribui para o refinamento dos poros da matriz do CUAD, porque eles reduzem o número de vazios pelo ar incorporado e aumentam o número de poros capilares e

poros gel (liu; wei; guo, 2021). Por isso, é possível observar que os traços com pó de quartzo apresentaram baixo índice de vazios.

As misturas com cinza volante apresentaram menores índices de vazios e absorção de água em relação às misturas com metacaulim, devido às suas partículas serem esféricas que podem reduzir o atrito e os vazios entre as partículas dos demais materiais da mistura durante a fase de fresco.

REF é o mesmo traço que CV-5, mas parte da água foi substituída por gelo. O REF apresentou uma diminuição de 36,30% do índice de vazios e 34,21% da absorção de água em comparação ao CV-5, pois para garantir o derretimento completo do gelo, o REF foi misturado mais tempo do que o CV-5, o que poderia ter evitado a formação de microfissuras na zona interfacial por uma duração de mistura otimizada (HIREMATH; YARAGAL, 2017). Durante a mistura, após a formação do concreto, misturou-se tudo por 1 min em velocidade, e para desaglomerar mais os materiais, aumentou-se a velocidade e CV-5 foi misturado 2 min, enquanto REF foi misturado por 5 min, sendo essa a única diferença entre esses traços. Portanto, recomenda-se que a durante a mistura de concretos com gelo seja realizado com um maior tempo de mistura.

Comparando o traço HIB com o REF, ocorreu um aumento do índice de vazios e da absorção de água em aproximadamente 200%. A adição das fibras de PVA aumentou a incorporação de ar no estado fresco, resultando em um aumento da porosidade no estado endurecido pela não distribuição homogênea das fibras (POORHOSEIN; NEMATZADEH, 2018) e força coesiva entre as fibras e a pasta de cimento (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c).

O índice de vazios e a absorção de água reduziram 10 e 15%, respectivamente, comparando o traço FBA com REF. Isso aconteceu, provavelmente, porque FBA foi vibrado mais tempo do que REF para ajudar durante a moldagem dos corpos de prova para eliminar o ar preso da matriz (ALLENA; NEWTON, 2011), (KOCH et al., 2019).

Figura 48-a, b e c apresenta a relação entre índice de vazios e abatimento para os traços de CUAD e CUADRF com pó de quartzo, cinza volante e metacaulim, respectivamente. Observa-se que as misturas de CUAD obtiveram baixo índice de vazios com valores de espalhamento suficientemente altos. Comparando PQ-5 com PQ-1, PQ-6 com PQ-2, MT-4 com MT-1, MT-5 com MT2, CV-4 com CV-1, CV-5 com CV-1, CV-5 para CV-4, REF para CV-5, HIB para REF, que foram desenvolvidos com o mesmo empacotamento de partículas, mas com menor relação a / aglom, pode-se observar que a redução da

porosidade melhorou a fluidez. Este comportamento também foi observado por (RAGALWAR et al., 2016), (SOHAIL et al., 2018), (LIU et al., 2020).

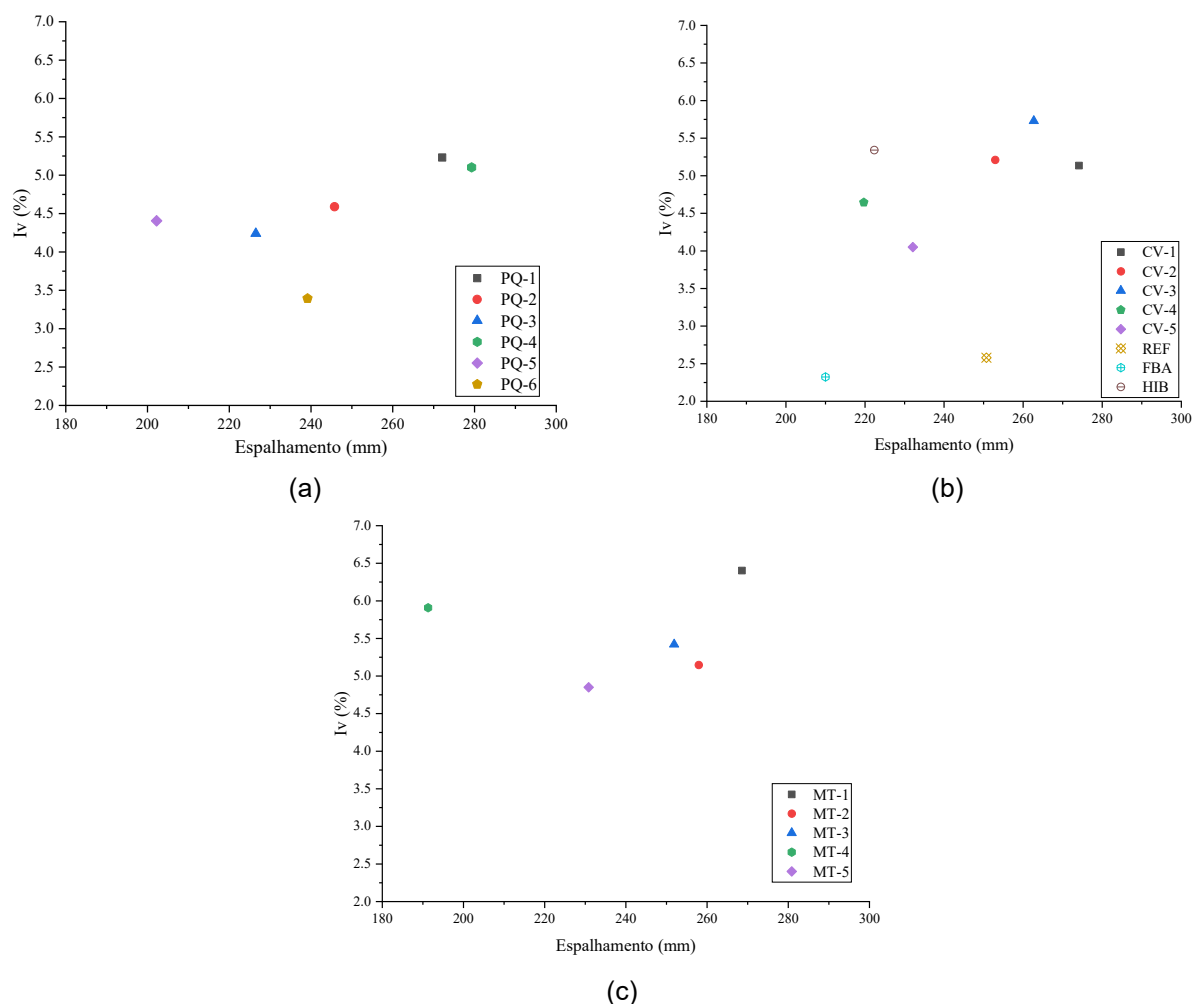


Figura 48: Relação entre índice de vazio e espalhamento para os traços de CUAD/CUADRF com (a) pó de quartzo, (b) cinza volante e (c) metacaulim

Apesar desta técnica não ser tão precisa quanto a técnica de pressão (SAFIUDDIN; HEARN, 2005), foi possível avaliar a porosidade dos traços e fazer comparações entre eles para definir qual seria o menos poroso e com maior resistência à compressão a fim de ser estudado com fibras. Além disso, Oliveira et al. (2020) utilizaram essa mesma técnica para encontrar o índice de vazios para concreto convencional de 25 MPa, e encontraram índice de vazios da ordem de 17.50%. Para os CUADs/CUADRF da presente

pesquisa, o índice de vazios ficou entre 2.60 a 6.40%, indicando que o CUAD é um concreto mais denso e homogêneo devido ao seu modo de dosagem e materiais.

5.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Utilizou-se a mesa vibratória para facilitar a moldagem dos corpos de prova dos seguintes traços: PQ-5, PQ-6, CV-4, CV-5, MT-4, MT-5, REF, FBA, HIB para eliminação de bolhas. A Tabela 14 apresenta os resultados da resistência à compressão para 7, 28 e 161 dias e módulo de elasticidade aos 161 dias para os traços de CUAD e a Tabela 15 apresenta os resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 140 dias para REF, FBA e HIB. Por conta da pandemia de Covid-19, houve um impacto muito grande na realização e utilização dos laboratórios universitários durante esse período. Por isso, as datas de ensaio não foram as datas padrões sugeridas pela ABNT NBR 5738:2015.

Tabela 14: Resultados da resistência à compressão aos 7, 28 e 161 dias para os traços de CUAD

Traços	7 dias			28 dias			161 dias						
	f _c (MPa)	D.P.	C.V. (%)	f _c (MPa)	D.P.	C.V. (%)	f _c (MPa)	D.P.	C.V. (%)	E (GPa)	D.P.	C.V. (%)	
PQ-1	83.29	5.12	6.14	95.00	22.29	23.46	-	-	-	-	-	-	
PQ-2	86.79	2.72	3.13	88.43	15.15	17.13	-	-	-	-	-	-	
PQ-3	78.81	17.04	21.63	101.26	14.14	13.97	-	-	-	-	-	-	
PQ-4	59.87	14.79	24.70	104.29	17.69	16.96	-	-	-	-	-	-	
PQ-5	63.73	7.13	11.19	108.21	12.07	11.15	-	-	-	-	-	-	
PQ-6	76.96	1.70	2.21	96.15	24.50	25.48	116.32	17.75	15.26	50.44	2.05	4.07	
MT-1	71.27	23.72	33.28	111.41	18.85	16.92	-	-	-	-	-	-	
MT-2	88.33	10.04	11.37	106.40	8.44	7.93	-	-	-	-	-	-	
MT-3	85.99	2.24	2.61	97.97	14.81	15.12	-	-	-	-	-	-	
MT-4	87.77	4.92	5.60	93.97	25.37	26.99	-	-	-	-	-	-	
MT-5	77.11	13.03	16.90	115.74	16.64	14.38	126.73	5.32	4.20	43.53	1.84	4.23	
CV-1	88.46	5.95	6.73	112.68	13.88	12.32	-	-	-	-	-	-	
CV-2	74.43	0.73	0.98	103.67	19.73	19.03	-	-	-	-	-	-	
CV-3	74.42	2.38	3.20	86.31	9.78	11.34	-	-	-	-	-	-	
CV-4	92.30	7.70	8.34	121.84	8.65	7.10	-	-	-	-	-	-	
CV-5	88.60	11.05	12.47	101.62	20.18	19.86	130.53	1.89	1.45	42.34	2.07	4.88	

Tabela 15: Resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 140 dias para os traços finais (REF, FBA e HIB)

Traços	fc (MPa)	D.P.	140 dias			
			C.V. (%)	E (GPa)	D.P.	C.V. (%)
REF	128.24	18.51	14.43	40.58	1.75	4.32
FBA	146.01	8.37	5.73	42.88	1.53	3.56
HIB	123.94	6.46	5.21	40.94	1.54	3.76

O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foi realizado para uma idade avançada, porém, sabe-se que a idade do concreto não influencia no resultado comparado com a resistência à compressão (CHEN; YU; TANG, 2020), pois o módulo de elasticidade é atingido já nas primeiras horas após a moldagem (NEHDI; SOLIMAN, 2011). Observa-se que com a incorporação de fibras (FBA e HIB), o módulo de elasticidade aumentou ligeiramente comparado ao traço referência (REF).

A adição de materiais cimentícios suplementares pode aumentar a resistência à compressão através da habilidade da reação pozolânica, convertendo CH em C-S-H, e preenchendo os poros e vazios do concreto (SHI et al., 2015), (SOHAIL et al., 2018). Os resultados experimentais podem confirmar, pois as misturas CV e MT apresentaram as maiores resistências à compressão. Verifica-se que após 161 dias, as misturas PQ-6, CV-5 e MT-5 obtiveram resistência à compressão média de 116.32 MPa, 130.53 MPa e 126.73 MPa, com desvio-padrão de 17.75, 5.32 e 1.89, respectivamente. Arora et al. (2018), Chao et al. (2016), Christ et al. (2019), Graybeal (2006), Graybeal; Davis (2008), Qiao; Honma; Kojima (2019), Wang; Gao (2016), Yoo et al. (2014) e Yoo; Kim (2019) reportaram, também, valores de desvio-padrão altos. Isso ocorreu pois o CUAD é um material muito frágil, além disso, o uso de corpo de prova cilíndricos pequenos pode levar a obtenção de maiores valores de desvio-padrão (GRAYBEAL, 2006). Para reduzir o desvio-padrão, o ideal seria utilizar equipamentos de maior precisão, com recente calibração e corpos de prova maiores. É possível verificar que os traços FBA e HIB apresentaram menor desvio-padrão e coeficiente de variação. O coeficiente de variação até 6%, classifica a eficiência do ensaio em razoável de acordo com ABNT NBR 5739:2018.

A resistência à compressão para o traço CV-5 aos 161 dias aumentou mais de 28% em relação ao resultado de 28 dias, além disso, obteve a maior resistência à compressão de todas as misturas de CUAD. A sílica ativa tem alta reatividade e rápida reação pozolânica, o que contribui para o desenvolvimento de força em idades precoces (MISHRA; SINGH, 2019), já a cinza volante tem uma reação pozolânica mais lenta, o

que pode atrasar a hidratação do cimento e aumentar a resistência à compressão em uma idade avançada (PARK et al., 2021), (BAJABER; HAKEEM, 2020), (MISHRA; SINGH, 2019), (LIU; SHI; WU, 2019). Devido a sua reação pozolânica, o metacaulim pode aumentar a resistência à compressão a longo prazo (JUENGER; SIDDIQUE, 2015), o que pode ser verificado pelo aumento da resistência à compressão em 9% de 28 para 161 dias para o traço MT-5. Portanto, a escolha dos materiais cimentícios suplementares adequados para CUAD dependerá totalmente das propriedades desejadas para o projeto (MISHRA; SINGH, 2019).

Observou-se que os corpos-de-prova referentes às misturas com metacaulim apresentaram melhor acabamento (estética) e cor mais clara em relação aos corpos-de-prova com pó de quartzo (PQ) e cinza volante (CV), Figura 49, o que pode ser útil para elementos de fachada em concreto aparente e pré-fabricados. Além disso, o metacaulim tende a acelerar mais a hidratação do cimento do que a sílica ativa (SONG et al., 2018) e a cinza volante, o que leva a um endurecimento mais rápido do concreto, ideal para aplicações de pré-moldados. O uso de metacaulim para a produção de CUAD é favorável devido à sua disponibilidade, baixo preço (SHI et al., 2015), (TAFRAOUI et al., 2009), e também por reduzir a retração autógena (SHI et al., 2015), (MISHRA; SINGH, 2019).

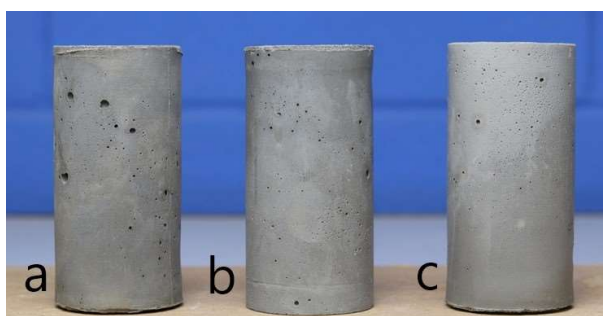


Figura 49: Superfícies das amostras de CUAD com (a) pó de quartzo, (b) cinza volante e (c) metacaulim

Como a matriz CUAD tem comportamento frágil, é necessário o uso de reforço através do uso de fibras discretas para proporcionar excelente ductilidade, resistência ao impacto (SOHAIL et al., 2018), absorção de energia, resistência à delaminação e resistência à fragmentação e fadiga (SHI et al., 2015). As fibras de aço são comumente usadas em matrizes de CUAD devido à maior resistência e módulo, e ter uma dosagem de fibra adequada pode melhorar o desempenho mecânico e diminuir o encolhimento autógeno de CUAD (SHI et al., 2015). Embora a adição de fibras seja mais eficiente sob esforços de tração, pode-se observar que a adição de fibras de aço (FBA) aumentou 14% a resistência à compressão e 6% o módulo de

elasticidade em relação ao REF. O mesmo comportamento também foi observado por (KRAHL, 2018), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2016), (YOO et al., 2014), (WU et al., 2017), (IBRAHIM et al., 2017), (POURJAHANSHAH; MADANI, 2021). O aumento da resistência à compressão e o módulo de elasticidade ocorreu porque as fibras são capazes de retardar a propagação e abertura de fissuras (MISHRA; SINGH, 2019), (YOO et al., 2017). As interações entre fibra e matriz podem auxiliar no aumento da ductilidade e a tenacidade do CUADRF (KRAHL, 2018), (MISHRA; SINGH, 2019). Existem três tipos de interação, adesão física e química, fricção e ancoragem mecânica. A ligação adesiva e friccional entre uma matriz de fibra e cimentícia tem uma alta contribuição e significado prático no caso de microestrutura extremamente refinada e porosidade muito baixa, como CUAD (BENTUR; MINDESS, 2006). O uso de fibras de aço com tratamento de superfície em CUADRF é o principal motivo para aumentar essa interação (KRAHL, 2018). Além disso, a maior resistência se deve à rigidez das fibras de aço (POURJAHANSHAH; MADANI, 2021).

Por outro lado, a substituição parcial das fibras de aço por fibras de PVA no traço híbrido de CUADRF (HIB) reduziu a resistência à compressão. (FENG et al., 2018), (POORHOSEIN; NEMATZADEH, 2018), (SONG et al., 2020), (POURJAHANSHAH; MADANI, 2021), (WEI et al., 2021) também observaram esse comportamento. Isso ocorreu, pois a incorporação de fibras aumenta a porosidade e ar aprisionado e como as fibras poliméricas possuem uma área superficial elevada, dificultam a sua dispersão de forma homogênea, e conseqüentemente, enfraquecendo a interação fibra-matriz (POORHOSEIN; NEMATZADEH, 2018), (YOO; KIM, 2019a), (LARSEN; THORSTENSEN, 2020). Isto se confirma frente à obtenção de um maior índice de vazios para traço HIB em comparação com o traço REF. Além disso, as fibras de PVA têm baixo módulo de elasticidade (CAO; XU; ZHANG, 2018) e baixa resistência (FENG et al., 2018) em comparação com as fibras de aço (SONG et al., 2020).

Para mostrar a influência da relação a/aglom na resistência à compressão, as Figura 50-a, b e c apresentam uma relação entre as resistências à compressão e a relação a/aglom para os traços de CUAD e/ou CUADRF com pó de quartzo, metacaulim e cinza volante, respectivamente. Pode-se observar que à medida que reduz-se a relação a/aglom, a resistência à compressão (f_c) tende a aumentar, pois quanto menor a quantidade de água, menor a porosidade, pois o excesso de água aumenta a capilaridade (FORNASIER, 1995), (RAUCCI et al., 2018). Analisando as misturas com a mesma otimização da distribuição granulométrica (empacotamento de partículas) por combinação de materiais (PQ, CV, MT), é possível verificar que entre PQ-

5 e PQ-1, PQ-6 e PQ-2, CV-4 e CV- 1, MT-5 para MT-2 houve um aumento da resistência à compressão de aproximadamente de 14%, 9%, 8%, 9%, respectivamente. Isso foi possível porque houve uma redução na sua relação $a/aglom$ de 12%, 14%, 17%, 14%. O aumento da resistência à compressão diminuindo a relação água/aglomerante também foi observado por (PARK et al., 2008), (RAGALWAR et al., 2016), (SOHAIL et al., 2018), (LIU et al., 2020).

Esperava-se maior resistência à compressão comparando CV-5 com CV-4 e MT-4 com MT-1, pois houve redução de $a/aglom$ de 7% e 10%, respectivamente. Porém, a resistência à compressão apresentou redução de 17% e 16%, respectivamente. Os resultados desses testes apresentaram grande dispersão, e a possível causa seria a máquina de ensaio não calibrada. Por isso, máquina de ensaio foi alterada para o ensaio de resistência à compressão aos 140 e 161 dias e para o módulo de elasticidade aos 140 dias.

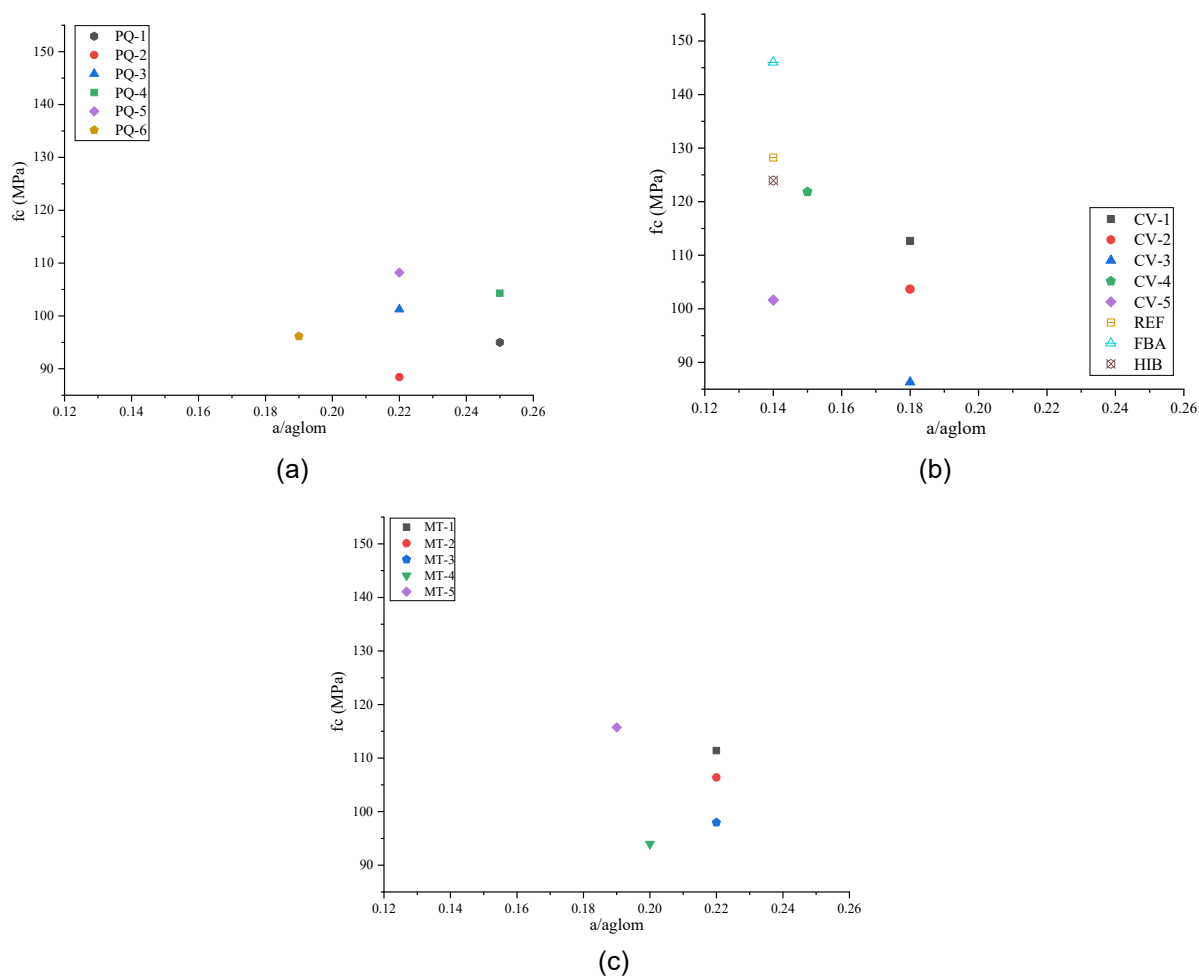


Figura 50: Comparação da resistência à compressão em função da relação $a/aglom$ para os traços da (a) Combinação 1; (b) Combinação 2; e (c) Combinação 3

A Figura 51-a, b e c apresenta a relação entre a resistência à compressão e o índice de vazios (I_v) para os traços de CUAD e/ou CUADRF estudados com pó de quartzo, cinza volante e metacaulim, respectivamente. Verifica-se que com a redução da porosidade, obtida através da redução da relação a/aglom e da utilização da mesa vibratória, ocorreu um aumento da resistência à compressão. O concreto com menor porosidade, consequentemente, possui uma matriz mais densa. (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014c), (LIU et al., 2020) também observaram que a diminuição da porosidade aumentou a resistência à compressão do UHPC. O traço FBA apresentou uma redução de 10% do índice de vazios em relação ao REF, o que levou a um aumento em torno de 14% da resistência à compressão. Enquanto o traço HIB obteve um aumento do índice de vazio em mais de 100% em comparação com o REF, o que levou a uma ligeira redução de 4% da resistência à compressão.

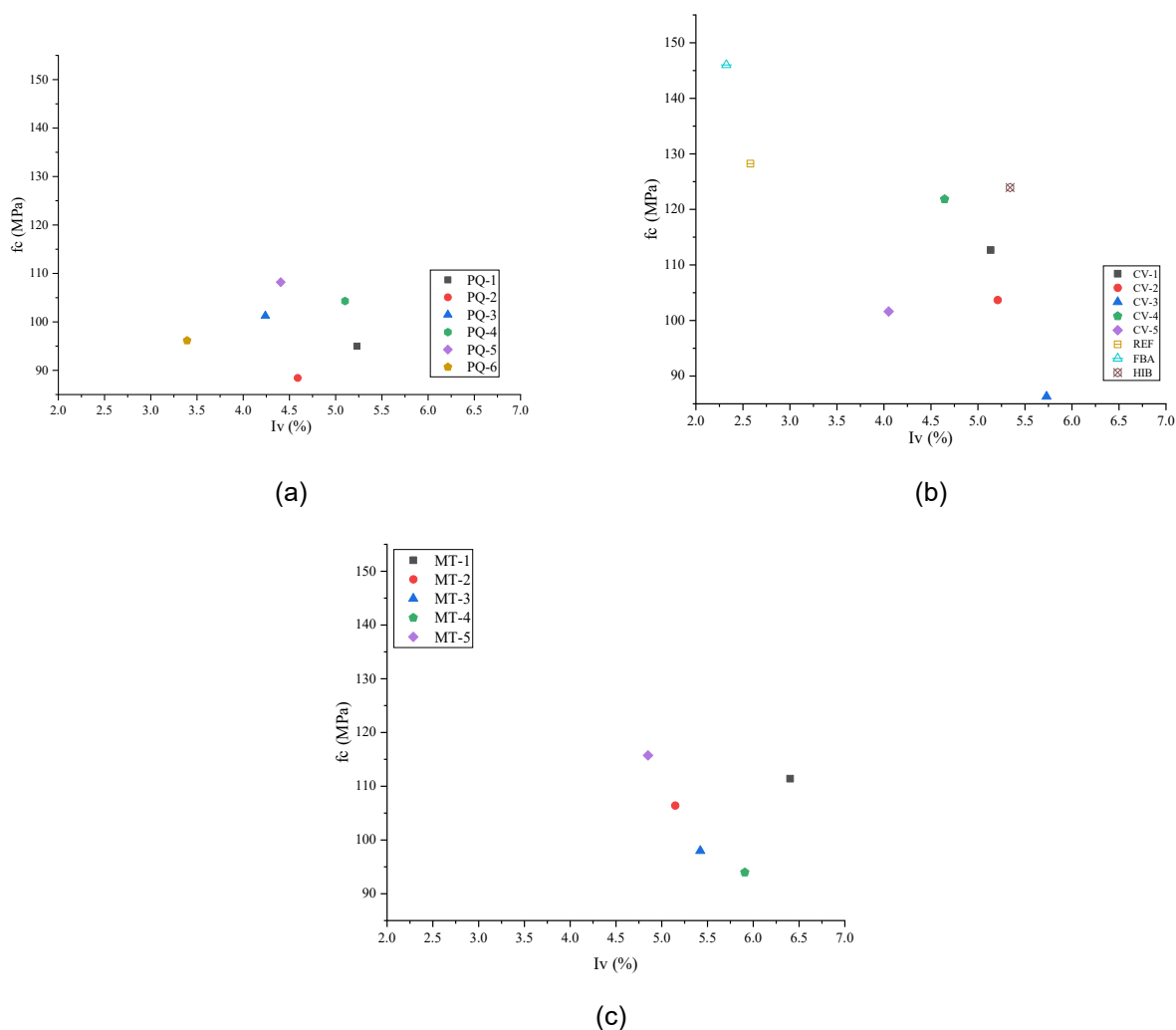
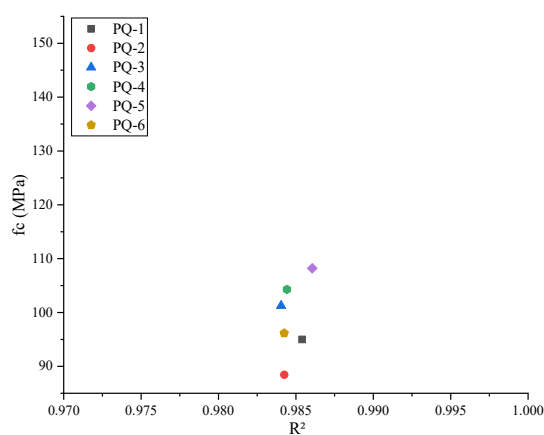


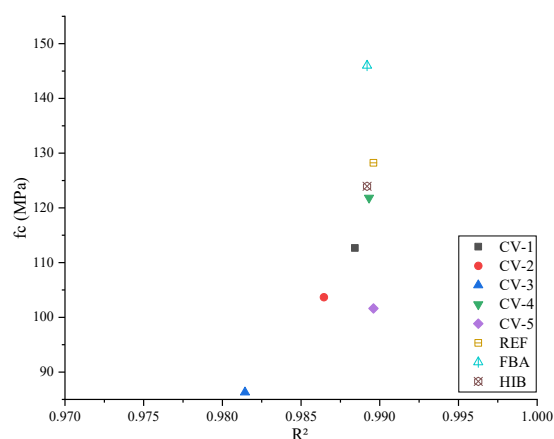
Figura 51: Comparação da resistência à compressão em função do índice de vazios para (a) traços da Combinação 1, (b) traços da Combinação 2 e (c) traços da Combinação 3

A Figura 52-a, b e c apresenta a comparação entre a resistência à compressão e o coeficiente de determinação (R^2) para os traços de CUAD e/ou CUADRF investigados com pó de quartzo, cinza volante e metacaulim, respectivamente. Observa-se que quando o coeficiente é próximo a 1, maior é a resistência à compressão, indicando que a mistura possui empacotamento denso de partículas por apresentar curva experimental mais próxima do modelo da curva de Andreasen e Andersen modificada (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2016), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2016).

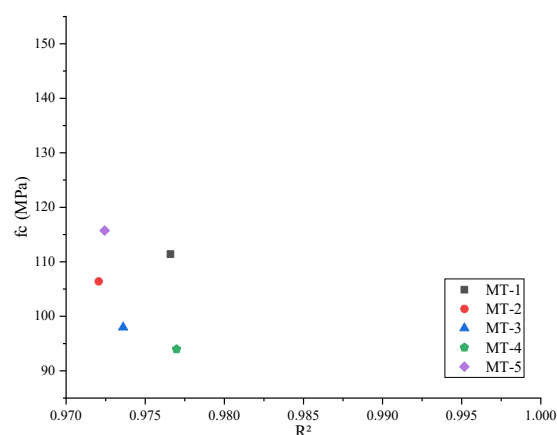
Além disso, é possível verificar que os traços com cinza volante apresentaram os maiores valores para o coeficiente de determinação (R^2) e as maiores resistências à compressão, indicando que a escolha da combinação com cimento, areia fina, sílica ativa e cinza volante foi a mais adequada e recomendada para desenvolver CUAD. Comparando o traço REF com CV-5, apesar de ambas serem a mesma mistura, devido ter sido desenvolvidos de forma diferente, REF apresentou um maior valor de R^2 . Além disso, os traços FBA e HIB possuem o mesmo empacotamento de partículas que o traço CV-5, diferenciando-se apenas devido a incorporação de fibras, também apresentaram um maior valor para R^2 . O aumento no valor de R^2 indica uma matriz de CUAD/CUADRF mais densa, e que consequentemente, apresentou maior resistência à compressão (140 e 161 dias).



(a)



(b)



(c)

Figura 52: Comparação da resistência à compressão em função do coeficiente de determinação (R^2) para os traços da (a) Combinação 1, (b) Combinação 2 e (c) Combinação 3

A presente pesquisa teve como base o trabalho desenvolvido por (KRAHL, 2018). A Tabela 16 apresenta o consumo de materiais e resultados obtidos da resistência à compressão e módulo de elasticidade para os traços principais de ambas as pesquisas (CUAD e CUADRF com 2% de fibras de aço). Comparando-se os traços desenvolvidos, é possível verificar que a grande diferença é a adição de cinza volante para os traços da presente pesquisa. Além disso, para o presente trabalho, o consumo de cimento, sílica, areia, água e superplastificante foram inferiores aos traços de (KRAHL, 2018). Vale ressaltar que para a presente pesquisa, a cura foi realizada no método tradicional e os resultados foram obtidos para 161 dias, enquanto (KRAHL, 2018) realizou a cura úmida durante os primeiros 28 dias e cura térmica até os 35 dias e os resultados obtidos foram feitos para 35 dias. Porém, observa-se que os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram equivalentes. Indicando que apesar da redução no consumo de material e realização de cura úmida, os materiais utilizados garantiram a obtenção de bons resultados.

Tabela 16: Comparação entre o trabalho de KRAHL e a presente pesquisa

Materiais / Propriedades	(KRAHL, 2018)		Presente pesquisa	
	CUAD	CUADRF-2%	CUAD	CUADRF-2%
cimento (kg/m ³)	850.00	850.00	800.00	800.00
silica (kg/m ³)	226.00	226.00	180.57	171.76
areia (kg/m ³)	850.00	850.00	588.80	581.82
cinza volante (kg/m ³)	-	-	417.94	397.36
sp (kg/m ³)	76.50	76.50	40.00	40.00
água (kg/m ³)	170.00	170.00	173.39	169.28
fibra aco (kg/m ³)	-	157.00	-	156.00
f _c (MPa)	131.50	150.50	128.24	146.01
D.P.(MPa)	8.58	6.67	18.51	8.37
E (GPa)	39.60	43.40	40.58	42.88
D.P.(GPa)	1.60	0.90	1.75	1.53
f _c – resistência à compressão / E – módulo de elasticidade / D.P. – Desvio-padrão				

5.4.RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado apenas para o traço referência aos 140 dias. O traço REF apresentou resistência à tração por compressão diametral de 6.87 MPa, com desvio-padrão de 0.49 MPa e coeficiente de variação de 7.12%. (OLIVEIRA, 2019) obteve resultado similar para o CUAD, da ordem de 7.6 MPa com desvio-padrão de 1.2 MPa.

A máxima resistência à tração por compressão diametral para o concreto convencional e para o concreto de alta resistência é em torno de 5 MPa (MISHRA, SINGH, 2019), (XU; YAN; WANG, 2018). Esse aumento da resistência à tração por compressão diametral para o CUAD implica na diminuição do risco de fissura, ocasionando um aumento da durabilidade, e possibilita a redução das seções dos elementos estruturais.

5.5.RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Para os corpos de prova referente ao traço REF, a ruptura ocorreu de modo frágil (Figura 53-a). Após a formação da fissura, as amostras referentes aos traços de CUADRF (FBA e HIB) apresentaram um comportamento dúctil, pois as fibras passaram a atuar através do mecanismo de pullout e assim promovem uma propagação estável da fratura. Para CUADRF-FBA e CUADRF-HIB, a fissura principal parte do entalhe

e se propaga até a borda superior do prisma (Figura 53-b e Figura 53-c). Cabe destacar, que devido ao volume de fibras e a capacidade destas de sustentar carga após a perda de aderência durante o arrancamento, se desenvolvem microfissuras nas proximidades da fissura principal, o que promove o mecanismo de endurecimento (*hardening*). Este comportamento também foi relatado por (SMARZEWSKI; BARNAT-HUNEK, 2018).

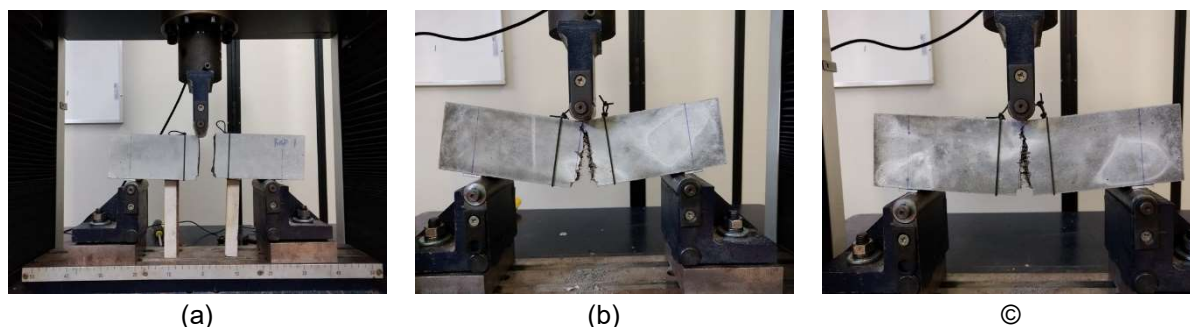


Figura 53: Ruptura dos corpos de prova durante ensaio de tração na flexão para (a) REF (b) FBA e (c) HIB

A Tabela 17 apresenta as cargas e a resistências à tração na flexão para a primeira fissura e para ruptura para REF, FBA e HIB. A incorporação de fibras aumentou significativamente a resistência à tração na flexão. Em comparação com o traço REF, houve um aumento de 63,90% para FBA e 38,47% para HIB. (MAGUREANU et al., 2010), (MARKOVIC, 2006), (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014a) e (YU et al., 2014) reportaram que a a partir da adição de fibras, a carga e a resistência à tração na flexão aumentaram, significativamente, independentemente do volume utilizado de fibras.

Tabela 17: Cargas e resistências à tração na flexão na primeira fissura e na ruptura para REF, FBA e HIB

Traço	Idade (Dias)	F_f (kN)	D.P.	f_f (Mpa)	D.P.	F_{fmax} (kN)	D.P.	f_{fmax} (Mpa)	D.P.
REF	70	-	-	-	-	8.78	0.5	9.57	0.62
FBA	30	8.96	0.35	9.75	0.43	16.02	2.71	17.44	2.98
HIB	30	7.75	0.57	8.68	0.28	12.61	0.33	14.13	0.26

F_f – Carga de flexão na primeira fissura
 f_f – resistência à flexão na tração na primeira fissura
D.P. – Desvio-padrão
 F_{fmax} – carga de flexão máxima
 f_{fmax} – resistência máxima à flexão na tração

A Figura 54 apresenta as curvas load-CMOD para REF aos 70 dias, e para CUADRF FBA e HIB aos 30. Percebe-se que o CUAD sem fibras (REF) possui um comportamento frágil. Tanto o traço FBA quanto o traço HIB apresentaram comportamento de endurecimento após a formação da primeira fissura até CMOD igual a 0,50 mm, aproximadamente. Para CUADRF, antes da formação da primeira fissura, as fibras e a matriz CUADRF sustentam a carga juntas, e a curva é quase linear. Já após o aparecimento da primeira fissura, as fibras transmitem a carga entre as faces da fissura por meio do seu mecanismo de aderência (WU et al., 2016), e a curva apresentou um comportamento de endurecimento. Quando a tensão de aderência máxima do grupo de fibras que está costurando a fissura é atingida, a carga que o grupo suporta passa a diminuir, e, consequentemente a capacidade do prisma também diminui, caracterizando o amolecimento.

A substituição de parte das fibras de aço por fibras de PVA diminuiu a resistência à flexão na tração máxima. O traço HIB obteve uma redução de 19% da resistência à tração à flexão na tração para 30 dias em comparação com o traço FBA. Porém, os resultados foram satisfatórios. (FENG et al., 2018), (SONG et al., 2020), (WEI et al., 2021) também obtiveram menor resistência à tração na flexão para o CUADRF híbrido em comparação com o CUADRF com apenas fibras de aço. A diminuição da resistência à tração na flexão foi devido à má dispersão e má orientação das fibras (WEI et al., 2021). As fibras de PVA são menos eficientes para melhorar as propriedades na flexão do CUADRF do que as fibras de aço (SONG et al., 2020), pois a resistência à tração na flexão do CUADRF é influenciada, principalmente, pela resistência ao arrancamento da fibra na superfície da fissura (YOO et al., 2017).

Porém, WEI et al. (2021) relataram que a aderência entre as fibras de PVA e a matriz de CUAD é mais forte em comparação com as fibras de aço, devido à hidrofília da fibra de PVA e à grande superfície de contato interfacial entre as fibras de PVA e a matriz. As fibras de PVA podem fazer a ponte entre as fissuras e transferir a carga na interface após a fissuração. Nesse etapa, as fissuras existentes se propagam e expandem lentamente e as novas fissuras ocorrem em outro local da amostra de CUADRF, resultando no modo de ruptura com a formação de múltiplas fissuras (WEI et al., 2021).

É possível verificar que o traço de CUADRF híbrido (HIB) obteve uma menor dispersão dos resultados em comparação com o traço sem fibras (REF) e o traço com fibras de aço (FBA). Indicando que a amostra está mais homogênea, sendo mais uma vantagem para a utilização da hibridização de fibras.

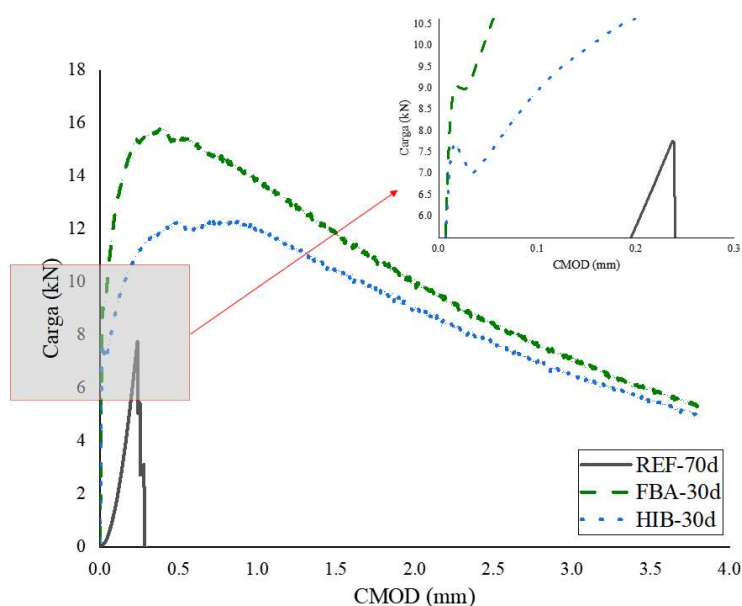


Figura 54: Curvas carga – CMOD para os traços REF aos 70 dias e FBA e HIB aos 30 dias

A Tabela 18 apresenta o limite de proporcionalidade e cargas e resistências residuais de flexão na tração para FBA e HIB aos 30 dias.

Tabela 18: Valores médios dos parâmetros residuais de resistência à tração na flexão

Traço	Idade (dias)	$ff_{ct,L}$ (MPa)	D.P.	$f_{R,1}$ (MPa)	D.P.	$f_{R,2}$ (MPa)	D.P.	$f_{R,3}$ (MPa)	D.P.	$f_{R,4}$ (MPa)	D.P.
FBA	30	11.21	1.77	16.80	2.40	12.91	1.82	9.23	0.96	6.48	0.72
HIB	30	8.68	0.28	13.81	0.37	11.72	0.43	8.62	0.73	6.21	0.47

$ff_{ct,L}$ – limite de proporcionalidade

$f_{R,1}$ – resistência residual de tração na flexão para $CMOD_1 = 0.50$ mm

$f_{R,2}$ – resistência residual de tração na flexão para $CMOD_2 = 1.50$ mm

$f_{R,3}$ – resistência residual de tração na flexão para $CMOD_3 = 2.50$ mm

$f_{R,4}$ – resistência residual de tração na flexão para $CMOD_4 = 3.50$ mm

D.P. – Desvio-padrão

5.6. MICROSCOPIA DOS PRISMAS

Após o ensaio de resistência à tração flexão, as amostras foram extraídas das superfícies fraturadas para observação da microscopia para os traços REF, FBA e HIB.

A Figura 55-a apresenta as características morfológicas da amostra REF. As análises da microestrutura revelaram uma microestrutura muito densa do CUAD devido à relação a/aglom ser muito baixa

e ao empacotamento de partículas. Além disso, a adição de sílica ativa e cinza volante também contribuiu para obtenção de uma microestrutura mais densa devido à reação pozolânica entre os materiais cimentícios suplementares e o produto de hidratação do cimento (hidróxido de cálcio). A zona de transição entre agregado-matriz é uma região de maior porosidade em concreto convencionais e portanto menos resistente (GIDRÃO; KRAHL; CARRAZEDO, 2020). Porém, é possível verificar que no CUAD esta região é praticamente inexistente, o que confere uma boa aderência entre a matriz de CUAD e o agregado fino, assim, como foi observado por (CHEN; YU; TANG, 2020).

As fibras, devido a sua forma, são as maiores heterogeneidades dentro do CUADRF, por isso, a interface fibra e matriz é uma região que tende a ser mais porosa, sendo que as fissuras em sua interface são normalmente de tamanho em nanoescala (GIDRÃO; KRAHL; CARRAZEDO, 2020). Em comparação com o concreto convencional, as descontinuidades pré-existentes no CUADRF são de menor escala (GIDRÃO; KRAHL; CARRAZEDO, 2020). A Figura 55-b apresenta a microestrutura do traço com fibras de aço. É possível verificar que na interação fibra e matriz formaram-se fissuras, evidenciando a danificação causada pelo arrancamento das fibras durante o ensaio. Na Figura 55-b é possível observar algumas localizações onde fibras de aço foram arrancadas da matriz. Esse comportamento também foi reportado por (CHEN; YU; TANG, 2020) e (KRAHL, 2018).

A resistência à tração das fibras metálicas e a ausência de ancoragem mecânicas permite que elas sejam arrancadas da matriz durante o ensaio (FENG et al., 2018), ao invés de romperem. Esse comportamento provê ductilidade ao compósito. A ancoragem mecânica é suprimida devido à excelente interação fibra-matriz, que mesmo depois do rompimento da aderência química, ainda sustenta um elevado nível de carga por atrito, provendo tenacidade ao CUADRF. Apesar das fibras de PVA apresentarem melhor aderência com a matriz, elas apresentam baixa resistência à tração e durante o ensaio são rompidas. Através da Figura 55-c, é possível perceber que a matriz aderiu melhor à fibra de PVA em comparação com a fibra de aço, com a maior quantidade de produtos hidratados aderidos à superfície da fibra de PVA (FENG et al., 2018), (PAKRAVAN; JAMSHIDI; LATIFI, 2016). (FENG et al., 2018) também observaram esse comportamento para o CUADRF híbrido.

Para garantir a boa orientação das fibras, durante a moldagem deixou-se o concreto fluir de uma extremidade à outra do prisma. Através da Figura 55, é possível verificar que as fibras estão todas no mesmo sentido, confirmando que o modo de moldagem auxiliou na orientação e alinhamento das fibras.

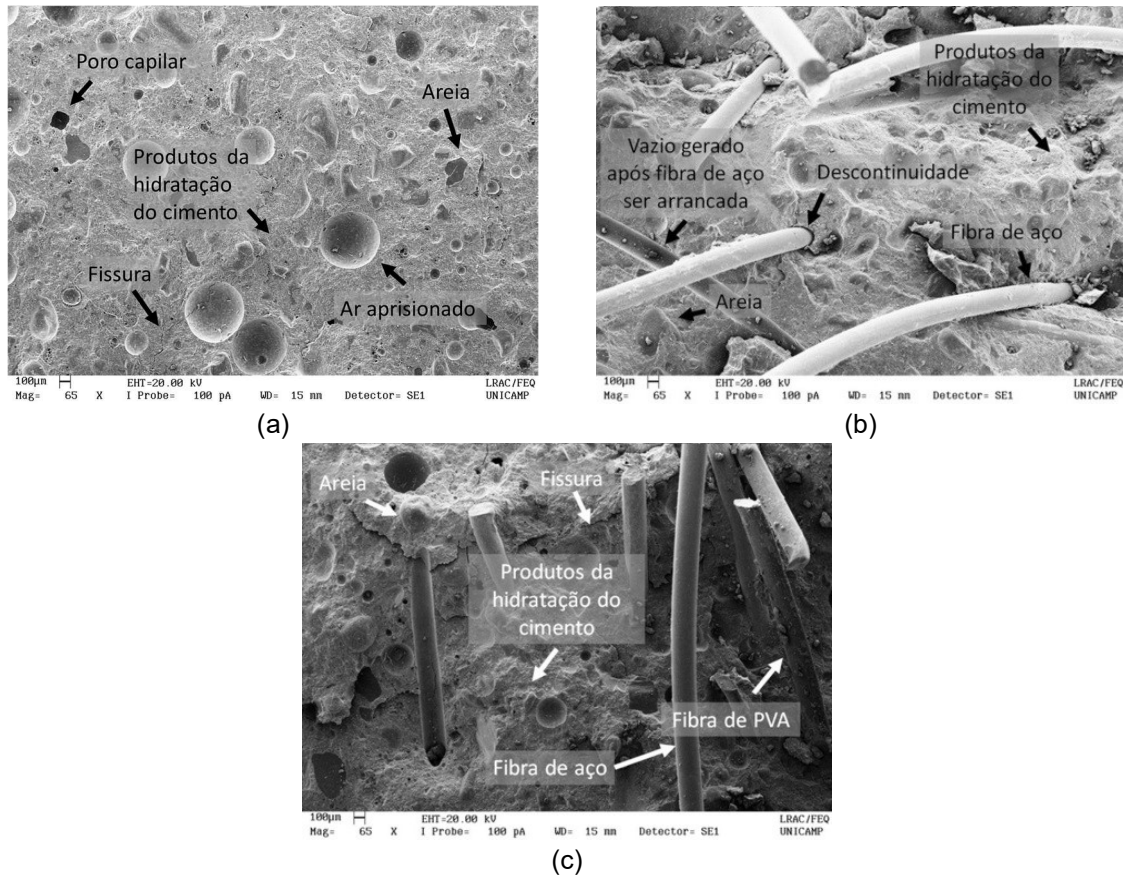


Figura 55: Micrografia do traço (a) REF, (b) FBA e (c) HIB

Na Figura 56, é possível verificar ranhuras longitudinais na superfície das fibras de aço proveniente do atrito entre matriz e fibra. Esse detalhe reflete a abrasão causada pela matriz e identifica a eficácia do atrito e excelente aderência entre matriz-fibra (WILLE; NAAMAN, 2010), (DENG et al., 2018).

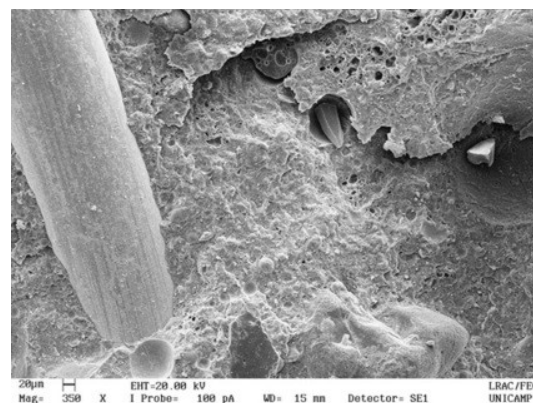


Figura 56: Micrografia da interação entre a fibra de aço e a matriz híbrida

5.7.PULLOUT

O comportamento interfacial está vinculado ao mecanismo de aderência das fibras e sua caracterização pode ser obtida por meio das propriedades de aderência em um ensaio de arrancamento (KRAHL et al., 2021). Melhorar a aderência interfacial entre as fibras e a matriz pode aumentar as propriedades mecânicas e também resultar em menores aberturas e espaçamentos de fissuras a uma determinada carga, o que pode proporcionar maior resistência ao ataque químico e à penetração de agentes agressivos, aumentando a durabilidade do CUADRF (WILLE; NAAMAN, 2012).

A carga máxima de arrancamento, tensão máxima da fibra, resistência média de aderência, energia de arrancamento até o pico, força de aderência média equivalente e razão de eficiência da fibra estão apresentados na Tabela 19. O ensaio foi realizado aos 64 dias. Cada série é relativa a um corpo de prova moldado com CUADRF híbrido com 18 fibras de aço embutidas. Apesar da configuração do ensaio de arrancamento ter sido feita de forma diferente em relação a outros autores, os resultados estão de acordo com (WILLE; NAAMAN, 2010), (WILLE; NAAMAN, 2012), (MENG; KHAYAT, 2016), (WU; SHI; KHAYAT, 2016), (MENG, 2017), (WU; KHAYAT; SHI, 2018), (WU; KHAYAT; SHI, 2019). A eficiência das fibras está em acordo com encontrado por (CHUN; YOO, 2019).

Tabela 19: Resultados do ensaio de arrancamento das fibras retas de aço

Séries	$P_{máx}$ (N)	D.P.	$\sigma_{f,máx}$ (MPa)	D.P.	T_{av} (MPa)	D.P.	W_p (N.mm)	D.P.	T_{eq} (MPa)	D.P.	μ	D.P.
Série 1	36.59	19.95	1164.65	634.98	7.28	3.97	164.29	106.24	8.17	5.28	0.41	0.22
Série 2	38.48	17.28	1224.82	550.17	7.66	3.44	148.68	74.57	7.39	3.71	0.43	0.19

$P_{máx}$ – Força máxima de arrancamento
 $\sigma_{f,máx}$ - Resistência máxima da fibra
 T_{av} – Resistência média de aderência
 W_p – Energia dissipada durante o arrancamento da fibra
 T_{eq} - Resistência de aderência equivalente
 μ – fator de eficiência das fibras
D.P. – Desvio-padrão

As curvas de carga-deslizamento médias para as Séries 1 e 2 estão apresentadas na Figura 59. Durante a realização do ensaio, apenas três fibras falharam para a Série 1 e apenas uma para a Série 2 antes

de serem arrancadas. Nos ensaios de arrancamento de fibra, existem três modos de falha: fragmentação da matriz, ruptura da fibra e falha da zona de transição interfacial (ZTI) (ALBERTI et al., 2016).

O processo de arrancamento (mecanismo de aderência) das fibras retas de aço consiste inicialmente na aderência química ou por adesão, que é rompida a partir da face da fissura, e nestas regiões é mobilizada pelo mecanismo de atrito (MARKOVIC, 2006), (WU; KHAYAT; SHI, 2018), (YOO et al., 2020). No início do arrancamento da fibra, a interface entre matriz e fibra está quimicamente aderida, e a tensão de cisalhamento máxima ocorre na saída da cavidade da matriz que embebe a fibra (KRAHL et al., 2021), (WU; KHAYAT; SHI, 2018). A curva de carga-deslizamento apresenta um comportamento linear durante essa fase (WU; KHAYAT; SHI, 2018). A aderência é gradativamente rompida e o atrito começa a atuar, criado pela retração da matriz, tornando a resposta não linear e o pico é alcançado nessa transição. Após o pico de carga ser alcançado, a curva fica quase estável, apresentando um comportamento de endurecimento por escorregamento (WU; SHI; KHAYAT, 2016), (MENG; KHAYAT, 2016), (WU; KHAYAT; SHI, 2018). Nessa fase, parte da fibra já está descolada da matriz. À medida que a carga aumenta, a fibra é gradualmente arrancada para fora da matriz, até ser totalmente descolada (WU; SHI; KHAYAT, 2016). Portanto, a resistência ao arrancamento da fibra de aço reta é controlada pelas propriedades de aderência físico-química entre a matriz e a superfície da fibra e o atrito (WILLE; NAAMAN, 2012). A Figura 57 apresenta uma das fibras de aço sendo arrancada durante o ensaio.

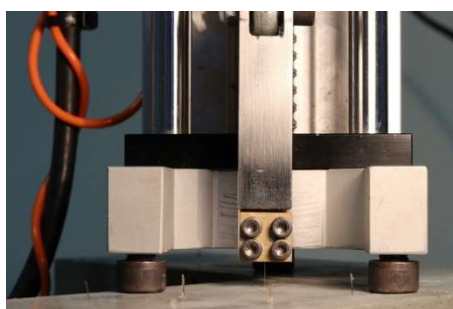


Figura 57: Fibra de aço em processo de arrancamento durante o ensaio

A Figura 58 ilustra de maneira mais detalhada o mecanismo do arrancamento da fibra em uma matriz de concreto. A curva P-s pode ser dividida em três fases:

- Fase 1 – Entre 0 e P_1 : Durante essa etapa, a interface entre a fibra de aço e a matriz é composta apenas pela aderência química adesiva. Inicialmente, essa interface está intacta, e o trecho linear da curva de carga-deslizamento representa apenas uma pequena parte de todo o deslizamento (DENG et al., 2018). Algumas microfissuras podem se formar na matriz próxima a superfície da fibra (MENG; KHAYAT, 2016), (DENG et al., 2018).
- Fase 2 – Entre P_1 e P_2 : Com o aumento da força de arrancamento, a aderência ao longo da interface fibra-matriz se danifica parcialmente. Por isso, a força de atrito na zona descolada atua junto com a força adesiva na zona intacta remanescente (DENG et al., 2018). A força de atrito é causada devido a retração da matriz (MENG; KHAYAT, 2016). A força atinge o seu máximo quando uma pequena parte da fibra ainda está aderida à matriz (DENG et al., 2018). A adição de fibras à matriz torna a superfície de atrito mais áspera, levando a uma maior carga de arrancamento (DENG et al., 2018).
- Fase 3 – Após atingir P_2 : Nessa etapa, a aderência química já foi destruída, e o comportamento de arrancamento da fibra ocorre apenas através do atrito entre a fibra e a matriz (DENG et al., 2018). A resistência ao arrancamento diminui gradualmente até zero, à medida que o comprimento restante da fibra na matriz torna-se cada vez mais curto até a fibra ser totalmente arrancada (WU; SHI; KHAYAT, 2016), (DENG et al., 2018).

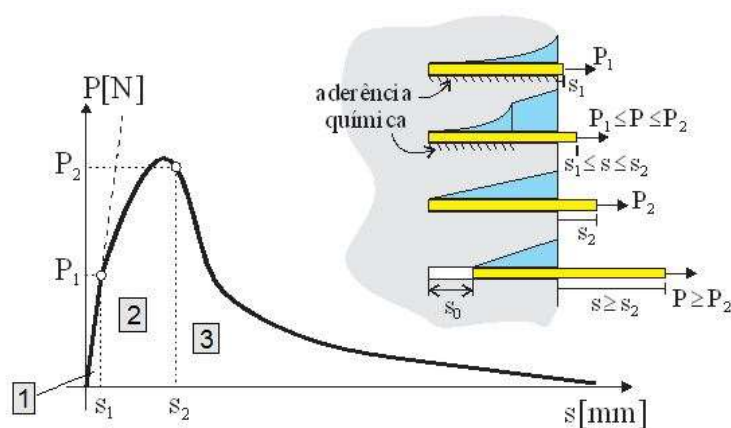


Figura 58: Mecanismo de arrancamento da fibra em uma matriz de concreto

A partir da Figura 59 é possível observar que ambas as Séries conseguiram sustentar um nível elevado de carga após a perda de aderência. Um dos motivos foi devido ao revestimento de cobre das fibras retas de aço, utilizado para tornar a superfície da fibra mais áspera. (YOO; KIM, 2019b) e (WILLE; NAAMAN, 2012) reportaram que o revestimento em latão na fibra de aço permitiu o aumento da resistência ao arrancamento. (WILLE; NAAMAN, 2012) relataram a abrasão na interface é intensa ao ponto de destacar o revestimento e danificar a superfície da fibra de aço, o que proporcionou maior aderência ao arrancamento.

Além disso, o uso de materiais cimentícios suplementares, como sílica ativa e cinza volante, na matriz do CUADRF pode aumentar a aderência da fibra (WILLE; NAAMAN, 2012), (WU; KHAYAT; SHI, 2018), (WU; KHAYAT; SHI, 2019), (SANKAR; RAMADOSS, 2021). A sílica ativa e a cinza volante proporcionam densificação adicional à matriz, devido às suas atividades pozolânicas, aumento do empacotamento de partículas e melhora das características de aderência entre a fibra e a matriz (WILLE; NAAMAN, 2012), (KRAHL et al., 2021), (NGUYEN; THAI; NGO, 2021).

Um dos motivos para estudar as fibras híbridas em uma matriz de concreto é por ser uma maneira eficaz de aumentar a resistência de aderência da interface fibra-matriz (DENG et al., 2018), (CHUN; YOO, 2019), (AHMAD; KHAN; SMARZEWSKI, 2021). A melhora nas propriedades de aderência devido à utilização de duas ou mais fibras diferentes é porque ocorre um aumento da resistência ao atrito durante o deslizamento da fibra, devido apresentar uma maior presença de fibras fazendo com que a fibra se adere fortemente à matriz (DENG et al., 2018). Além disso, um fator que pode melhorar o comportamento é fato de fibras com menores diâmetros e baixa densidade, como fibras de PVA, resultarem em um número muito grande de fibras no entorno da fibra metálica, promovendo o confinamento da fibra e aumentando o atrito.

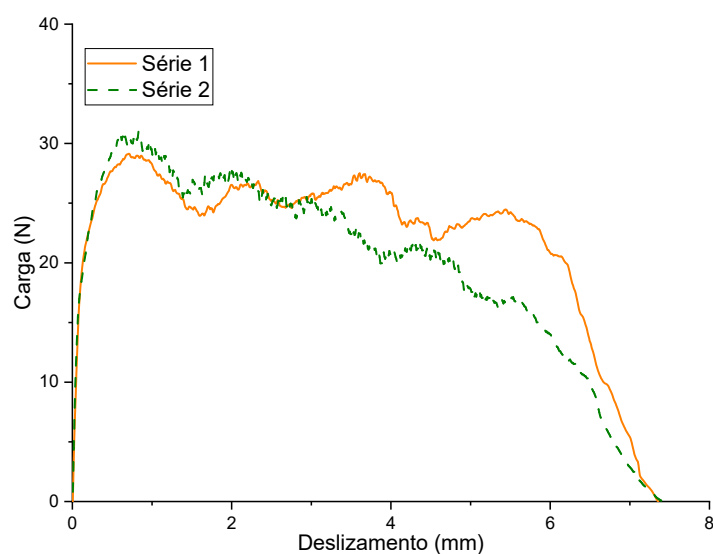


Figura 59: Curvas médias de carga-deslizamento para as Séries 1 e 2

As curvas de deslizamento normalizado da tensão de adesão média ($\tau - S / L_E$) estão apresentadas na Figura 60. Como pode ser visto depois que a fibra é totalmente descolada da matriz, a tensão de aderência diminui à medida que a fibra é arrancada. (KRAHL et al., 2021) relataram que existe uma sinergia entre aderência e alta resistência das fibras retas de aço, o que pode aumentar a capacidade de dissipação de energia sem falha prematura da fibra, e justifica o uso de fibras retas de aço em CUADRF. Devido às fibras de aço terem revestimento e pelo CUADRF ter uma gradação otimizada, pode ocorrer um aumento da aderência química das fibras, e a ruptura em algumas partes pode ocorrer ligeiramente fora da interface. (KRAHL et al., 2021).

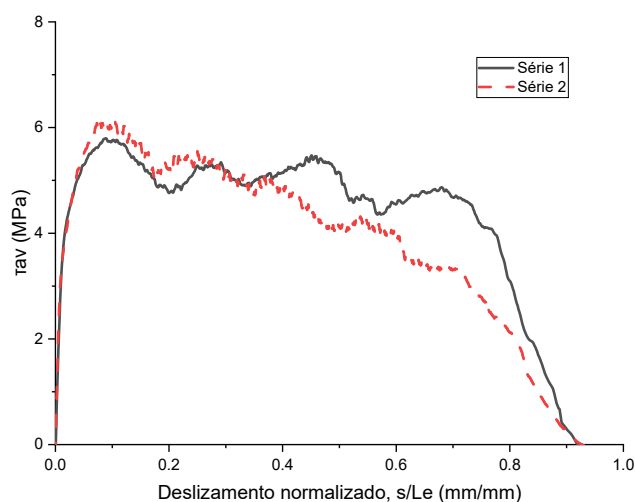


Figura 60: Curvas de tensão de aderência média estática versus deslizamento normalizado das fibras de aço retas em CUADRF híbrido

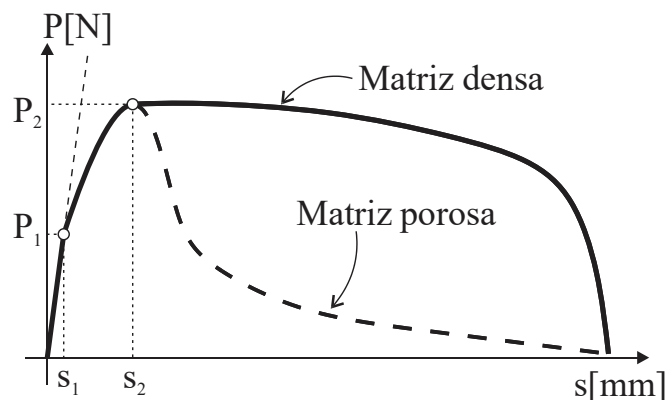


Figura 61: Curva de $P-s$ para concreto convencional e CUADRF

A Figura 61 apresenta a diferença do ensaio de arrancamento de fibra para um concreto convencional (matriz porosa) e o CUADRF (matriz densa). Para o concreto convencional, a curva típica de carga – deslocamento ($P-s$) apresenta um comportamento de amolecimento após atingir a carga máxima. Porém, para o CUADRF, a curva carga-deslocamento apresenta um comportamento de endurecimento após atingir a carga máxima de arrancamento, devido esse tipo de concreto apresentar menor porosidade o que aumenta a interação entre fibra e matriz. Segundo (WU; SHI; KHAYAT, 2016), é possível aumentar a aderência entre fibra e matriz através da formação de mais produtos de hidratação com maior resistência e o refinamento de zona de transição ao redor da fibra ao garantir maior microdureza.

6. ESTUDO ANALÍTICO

Esta seção faz duas abordagens numéricas, sendo uma para obter a curva de tensão de tração pela abertura de fissura utilizando a análise inversa através dos resultados do ensaio de tração na flexão para os traços de CUADRF (FBA e HIB). Para isso, foram seguidas os procedimentos de duas normas, NF P 18-470 (2016) e FIB MC2010 (2013), e por fim fez-se uma comparação entre as curvas obtidas para ambas as normas.

A segunda abordagem numérica foi realizada a partir dos resultados do ensaio de pullout das fibras de aço, com o intuito de obter a resistência residual de tração e a deformação correspondente seguindo (LIM; PARAMASIVAM; LEE, 1987) e (LOK; PEI, 1998).

6.1. ANÁLISE INVERSA DE TRAÇÃO

Existem diversos modelos para realizar a análise inversa para obtenção da curva de tração direta a partir dos resultados do ensaio de flexão na tração. Para a presente pesquisa foram utilizados dois métodos, um método iterativo-incremental resolvido através de algoritmos seguindo a norma francesa desenvolvido para CUAD, NF P 18-470 (2016) e um método simplificado de acordo com a FIB MC2010 (2013).

A resposta de tensão-deformação de tração de concretos reforçados com fibras pode ser classificado como deformação por amolecimento (*strain-softening*) ou por endurecimento (*strain-hardening*) (Figura 62). Para comportamento de deformação por amolecimento, após a formação da primeira fissura (σ_{fis}) o concreto não possui resistência suficiente à tração e se rompe. Após a fissuração, o alongamento cresce gradualmente com a redução da tensão aplicada (Figura 62a). No comportamento de deformação por endurecimento, ocorre a formação da primeira fissura (σ_{fis}), mas a tensão e a deformação continuam aumentando, ocorrendo a formação de múltiplas fissuras até a obtenção da tensão de tração máxima do concreto ($\sigma_{m\acute{a}x}$) (Figura 62b). A partir desse ponto, ocorre a ruptura no concreto, e a tensão reduz com o aumento do alongamento (Figura 62c). Para ambos os casos, o alongamento pode ser convertido em deformação antes da fissuração. Porém, após a ruptura, o alongamento está relacionado a uma única abertura de fissura (w) (NAAMAN, 2009) Naaman, 2009

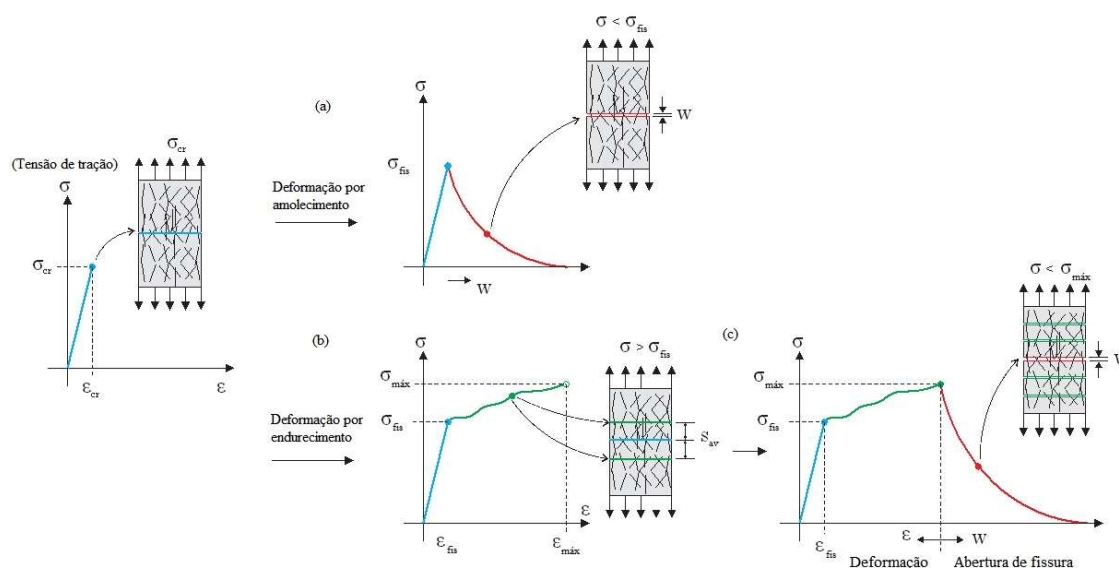


Figura 62: Comportamento à tração de concretos reforçados com fibras

6.1.1. NF P 18-470

O comportamento à tração pós-fissuração do CUADRF pode ser determinado pelo método inverso a partir dos resultados experimentais do ensaio de tração na flexão por 3-pontos, relacionando o momento aplicado à abertura da fissura. O método deve ser aplicado aos dados filtrados, a fim de obter uma convergência numérica estável, considerando a curva média e a curva característica da série de resultados de teste. A análise inversa foi realizada conforme orientações da norma francesa (NF P 18-470, 2016) e (BERTRAND et al., 2017).

O modelo apresentado na norma NF P 18-470 (2016), recomendado para aplicação em UHPFRC, é baseado no trabalho de Casanova (1995), podendo ser aplicado à ensaios de 3 pontos e 4 pontos para determinação por análise inversa da curva tensão de tração por abertura de fissura ($\sigma_f - w$). Para o equacionamento é admitida uma região fissurada na região de momento máximo, denominada de rótula plástica, cujo comprimento é Δf , como mostra a Figura 63. A curvatura κ do prisma apresenta uma variação parabólica no trecho Δf , com máximo valor de κ_m . Nas demais regiões a curvatura é elástica κ_e . Além disso, a abertura de fissura w é considerada com um perfil linear desde o máximo valor na base do prisma (w_{max}) até a ponta da fissura ($w = 0$), formando um ângulo 2θ entre suas faces.

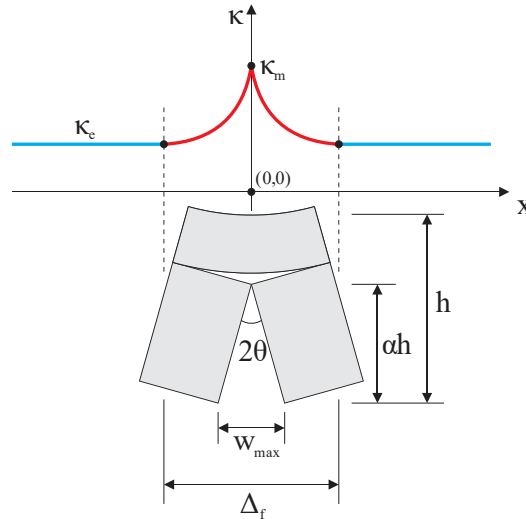


Figura 63: Definição da rótula plástica

O ângulo de rotação θ dos blocos rígidos da camada inferior resulta em uma abertura angular 2θ da fissura. Ao fazer a suposição de que $w_{\max}$ (abertura da fissura) é pequeno em comparação com αh (altura da fissura), a geometria adotada pode ser escrita em relação entre abertura de fissura w e θ conforme a Equação 29.

$$2\theta = \frac{w_{\max}}{\alpha h} \quad \text{Equação 29}$$

Onde α é a fração da altura correspondente à altura da fissura, ou seja, a altura da fissura é $\alpha \times h$. De acordo com Casanova (1995), o comprimento da rótula plástica é $\Delta_f = 2 \times \alpha \times h$, que significa duas vezes a altura da fissura e que varia à medida que a fissura propaga. Ulfkjær, Krenk, Brincker (1995) consideraram um valor constante $\Delta_f = h/2$. Na Figura 63 nota-se que existe uma região fissurada $\alpha \times h$ na rótula plástica e uma não fissurada. Isto implica que acima da ponta da fissura ($w = 0$), o comportamento pode ser assumido como linear e abaixo será admitida a relação entre tensão e abertura de fissura $\sigma_f - w$, Figura 64. Além disso, a altura da linha neutra é representada por $\alpha n h$.

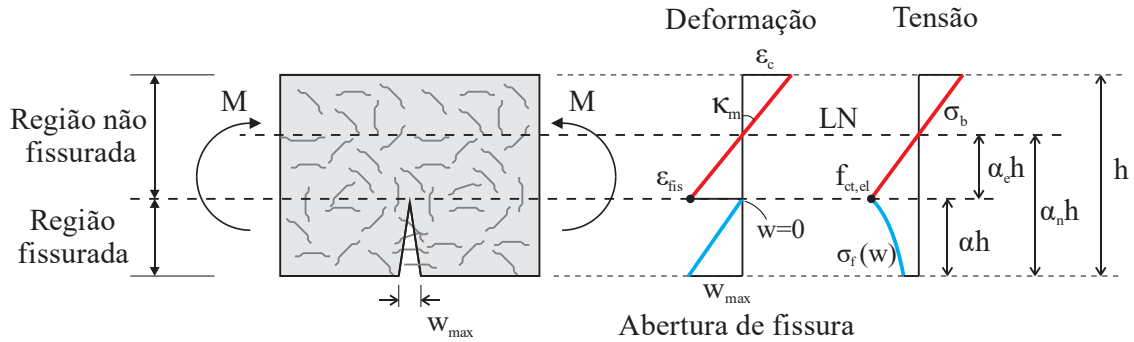


Figura 64: Distribuição de tensão e deformação na seção fissurada

Para o equilíbrio da seção, o momento resultante a partir da carga aplicada no ensaio é M_{exp} e os momentos internos provenientes da distribuição de tensão na região não fissurada e fissurada são M_b e M_f , respectivamente, ambos calculados em relação à fibra inferior do prisma. A soma das forças normais internas N_b e N_f deve ser igual a zero. Assim, as equações de equilíbrio de momento e força normal podem ser calculadas conforme Equação 30 e Equação 31, respectivamente (NF P 18-470, 2016).

$$M_{exp} = M_b + M_f \quad \text{Equação 30}$$

$$N = N_b + N_f = 0 \quad \text{Equação 31}$$

Casanova (1995) realiza a integração para determinar a resultante na região fissurada em função da abertura de fissura, com base na Figura 65.

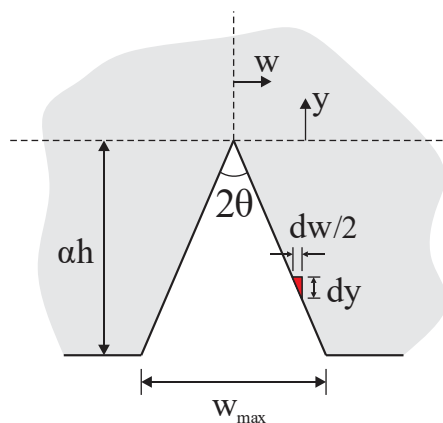


Figura 65: Relação entre dw e dy

Considerando a hipótese de a fissura manter sua forma plana, pode-se escrever a relação entre as coordenadas w e y como $\theta = dw/2dy$ ou $dy = dw/2\theta$. Com a Equação 29, pode-se escrever $dy =$

$\alpha \times h \times dw / w_{max}$. Uma fração da resultante de força em uma área infinitesimal da seção é $dN_f = \sigma_f \times dA$ ou $\sigma_f \times b \times dy$.

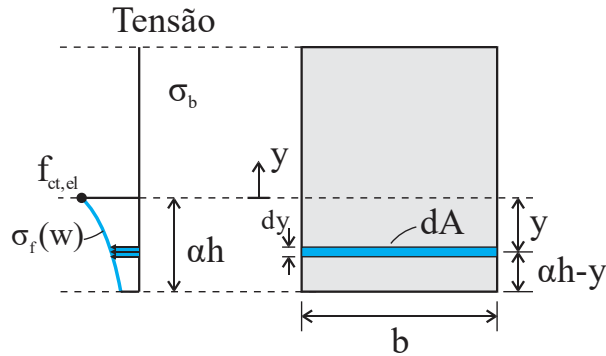


Figura 66: Força resultante em área dA da região de concreto fissurado

Realizando-se a integração das tensões de tração na região fissurada obtêm-se a resultante normal de tração N_f (Equação 32) (NF P 18-470, 2016).

$$N_f = \int_0^{\alpha h} \sigma_f b dy \quad \text{Equação 32}$$

Em que b é a largura da seção transversal e σ_f é a distribuição de tensão de tração na região fissurada. Substituindo dy e mudando o intervalo de integração, os esforços normais internos da parte fissurada podem ser calculados conforme Equação 33 (NF P 18-470, 2016).

$$N_f = \int_0^{w_{máx}} \sigma_f b \frac{\alpha h}{w_{máx}} dw = \frac{\alpha h b}{w_{máx}} \int_0^{w_{máx}} \sigma_f dw \quad \text{Equação 33}$$

Para o momento fletor M_f , a fração de momento em relação à fibra inferior do prisma é $dM_f = dN_f \times (\alpha h - y)$, pode ser calculado pela Equação 34 (NF P 18-470, 2016).

$$M_f = \int_0^{\alpha h} \sigma_f b (\alpha h - y) dy \quad \text{Equação 34}$$

Integrando de 0 a w_{max} e escrevendo $y = \alpha \times h \times w / w_{max}$, o momento fletor da parte fissurada pode ser calculado conforme Equação 35 (NF P 18-470, 2016).

$$M_f = \int_0^{w_{máx}} \sigma_f b \frac{\alpha h}{w_{máx}} dw - \int_0^{w_{máx}} \sigma_f b \frac{\alpha h w}{w_{máx}} dw$$

$$M_f = \alpha h N_f - \frac{(\alpha h)^2 b}{w^2} \int_0^{w_{máx}} \sigma_f w dw \quad \text{Equação 35}$$

Estas soluções são novamente desenvolvidas para obtenção da solução por processo iterativo.

Para determinar a força normal N_b e momento fletor M_b da parte não fissurada, considere a

Figura 67.

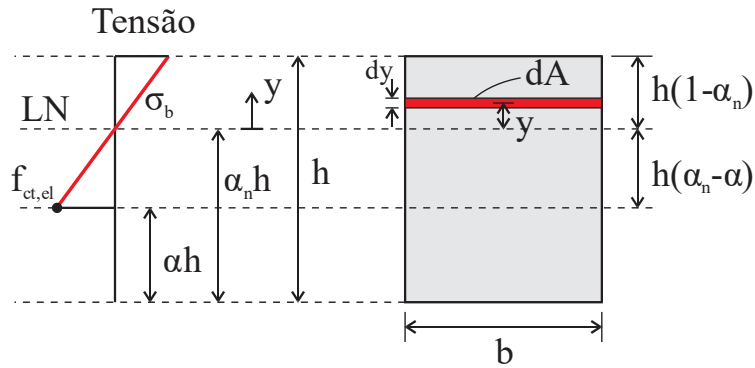


Figura 67: Força resultante em área dA da região de concreto não fissurado

Uma fração da resultante de força normal em uma área infinitesimal da seção é $dN_b = \sigma_f \times dA$ ou $\sigma_f \times b \times dy$. Portanto, a força normal resultante da parte não fissurada pode ser obtida através da Equação 36 (NF P 18-470, 2016).

$$N_b = \int_{-h(\alpha_n - \alpha)}^{h(1 - \alpha_n)} \sigma_b b dy \quad \text{Equação 36}$$

Tomando a equação da flexão ($\sigma_b = M \times y / I$) e a relação momento-curvatura ($\kappa_m = M / E_c I$), tem-se $\sigma_b = E_c \times \kappa_m \times y$, portanto, a força normal pode ser recalculada a partir da Equação 37 (NF P 18-470, 2016).

$$N_b = \int_{-h(\alpha_n - \alpha)}^{h(1 - \alpha_n)} E_c \kappa_m y b dy$$

$$N_b = \frac{E_c \kappa_m b y^2}{2} \Big|_{-h(\alpha_n - \alpha)}^{h(1 - \alpha_n)} \text{ ou } h(\alpha_n - \alpha)$$

$$N_b = \frac{E_c \kappa_m b h^2}{2} [(1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2] \quad \text{Equação 37}$$

O momento fletor para a parte não fissurada deve ser calculado em duas posições. A primeira é em relação a linha neutra e a segunda em relação à fibra inferior do prisma.

Com relação à linha neutra, o momento fletor (M_b^*) pode ser obtido pela Equação 38 (NF P 18-470, 2016).

$$\begin{aligned}
 M_b^* &= \int_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} \sigma_b b dy y \\
 M_b^* &= \int_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} E_c k_m y^2 b dy \\
 M_b^* &= \frac{E_c k_m b y^3}{3} \Big|_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} \\
 M_b^* &= \frac{E_c k_m b h^3}{3} [(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3]
 \end{aligned}
 \tag{Equação 38}$$

Já para o momento resultante M_b em relação à fibra inferior do prisma, utiliza-se a Equação 39 (NF P 18-470, 2016).

$$\begin{aligned}
 M_b &= \int_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} \sigma_b b (y + \alpha_n h) dy = \int_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} \sigma_b b y dy + \alpha_n h \int_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} \sigma_b b dy \\
 M_b &= \int_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} E_c k_m b y^2 dy + \alpha_n h \int_{-h(1-\alpha_n)}^{h(1-\alpha_n)} E_c k_m y b dy \\
 M_b &= h \alpha_n N_b + M_b^* \\
 M_b &= \frac{E_c k_m b h^3}{3} [(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3] + h \alpha_n N_b
 \end{aligned}
 \tag{Equação 39}$$

A solução do problema depende das hipóteses cinemáticas adotadas. Para determinação da variação da curvatura na rótula plástica, como mostrado na Figura 63, considera-se:

- a) $x = 0$, $\kappa(x) = \kappa_m$;
- b) $x = \Delta f/2$, $\kappa(x) = \kappa_e$;
- c) $x = \Delta f/2$, $d\kappa/dx = 0$.

Considerando a variação quadrática da curvatura e aplicando as condições de contorno de a) a c), obtêm-se a Equação 40 (NF P 18-470, 2016).

$$k(x) = \frac{4(k_m - k_e)}{\Delta_f^2} x^2 - \frac{4(k_m - k_e)}{\Delta_f} x + k_m \quad \text{Equação 40}$$

Sendo a rotação θ , a integral da curvatura κ para o intervalo de 0 a Δ_f , obtêm-se a Equação 41 (NF P 18-470, 2016).

$$\theta = \int_0^{\Delta_f/2} \kappa dx$$

$$\theta = \frac{k_m \Delta_f}{2} - \frac{(k_m - k_e) \Delta_f}{3} \quad \text{Equação 41}$$

Com a hipótese Casanova (1995) para o comprimento da rótula plástica, $\Delta_f = 2\alpha \times h$, têm-se a rotação θ , denominada de θ_1 . Para o ensaio de 4 pontos, a rotação pode ser calculada pela Equação 42 e para o ensaio de 3-pontos pela Equação 43 (BERTRAND et al., 2017).

$$\theta_1 = \left[\frac{k_m}{2} - \frac{(k_m - k_e)}{3} \right] 2\alpha h = \frac{\alpha h}{3} (k_m + 2k_e) \quad \text{Equação 42}$$

$$\theta_1 = \left[\frac{k_m}{2} - \frac{(k_m - k_e)}{3} \right] 2\alpha h = \frac{\alpha h}{3} (k_m + 2k_e) + \frac{M}{3EIL} (\alpha h)^2 \quad \text{Equação 43}$$

Considerando a hipótese de Ulfkjær, Krenk, Brincker (1995), $\Delta_f = h/2$, o ângulo θ_2 pode ser obtido pela Equação 44 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$\theta_2 = \frac{h}{2} \left(\frac{k_m}{6} + \frac{k_e}{3} \right) \quad \text{Equação 44}$$

Aplicando a Equação 29 que estabelece a relação entre θ e w à equação de θ_1 conforme Casanova (1995), obtêm-se a Equação 45 e Equação 46 para o ensaio de 4-pontos e de 3-pontos (BERTRAND et al., 2017), respectivamente.

$$w_{m\acute{a}x,1} = \frac{2(\alpha h)^2}{3} (k_m + 2k_e) \quad \text{Equação 45}$$

$$w_{m\acute{a}x,1} = \frac{2(\alpha h)^2}{3} (k_m + 2k_e) + \frac{2M}{3EIL} (\alpha h)^3 \quad \text{Equação 46}$$

E aplicando a Equação 29 na Equação 44, obtém-se a Equação 47 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$w_{máx,2} = \alpha h^2 \left(\frac{k_m}{6} + \frac{k_e}{3} \right) \quad \text{Equação 47}$$

Outra relação pode ser estabelecida entre as frações da altura da fissura α e altura da linha neutra α_n . Esta última representa a soma das frações da região fissurada α e da região elástica, entre a ponta da fissura e a linha neutra, denominada α_e , como mostrado na Figura 64, e pode ser obtida pela Equação 48 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$\alpha_n = \alpha + \alpha_e \quad \text{Equação 48}$$

Sendo que α_e pode ser escrito em função da curvatura k_m e da deformação de fissuração ε_{fis} . Esta última é relacionada à resistência à tração direta $f_{ct,el} = E_c \times \varepsilon_{fis}$. Portanto, α_e pode ser obtido através da Equação 49 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$k_m = \frac{\varepsilon_{fis}}{\alpha_e h} = \frac{f_{ct,el}}{h \alpha_e E_c}$$

$$\alpha_e = \frac{f_{ct,el}}{h k_m E_c} \quad \text{Equação 49}$$

Reescrevendo a Equação 48 em função da Equação 49, obtém-se a Equação 50 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$(\alpha_n - \alpha) h k_m E_c = f_{ct,el} \quad \text{Equação 50}$$

A curvatura elástica equivalente (não-fissurada), k_e , pode ser calculada conforme Equação 51 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$k_e = \frac{M_{exp}}{E_c I} \quad \text{Equação 51}$$

Onde I é igual a inércia da seção transversal retangular.

Para determinar a curva $\sigma_f - w$, realiza-se um procedimento incremental com dados de entrada:

- Dimensões do prisma e condições de apoio;
- Módulo de elasticidade do concreto;
- Altura do entalhe, caso haja;
- Curva $P - w$ no caso do 3PBT e $P - \delta$ para o 4PBT.

Para cada incremento P_{i+1} e w_{i+1} , obtêm-se a solução para tensão $\sigma_{f,i+1}$ e profundidade da abertura de fissura a_{i+1} . Destaca-se que para a solução do passo $i+1$ são utilizadas as variáveis determinadas no passo i . A Equação 37 e a Equação 39 de esforço normal N_b e momento fletor M_b , respectivamente, são utilizadas para a região não fissurada. Para a região fissurada, uma solução incremental é apresentada com base na Equação 33, na Equação 35 e na Figura 68.

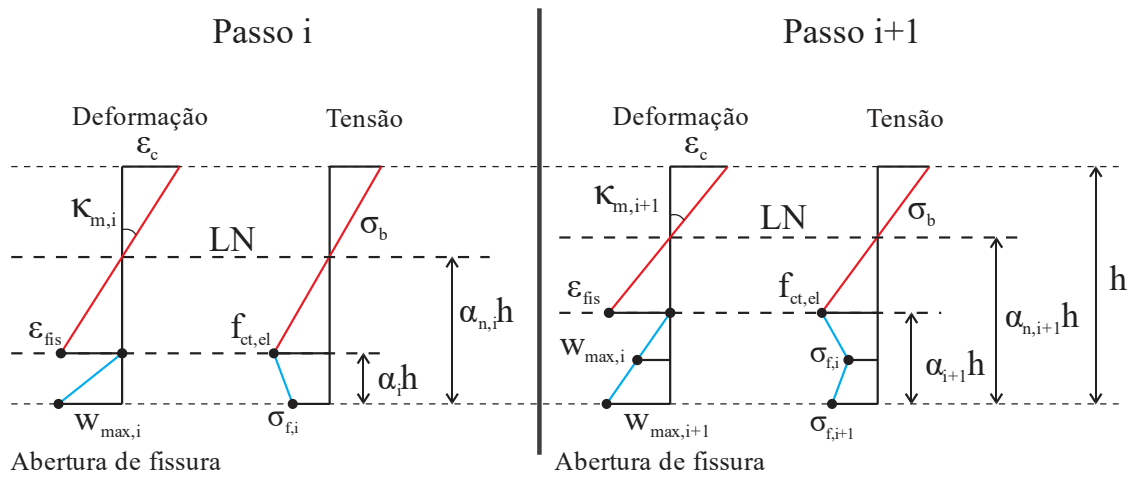


Figura 68: Distribuição de tensões e deformação/abertura de fissura de dois incrementos subsequentes

Para simplificar a representação, $w_{max,i}$ e $w_{max,i+1}$ são representados por w_i e w_{i+1} . Destaca-se que no passo $i+1$, a resultante de força normal N_{fi+1} é obtida integrando-se σ_f de 0 a w_{i+1} (Equação 52) (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$N_{fi+1} = \frac{\alpha_{i+1} h b}{w_{i+1}} \int_0^{w_{i+1}} \sigma_f dw \quad \text{Equação 52}$$

A integral pode ser representada, como a soma das tensões do passo atual mais a soma do passo anterior (Equação 53) (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$N_{fi+1} = \frac{\alpha_{i+1}hb}{w_{i+1}} \int_0^{w_i} \sigma_f dw + \frac{\alpha_{i+1}hb}{w_{i+1}} \int_{w_i}^{w_{i+1}} \sigma_f dw \quad \text{Equação 53}$$

Multiplicando-se os dois lados da equação por α_i/w_i , obtém-se a Equação 54 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$\begin{aligned} N_{fi+1} \frac{\alpha_i}{w_i} &= \frac{\alpha_i}{w_i} \frac{\alpha_{i+1}hb}{w_{i+1}} \int_0^{w_i} \sigma_f dw + \frac{\alpha_i}{w_i} \frac{\alpha_{i+1}hb}{w_{i+1}} \int_{w_i}^{w_{i+1}} \sigma_f dw \\ N_{fi+1} &= \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \frac{\alpha_i}{w_i} \int_0^{w_i} \sigma_f dw + \frac{\alpha_{i+1}hb}{w_{i+1}} \int_{w_i}^{w_{i+1}} \sigma_f dw \\ N_{fi+1} &= \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) N_{fi} + \frac{\alpha_{i+1}hb}{w_{i+1}} \int_{w_i}^{w_{i+1}} \sigma_f dw \end{aligned} \quad \text{Equação 54}$$

A integral de w_i a w_{i+1} é admitida como a área de um trapézio, como mostra Figura 69 e a tensão de tração pode ser obtida através da Equação 55 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

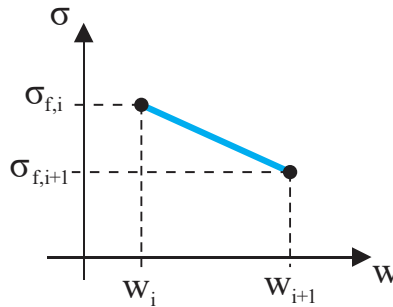


Figura 69: Obtenção da integral de w_i a w_{i+1}

$$\int_{w_i}^{w_{i+1}} \sigma_f dw = \frac{(\sigma_{fi} + \sigma_{fi+1})(w_{i+1} - w_i)}{2} = w_{i+1} \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \frac{(\sigma_{fi} + \sigma_{fi+1})}{2} \quad \text{Equação 55}$$

Então, a força normal $N_{f,i+1}$ resultará na Equação 56 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$\begin{aligned} N_{fi+1} &= N_{fi} \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) + \frac{\alpha_{i+1}bh}{w_{i+1}} w_{i+1} \left(\frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2} \right) \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \\ N_{fi+1} &= \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) N_{fi} + \alpha_{i+1}bh \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \left(\frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2} \right) \end{aligned} \quad \text{Equação 56}$$

Considerando a variação linear de tensão entre dois incrementos. Para o momento fletor M_f , a fração de momento em relação à fibra inferior do prisma é $dM_f = dN_f \times (\alpha \times h - y)$. Portanto, o momento $M_{f,i+1}$ pode ser obtido através da Equação 57 (NF P 18-470, 2016) (BERTRAND et al., 2017).

$$M_f = \int_0^{\alpha_{i+1}} \sigma_f b (\alpha_{i+1} h - y) dy = \int_0^{w_{i+1}} \sigma_f b (\alpha_{i+1} h - y) \frac{\alpha_{i+1} h}{w_{i+1}} dw$$

$$M_{f,i+1} = \alpha_{i+1} h N_{f,i+1} - \frac{(\alpha_{i+1} h)^2 b}{w_{i+1}^2} \int_0^{w_{i+1}} \sigma_f w dw = \alpha_{i+1} h N_{f,i+1} - \frac{(\alpha_{i+1} h)^2 b}{w_{i+1}^2} \left[\int_0^{w_i} \sigma_f w dw + \int_{w_i}^{w_{i+1}} \sigma_f w dw \right]$$

$$M_{f,i+1} = M_{f,i} \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 + \alpha_{i+1} h N_{f,i+1} \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) - \frac{(\alpha_{i+1} h)^2 b}{2} \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 \sigma_{i+1} \quad \text{Equação 57}$$

Assim, considerando que a relação tensão-abertura de fissura é conhecida até a iteração i , obtemos as duas incógnitas da tensão ($\sigma_{f,i+1}$) e da profundidade relativa da fissura na iteração $i + 1$ ($\alpha_{f,i+1}$), resolvendo as equações acima, expressando a nulidade da força axial e a igualdade do momento fletor resistente da seção com o momento experimental. Para resolver os sistemas, desenvolveu-se um algoritmo, deixando as equações em função das duas incógnitas $\sigma_{f,i+1}$ e $\alpha_{f,i+1}$. Para o primeiro passo, w_0 será referente a localização onde formou-se a primeira fissura.

A oscilação da relação tensão-abertura da fissura ($\sigma_f - w_{máx}$) é ajustada através da média móvel calculada pela Equação 58, conforme recomendação da NF P 18-470 (2016).

$$\sigma_{fi} = \frac{2\sigma_{fi} + \sigma_{fi+1}}{3} \quad \text{Equação 58}$$

O limite de tração da elasticidade $f_{ct,el}$ para o ensaio de flexão de 3 pontos para o traço FBA e HIB aos 30 dias foi de 7.90 MPa e 6.84 MPa MPa, respectivamente. A análise inversa aplicada aos resultados do ensaio de flexão de 3 pontos no prisma entalhado forneceu a lei $\sigma_f - w_{máx}$ para os traços FBA e HIB obteve as curvas apresentadas na Figura 70.

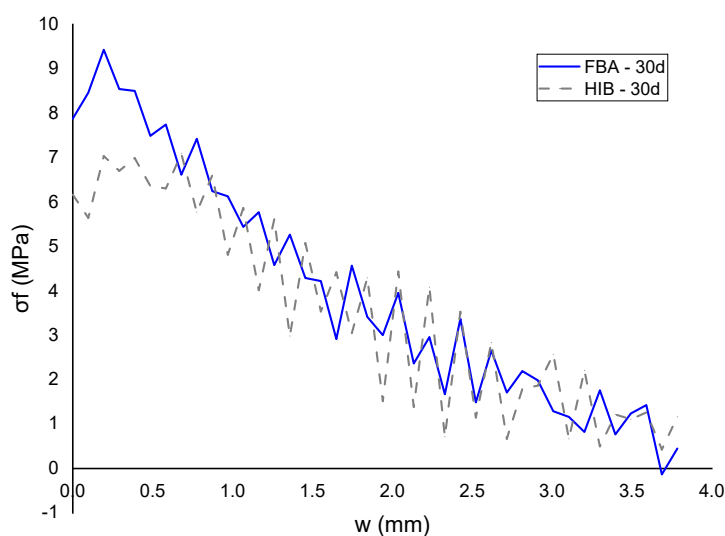


Figura 70: Lei de pós-fissuração σ_f - $w_{\max}$ para os traços de CUADRF com fibras de aço e híbrido aos 30 dias

Através da Figura 70 é possível verificar que o traço FBA apresentou maior resistência à tração em comparação com o traço híbrido (HIB). Isso ocorreu pois, a fibra de aço apresenta uma resistência à tração superior à resistência à tração das fibras de PVA. Porém, observa-se que o traço híbrido (HIB) apresentou um comportamento mais constante após a obtenção da resistência máxima. É possível verificar que a inclinação da curva é mais suave após a atingir a resistência máxima para o traço HIB, indicando que uma maior tenacidade em comparação com o traço FBA.

6.1.2. FIB MODEL CODE

O (FIB MC2010, 2013) propõe dois métodos simplificados para obtenção da curva tensão-abertura de fissura que podem ser deduzidas dos resultados do ensaio de flexão: um comportamento de rígido plástico ou um comportamento linear pós-fissuração (endurecimento ou amolecimento), esquematicamente apresentado na Figura 71. Sendo f_{Fts} a resistência residual de serviço, definida como a resistência pós-fissuração para aberturas de fissura de serviço, e f_{Ftu} a resistência residual final. Para realizar os cálculos, utilizou-se como referência o trabalho de (BUTTIGNOL et al., 2017).

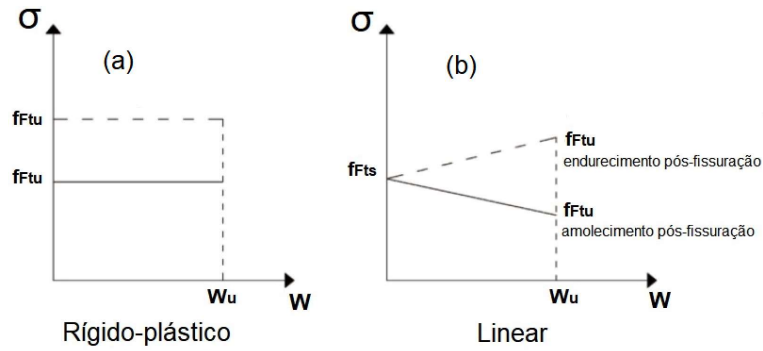


Figura 71: Leis constitutivas de pós-fissuração simplificadas: (a) Método rígido-plástico, (b) Método linear (linhas contínuas e tracejadas referem-se ao comportamento de amolecimento e endurecimento pós-fissuração, respectivamente)

As tensões residuais $f_{R1,m}$ e $f_{R3,m}$, calculadas a partir do ensaio de flexão por 3 pontos, são utilizadas na determinação da curva de tração. Elas são correspondentes às aberturas CMOD = 0.5 mm e CMOD = 2.5 mm, respectivamente. A Figura 72 apresenta o diagrama carga-CMOD que é obtido através do ensaio de flexão por 3 pontos.

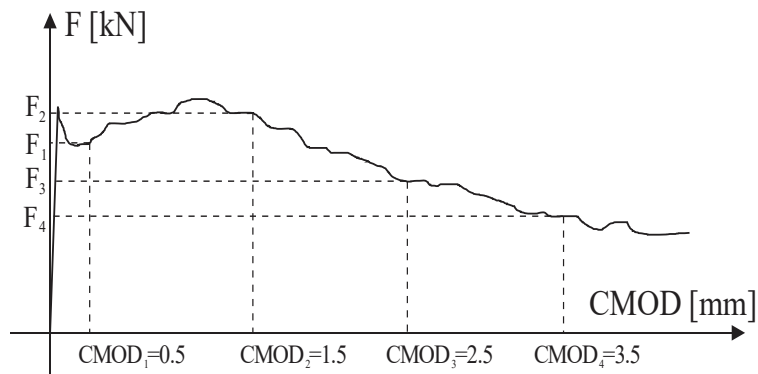


Figura 72: Diagrama carga-CMOD

O modelo constitutivo à tração residual (curva linear tensão versus abertura de fissuras no regime de pós-fissuração) será obtido através do modelo linear e pelo modelo rígido plástico. O modelo linear utiliza dois valores de referência de resistências à flexão residuais (f_{Fts} e f_{Ftu}) e podem ser calculadas conforme Equação 59 e Equação 60 (FIB MC2010, 2013).

$$f_{Fts} = 0,45f_{r1,m} \quad \text{Equação 59}$$

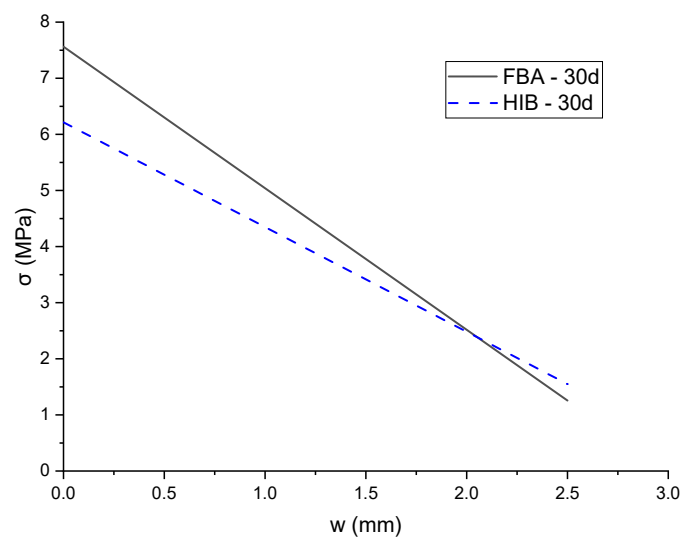
$$f_{Ftu} = 0,50f_{r3,m} - 0,2f_{r1,m} \quad \text{Equação 60}$$

Onde f_{Fts} é o valor da resistência à tração residual (pós-pico) inicial para uma abertura de fissura igual a 0 mm (ELS; $w = 0$ mm, correspondente ao $CMOD1 = 0.5$ mm); f_{Ftu} é o valor da resistência à tração residual no estado limite último para uma abertura de fissuras igual a 2,5 mm (ELU; $w = 2,5$ mm).

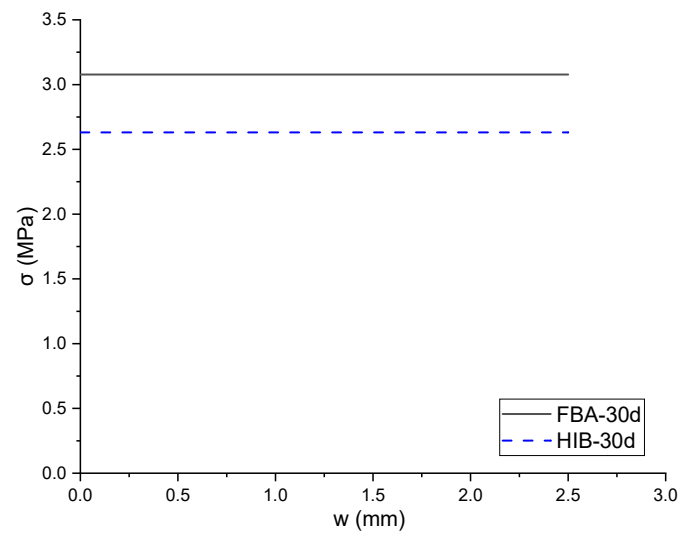
O modelo rígido plástico utiliza o valor de resistência à flexão residual e pode ser calculado conforme a Equação 61 (FIB MC2010, 2013).

$$f_{Ftu} = f_{r3,m}/3 \quad \text{Equação 61}$$

As curvas de tensão-abertura de fissura à tração estão apresentadas na Figura 73. É possível verificar que o traço CUADRF com fibras de aço (FBA) apresentou uma melhor resistência à tração em comparação com o traço CUADRF híbrido (HIB), pois as fibras de aço apresentam maior resistência à tração em relação as fibras de PVA. Comparando-se as curvas experimental e de projeto, é possível verificar que a curva obtida pelo (FIB MC2010, 2013) é mais conservadora, isto é, está mais a favor da segurança.



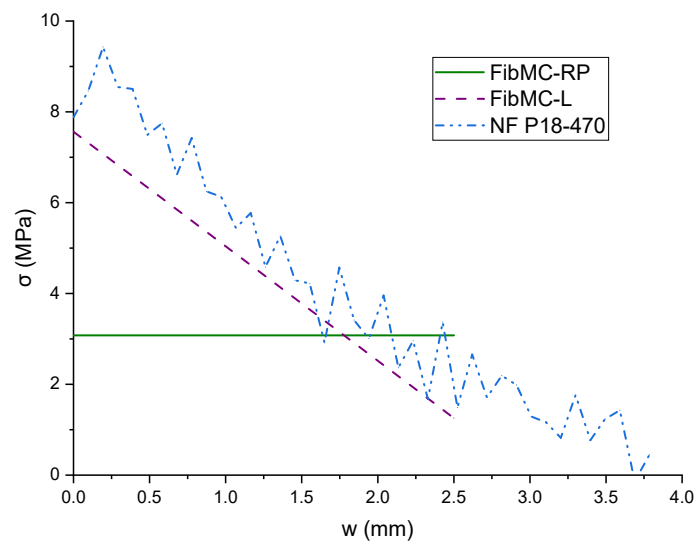
(a)



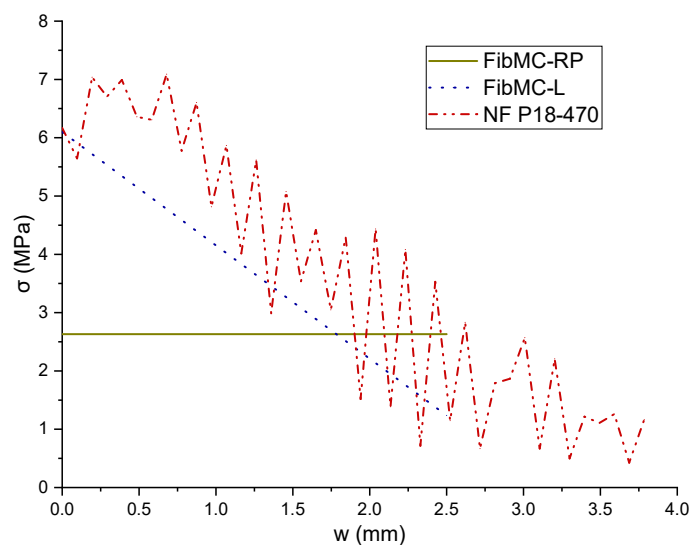
(b)

Figura 73: Curva σ - w para os traços FBA e HIB (a) Modelo linear (b) Modelo rígido plástico

A Figura 74 apresenta as curvas para o traço FBA e HIB para os modelos de análise inversa estudados a fim de realizar uma melhor comparação.



(a)



(b)

Figura 74: Curvas σ - w para os modelos de análise inversa estudados os traços (a) FBA e (b) HIB

De modo geral, as curvas obtidas pelo método inverso seguindo a NF P 18-470 e pelos modelos da FIB MC2010 (2013) ficaram próximas. É possível verificar que os modelos propostos pela FIB MC2010 (2013) conseguem prever o comportamento do CUAD de um modo mais conservador.

A FIB MC2010 (2013) recomenda que o ensaio de flexão seja realizado conforme a norma (BS EN 14651:2005+A1:2007), utilizando corpos de prova prismáticos de 150 x 150 x 500 mm. Porém, para a presente pesquisa utilizou-se um corpo de prova prismático com 70 x 70 x 280 mm. Portanto, para as dimensões de corpo de prova que foi adotado nesse estudo, o modelo simplificado da FIB MC2010 (2013) prevê com boa aproximação a resposta de um modelo mais robusto.

Ressalta-se que as curvas de σ - w obtidas através do método inverso podem ser utilizadas em projeto, assim como em modelos numéricos para análise em método dos elementos finitos.

6.1.3. ATRAVÉS DO PULLOUT

(LIM; PARAMASIVAM; LEE, 1987) propuseram uma abordagem para obter a resistência residual de tração (f_{tRm}) em função da tensão de aderência do ensaio de arrancamento de fibra (τ_f), fatores que levam em conta a distribuição de fibras na matriz (η_0) e a forma e resistência das fibras (η_1). Após atingir a tensão

de fissuração, ocorre uma queda brusca na capacidade do material até o nível da tensão residual, como mostrado na Figura 75, que é obtida de acordo com a Equação 62 (LIM; PARAMASIVAM; LEE, 1987).

$$f_{tRm} = 2\eta_0\eta_1V_f\frac{l_f}{d_f}\tau_f \quad \text{Equação 62}$$

Onde l_f é o comprimento da fibra; d_f é diâmetro da fibra; V_f é a porcentagem volumétrica de fibra; η_0 é o fator de orientação da fibra e igual a 0.405; η_1 é o fator de eficiência de comprimento para fibra; τ_f é a resistência média de aderência entre a matriz e a fibra.

O parâmetro η_1 é o fator de eficiência de comprimento responsável pela variação da tensão da fibra nas porções finais das fibras e é definido como a razão entre a tensão média da fibra e a tensão máxima da fibra, podendo ser obtido através da Equação 63 (LIM; PARAMASIVAM; LEE, 1987).

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 0.50 & \text{Se } l_f \leq l_c \\ \eta_1 &= \frac{\tau_f l_f}{\sigma_{fu} d_f} & \text{Se } l_f > l_c \end{aligned} \quad \text{Equação 63}$$

Onde σ_{fu} é a resistência à tração da fibra e d_f é o diâmetro da fibra. Sendo que o comprimento crítico (l_c) pode ser obtido através da Equação 64 (LIM; PARAMASIVAM; LEE, 1987).

$$l_c = \frac{0.5\sigma_{fu}d_f}{\tau_f} \quad \text{Equação 64}$$

(LOK; PEI, 1998) desenvolveram um modelo similar, com a diferença de considerar um decaimento linear da tensão após o início da fissuração até que seja alcançado o valor da tensão residual f_{tRm} . Este fato é atribuído ao amolecimento do concreto. A carga diminui e estabiliza em f_{tRm} , para a qual a deformação correspondente é calculada pela Equação 65 (LOK; PEI, 1998).

$$\varepsilon_R = \frac{\tau_f l_f}{E_f d_f} \quad \text{Equação 65}$$

Onde τ_f é a tensão de aderência do ensaio de arrancamento de fibra; l_f é o comprimento da fibra; E_f é o módulo de elasticidade da fibra; e d_f é o diâmetro da fibra.

Após esta deformação, o material mantém o nível de tensão constante. A Figura 75 apresenta a comparação entre os modelos de (LIM; PARAMASIVAM; LEE, 1987) e (LOK; PEI, 1998).

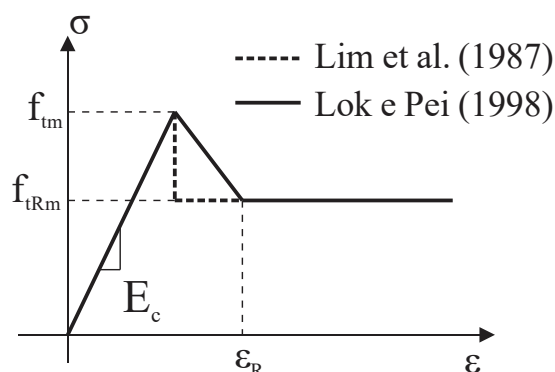


Figura 75: Resistência residual e deformação à tração obtidas através do ensaio de pullout

A Tabela 20 apresenta a resistência residual de tração e deformação correspondente para as duas séries ensaiadas pelo pullout.

Tabela 20: Resistência residual e deformação à tração obtidas pelo ensaio de pullout

Série	f_{tRm} (MPa)	ϵ_R
1	1.94	0.0024
2	2.04	0.0025

6.2. ANÁLISE DE CUSTO

A Tabela 21 apresenta uma estimativa dos custos para produzir 1 m^3 dos traços REF, FBA e HIB. É possível verificar como o valor unitário da cinza volante é muito inferior ao valor unitário do cimento. A substituição parcial do cimento por cinza volante pode reduzir o custo do concreto, além de reduzir o impacto ambiental. Outro ponto a ser destacado são os valores das fibras, que são muito altos devido serem materiais importados. Por isso, há uma necessidade para que se tenha a fabricação nacional de fibras apropriadas para a produção do CUAD/CUADRF.

É possível observar que ao substituir parte das fibras de aço por fibras de PVA, houve uma redução de 10% no custo do concreto. Apesar do traço híbrido (HIB) apresentado propriedades mecânicas

um pouco inferiores ao traço com apenas fibras de aço, a possibilidade de se reduzir o custo do concreto é favorável ao desenvolvimento e utilização de CUADRF híbridos.

Tabela 21: Estimativa de custo dos traços REF, FBA e HIB

Materiais	Traços								
	REF			FBA			HIB		
	Quant (kg)	Preço unit.	Valor	Quant (kg)	Preço unit.	Valor	Quant (kg)	Preço unit.	Valor
Cimento	800.00	R\$0.75/kg	R\$600.00	800.00	R\$0.75/kg	R\$600.00	800.00	R\$0.75/kg	R\$600.00
Sílica ativa	180.57	R\$1.30/kg	R\$234.74	171.76	R\$1.30/kg	R\$223.29	171.76	R\$1.30/kg	R\$223.29
Areia	588.80	R\$0.15/kg	R\$88.32	581.82	R\$0.15/kg	R\$87.27	581.82	R\$0.15/kg	R\$87.27
Cinza volante	417.94	R\$0.35/kg	R\$146.28	397.36	R\$0.35/kg	R\$ 139.08	397.36	R\$0.35/kg	R\$ 139.08
SP	40.00	R\$14.63/kg	R\$585.20	40.00	R\$14.63/kg	R\$585.20	40.00	R\$14.63/kg	R\$585.20
Água	173.39	R\$50.00/m³	R\$8.67	169.28	R\$50.00/m³	R\$8.46	169.28	R\$50.00/m³	R\$8.46
Fibras aço	-	-	-	156.00	R\$25.00/kg	R\$3,900.00	117.00	R\$25.00/kg	R\$2,925.00
Fibras PVA	-	-	-	-	-	-	6.50	R\$65/kg	R\$ 422.50
Total (R\$)		R\$ 1,663.20			R\$ 5,543.30			R\$ 4,990.80	

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou experimentalmente o concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF) híbrido. Primeiramente, os materiais foram selecionados e ensaiados para definir as melhores combinações entre os materiais secos, a partir da morfologia e distribuição granulométrica para obter CUAD com menor porosidade possível. Materiais cimentícios suplementares foram utilizados para aumentar as propriedades nos estados fresco e endurecido, bem como reduzir o custo do concreto e o impacto ambiental.

Em seguida, diferentes traços de concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) foram dosados e analisados quanto à fluidez, porosidade e resistência à compressão. O CUAD de melhor desempenho foi investigado com a adição de fibras. Nessa etapa, foram desenvolvidos dois CUADRF, um com apenas fibras de aço e outro com a combinação de fibras de aço e álcool polivinílico (popularmente, mais conhecidas como PVA). A fluidez, a porosidade, a temperatura do concreto, a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão foram investigados. Além disso, avaliou-se a eficiência das fibras de aço através do ensaio de arrancamento das fibras, e verificou-se os mecanismos de degradação envolvidos no ensaio de resistência à tração na flexão pelo ensaio de microscopia. Com base na revisão bibliográfica e na análise e discussão dos resultados experimentais obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- A partir da otimização do traço, utilizando o empacotamento de partículas, foi possível desenvolver diferentes traços de CUAD. A utilização da otimização do traço pode ser ampliada e utilizada para outros tipos de concreto, o que possibilitaria uma escolha mais adequada de materiais para obter uma menor porosidade.
- No Brasil há matéria-prima em abundância, por isso, deve-se aprofundar os estudos e aplicação de CUAD/CUADRF para que seja possível contribuir com o desenvolvimento e infraestrutura no país. Porém, há uma necessidade em produzir fibras compatíveis com CUADRF no país para possibilitar a redução do custo.

- Foram desenvolvidas três diferentes composições de concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) utilizando materiais disponíveis no mercado brasileiro. Através da análise dos diâmetros existentes de cada material, foi possível escolher os materiais mais adequados para cada composição de CUAD, permitindo reduzir os vazios através do empacotamento de partículas. A redução da porosidade do concreto, através da redução no teor de água e utilizando técnicas de compactação e de empacotamento de partículas, é essencial para aumentar a resistência à compressão e obter um CUAD.
- Apesar dos traços com pó de quartzo terem apresentado boa fluidez e baixa porosidade, a resistência à compressão aos 28 e 161 dias foi inferior aos traços com cinza volante e metacaulim. Isso ocorreu devido o pó de quartzo influenciar a hidratação do cimento somente nas primeiras idades.
- A utilização de cinza volante se tornou interessante, pois os traços produzidos com a cinza volante apresentaram boa fluidez, apesar terem menor relação a/aglom em comparação com os traços com pó de quartzo e metacaulim. Isso ocorreu devido às partículas da cinza volante serem esféricas, que durante o estado fresco do concreto, diminuem o atrito entre as partículas dos materiais em movimento.
- O uso de pozolanas, como a cinza volante e o metacaulim, apresenta diversas vantagens para a produção de CUAD, como aumento da resistência à compressão em relação ao CUAD com pó de quartzo, e a redução da retração térmica, pois reduzem o calor de hidratação do cimento; além disso, ao substituírem parte do cimento na composição do concreto, geram um menor impacto ambiental. Foi possível desenvolver um CUAD utilizando cinza volante, com resistência à compressão superior a 130 MPa aos 161 dias.
- O estudo experimental demonstrou que a adição em duas etapas do superplastificante durante a mistura aumentou a fluidez do CUAD. Isso acontece, pois as moléculas do superplastificante adicionadas ao final do processo não irão interagir com os produtos da hidratação iniciais do cimento, permitindo assim que suas moléculas possam fluidificar o concreto.

- Para todos os traços desenvolvidos com a substituição de 2/3 de água por gelo, observou-se uma melhora na fluidez e no tempo de pega do CUAD, pois o gelo foi capaz de reduzir a velocidade de hidratação do cimento. Além disso, o uso do gelo também pode minimizar a retração térmica, que pode ser um problema para o CUAD/CUADRF devido ao alto teor de cimento.
- A reprodutibilidade do traço só é possível a partir da utilização dos mesmos materiais utilizados nessa pesquisa, pois cada material tem suas peculiaridades, como composição química, distribuição granulométrica, morfologia, até mesmo a forma como um superplastificante interage com o cimento pode variar. Portanto, nem sempre uma dosagem com os mesmos tipos de materiais, irá obter os mesmos resultados. Por isso, como para o CUAD são obtidas excelentes propriedades, é essencial que cada material seja estudado antes da realização da mistura. Para uma produção em grande escala, por exemplo na indústria de pré-moldados, é necessário que se tenha um controle tecnológico bastante rígido. O ANEXO VI apresenta os procedimentos fundamentais para produzir um traço de CUAD/CUADRF.
- As fibras retas de aço utilizadas neste trabalho são promissoras para uso em matriz de materiais cimentícios densos, como o CUADRF, por apresentar alta resistência de aderência.
- Foi possível produzir CUADRF com resistência à compressão de 146,01 MPa usando 2% de fibras de aço e uma cura convencional.
- O ensaio de arrancamento da fibra de aço e o corpo de prova utilizado podem ser facilmente realizados e utilizados, pois a máquina é portátil e proporciona agilidade na execução do ensaio.
- O tratamento da superfície da fibra, como cobre ou latão, a densificação da matriz por meio do uso de materiais cimentícios suplementares (como sílica ativa e cinza volante) e a adição de fibras de forma híbrida são algumas das maneiras para melhorar as propriedades de aderência entre a fibra e a matriz.

- O uso de materiais cimentícios suplementares apresentam diversos benefícios para o CUAD: redução do teor de água, redução da porosidade, aumenta das propriedades mecânicas, aumento da durabilidade, redução de custo e impacto ambiental. Além disso, permitem uma maior aderência entre as fibras e matriz, contribuindo para um aumento da resistência à tração do CUADRF.
- A substituição de parte das fibras de aço por fibras de PVA, permitiu a obtenção de CUADRF híbrido com resistência à compressão superior a 120 MPa, e tornou o material mais barato. Além disso, destaca-se que as fibras sintéticas, como as fibras de PVA, proporcionam um aumento da resistência do concreto em situação de incêndio.
- A análise inversa pela NF P18-470 é um método mais complexo, porém, a FIB Model Code pode ser utilizada por ser um método simplificado e obter um resultado similar ao da norma francesa.
- As curvas de σ -w obtidas através dos modelos de análise inversa podem ser utilizadas em projetos e em modelos numéricos para análise pelo método de elementos finitos.

7.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A partir do estudo experimental, foi possível verificar alguns pontos que podem ser mais explorados e aprofundados no futuro, como:

- Utilizar mais um tipo de material para preencher os vazios gerados entre a sílica ativa e o cimento, como a cinza de casca de arroz, o que contribuiria para um aumento do empacotamento de partículas do concreto através da minimização dos poros, e conseqüentemente, resultaria no aumento da resistência à compressão do CUAD.

- Realizar ensaio de porosidade pela técnica de pressão ou com intrusão de mercúrio para obter valores mais precisos.

- Realizar ensaios de retração e fluência para avaliar a estabilidade dimensional do CUAD e CUADRF.

- Realizar ensaios para avaliar a durabilidade do CUAD e CUADRF, como penetração de cloretos, ataques químicos, carbonatação.
- Realizar ensaios para analisar a resistência ao fogo do CUAD, CUADRF com fibras de aço e o CUADRF híbrido para verificar a contribuição das fibras de PVA.
- Realizar a análise em elementos finitos para estruturas em CUAD e CUADRF com apenas fibras de aço e híbrido para verificar o comportamento mecânico da estrutura e fazer comparações entre esses diferentes tipos de concreto.

8. REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, O. M. et al. Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 235–246, 28 fev. 2018.
- ABNT NBR 11768. **Aditivos para concreto de cimento Portland - Requisitos** Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT NBR 12653. **Materiais pozolânicos (Versão Corrigida 2015)**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT NBR 13320:2012. **Materiais refratários - Determinação da fluidez de concretos refratários convencionais e concretos de fluência livre**, 2012.
- ABNT NBR 13956-1. **Silica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT NBR 15894-1. **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT NBR 16697. **Cimento Portland — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT NBR 5738:2015. **NBR 5738:2015 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, 2015.
- ABNT NBR 5739:2018. **NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, 2018.
- ABNT NBR 7222:2011. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.
- ABNT NBR 9778:2005. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- AFGC. **Documents scientifiques et techniques Bétons fibrés à ultra-hautes performances Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes Recommendations.**, 2013.
- AGHDASI, P. et al. **Mechanical properties of a highly flowable ultra-high-performance fiber-reinforced concrete mixture considering large-size effects**. HPFRCC-7 Proceedings of the 7th RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. Stuttgart, Germany, June 1-3, 2015. **Anais...** Stuttgart, Germany: 2015
- AGHDASI, P. **Development and Characterization of Green Ultra-High Performance Fiber- Reinforced Concrete (G-UHP-FRC) for Structural and Non-Structural Applications** UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations University of California. [s.l.] University of California, 2019.
- AGHDASI, P.; HEID, A. E.; CHAO, S. Developing Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete for Large-Scale Structural Applications. **ACI MATERIALS JOURNAL**, n. October, p. 559–570, 2016.
- AHMAD, W.; KHAN, M.; SMARZEWSKI, P. Effect of short fiber reinforcements on fracture performance of cement-based materials: A systematic review approach. **Materials**, v. 14, n. 7, 2021.
- AİTCIN, P.-C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.
- AİTCIN, P. C. Developments in the application of high-performance concretes. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 1, p. 13–17, 1995.
- AL-MWANES, A. O.; AGAYARI, R. Studying the effect of hybrid fibers and silica fumes on mechanical properties of Ultra-High-Performance Concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and**

Engineering, v. 1076, n. 1, p. 012128, 2021.

ALBERTI, M. G. et al. Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 607–622, 2016.

ALLENA, S.; NEWTON, C. M. Ultra-High Strength Concrete Mixtures Using Local Materials. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 5, n. 4, p. 322–330, 2011.

ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; MICAH HALE, W. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. **Construction and Building Materials**, v. 133, 2017.

AMRAN, M. et al. **Fly ash-based eco-efficient concretes: A comprehensive review of the short-term properties** **Materials**, 2021.

ANDREASEN, A. H. M. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, n. 3, p. 217–228, 1930.

ARORA, A. et al. **First Principles-Based Design of Economical Ultra-High Performance First Principles-Based Design of Economical Ultra-High Performance Concrete**. Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures. **Anais...Leeds**: 2018

ARUNOTHAYAN, R. et al. Development of a 3D-Printable Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete for Digital Construction. **Preprints**, n. November, p. 1–31, 2019.

ASTM C1018 -97. Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). **Annual Book of ASTM Standards**, v. 04, p. 1–8, 1998.

ASTM C1609/C1609M-19. C 1609/C 1609M-05 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) 1. **Astm**, v. i, n. C 1609/C 1609M-05, p. 1–8, 2005.

ASTM C1856. **Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete**. West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM C230/C230M. **Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement**. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2020.

ASTM C39/C39M – 21. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1. **ASTM Standard Book**, p. 8, 2021.

ASTM C469/C469M. **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson' s Ratio of Concrete in Compression** West Conshohocken, PA, ASTM International, , 2014.

AUBRY, S. et al. **A UHPFRC Cladding Challenge: The Fondation Louis Vuitton Pour La Création "Iceberg"**. Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. **Anais...2013**

AZMEE, N. M.; SHAFIQ, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 2018.

BACHE, H. H. Densified Cement / Ultra-Fine Particle-Based Materials. **the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete**, 1981.

BAJABER, M. A.; HAKEEM, I. Y. UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 10, p. 1058–1074, 2020.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): Fiber synergy in high strength matrices.

Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 37, n. 274, p. 707–716, 2004.

BEHLOUL, M. et al. **Ductal® Pont du Diable footbridge, France**. Proceedings of the International FIB Symposium 2008 - Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for our Society. **Anais...**CRC Press/Balkema, 2008

BENSON, S. D. P.; KARIHALOO, B. L. CARDIFRC® - Development and mechanical properties. Part I: Development and workability. **Magazine of Concrete Research**, v. 57, n. 6, p. 347–352, 2005.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. [s.l.] CRC Press, 2006.

BERTRAND, J. et al. Design of a UHPFRC using amorphous metallic fibers. **AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete**, n. 1, p. 53–62, 2017.

BIRCHALL, J. D.; HOWARD, A. J.; KENDALL, K. Flexural strength and porosity of cements. **Nature**, v. 289, n. 5796, p. 388–390, 1981.

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. Precast, prestressed pedestrian bridge - world's first Reactive Powder Concrete structure. **PCI Journal**, v. 44, n. 5, p. 60–71, 1999.

BOGUE, R. H. The Chemistry of Portland Cement. Second Edition. **Soil Science**, v. 79, n. 4, 1955.

BS EN 12390-3:2019. **BS EN 12390-3:2019 - Testing hardened concrete Compressive strength of test specimens** British Standard Institution, 2019.

BS EN 14651:2005+A1:2007. **Test method for metallic fibre concrete — Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 2007.**

BUTTIGNOL, T. E. T. et al. Análise estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de aço a partir de modelos constitutivos idealizados. **59º Congresso Brasileiro Do Concreto - 59Cbc2017**, n. 1, p. 1–16, 2017.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras (CUADRF): análise das propriedades do material e especificações de projeto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 957–971, 2017.

CAO, M.; XU, L.; ZHANG, C. Rheological and mechanical properties of hybrid fiber reinforced cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 736–742, 2018.

CASANOVA, P. BETONS RENFORCES DE FIBRES METALLIQUES, DU MATERIAU A LA STRUCTURE: Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant. p. 225, 1995.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. [s.l.: s.n.].

CASTRO, A. L. DE; LIBORIO, J. B. L. **Considerações sobre o processo de produção de concreto de alto desempenho para estruturas pré-moldadas**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em concreto pré moldado. **Anais...**2005

CHAO, S.-H. et al. **Seismic Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Moment Frame Members**. International Interactive Symposium on UHPC, 8 ago. 2016

CHEN, B. et al. Application of Ultra-High Performance Concrete in Bridge Engineering in China. p. 1–8, 2016.

CHEN, B. et al. Development and application of concrete arch bridges in China. **Journal of Asian Concrete Federation**, v. 3, n. 2, p. 12–19, 2017.

- CHEN, H. J.; YU, Y. L.; TANG, C. W. Mechanical properties of ultra-high performance concrete before and after exposure to high temperatures. **Materials**, v. 13, n. 3, p. 1–17, 2020.
- CHEN, Y. et al. Optimization of ultra-high performance concrete, quantification of characteristic features. **Cogent Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1–12, 2019.
- CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra-alto desempenho (UHPC)**. [s.l.] Universidade do Vale do Rio Sinos, 2019.
- CHRIST, R. et al. Study of mechanical behavior of ultra - high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption. **Revista ingeniería de construcción**, v. 34, n. 2, p. 159–168, 2019.
- CHU, S. H.; KWAN, A. K. H. Co-addition of metakaolin and silica fume in mortar: effects and advantages. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 716–724, 2019.
- CHUN, B.; YOO, D. Y. Hybrid effect of macro and micro steel fibers on the pullout and tensile behaviors of ultra-high-performance concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 162, n. November 2018, p. 344–360, 2019.
- COURTIAL, M. et al. Effect of polycarboxylate and crushed quartz in UHPC : Microstructural investigation. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 699–705, 2013.
- DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009.
- DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.
- DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002.
- DENG, F. et al. The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling. **Composite Structures**, v. 206, n. June, p. 693–712, 2018.
- DESCHNER, F. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 10, p. 1389–1400, 2012.
- DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: New design perspectives. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 9, p. 1261–1281, 2009.
- DU, J. et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). **Composites Part B: Engineering**, v. 224, p. 109220, 2021.
- EIDE, M. B.; HISDAL, J.-M. **Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art**. Oslo: SINTEF Building and Infrastructure, 2012.
- EL-TAWIL, S. et al. **Commercial Production of Non-Proprietary Ultra High Performance Concrete** Technical Report; The Regents of the University of Michigan: Ann Arbor. [s.l.: s.n.].
- EL-TAWIL, S. et al. Open Recipe Ultrahigh Performance Concrete: Busting the cost myth. **Concrete International**, n. June, p. 33–38, 2020.
- EN 196-1. BSI Standards Publication Methods of testing cement Part 1: Determination of strength. **British Standards**, 2016.

- ENAMI, R. M. **Reforço de pilares curtos de concreto armado por encamisamento com concreto de ultra-alto desempenho**. [s.l.] . Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.
- EUROPEAN FEDERATION OF PRODUCERS AND CONTRACTORS OF SPECIAL PRODUCTS FOR STRUCTURES. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. [s.l.] EFNARC 2002, 2002. v. 44
- FENG, J. et al. Experimental study on hybrid effect evaluation of fiber reinforced concrete subjected to drop weight impacts. **Materials**, v. 11, n. 12, 2018.
- FERDOSIAN, I.; CAMÕES, A. Effective low-energy mixing procedure to develop high-fluidity cementitious pastes. **Revista Materia**, v. 21, n. 1, p. 11–17, 1 jan. 2016.
- FIB MC2010. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. [s.l.: s.n.].
- FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microssilica**. [s.l.] Dissertação (Mestrado). Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/L Porto Alegre, 1995., 1995.
- FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The Laws of Proportioning Concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. LIX, n. 2, p. 67–143, 1907.
- FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**. New York: Springer US, 1994.
- FURNAS, C. C. Grading Aggregates: I—Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 23, n. 9, p. 1052–1058, 1931.
- GETTU, R. et al. Fiber Concrete Tunnel Lining. **Concrete International**, v. 28, n. 8, p. 63–69, 2006.
- GHAFAARI, E.; COSTA, H.; JULIO, E. **Development of Ultra High Performance Self Compacting Concrete**. The Fifth North American Conference on the SCC Design and Use of Self-Consolidating Concrete. **Anais...**Chicago, USA: RILEM, 2013
- GHAFAARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E. **Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials****Construction and Building Materials**Elsevier Ltd, , 2015.
- GHANEM, S. Y.; BOWLING, J.; SUN, Z. Mechanical Properties of Hybrid Synthetic Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete Composites Part C : Open Access Mechanical Properties of Hybrid Synthetic Fiber Reinforced Self- Consolidating Concrete. **Composites Part C: Open Access**, v. 5, n. May, p. 100154, 2021.
- GIACCIO, G. et al. Study on cement pastes for self-compacting concrete design. **Industria Italiana del Cemento**, v. 75, n. 815, 2005.
- GIDRÃO, G. DE M. S.; KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R. Internal Damping Ratio of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Considering the Effect of Fiber Content and Damage Evolution. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 12, p. 04020364, 2020.
- GODART, B.; DIVET, L. **The Revision of the French Recommendations for the Prevention of Delayed Ettringite Formation**. JCI-RILEM International Workshop on “Control of Cracking of Mass Concrete and Related Issues concerning Early Age Cracking of Concrete Structures” - CONCRACK5. **Anais...**2017
- GRAYBEAL, B. **Behavior of Field-Cast Ultra-High Performance Concrete Bridge Deck Connections Under Cyclic and Static Structural Loading****FHWA Publication No. FHWA-HRT-11-023**, 2010.

- GRAYBEAL, B. A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. **FHWA**, n. FHWA-HRT-06-103, p. 186, 2006.
- GRAYBEAL, B.; DAVIS, M. Cylinder or cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 6, p. 603–609, 2008.
- GRUNEWALD, S. et al. **Parkbridge: Optimization of a slender bridge in UHPFRC**. RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. **Anais...**Marseille, France: 2013Disponível em: <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:f0788c09-16e4-4a7c-81ec-d394cf8ca458>>
- HASNAT, A.; GHAFOORI, N. Freeze–Thaw Resistance of Nonproprietary Ultrahigh-Performance Concrete. **Journal of Cold Regions Engineering**, v. 35, n. 3, p. 1–9, 2021.
- HAUG, A. K.; SANDVIK, M. **Mix Design and Strength Data for Concrete Platforms in the North Sea**. ACI SP. **Anais...**1988
- HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 271–288, 2017.
- HIRSCHI, T.; WOMBACHER, F. **Influence of different superplasticizers on UHPC**. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete; Kassel University Press. **Anais...**Kassel, Germany: 2008
- HOAN, P. T.; THUONG, N. T. Shear resistance of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid steel fiber subjected to impact loading. **Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE**, v. 13, n. 1, p. 12–20, 2019.
- HUANG, W. et al. Effect of replacement of silica fume with calcined clay on the hydration and microstructural development of eco-UHPFRC. **Materials and Design**, v. 121, p. 36–46, 2017a.
- HUANG, W. et al. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, v. 77, p. 86–101, 2017b.
- HUNG, C.-C.; EL-TAWIL, S.; CHAO, S.-H. A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design. **Journal of Structural Engineering**, v. 147, n. 9, p. 03121001, 2021.
- HÜSKEN, G. **A Multifunctional design approach for sustainable concrete with application to concrete mass products**. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.
- HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for each-moist concrete : A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 1246–1259, 2008.
- IBRAHIM, M. A. et al. Effect of Material Constituents on Mechanical and Fracture Mechanics Properties of Ultra-High-Performance Concrete. **ACI Materials Journal**, n. May, p. 453–465, 2017.
- ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 69–76, 2003.
- JSCE. **Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Concrete Structures, Draft.JSCE Guidelines for Concrete**, 2006.
- JSCE. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). **Concrete Engineereing Series**, v. 82, p. Testing Method

6-10, 2008.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71–80, 2015.

JUNGWIRTH, J. et al. **sustainable precast park deck systems Structural concepts for application of UHPFRC in construction practice : sustainable precast park deck systems**. Proceedings of Hipermat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials. **Anais...**Kassel: 2016

KALIFA, P.; MENNETEAU, F. D.; QUENARD, D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 12, p. 1915–1927, 2000.

KANTRO, D. L. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95–102, 1980.

KARMACHARYA, A.; CHAO, S.-H. Precast Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHP-FRC) for Fast and Sustainable Pavement Repair. **MATEC Web of Conferences**, v. 271, p. 01004, 2019.

KHAN, M. I.; ABBAS, Y. M.; FARES, G. Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating various combinations of fibers and ultrafines. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 29, n. 4, p. 339–347, 2017.

KHAYAT, K. H. et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete -An overview Cement and Concrete Research Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. September, p. 105828, 2019.

KICT. **Design Guidelines for K-UHPC**, 2014.

KIM, D. J. et al. Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 4144–4155, 2011.

KOCH, J. A. et al. Vibration of fresh concrete understood through the paradigm of granular physics. **Cement and Concrete Research**, v. 115, n. November 2017, p. 31–42, 2019.

KRAHL, P. et al. **Effect of wet curing time on the pull-out behavior of steel fibers in UHPFRC Effect of wet curing time on the pull-out behavior of steel fibers in UHPFRC**. 2020a

KRAHL, P. A. **Lateral stability of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with emphasis in transitory phases Instabilidade lateral de vigas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras com ênfase em fases transitórias**. Tese: Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo., 2018.

KRAHL, P. A. et al. Experimental and analytical studies on the lateral instability of UHPFRC beams lifted by cables. **Composite Structures**, v. 209, n. May 2018, p. 652–667, 2019.

KRAHL, P. A. et al. A novel approach to characterize the direct shear pullout behavior of single hooked steel fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, n. May, 2020b.

KRAHL, P. A. et al. Effect of curing age on pullout behavior of aligned and inclined steel fibers embedded in UHPFRC. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121188, 2021.

KUMAR, D. et al. **Influence of maximum aggregate size and distribution modulus on UHPC matrix properties Influence of maximum aggregate size and distribution modulus on UHPC matrix properties**. 5th International Symposium: Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials. **Anais...**Kassel, Germany: 2020

- KUMAR, S. V.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning : A review. **The Indian Concrete Journal**, n. September 2003, 2003.
- LARSEN, I. L. L.; THORSTENSEN, R. T. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete : A review. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119459, 2020.
- LE, H. T. et al. The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. **Materials and Design**, v. 72, p. 51–62, 2015.
- LI, P. P. et al. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 11, 2020.
- LI, P. P.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 649–659, 2018.
- LI, Q. et al. Microstructure and Mechanical Properties of High-Toughness Fiber-Reinforced Cementitious Composites after Exposure to Elevated Temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 11, p. 04016132, 2016.
- LI, V. C.; WANG, S.; WU, C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 483–492, 2001.
- LIM, T. Y.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S. L. Analytical Model for Tensile Behavior of Steel-Fiber Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 4, p. 286–298, 1987.
- LIU, J.; SHI, C.; WU, Z. Hardening, microstructure, and shrinkage development of UHPC: A review. **Journal of Asian Concrete Federation**, v. 5, n. 2, p. 1–19, 2019.
- LIU, K. et al. Influence of external water introduced by coral sand on autogenous shrinkage and microstructure development of Ultra-High Strength Concrete (UHSC). **Construction and Building Materials**, v. 252, n. November, p. 119111, 2020.
- LIU, R. et al. Optimization of Cementitious Material Content for Sustainable Concrete Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 6, p. 745–753, 4 jun. 2012.
- LIU, Y.; WEI, Y.; GUO, W. Effect of Filler Type, Fineness, and Shape on the Properties of Nonfibrous UHPC Matrix. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 5, p. 04021084, 2021.
- LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Pastas de ultra-alto desempenho submetidas a cura sob pressão. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 83–98, set. 2019.
- LOK, T.-S.; PEI, J.-S. Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 10, n. 2, p. 86–97, maio 1998.
- LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. Dissertação: Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.
- LUO, D.; WANG, Y.; NIU, D. Evaluation of the Performance Degradation of Hybrid Steel-Polypropylene Fiber Reinforced Concrete under Freezing-Thawing Conditions. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, 2020.
- MAGUREANU, C. et al. Bending and shear behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete. In: **High Performance Structures and Materials V**. [s.l.] WIT Transactions on the Built Environment, 2010. v. 112p. 79–89.
- MANGULKAR, M.; JAMKAR, S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning.

International Journal Of Scientific & Engineering Research, v. 4, n. 5, p. 143–148, 2013.

MARKOVIC, I. **High-Performance Hybrid-Fibre Concrete**. [s.l.] Doctorate. Universiteit van Belgrado., 2006.

MARTÍNEZ, J. Á. L. **Characterisation of the Tensile Behaviour of Uhpfrc By Means of Four-Point Bending Tests**. [s.l.] Universitat Politècnica de València, 2017.

MÁRTIRES, R. A. C. **Caulim**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/6-2-caulim>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

MCGEARY, R. K. Mechanical Packing of Spherical Particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, n. 10, p. 513–522, 1961.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. [s.l.] ntifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete Microstructure, Properties, and Materials**. 3rd. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2006.

MENG, W. **Design and Performance of Cost-Effective Ultra-High Performance Concrete for Prefabricated Elements**. [s.l.] Dissertation (Doctoral of Philosophy). Missouri University of Science and Techinology. 2017., 2017.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 107, p. 113–122, 2016.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 107, p. 26–34, 2017.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, 2018a.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC. **Cement and Concrete Research**, v. 105, p. 64–71, 2018b.

MENG, W.; VALIPOUR, M.; KHAYAT, K. H. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, p. 50–29, 2017.

MILLER, K. P. **Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicação de conceitos da mecânica da fratura**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2008.

MISHRA, O.; SINGH, S. P. **An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete****Journal of Sustainable Cement-Based Materials**Taylor & Francis, , 2019.

MO, Z.; GAO, X.; SU, A. Mechanical performances and microstructures of metakaolin contained UHPC matrix under steam curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 268, n. xxxx, p. 121112, 2021.

MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. **Journal of Colloid Science**, v. 6, n. 2, p. 162–170, 1951.

NAAMAN, A. E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 241–252, 2003.

NAAMAN, A. E. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification and Applications. **CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan**, v. 1, n. 1, p. 389–401, 2009.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile

- response. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 5, p. 547–555, 2006.
- NEHDI, M. L.; SOLIMAN, A. M. Early-age properties of concrete : overview of fundamental concepts and state-of-the-art research. n. April, 2011.
- NF P 18-470. **Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Spécification, performance, production et conformité** Paris, 2016.
- NGUYEN, T. T.; THAI, H. T.; NGO, T. Optimised mix design and elastic modulus prediction of ultra-high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 302, n. October, p. 124150, 2021.
- OLIVEIRA, C. O. Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC. p. 157, 2019.
- OLIVEIRA, C. O. E. **Análise Das Propriedades Reológicas De Materiais Cimentícios Associando O Conceito De Empacotamento De Partículas**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2013.
- OLIVEIRA, J. P. DE et al. Concrete performance evaluation of coarse aggregate replacement by civil construction waste. **REVISTA ELETRÔNICA EM GESTÃO, EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL**, v. 24, n. 52, 2020.
- PACHECO, F. et al. Effects of fiber hybridization in advanced cementitious composites durability in humid and aggressive environments. **Revista Materia**, v. 23, n. 3, 18 out. 2018.
- PAKRAVAN, H. R.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M. The effect of hybridization and geometry of polypropylene fibers on engineered cementitious composites reinforced by polyvinyl alcohol fibers. **Journal of Composite Materials**, v. 50, n. 8, p. 1007–1020, 2016.
- PARK, J. J. et al. **Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion**. [s.l.: s.n.].
- PARK, J. J. et al. Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, 1 nov. 2019.
- PARK, S. et al. **The role of supplementary cementitious materials (Scms) in ultra high performance concrete (uhpc): A review** Materials, 2021.
- PARK, S. H. et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 172–184, 2012.
- PERRY, V. H. **What Really is Ultra-High Performance Concrete ? -Towards a Global Definition What Really is Ultra-High Performance Concrete ? - Towards a Global Definition**. The 2nd Int. Conference on Ultra-High Performance Concrete Material & Structures UHPFRC 2018. **Anais...** Fuzhou, China: 2018
- PLISKIN, L. High Performance Concretes – Engineering Properties and Code Aspects. In: **High Performance Concrete**. [s.l.] CRC Press, 2018. p. 186–195.
- POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 10, p. 858–865, 2006.
- POORHOSEIN, R.; NEMATZADEH, M. Mechanical behavior of hybrid steel-PVA fibers reinforced reactive powder concrete. **Computers and Concrete**, v. 21, n. 2, p. 167–179, 1 fev. 2018.
- POURJAHANSHAHI, A.; MADANI, H. Chloride diffusivity and mechanical performance of UHPC with hybrid fibers under heat treatment regime. **Materials Today Communications**, v. 26, n. April, 2021.
- PYO, S.; KIM, H. K.; KIM, H. Characteristics of an eco-friendly UHPC incorporating Coal Bottom Ash.

Proceedings of Hipermat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials Kassel, p. 1–6, 2016.

QIAO, D.; HONMA, D.; KOJIMA, M. **Evaluation of tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete with uniaxial tension tests**. Conference: JCI Annual Convention 2019. **Anais...**2019

RAGALWAR, K. et al. **Systematic Development of Environmentally Sustainable Ultra-High Systematic Development of Environmentally Sustainable Ultra-High Performance Concrete**. Proceedings of Hipermat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials Kassel, (March). **Anais...**2016

RAGALWAR, K. et al. Significance of the particle size distribution modulus for strain- hardening-ultra-high performance concrete (SH-UHPC) matrix design. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117423, 2020.

RANDL, N. et al. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. **CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS**, 2014.

RAUCCI, B. J. S. et al. Efeito do método de mistura sobre o espalhamento mini-slump de pastas de cimento Portland. **RIEM - IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 2, 2018.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.

RIVA, R. D. D. **Efeito das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados**. Tese: Doutorado. Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.

RIZWAN, A.; AHMAD, S.; BIER, T. A. **Application of Packing Concepts to High Performance Self-Consolidating Mortar (SCM) Systems**. Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. **Anais...**Prague, Czech Republic: 2012

ROY, D. M.; GOUDA, G. R.; BOBROWSKY, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 2, n. 3, p. 349–366, 1972.

ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. **MRS Bulletin**, v. 18, n. 3, p. 45–49, 1993.

RUSSEL, H. G.; GRAYBEAL, B. A. **Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community**. Publication N.º FHWA-HRT-13-060. [s.l: s.n.].

SAFIUDDIN, M.; HEARN, N. Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1008–1013, 2005.

SAKAI, E. et al. **Influence of Superplasticizer on the Fluidity of Cements with Different Amount of Aluminate Phase**. Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. **Anais...**Kassel, Germany: 2008

SANCHAYAN, S.; FOSTER, S. J. **Behaviour of hybrid PVA-steel fibre reinforced ultra high performance concrete at high temperature**. Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 5th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC 2013. **Anais...**2013

SANKAR, B.; RAMADOSS, P. Review on fiber hybridization in ternary blended high-performance concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4919–4924, 2021.

- SANTOS, F. B. DOS. **Influência do C3A em pastas de cimento Portland : avaliação das propriedades**. Dissertação: Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- SBIA, L. A. et al. Production methods for reliable construction of ultra-high-performance concrete (UHPC) structures. **Materials and Structures**, v. 50, n. 7, p. 1–19, 2017.
- SCHRÖFL, C.; GRUBER, M.; PLANK, J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 11, p. 1401–1408, 2012.
- SHEN, B. et al. Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: Processing, microstructure, and properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 8, p. 663–673, 2008.
- SHI, C. et al. A review on ultra high performance concrete : Part I . Raw materials and mixture design. **CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS**, v. 101, p. 741–751, 2015.
- SHIN, H. O. et al. Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4182–4197, 2019.
- SMARZEWSKI, P.; BARNAT-HUNEK, D. Property Assessment of Hybrid Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete. **International Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 593–606, 2018.
- SOBOLEV, K.; GUTIÉRREZ, M. F. How nanotechnology can change the concrete world. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 84, n. 10, p. 14–18, 2005.
- SOHAIL, M. G. et al. Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 3, p. 04017310, 2018.
- SONG, Q. et al. A novel Self-Compacting Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (SCUHPFRC) derived from compounded high-active powders. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 883–893, 2018.
- SONG, Q. et al. Intrinsic effect of hybrid fibres 3D network on the electrochemical characteristics of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Composites (UHPFRC). **Cement and Concrete Composites**, v. 114, n. January, p. 103818, 2020.
- SPASOJEVIĆ, A. **Structural Implications of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete in Bridge Design**. Thesis: Doctoral. À La Faculté De L'environnement Naturel, Architectural Et Construit Laboratoire De Construction En Béton Programme Doctoral En Structures. École Polytechnique Fédérale De Lausanne. Suisse., 2008.
- SUN, W.; YAN, H.; ZHAN, B. Analysis of mechanism on water-reducing effect of fine ground slag, high-calcium fly ash, and low-calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1119–1125, 2003.
- TAFRAOUI, A. et al. Metakaolin in the formulation of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 669–674, 2009.
- TAI, Y. S. et al. Parameters Influencing Fluidity of UHPC and Their Effect on Mechanical and Durability Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 10, 1 out. 2020.
- TALEBINEJAD, I. et al. **Optimizing mix proportions of normal weight reactive powder concrete with strengths of 200–350 MPa**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete. **Anais...Kassel**, Germany: 2004
- TARIFA CRESPO, MANUEL AGUSTIN. **Procesos de fractura dinámica en hormigón de alta resistencia**. [s.l.] Universidad de Castilla-La Mancha - UCLM, 2012.

- TRAN, N. T.; KIM, D. J. Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, p. 132–145, 1 abr. 2017.
- TUE, N. V.; MA, J.; ORGASS, M. **Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC**. Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. **Anais...Kassel**, Germany: 2008
- ULFKJÆR, J. P.; KRENK, S.; BRINCKER, R. Analytical Model for Fictitious Crack Propagation in Concrete Beams. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 121, n. 1, p. 7–15, 1995.
- VAN DAMME, H. Concrete material science: Past, present, and future innovations. **Cement and Concrete Research**, v. 112, n. January, p. 5–24, 2018.
- VAN MIER, J. G. M. **Fracture processes of concrete: Assessment of material parameters for fracture models**. [s.l.: s.n.].
- VAN TUAN, N. et al. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1104–1111, 2011.
- VAN, V. T. A. et al. Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 270–278, 2014.
- VANDERLEI, R. D. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS : DOSAGEM E**. [s.l.: s.n.].
- VANDERWALLE L. Recommendations of RILEM TC162- TDF: 'Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: bending test' (final recommendation). **Materials and Structures**, v. 36, n. October, p. 560–567, 2003.
- VIAPIANA, L. G. **Influência do confinamento na resistência e ductilidade de pilares curtos de concreto de ultra alta resistência submetidos à compressão centrada**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.
- VITEK, J. L.; COUFAL, R.; ČÍTEK, D. UHPC - Development and testing on structural elements. **Procedia Engineering**, v. 65, p. 218–223, 2013.
- WANG, D. et al. **A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties** **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 24 ago. 2015.
- WANG, R.; GAO, X. Relationship between flowability, entrapped air content and strength of UHPC mixtures containing different dosage of steel fiber. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 6, n. 8, 2016.
- WANG, X. et al. Optimized treatment of recycled construction and demolition waste in developing sustainable ultra-high performance concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 805–816, 2019.
- WEI, H. et al. Multiscale insights on enhancing tensile properties of ultra-high performance cementitious composite with hybrid steel and polymeric fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 14, n. July, p. 743–753, 2021.
- WILLE, K. et al. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 45, n. 3, p. 309–324, 2012.
- WILLE, K.; BOISVERT-COTULIO, C. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 33–43, 2015.
- WILLE, K.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 48, p.

53–66, 2014.

WILLE, K.; KIM, D. J.; NAAMAN, A. E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. **Materials and Structures**, v. 44, n. 3, p. 583–598, 2011.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E. **Bond stress-slip behavior of steel fibers embedded in ultra high performance concrete**. 18th European Conference on Fracture: Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale. **Anais...**2010

WILLE, K.; NAAMAN, A. E. Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, v. 109, n. 4, p. 479–488, jul. 2012.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 1, p. 46–54, 2011.

WU, Z. et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 103, p. 8–14, 2016.

WU, Z. et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 148–157, 2017.

WU, Z.; KHAYAT, K. H.; SHI, C. How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC? **Cement and Concrete Composites**, v. 90, p. 193–201, 1 jul. 2018.

WU, Z.; KHAYAT, K. H.; SHI, C. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content. **Cement and Concrete Research**, v. 123, 2019.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 97–109, 1 ago. 2016.

XIE, C. et al. Effects of freeze-thaw damage on fracture properties and microstructure of hybrid fibers reinforced cementitious composites containing calcium carbonate whisker. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 123872, 2021.

XINCHENG, P.; JIXIN, D.; MILESTONE, N. **Super-high-strength high performance concrete**. [s.l: s.n.].

XU, M.; YAN, L.; WANG, S. **Experimental Research on Mechanical Properties of Steel-UHMWPE Hybrid Fiber Reinforced Concrete**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...**2018

YANG, J. et al. Structural Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Thin-Walled Arch Subjected to Asymmetric Load. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

YAZICI, H. et al. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. v. 87, p. 2401–2407, 2008.

YAZICI, H. et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 639–648, 2010.

YOO, D. Y. et al. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 122–133, 2014.

YOO, D. Y. et al. Development of cost effective ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using single and hybrid steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 383–394, 2017.

YOO, D. Y. et al. Enhancing the tensile performance of ultra-high-performance concrete through strategic use of novel half-hooked steel fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 2914–2925,

2020.

YOO, D. Y.; BANTHIA, N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 267–280, 2016.

YOO, D. Y.; KIM, M. J. High energy absorbent ultra-high-performance concrete with hybrid steel and polyethylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 354–363, 2019a.

YOO, D. Y.; KIM, S. Comparative pullout behavior of half-hooked and commercial steel fibers embedded in UHPC under static and impact loads. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, n. December 2018, p. 89–106, 2019b.

YU, K. Q. et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 217–227, 2018.

YU, R. et al. A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA). **Construction and Building Materials**, v. 60, p. 98–110, 2014.

YU, R. et al. Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 203–215, 2016.

YU, R. et al. Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 220–233, 2017.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 158–171, 2014a.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 140–150, 2014b.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29–39, 2014c.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383–394, 2015a.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 273–282, 2015b.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Energy absorption capacity of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) in quasi-static mode and under high velocity projectile impact. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 109–122, 2016.

ZHANG, J.; ZHAO, Y. The mechanical properties and microstructure of ultra-high-performance concrete containing various supplementary cementitious materials. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 6, n. 4, p. 254–266, 2017.

ZHOU, M. et al. Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 1256–1267, 2018.

ZHOU, M. et al. Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 124, p. 104242, 2021.

ANEXO I – EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS PARA AGREGADOS

Para produzir um CUAD é necessário que seja feito o empacotamento das partículas, Para entendimento desse conceito, desenvolveu-se um estudo simples sobre empacotamento para agregados (areia fina, areia média e brita 1), e a partir deste estudo, seguiu-se os mesmos passos para realizar a otimização dos materiais para produção do CUAD. O objetivo foi verificar o melhor empacotamento na prática, ou seja, menor volume de vazios, a partir de três diferentes combinações de agregados. Os materiais utilizados foram areia fina de 0.42 mm de diâmetro, densidade específica de 2.64 g/cm³ de e massa unitária de 1.49 g/cm³; areia média com densidade específica de 2.56 g/cm³ e massa unitária de 2.05 g/cm³; e brita 1 com densidade de 2.91 g/cm³ e massa unitária de 1.12 g/cm³. A Tabela 22 apresenta a granulometria para os materiais utilizados nessa análise.

Tabela 22: Granulometria dos agregados utilizados no ensaio de empacotamento

Diâmetro da partícula (µm)	% Passante		
	Brita 1	Areia média	Areia fina
64000	100.0	100.0	100.0
32000	100.0	100.0	100.0
26000	100.0	100.0	100.0
22000	98.4	100.0	100.0
19000	80.25	100.0	100.0
16000	62.09	100.0	100.0
12000	19.72	100.0	100.0
8000	6.18	99.96	100.0
4000	0	88.93	100.0
2000	0	66.96	100.0
1000	0	47.88	100.0
704	0	39.41	100.0
592	0	36.21	100.0
497.8	0	30.56	99.99
418.6	0	25.75	99.71
352	0	21.72	97.72
296	0	18.28	89.31
248.9	0	13.65	73.29
209.3	0	9.76	51.19
176	0	6.48	28.58
148	0	3.78	11.86
124.5	0	2.58	3.14
104.7	0	1.57	0.52
88	0	0.71	0.02

Inicialmente, para realizar o empacotamento utilizou-se o software EMMA, desenvolvido pela empresa Elkem, que tem como base os modelos de Andreassen & Andersen e o modelo de Andreasen e Andersen & Andersen modificado (A&Am). Porém, no software, as proporções devem ser colocadas pelo

próprio usuário na forma da massa de cada material e para obter uma curva mais próxima da curva ideal dos modelos, só é possível através de tentativas e erros. Por isso, a fim de aplicar o conceito e automatizar o proporcionamento dos materiais para se encontrar a curva mais aproximada do modelo de A&Am, desenvolveu-se um sistema utilizando o software Microsoft Excel. Para obter as curvas de cada mistura de agregados, foram inseridas no sistema no software Microsoft Excel, as curvas granulométricas, os diâmetros máximo e mínimo dos agregados e o coeficiente de distribuição (q) igual a 0.10 (valor escolhido, simplesmente, para desenvolvimento do ensaio e entendimento do conceito). Com a curva ideal obtida a partir da Equação 6, utilizou-se o cálculo matemático pelo “Método dos Mínimos Quadrados” conforme as Equação 7 e Equação 8 para encontrar proporções aproximadas à curva ideal. As três combinações de materiais foram calculadas para preencher um volume de 2 litros e as proporções foram escolhidas para a obtenção das seguintes curvas: uma curva mais próxima possível da curva ideal do modelo de A&Am; uma curva acima da curva ideal; e uma curva abaixo da curva ideal. A Tabela 23 apresenta o volume real ocupado pelos materiais, o fator de empacotamento (P_f) e a porosidade da mistura (P_o). Observa-se que a curva mais aproximada da curva ideal do modelo de A&A modificado, possui o fator de empacotamento (P_f) superior às outras curvas, confirmando com o conceito de empacotamento e o previsto pelo sistema desenvolvido no software Excel.

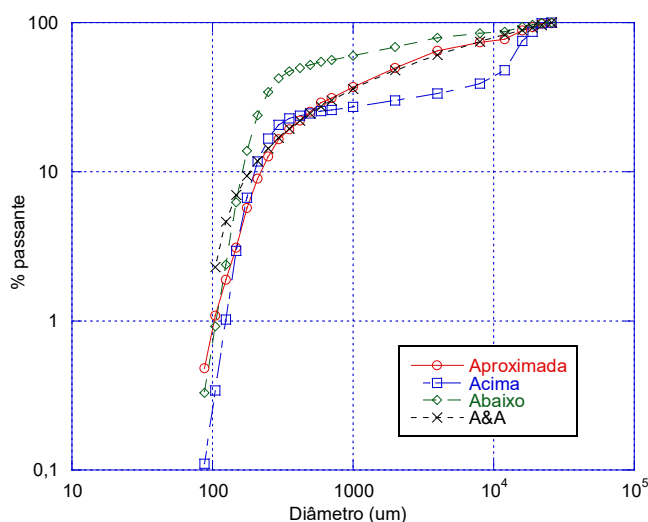


Figura 76: Curvas obtidas para o ensaio de empacotamento dos agregados

Tabela 23: Resultados obtidos no ensaio de empacotamento de agregados

Curva	Vol (l)	P_f	P_o
Aproximada	2.47	0.81	0.19
Acima	2.82	0.71	0.29
Abaixo	2.59	0.77	0.23

ANEXO II – TRAÇO CUAD-SC

Para analisar o comportamento do CUAD e comparar com o que foi desenvolvido nesta pesquisa, reproduziu-se um traço de CUAD criado por um grupo de pesquisadores da Universidade Estadual de São Paulo da cidade de São Carlos descrito em Oliveira (2019), denominando como CUAD-SC. Porém, os materiais utilizados não foram os mesmos utilizados pelo grupo de pesquisadores, mas sim, os materiais obtidos através de doações para a presente pesquisa. Para produzir este concreto, foram utilizados os seguintes materiais e proporções: 757.2 kg/m³ de cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), 833 kg/m³ de areia fina com diâmetro máximo de 0.42 mm (massa específica de 2655 kg/m³), 189.3 kg/m³ de sílica ativa (massa específica entre 2465 kg/m³), 378.6 kg/m³ de pó de quartzo (massa específica de 2659 kg/m³), 68.2 kg/m³ de aditivo superplastificante à base de policarboxilato (massa específica de 1093 kg/m³), e, 159 kg/m³ de água.

A mistura do concreto foi realizada em um misturador de eixo de rotação vertical com capacidade de 20 litros. Primeiramente, colocou-se a areia fina e um quarto da água na batedeira e foram misturados por 1 minuto em velocidade baixa. Em seguida, adicionou-se o cimento, a sílica ativa, o pó de quartzo e mais um quarto da água, e foram misturados por mais 3 minutos. Depois, adicionou-se o restante da água e misturou-se por mais 4 minutos. Para obter uma mistura fluida, adicionou-se o aditivo superplastificante e todos os materiais foram misturados por 15 minutos em velocidade alta.

Este traço foi avaliado quanto à fluidez pelo método de Kantro (1980) e resistência à compressão. Para determinação da resistência à compressão aos 8, 14 e 56 dias, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada idade de ensaio. Para isso, os moldes foram previamente umedecidos com desmoldante e foram preenchidos e vibrados manualmente. Durante o preenchimento dos corpos de prova, percebeu-se o aparecimento de bolhas, e por este motivo, decidiu-se utilizar a mesa vibratória para melhorar o adensamento do concreto. As amostras foram cobertas com um pano umedecido e armazenados em local protegido de intempéries conforme ABNT NBR 5738:2015 até a desmoldagem. Após a desmoldagem, foram mantidos submersos em água e mantidos em temperatura ambiente até a realização do ensaio. As vantagens da realização da cura convencional são menor consumo de energia e facilidade de operação (YUNSHENG et al., 2008).

Para avaliar a fluidez do concreto executou-se o ensaio de miniabatimento pelo método de Kanro (1980). Para a realização do ensaio utilizou-se: um mini tronco de cone com diâmetro inferior de 40 mm e diâmetro superior de 20.9 mm e 59.5 mm de altura e placa de vidro milimetrada (Figura 77). Na realização do ensaio seguiu-se as seguintes etapas: preencheu-se o molde de uma única vez, retirou-se o excesso do concreto do topo do molde, bateu-se 10 vezes com espátula no molde para eliminar possíveis bolhas de ar do concreto; levantou-se o molde com um único movimento em uma altura de, aproximadamente, 10 cm acima da placa, e deixou o concreto fluir. Após o espalhamento do concreto cessar, foram medidos dois diâmetros perpendiculares entre si, sendo o espalhamento, a média desses diâmetros.



Figura 77: Placa de vidro e molde para ensaio de fluidez pelo método de Kanro

A primeira observação foi que antes da colocação do superplastificante, o concreto apresentava uma consistência muito seca, mesmo após a adição completa de água (Figura 78 a). Entretanto, ao adicionar o superplastificante, a consistência mudou completamente, tornando-se uma mistura viscosa (glutinosa) (Figura 78 b) (WILLE; NAAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011), (AGHDASI; HEID; CHAO, 2016). O concreto apresentou baixa fluidez, pois parte do concreto ficou preso no molde e o espalhamento foi de 80 mm (Figura 78 c). Apesar desse ensaio, normalmente, ser utilizado para avaliar a compatibilidade entre cimento e superplastificantes (CASTRO, 2007), já foi utilizado para verificar a fluidez de concreto auto-adensável (GIACCIO et al., 2005), (MENEZES, 2006) e concreto de alto desempenho (CASTRO; LIBORIO, 2005). A Tabela 24 apresenta os valores obtidos para o ensaio de resistência à compressão para 8, 14 e 56 dias.

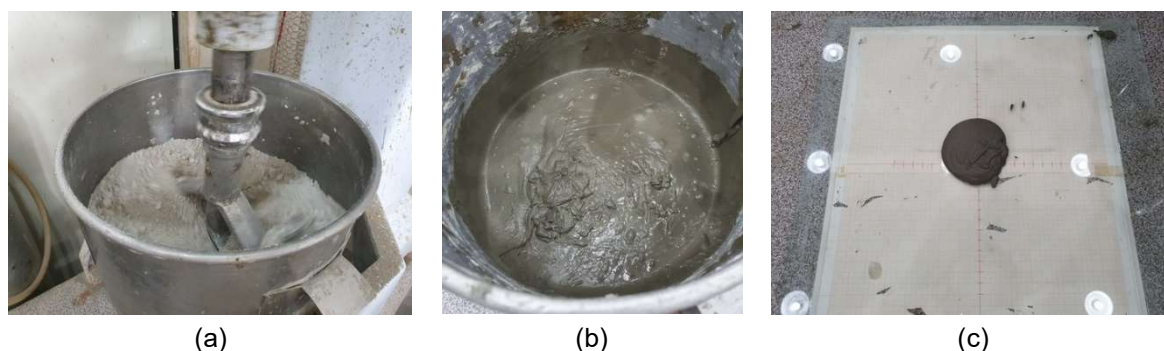


Figura 78: Aparência do concreto (a) após adição dos materiais secos e água e (b) após colocação do superplastificante, (c) Espalhamento do CUAD-SC

Tabela 24: Resultados obtidas no ensaio de resistência à compressão para CUAD de São Carlos

Propriedades	(OLIVEIRA, 2019)		Presente pesquisa		
	28 dias	56 dias	8 dias	14 dias	56 dias
σ (MPa)	127.4	131.5	80.28	76.76	102.97
Desvio-padrão (MPa)	-	7.2	4.05	15.41	8.28
Coeficiente de variação (%)	-	-	5.04	20.07	8.04

Observou-se que os corpos de prova apresentaram muito poros para um CUAD. Este fator pode ter relação com o empacotamento, com a sequência da mistura e eficiência da mistura. Como o cimento e a sílica são bem finos, podem não ter sido desaglomerados eficientemente de forma que parte do material não reagiu e resultou na formação de regiões de fraqueza. Porém, para confirmar esse fato, o ideal seria ter realizado ensaios de análise de porosidade. Aos 8 dias de idade, o concreto atingiu quase 80% da sua capacidade total de resistência à compressão, que segundo Buttignol et al. (2018), é a resistência esperada. Esse ganho de resistência ocorre após o período de dormência, de aproximadamente 1 dia, que é gerado pela adição de aditivos. Durante esse período, os aditivos criam uma película em torno dos grãos de cimento, impedindo o contato e reação química com a água. Logo após esse período, é que se inicia a hidratação do cimento e outros materiais e o ganho de resistência (BUTTIGNOL et al., 2018). É possível verificar que ao reproduzir o CUAD desenvolvido por (OLIVEIRA, 2019), a resistência à compressão média atingida aos 56 dias foi de 102.97 MPa, enquanto para Oliveira (2019) foi 131.5 MPa aos 56 dias. Apesar da resistência atingida ter sido acima de 100 MPa, houve uma redução de mais de 20% em relação ao traço referência. Essa redução da resistência à compressão indica que para a produção do CUAD, é necessário que sejam utilizados os mesmos materiais e fornecedores e mesmo tipo de misturador para que seja reproduzido com as mesmas características. Ou seja, quando são utilizados diferentes materiais e fornecedores, os traços

deverão ser refeitos, isto é, iniciar uma nova dosagem a partir do empacotamento de partículas utilizando os novos materiais.

De acordo com a norma chinesa, GB/T 31387-2015 (PERRY, 2018) e em (PLISKIN, 2018), um concreto com resistência à compressão acima de 100 MPa pode ser considerado de ultra-alto desempenho, enquanto a norma americana (ASTM C1856, 2017) recomenda que deve ser acima de 120 MPa. Além disso, sabe-se que como o CUAD é muito frágil quando submetido aos esforços de tração, e por isso, é necessário que fibras sejam incorporadas, e com isso existe uma tendência que haverá um aumento da resistência à compressão (SOHAIL et al., 2018), (YOO et al., 2014), (WU et al., 2017), (IBRAHIM et al., 2017), (POURJAHANSHAH; MADANI, 2021).

ANEXO III – PRÉ DOSAGEM DOS TRAÇOS DE CUAD

Inicialmente, para definir quais traços seriam moldados, realizou-se o ensaio de auto-adensabilidade (mini abatimento) conforme item 5.3.2 da dissertação conforme EFNARC (2002) e pela norma brasileira NBR 13320:2012 para diversos traços de CUAD, a fim de se encontrar os traços com menor relação a/aglom e boa fluidez. Os traços foram divididos em três tipos de combinações conforme explicado no item 5.5.2 na Tabela 7. A dosagem dos traços foi realizado conforme item 5.5.2 utilizando o método de empacotamento de partículas. A Tabela 25, Tabela 26 e Tabela 27 apresentam as restrições inseridas para cada traço estudado para Combinação 1, Combinação 2 e Combinação 3, respectivamente.

Tabela 25: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 1

Traço	Proporções		Consumo (kg/m ³)	a/aglom
	Sílica ativa	Pó de Quartzo	Cimento	
A.1	-	-	-	0,2
A.1.1	-	-	-	0,22
A.2	-	-	-	0,25
A.3	≤ 0,05	≤ 0,20	-	0,2
A.3.1	≤ 0,05	≤ 0,20	-	0,22
A.4	≤ 0,05	≤ 0,20	-	0,25
A.5	-	-	800,0	0,2
A.5.1	-	-	800,0	0,22
A.6	-	-	800,0	0,25

Tabela 26: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 2

Traço	Proporções		Consumo (kg/m ³)	a/aglom
	Sílica ativa	Cinza	Cimento	
B.1	-	-	800,0	0,20
B.1.3	-	-	800,0	0,18
B.1.2	-	-	800,0	0,15
B.3	-	≤ 0,2	800,0	0,20
B.3.3	-	≤ 0,2	800,0	0,18
B.3.2	-	≤ 0,2	800,0	0,15
B.5	≤ 0,05	≤ 0,2	800,0	0,20
B.5.3	≤ 0,05	≤ 0,2	800,0	0,18
B.5.2	≤ 0,05	≤ 0,2	800,0	0,15

Tabela 27: Restrições para cada traço estudado para a Combinação 3

Traço	Proporções			Consumo (kg/m³)	a/aglom
	Sílica ativa	Metacaulim	Areia	Cimento	
C.1.1	-	-	-	800	0,22
C.1	-	-	-	800	0,20
C.2	-	-	-	800	0,25
C.3	≤ 0,05	-	-	800	0,20
C.3.1	≤ 0,05	-	-	800	0,22
C.5.1	-	-	≥ 0,45	800	0,22
C.7.1	-	≤ 0,10	≤ 0,43	800	0,22

As Figura 79, Figura 80 e Figura 81 apresentam as granulometrias de cada material utilizado nas misturas, as curvas para o modelo modificado de Andreasen e Andersen e para as curvas das misturas para a Combinação 1, Combinação 2 e Combinação 3, respectivamente. O eixo x está em escala logarítmica.

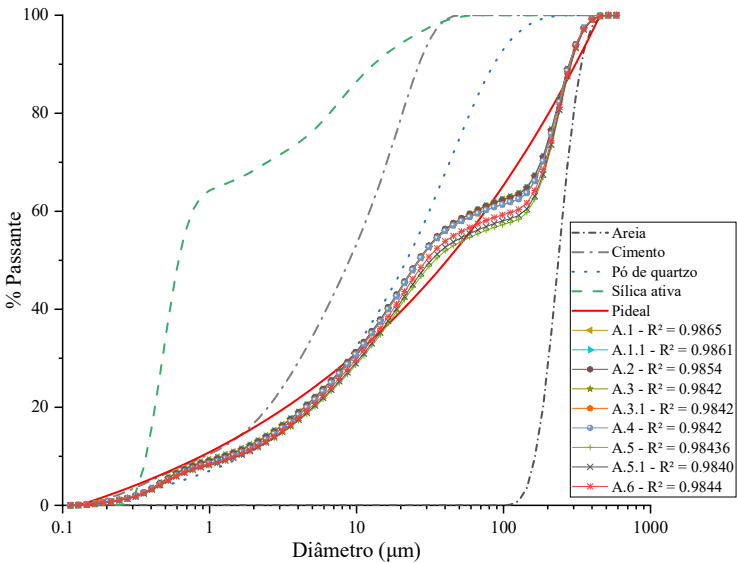


Figura 79: Curvas para modelo modificado A&A e traços mais aproximados ao modelo para a Combinação 1

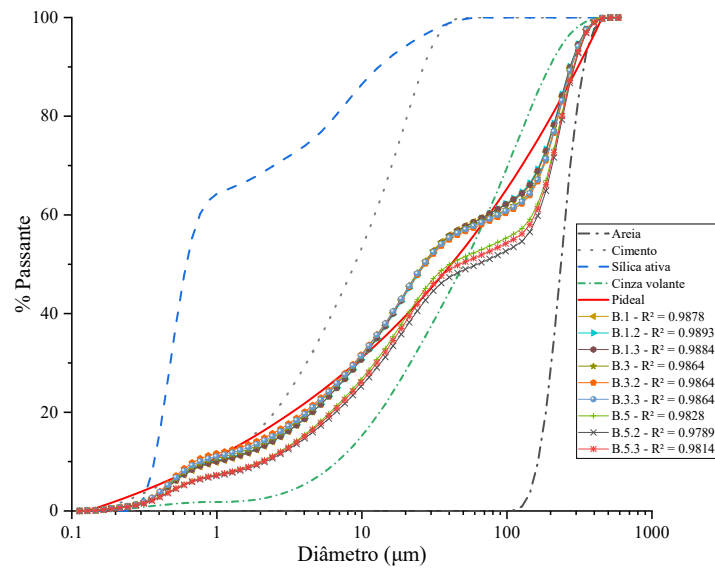


Figura 80: Curvas para modelo modificado A&A e traços mais aproximados ao modelo para a Combinação 2

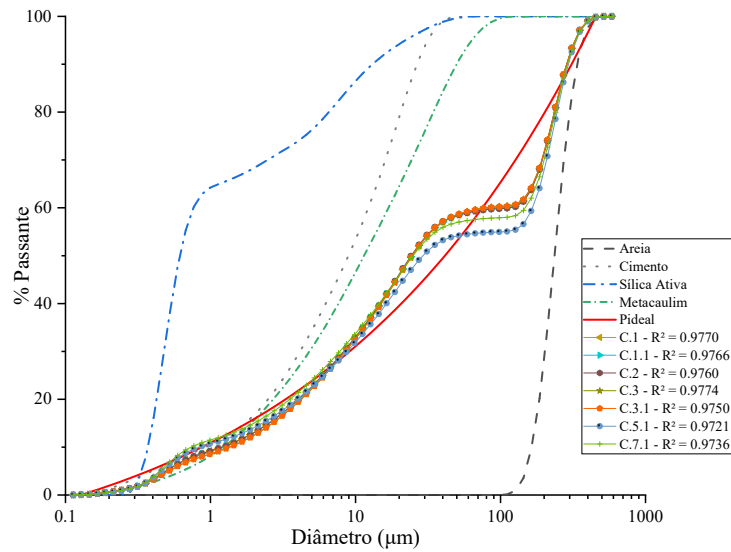


Figura 81: Curvas para modelo modificado A&A e traços mais aproximados ao modelo para a Combinação 3

A mistura dos componentes para esses traços de CUAD foi realizada da seguinte maneira:

- Peneiramento da sílica ativa para desaglomeração das suas partículas;

- Mistura dos materiais secos em velocidade baixa por 2 min para desaglomerar suas partículas (procedimento também realizado por (GRAYBEAL, 2006), (TAFRAOUI et al., 2009), (CHEN et al., 2019);

- Adição do superplastificante com parte da água à mistura, despejar o restante da água no recipiente do superplastificante para retirar a sobra do aditivo e adicionar a mistura. Após adicionar todo o superplastificante e a água, misturou-se tudo em velocidade baixa até a formação do concreto. O tempo para formação do concreto foi diferente para cada um dos traços estudados.

- Após a formação do concreto, misturou-se tudo por 1 min em velocidade baixa, 2 min em velocidade alta e mais 1 min em velocidade baixa (para eliminação de ar).

O ensaio foi realizado seguindo a ordem das Figura 82-a, b e c para os traços com pó de quartzo (Combinação 1), cinza volante (Combinação 2) e metacaulim (Combinação 3), respectivamente.

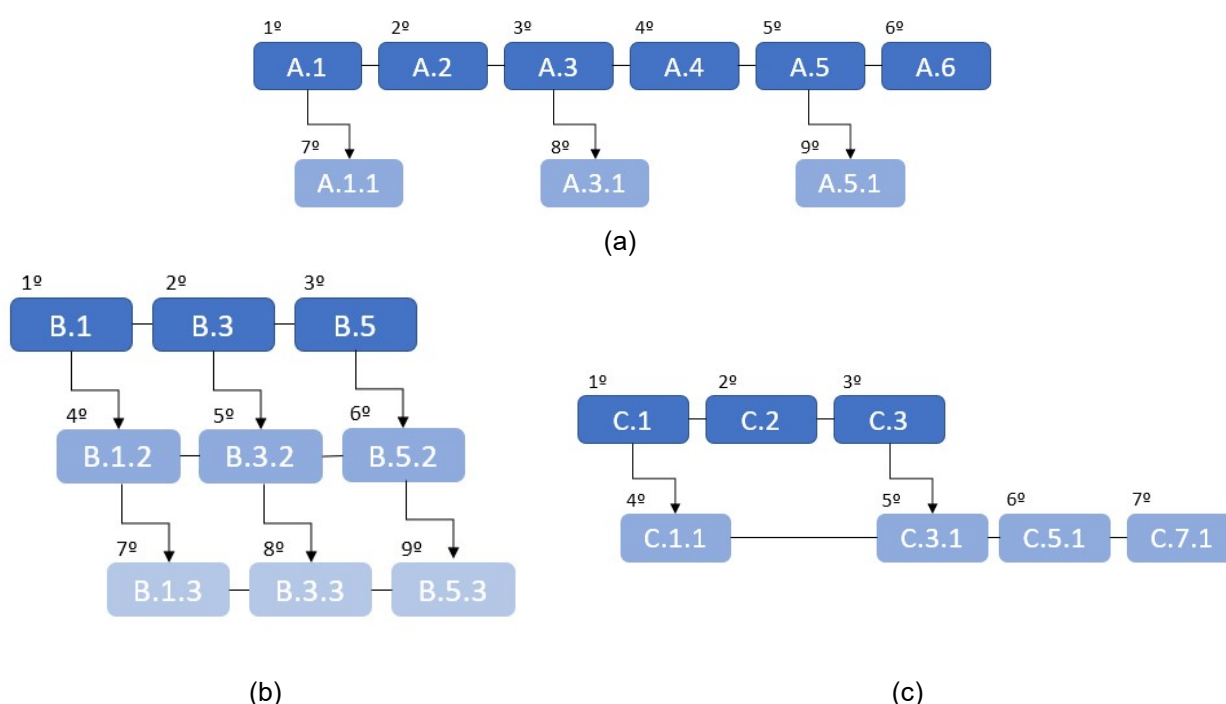


Figura 82: Traços com (a) pó de quartzo (b) cinza volante e (c) metacaulim

RESULTADOS

As Tabela 27, Tabela 29 e Tabela 30 apresentam os resultados de miniabatimento, tipo da mistura, tempo para formação do concreto e tempo total da mistura obtidos para os traços estudados para a Combinação 1, Combinação 2 e Combinação 3, respectivamente.

Tabela 28: Resultados do ensaio de auto-adensabilidade para Combinação 1

Traço	Miniabatimento (mm)	Tipo da mistura	Tempo p/ formar concreto	Tempo total mistura
A.1	-	Muito viscosa	6:40 min	13:00 min
A.1.1	202,23	Fluida p/ viscosa	5:30 min	10:30 min
A.2	272,10	Bem fluida	1:50 min	6:00 min
A.3	134,45	Viscoso	6:00 min	13:30 min
A.3.1	245,75	Fluida	4:00 min	7:40 min
A.4	286,93	Bem fluida	1:30 min	5:40 min
A.5	153,40	Viscoso	8:00 min	12:00 min
A.5.1	226,95	Fluida	4:20 min	8:30 min
A.6	279,30	Bem fluida	1:40 min	5:40 min

Tabela 29: Resultados do ensaio de auto-adensabilidade para Combinação 2

Traço	Miniabatimento (mm)	Tipo da mistura	Tempo p/ formar concreto	Tempo total mistura
B.1	331,0	Muito fluida	50 s	4:50 min
B.1.2	219,7	Fluida p/ viscosa	3:17 min	7:20 min
B.1.3	274,1	Fluida	1:42 min	5:42 min
B.3	300,8	Muito fluida	1:00 min	5:00 min
B.3.2	176,5	Viscosa	3:13 min	7:15 min
B.3.3	252,9	Fluida	1:53 min	5:55 min
B.5	321,0	Muito fluida	47 s	5:00 min
B.5.2	140,8	Muito viscosa	8:40 min	12:50 min
B.5.3	262,7	Fluida	1:49 min	5:50 min

Tabela 30: Resultados do ensaio de auto-adensabilidade para Combinação 3

Traço	Miniabatimento (mm)	Tipo da mistura	Tempo p/ formar concreto	Tempo total mistura
C.1	191,3	Viscosa	5:35 min	9:40 min
C.1.1	268,6	Fluida	4:08 min	8:08 min
C.2	352,5	Muito fluida	1:21 min	5:21 min
C.3	169,0	Viscosa	9:00 min	14:00 min
C.3.1	252,6	Fluida	5:00 min	9:00 min
C.5.1	258,0	Fluida	2:10 min	6:10 min
C.7.1	251,9	Fluida	2:35 min	6:40 min

Para verificação da resistência à compressão, escolheu-se os traços que utilizaram o menor teor de a/aglom com o miniabatimento mínimo entre 240 e 260 mm. Por isso, a primeira tentativa de obter CUAD escolheu-se os seguintes traços: A.2, A.3.1, A.5.1 e A.6 (que são PQ-1, PQ-2, PQ-3 e PQ-4, respectivamente) para Combinação 1; B.1.3, B.3.3 e B.5.3 (que são CV-1, CV-2 e CV-3, respectivamente) para a Combinação 2; e C.1.1, C.5.1 e C.7.1 (que são MT-1, MT-2 e MT-3, respectivamente) para a Combinação 3. A Figura 83 apresenta a fluidez obtida para cada um dos traços escolhidos para serem avaliados quanto à resistência à compressão.

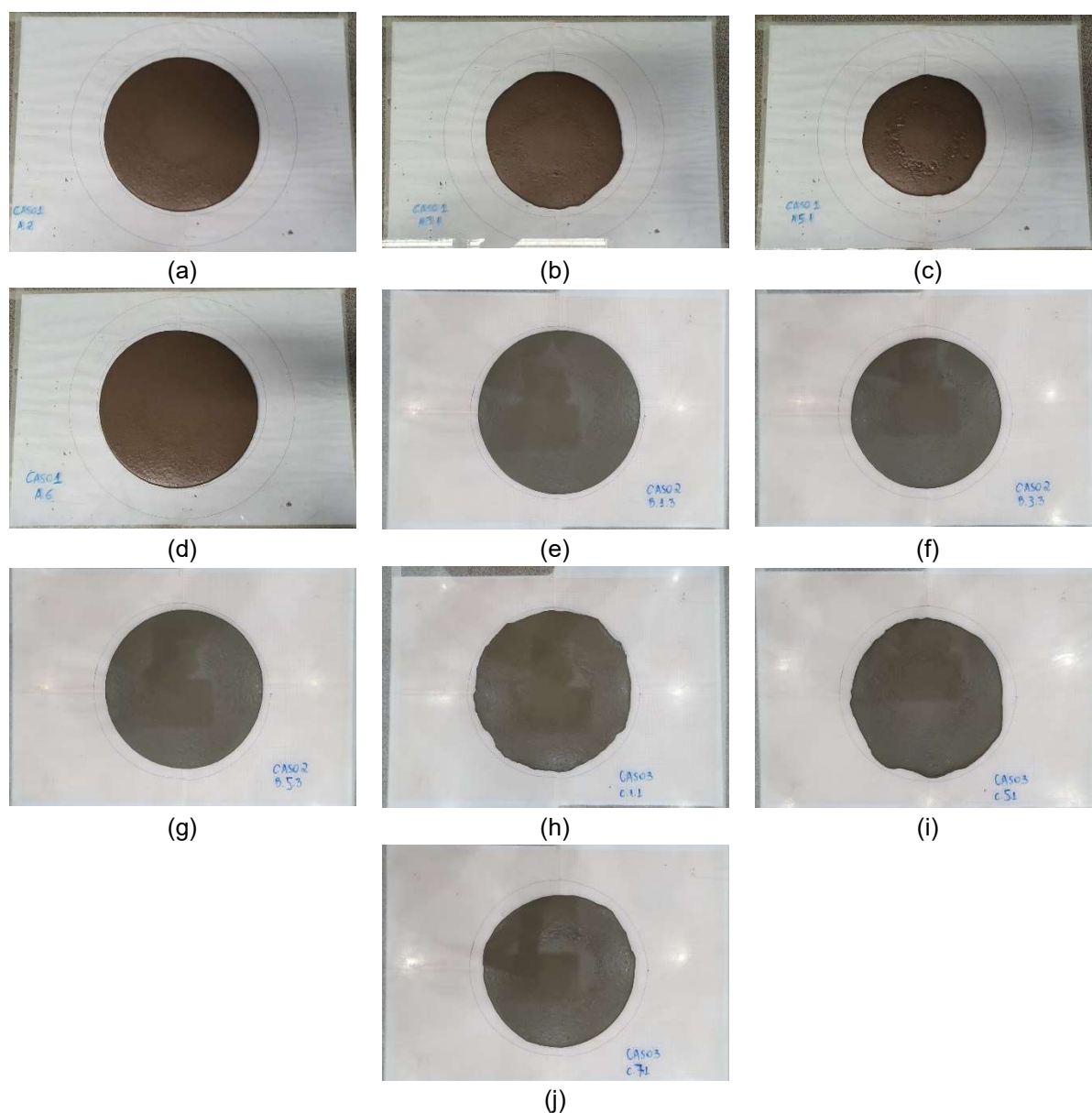


Figura 83: Fluidez obtida para os traços que foram avaliados quanto à resistência à compressão durante a primeira moldagem de CUAD: (a) A.2, (b) A.3.1, (c) A.5.1, (d) A.6, (e) B.1.3, (f) B.3.3, (g) B.5.3, (h) C.1.1, (i) C.5.1 e (j) C.7.1

ANEXO IV – ROTINA DE CÁLCULO PARA O TRAÇO DE CUADRF HÍBRIDO (HIB)

> Proporcionamento para o Caso 2 - q = 0,23 - B.1.2a-Híbrido

Areia fina + cimento + cinza volante + sílica ativa

restart

Densidades (kg/m³)

$dc := 3097 :$

$dsa := 2465 :$

$dsv := 2125 :$

$daf := 2655 :$

$dsp := 1093 :$

$da := 1000 :$

$dfba := 7800 :$

$dfbp := 1300 :$

Massa de cimento (kg/m³)

$Mc := 800$

800

Volume de cimento

$Vc := evalf\left(\frac{Mc}{dc}\right)$

0.2583144979

Volume de superplastificante (5% da massa de cimento)

$Msp := 0.05 \cdot Vc \cdot dc$

40.00000000

$Vsp := \frac{Msp}{dsp}$

0.03659652333

Volume de ar

$Var := 0.04 \cdot 1$

0.04

Volume de fibra de aço (1,5%):

$Vfba := 0.015 \cdot 1$

0.015

$Mfba := dfba \cdot Vfba$

117.000

Volume de fibra de PVA (0,5%):

$Vfbp := 0.005 \cdot 1$

0.005

$Mfbp := dfbp \cdot Vfbp$

6.500

Teor água aglomerante

$a.agl := \frac{da \cdot Vagua + dsp \cdot Vsp \cdot 0.56}{dc \cdot Vc + dsa \cdot Vsa + dsv \cdot Vsv}$

$$\frac{1000 Vagua + 22.40000000}{800.0000000 + 2465 Vsa + 2125 Vsv}$$

Volume total

$Vsecos := Vc + Vsa + Vsv + Vaf$

$0.2583144979 + Vsa + Vsv + Vaf$

$$PAF := \frac{Vaf}{Vsecos} :$$

$$PCM := \frac{Vc}{Vsecos} :$$

$$PCV := \frac{Vcv}{Vsecos} :$$

$$PSA := \frac{Vsa}{Vsecos} :$$

$$Vtot := Var + Vagua + Vsp + Vsecos + Vfba + Vfbp$$

$$0.3549110212 + Vagua + Vsa + Vcv + Vaf$$

with(ExcelTools) :

Arquivo := "D:/Caso_2.xlsx"

"D:/Caso_2.xlsx"

AF := Import(Arquivo, 1, "A2:A66")

1..65 x 1..1 Array
Data Type: anything
Storage: rectangular
Order: Fortran_order

CM := Import(Arquivo, 1, "B2:B66")

1..65 x 1..1 Array
Data Type: anything
Storage: rectangular
Order: Fortran_order

CV := Import(Arquivo, 1, "C2:C66")

1..65 x 1..1 Array
Data Type: anything
Storage: rectangular
Order: Fortran_order

SA := Import(Arquivo, 1, "D2:D66")

1..65 x 1..1 Array
Data Type: anything
Storage: rectangular
Order: Fortran_order

- Chamando a função objetivo, do modelo A&A para q = 0,23 - "Pobj1".

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q}$$

Pobj1 := Import(Arquivo, 1, "F2:F66")

$$\left[\begin{array}{l} 1..65 \times 1..1 \text{ Array} \\ \text{Data Type: anything} \\ \text{Storage: rectangular} \\ \text{Order: Fortran_order} \end{array} \right]$$

AF: areia fina

CM: cimento

CV: cinza volante

PSA: sílica ativa

$\triangleright P_{mix} := PAF \cdot AF + PCM \cdot CM + PCV \cdot CV + PSA \cdot SA :$

Minimos quadrados

$$\left(P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1}) \right)^2$$

$$Ps := (P_{mix} - P_{obj1})^2$$

$$\left[\begin{array}{l} 1..65 \times 1..1 \text{ Array} \\ \text{Data Type: anything} \\ \text{Storage: rectangular} \\ \text{Order: Fortran_order} \end{array} \right]$$

with(LinearAlgebra) :

- Fazendo o somatório de todas as linhas do vetor anterior:

$$RSS = \sum_{i=1}^n \left(P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1}) \right)^2$$

$Rss := add(i, i = Ps) :$

- Minimizando a função Rss, com a possibilidade de colocar restrições e um chute inicial.

with(Optimization) :

Min := Minimize(Rss, {PAF + PCM + PCV + PSA = 1, Vtot = 1, a.agl = 0.14}, assume
= nonnegative)

[652.617765329971462, [Vaf=0.219141735258642, Vagua=0.169276309216761, Vcv
=0.186992256109075, Vsa=0.0696786782155217]]

Pra gerar a função experimental, substituir os valores da minimização nas variáveis PAF, PCV, PSA

$$Vaf := 0.219141735259733$$

$$0.219141735259733$$

$$Maf := Vaf \cdot daf$$

$$581.8213072$$

$$Vcv := 0.186992256108265$$

$$0.186992256108265$$

$$Mcv := Vcv \cdot dcv$$

$$397.3585442$$

$$Vsa := 0.0696786782154892$$

$$0.0696786782154892$$

$$Msa := Vsa \cdot dsa$$

171.7579418

$Vagua := 0.169276309216513$

0.169276309216513

$Magua := Vagua \cdot da$

169.2763092

$Vsecos = Vc + Vaf + Vcv + Vsa$

0.7341271675 = 0.7341271675

$Vtot := Vsecos + Var + Vagua + Vsp + Vfba + Vfbp$

1.0000000000

PAF

0.2985065054

PCM

0.3518661471

PCV

0.2547137123

PSA

0.09491363527

Exportar um arquivo do excel com a função experimental

$Pmix4 := Pmix - 0.0000000001$

$\left[\begin{array}{l} 1..65 \times 1..1 \text{ Array} \\ \text{Data Type: anything} \\ \text{Storage: rectangular} \\ \text{Order: Fortran_order} \end{array} \right]$

$with(ExcelTools) :$

$\triangleright Export(Pmix4, "PmixB1.2a-hibrido.xls")$

ANEXO V – TEMPERATURA DO CONCRETO

Devido a utilização de gelo nos traços finais de CUAD (REF) e CUADRF (FBA e HIB), decidiu-se analisar a temperatura do concreto durante um período de 1 h, imediatamente, após realizar a mistura dos traços. Utilizou-se um Termômetro Digital com Sensor Termopar Tipo K, da marca UsinaInfo para verificar a temperatura do concreto e um Mini Termohigrômetro Digital com Sensor de Temperatura e Umidade para verificar a umidade e temperatura ambiente. Para realizar o ensaio, moldou-se um corpo de prova cúbico de 40 x 40 x 40 mm para cada traço. Todos os traços foram moldados no mesmo local, porém, em dias diferentes, apesar disso, a temperatura ambiente foi da ordem de 26.5°C e a umidade da ordem de 65%. É importante ressaltar que o ensaio foi realizado em uma época mais quente e com dias chuvosos. A temperatura da mistura de 1/3 de água e 2/3 de gelo foi de 2 °C, e a temperatura do concreto após adição de água e gelo foi de 26.8 °C. A Figura 84 apresenta a variação da temperatura dos traços de CUAD/CUADRF durante 1 h.

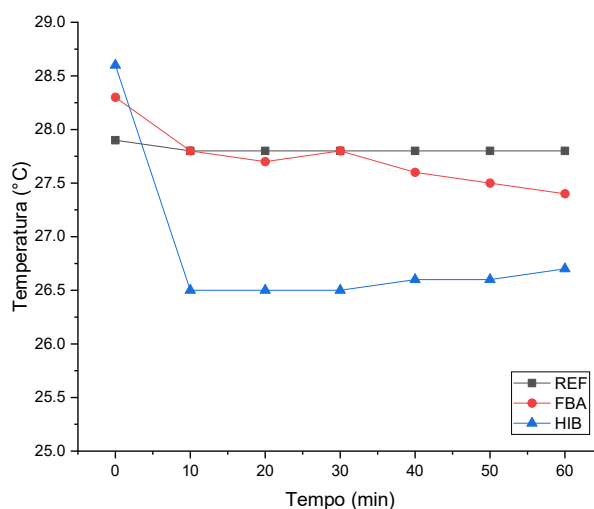


Figura 84: Análise da variação da temperatura do concreto ao longo de um período de 1 hora

Verifica-se que para o traço REF, a temperatura se manteve constante durante o período monitorado, indicando que a substituição de parte da água por gelo conseguiu auxiliar na redução da temperatura do concreto. Para o traço FBA, a temperatura reduziu ao longo do período monitorado, indicando que o gelo e as fibras de aço auxiliaram nessa redução, pois os metais apresentam mais condutividade e por isso possuem menor temperatura. Observa-se que para o traço HIB, ocorreu um leve aumento da temperatura com o passar do tempo, indicando, possivelmente, a realização do processo de hidratação do cimento. Além

disso, a temperatura desse concreto foi inferior aos traços REF e FBA, indicando que tanto o uso de gelo quanto o uso dos dois tipos de fibras auxiliaram na redução da temperatura do concreto.

ANEXO VI – FLUXOGRAMA PARA PRODUZIR UM TRAÇO DE CUAD/CUADRF

Com intuito de auxiliar o entendimento de como deve ser o procedimento para produzir-se um traço de CUAD/CUADRF, a Figura 85 apresenta um fluxograma com as etapas fundamentais.

A pré-seleção dos materiais deve ser feita para escolher inicialmente os principais materiais que serão utilizados na composição do concreto. É fundamental que seja escolhido um cimento de alta resistência inicial e que seja utilizada a sílica ativa. Outro detalhe importante, é escolher materiais com granulometrias finas. Escolhidos os materiais, estes deverão ser ensaiados quanto à sua distribuição granulométrica e morfologia. A partir desses ensaios, os materiais deverão ser definidos para que seja possível fazer uma composição de concreto com a menor ausência em determinados diâmetros de partículas, para garantir que seja obtido um bom empacotamento.

Escolhidos os materiais e com os resultados da distribuição granulométrica, será possível realizar a otimização da mistura. Isto é, realizar a dosagem do traço utilizando modelos de empacotamento de partículas. A dosagem do CUAD/CUADRF é feita desse modo para obter uma microestrutura densa devido a minimização da porosidade. Durante a etapa de otimização, inúmeras composições podem ser obtidas, por isso, é importante definir algumas restrições, como por exemplo, consumo de cimento por metro cúbico ou proporção dos materiais em relação a massa de cimento.

Após a obtenção do traço através da dosagem por empacotamento, deve-ser realizado a mistura e moldagem do concreto. O procedimento de mistura também deve ser feito com critérios, recomenda-se misturar os materiais secos (cimento, sílica, outros aglomerantes) primeiro para que possam se desaglomerar antes da adição de líquidos.

Posteriormente, realiza-se os principais ensaios de caracterização do concreto: fluidez e resistência à compressão. Se forem alcançados os objetivos, podem ser realizados outros ensaios como porosidade, tempo de pega, e resistência à tração. Recomenda-se que a resistência à compressão mínima aos 28 dias seja superior a 120 MPa. Caso, a fluidez e a resistência à compressão não sejam satisfatórias, deve retornar ao passo da pré-seleção dos materiais, e refazer a otimização com novos dados (por exemplo, novas restrições, reduzir teor de água).

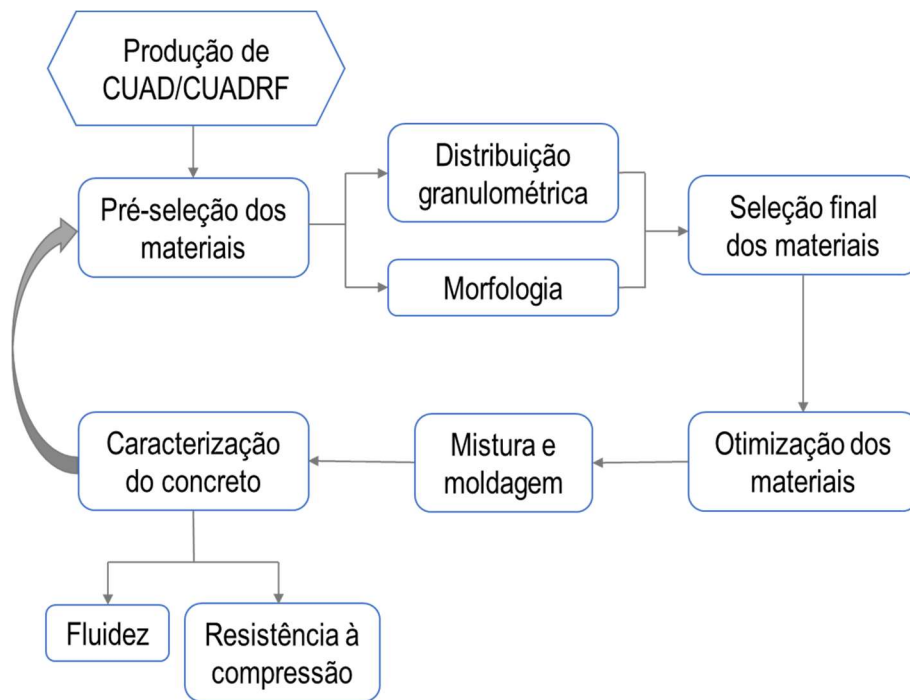


Figura 85: Fluxograma para produzir um traço de CUAD/CUADRF