

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL DOUTORADO**

ROBERTO CHRIST

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ULTRA
ALTO DESEMPENHO (UHPC)**

São Leopoldo

2019

ROBERTO CHRIST

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ULTRA
ALTO DESEMPENHO (UHPC)**

Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Helene

São Leopoldo

2019

C554p Christ, Roberto.
Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC) / por Roberto Christ. -- São Leopoldo, 2019.

152 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, Escola Politécnica ; Coorientação: Prof. Dr. Paulo Helene, USP .

1.Concreto. 2.Concreto – Mistura. 3.Agregados (Materiais de construção). 4.Construção de concreto armado. 5.Concreto de alta resistência. 6.Concreto – Durabilidade. I.Tutikian, Bernardo Fonseca. II.Helene, Paulo. III.Título.

CDU 666.972
666.972.12
691.32.059

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

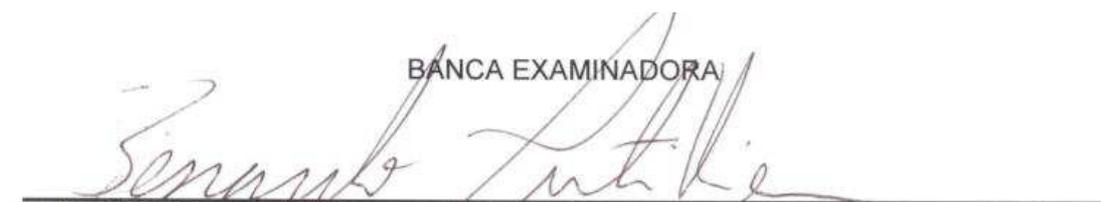
Roberto Christ

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ULTRA
ALTO DESEMPENHO (UHPC)**

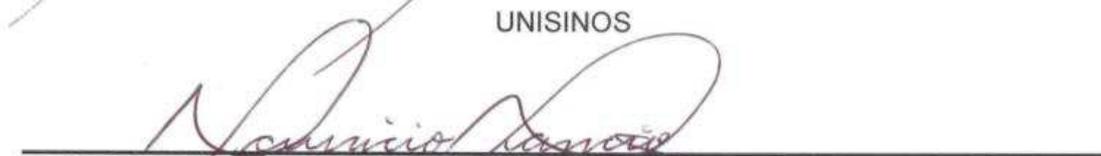
Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

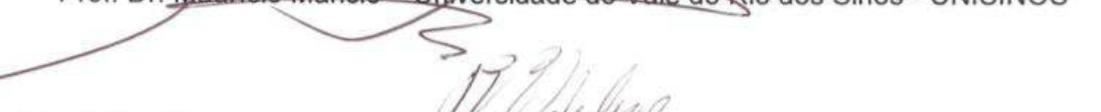
Aprovado em 16 de outubro de 2019

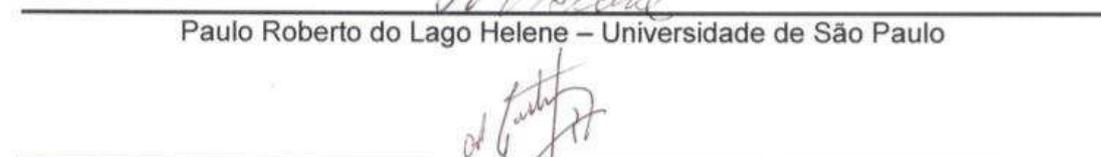
BANCA EXAMINADORA

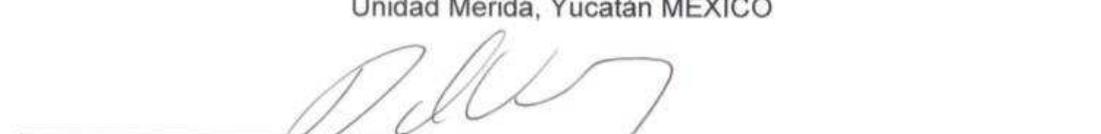

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian – Universidade do Vale do Rio dos Sinos -

UNISINOS


Prof. Dr. Mauricio Mancio – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS


Paulo Roberto do Lago Helene – Universidade de São Paulo


Pedro Castro Borges – Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Unidad Merida, Yucatán MÉXICO


Daniel Veras Ribeiro – Universidade Federal da Bahia

Dedico este trabalho à toda a minha família em especial a
minha esposa Viviane Bender Christ e aos meus filhos
Bruno Bender Christ e Lucas Bender Christ.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível devido a ajuda de pessoas que tenho muito apreço e gratidão. E desta forma gostaria de agradecer a todos pela ajuda dada, seja com pequenas ou grandes contribuições.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, pessoa que tenho muita admiração e respeito, aprendi e aprendo cada dia com seus comentários e conselhos (muitas brincadeiras). Da mesma forma gostaria de agradecer a oportunidade que tive de ter a orientação do Professor Dr. Paulo Helene, que em todas as conversas referente ao trabalho contribuiu com pontos de grande importância que objetivou a conclusão do trabalho.

Trabalhar com pessoas que querem o bem do próximo sempre será o melhor aprendizado que uma pessoa possa ter e devido a isso quero agradecer também a minha colega Fernanda Pacheco que nunca mediu esforços para me auxiliar no desenvolvimento da pesquisa.

Quero também agradecer aos laboratoristas e amigos do instituto itt Performance são eles: Gian Moreira, Lucas Lerner, Lucas Fuhr e Simone Braatz pela ajuda fornecida nas etapas de concretagem e dos ensaios desenvolvidos no trabalho.

Cabe ainda um agradecimento especial à minha família, minha esposa, meus filhos, meu pai e minha mãe que lá de cima está sempre me cuidando, meus irmãos, cunhados e cunhadas, que muito me auxiliaram dando apoio nas horas difíceis, sempre preocupados com o sucesso do meu trabalho.

Ao instituto tecnológico em desempenho das construções itt Performance pelo apoio físico dado durante toda pesquisa. Graças a estrutura existente e de toda a flexibilidade na utilização dos equipamentos foi possível a conclusão do trabalho. Agradeço também as empresas Kruzivar e Lager esquadrias pela ajuda proporcionada na execução das formas e de equipamentos auxiliares na execução dos trabalhos.

Agradeço também as empresas Basse PVC pelo fornecimento do carbonato de cálcio, a Votorantim cimentos pela doação do cimento utilizado na pesquisa, a MC – Bauchemie pela doação dos aditivos utilizados e pela empresa New House pela doação da areia utilizada.

Gostaria de agradecer também a UNISINOS pela bolsa fornecida, e por todo o aprendizado construído ao longo desta jornada que espero ser longa. Tenho um grande apreço por esta instituição pois foi ela que me formou em todas as instâncias que uma pessoa pode ter com relação a formação profissional.

A todos o meu muito obrigado!

“Viver é enfrentar um problema atrás do outro. O modo como você o encara é que
faz a diferença.”

Benjamin Franklin

RESUMO

O Concreto de Ultra Alto Desempenho, ou *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) é um material promissor e, devido às suas excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade, se torna uma solução atraente. Diversas pesquisas mostrando o potencial mecânico, de durabilidade e as mais variadas aplicações em diferentes estruturas comprovam a utilização do UHPC. Porém, há uma lacuna quanto à determinação de traços utilizando um método de dosagem simples, de fácil acesso e que possibilite a determinação de uma proporção ideal de todos os constituintes da mistura. Os trabalhos desenvolvidos, com relação a misturas de UHPC, não apresentam uma forma de se elaborar um traço com diferentes materiais com a quantidade ideal de fibras a ser empregada, sem que a mistura perca a trabalhabilidade com elevadas resistências mecânicas. O objetivo da pesquisa foi desenvolver um método de dosagem capaz de, através de parâmetros informativos dos materiais, obter a melhor resistência à compressão e à tração do composto, buscando encontrar as proporções dos materiais da mistura, bem como a quantidade de fibras a ser inserida sem que se perca a trabalhabilidade. Para tal, trabalhou-se com materiais de diferentes distribuições granulométricas, avaliando o maior empacotamento das partículas. Foram avaliadas quatro composições com diferentes materiais, sendo: cimento, sílica ativa, cinza volante, dois tipos de agregado miúdo, pó de quartzo e carbonato de cálcio. O método proposto para verificação da compacidade da matriz foi baseado no método de empacotamento de Andreasen e Andersen. Os resultados encontrados nesta pesquisa evidenciaram que o método de dosagem proposto proporcionou maior potencial de resistência mecânica da mistura. Percebeu-se uma relação linear entre uma maior compacidade da matriz e a resistência à compressão obtida na mistura. Na composição com maior compacidade, a resistência à compressão apresentou aumento de 20% quando comparada com a mistura de menor compacidade.

Palavras-chave: Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC). Método de dosagem. Tenacidade. Empacotamento de partículas. Fibras.

ABSTRACT

Ultra High Performance Concrete (UHPC) is a promising material and, due to its excellent mechanical properties and durability, it becomes an attractive solution. Several studies showing the mechanical potential, durability and various applications in different structures vouch the use of UHPC. However, there is a gap in trace determination using a simple, easily accessible dosing method that enables the determination of an optimal ratio of all constituents of the mixture. The work developed with respect to UHPC mixtures, does not present a way to draw a trace with different materials with the ideal amount of fibers to be used, without losing the workability with high mechanical strengths. The objective of the research was to develop a dosing method that can, through informative parameters of the materials, obtain the best compressive and tensile strength of the compound, aiming to find the proportions of the materials in the mixture, as well as the amount of fibers to be inserted without losing workability. For such, it was worked with materials of different particle size distributions, evaluating the largest packing of the particles. Four compositions with different materials were evaluated: cement, active silica, fly ash, two types of fine aggregate, quartz powder and calcium carbonate. The proposed method for matrix compactness verification was based on the Andreasen and Andersen packing method. The results found in this research showed that the proposed dosing method provided greater potential for the mechanical strength of the mixture. A linear relationship between a higher matrix compactness and the compressive strength obtained in the mixture was noticed. In the composition with higher compactness, the compressive strength increased by 20% when compared to the mixture with lower compactness.

Key-words: Ultra High Performance Concrete. Method of dosing. Toughness. Particle packing. Fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento da resistência máxima à compressão do concreto em 100 anos.....	24
Figura 2 - Comparação entre as proporções dos constituintes de um UHPC e um CC	26
Figura 3 – Combinações das propriedades dos diferentes concretos.....	27
Figura 4 - Ponte no aeroporto de Tóquio, com 46 metros de comprimento e 16 metros de largura	29
Figura 5 - Peças pré-fabricadas, montagem e detalhamento da concepção da ponte.	29
Figura 6 - Ponte confeccionada com UHPC na Áustria.....	30
Figura 7 - Secção transversal das vigas que formam os arcos	31
Figura 8 - Ilustração da sequência de montagem dos elementos que forma o arco .	31
Figura 9 - Painéis decorativos de fachadas confeccionadas com UHPC na França.	32
Figura 10 - Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo	35
Figura 11 – Correlação entre a viscosidade e o tempo final de abertura de uma pasta de cimento.....	36
Figura 12 - Comparação da resistência em função da densidade do material.....	40
Figura 13 - Comportamento mecânico de UHPC com diferentes tipos e percentagens de fibras: (a) 0,5%; (b) 1,0%; (c) 1,5%; (d) 2,0%	42
Figura 14 - Alteração da rugosidade superficial das fibras sintéticas gerando maior aderência com a matriz cimentícia	44
Figura 15 - Resistência x deformação de UHPC com fibras híbridas.....	45
Figura 16 - Resistência à tração direta de UHPC com diferentes formas de lançamentos	46
Figura 17 - Resistência à tração na flexão de elementos com diferentes orientação das fibras	47
Figura 18 – Comportamento de misturas com diferentes percentuais de fibras	48
Figura 19 – Quantidades e diâmetros de poros em concretos de classe de resistência C30 e C80 e em UHPC de 200 MPa com e sem aplicação de cura térmica.....	50
Figura 20 - Distribuições dos tamanho de poros e volumes de poros de UHPC com e sem aplicação de cura térmica no material	51

Figura 21 - Viga confeccionada com UHPC, sendo ensaiada em tamanho real	52
Figura 22 - Faixas de taxa de deformação típicas para estruturas de concreto	53
Figura 23 – Relação entre tamanho dos grãos e índice de vazios de uma mistura ..	58
Figura 24 - Diagrama de empacotamento ternária de três areias distintas	59
Figura 25 – Ilustração do gráfico ternário para determinação do traço do concreto..	60
Figura 26 – Empacotamento granular de uma mistura	62
Figura 27 – Misturas com diferentes compacidades em função do empacotamento granular da mistura.....	63
Figura 28 – Comparativo das relações água/cimento em diferentes tipos de concretos. (CC-Concreto Convencional; CAR-Concreto de Alta Resistência; UHPC -Concreto de Ultra Alto Desempenho)	67
Figura 29 – Viscosidade aparente em função da concentração de C ₃ A do cimento .	68
Figura 30 - Consumo de cimento frequente em diferentes misturas	70
Figura 31 - Consistência de uma pasta de cimento misturada com fibras com várias proporções. (a) $\emptyset_{fm} = 0,18$; (b) $\emptyset_{fm} = 0,83$; (c) $\emptyset_{fm} = 1,02$	73
Figura 32 - Fator de volume de fibra relacionado com o diâmetro máximo agregado	74
Figura 33 – Fibras metálicas utilizadas na pesquisa (d_f – diâmetro; L_f – comprimento)	75
Figura 34 – Comportamento das misturas com diferentes concentrações de microfibras na matriz de UHPC	76
Figura 35 - Comportamento das fissuras formadas nas diferentes misturas	77
Figura 36 - Variação de ar incorporado em UHPC com diferentes teores de fibra de aço.....	77
Figura 37 - Fluxograma do programa experimental	79
Figura 38 - Faixas granulométrica de alguns materiais	80
Figura 39 – Equipamento para verificação da granulometria a laser da Universidade do Vale do Rio do Sinos	81
Figura 40 – Curva teórica do empacotamento utilizando a equação de Funk e Dinger.....	82
Figura 41 - Curvas do empacotamento ótimo e da mistura.....	84
Figura 42 – Área entre o empacotamento perfeito e o empacotamento da mistura..	84
Figura 43 - Exemplo de diagrama de dosagem proposto.....	87
Figura 44 – Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 87	91

Figura 45 - Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 98	92
Figura 46 - Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 118	92
Figura 47 - Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 133	93
Figura 48 - Composição dos materiais em cada mistura	94
Figura 49- Distribuição granulométrica do cimento	97
Figura 50 - Distribuição granulométrica da sílica ativa	98
Figura 51 - Distribuição granulométrica da cinza volante	99
Figura 52 - Distribuição granulométrica do carbonato de cálcio.....	100
Figura 53 - Distribuição granulométrica do pó de quartzo	101
Figura 54 - Distribuição granulométrica das areias	102
Figura 55 - Fibra de aço utilizada na pesquisa.....	103
Figura 56 - Misturador planetário utilizado para a realização das misturas.....	104
Figura 57 - Sequência do ensaio de espalhamento realizado em todas as misturas	105
Figura 58 - Ensaio de tenacidade e resistência à flexão: (a) esquema do dispositivo e (b) ensaio sendo realizado	107
Figura 59 - Formas do espalhamento das misturas, a) IDE 87; b) IDE 98; c) IDE 118; d) IDE 133	110
Figura 60 - Resistências potenciais de cada mistura em diferentes idades para os corpos de prova cilíndricos	113
Figura 61 - Espalhamento das misturas, a) Ref.; b) 1% fibras; c) 2% fibras; d) 3% fibras.....	119
Figura 62 - Variação do espalhamento do UHPC com relação ao teor de fibras	120
Figura 63 - Evolução da resistência em função do tempo das diferentes misturas.	123
Figura 64 - Relação entre a resistência à compressão e resistência à tração das idades de cura para 1% de fibra.....	128
Figura 65 – Diagrama carga x deformação das amostras com 1%, 2% e 2,9%.....	130
Figura 66 - Diagrama carga x deformação de cada idade de cura e teor de fibras.	132
Figura 67 - Diagrama do comportamento mecânico do traço para as diferentes idades.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais pesquisas desenvolvidas sobre a dosagem do UHPC	20
Tabela 2 – Resistência à compressão em diferentes regimes de cura	39
Tabela 3 - Descrição dos tipos de fibras apresentadas na Figura 23.....	43
Tabela 4 - Fatores de segurança parciais γ_m para determinar a resistência final no estado limite último do UHPC.....	54
Tabela 5 - Composição química e física de seis tipos de cimentos belgas	69
Tabela 6 - Porcentagens passante de cada diâmetro dos materiais.....	89
Tabela 7 - Traço unitário das misturas desenvolvidas pelo método proposto	95
Tabela 8 - Propriedades químicas e físicas do cimento utilizado na pesquisa.....	96
Tabela 9 - Características químicas da sílica ativa	97
Tabela 10 - Características físicas da sílica ativa.....	98
Tabela 11 - Composição química da cinza volante	99
Tabela 12 - Composição química do carbonato de cálcio	100
Tabela 13 - Características físicas do pó de quartzo.	101
Tabela 14 - Composição granulométrica das areias	102
Tabela 15 - Procedimentos realizados para a execução de todas as misturas.....	104
Tabela 16 - Resultados do espalhamento das misturas avaliadas.....	109
Tabela 17 – Resultado da resistência à compressão das misturas desenvolvidas.	112
Tabela 18 - Análise de variância da resistência à compressão para cada idade de cura	115
Tabela 19 - Resumo da análise estatística da influência da idade na resistência à compressão das misturas.....	116
Tabela 20 - Resultados do espalhamento das misturas com diferentes teores de fibras.....	118
Tabela 21 - Análise de variância dos teores de fibras com relação a trabalhabilidade	121
Tabela 22 – Resistências à compressão das misturas com diferentes teores de fibras	122
Tabela 23 -Análise de variância da resistência à compressão em relação ao teor de fibras para a idade de 7 dias	124
Tabela 24 - Análise de variância da resistência à compressão em relação ao teor de fibras para a idade de 28 dias	124

Tabela 25 - Análise de variância da resistência à compressão em relação ao teor de fibras para a idade de 91 dias	125
Tabela 26 – Resultados à tração na flexão máxima, na primeira fissura, tenacidade e resistência a flexão equivalente das amostras	126
Tabela 27 – Porcentagens da evolução da resistência à tração do UHPC com os diferentes teores de fibras e a idade de cura comparando com a resistência aos 28 dias	127

LISTA DE SIGLAS

a/aglo	Relação água / aglomerante
a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto americano do concreto
AFGS	Associação Francesa de Engenharia Civil
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CAA	Concreto Auto Adensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
C	Consumo de Cimento
CC	Concreto Convencional
CH	Hidróxido de Cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRF	Concreto Reforçado com Fibra
CRP	Concreto de pós Reativo
CSH	Silicato de cálcio hidratados
CUAD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ S	Silicato Tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato Tricálcico
d _f	Diâmetro da Fibra
f ₁	Resistência na Primeira Fissura
f _p	Resistência Máxima
fib	Federação Internacional do Concreto
L _f	Largura da Fibra
NBR	Norma Brasileira de Regulação
R ^D _{R,150}	Resistência a Flexão Equivalente
PAD	Porcentagem Acumulada do Diâmetro
ø _{fm}	Fração volumétrica da Fibra
Ø _{fmax}	Teor máximo de Fibras

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivo específico	21
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 DEFINIÇÕES DO UHPC	25
2.2 APLICAÇÕES DO UHPC	28
2.3 REOLOGIA.....	33
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	37
2.4.1 Resistência à compressão	37
2.4.2 Resistência à tração	40
2.4.3 Tenacidade	47
2.5 DURABILIDADE	49
2.6 ELEMENTOS ESTRUTURAIS	51
2.7 MÉTODOS DE DOSAGEM	55
2.7.1 Aspectos importantes para dosagem do UHPC	57
2.7.2 Desenvolvimento dos traços em diferentes estudos	59
2.8 PROPRIEDADES IMPORTANTES DO ESTUDO DE DOSAGEM.....	61
2.8.1 Empacotamento granular	61
2.8.2 Relação água/cimento	66
2.8.3 Teor de aglomerante	69
2.8.4 Métodos de dosagem de fibras	72
3 MÉTODO E MATERIAIS	79
3.1 ETAPAS DO MÉTODO PROPOSTO	80
3.1.1 Etapa 1 – Escolha dos Materiais	80
3.1.2 Etapa 2 – Determinação do Índice de Desvio do Empacotamento (IDE) ...	82
3.1.3 Etapa 3 – Determinação do Teor Máximo de Fibras	85
3.1.4 Etapa 4 – Diagrama de Desempenho Mecânico	86
3.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO	88
3.3 MATERIAIS CONSTITUINTES	95

3.3.1 Cimento	96
3.3.2 Sílica Ativa	97
3.3.3 Cinza Volante	98
3.3.4 Carbonato de Cálcio	99
3.3.5 Pó de Quartzo	101
3.3.6 Areias	101
3.3.7 Fibras	103
3.4 PROCEDIMENTO DE MISTURA E ENSAIOS	103
3.5 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	105
3.6 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	106
3.6.1 Resistência à compressão axial	106
3.6.2 Resistência à flexão e fator de tenacidade	106
3.6.3 Análise e tratamento dos dados	107
4 RESULTADOS	109
4.1 AVALIAÇÃO DAS PROPORÇÕES ENCONTRADAS COM O MÉTODO PROPOSTO	109
4.1.1 Resultados no estado fresco das misturas sem fibras	109
4.1.2 Resistência à compressão das misturas sem fibras	111
4.2 RESULTADOS DA MISTURA COM FIBRAS	117
4.2.1 Resultados no estado fresco das misturas com fibras	117
4.2.2 Resistência à compressão das misturas com fibras	121
4.2.3 Resistência à tração na flexão e tenacidade das misturas com fibras	125
4.2.4 Diagrama do comportamento mecânico da mistura	133
5 CONCLUSÃO	135
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	136
REFERÊNCIAS	138
APÊNDICE A – SEQUÊNCIA PARA A DETERMINAÇÃO DO IDE DAS MISTURAS	150

1 INTRODUÇÃO

A partir dos anos 80, diante do desenvolvimento e maior aplicabilidade de adições pozolânicas e aditivos químicos, avançou-se na ciência do concreto e novos materiais surgiram. Esse avanço tecnológico ocorreu, principalmente, pela necessidade de se ter um material que pudesse atender a condições específicas de resistência mecânica, deformação e durabilidade (TORREGROSA, 2013).

O desenvolvimento de novos concretos, que possam suprir uma demanda que os concretos existentes não atendem é o principal motivo que justifica. Esta demanda pode ser a união dos benefícios de dois ou mais concretos já conhecidos, como alta fluidez e elevada resistência à tração por exemplo.

O concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um destes novos concretos, que já foi utilizados em inúmeras situações, em vários países, devido às suas excelentes propriedades reológicas e mecânicas. (RESPLENDINO, 2004). O UHPC é um tipo especial de concreto com elevadas propriedades mecânicas, como resistência à compressão, que supera os 150 MPa (ARORA et al., 2018), e resistência à tração direta, superando 8 MPa (GUO et al., 2018).

Os constituintes que compõem o UHPC são diferentes dos concretos comumente utilizados na construção civil. O UHPC é formado basicamente por pós, materiais com granulometria muito fina sem a presença de agregados graúdos (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

A não existência do agregado graúdo na mistura do UHPC proporciona uma maior compacidade, de maneira que os vazios deixados pelo arranjo granular formado por misturas com agregados de maior dimensão é diminuído. O arranjo granular de uma mistura depende das proporções de cada constituinte. Esta proporção, por sua vez, depende da granulometria de cada elemento e do empacotamento das partículas (LERCH et al., 2018).

Além da diminuição de vazios, existe a zona mais fraca do concreto, que é a interface entre o agregado e a argamassa. Porém, no UHPC a zona de transição não existe ou pode ser desprezada.

Com a diminuição considerável de porosidade da matriz e a elevada compacidade da mistura, o UHPC apresenta elevada durabilidade, pois os agentes agressivos não conseguem penetrar com facilidade nos poros existentes da mistura (FEHLING et al., 2004).

O desempenho do UHPC não está ligado apenas ao perfeito empacotamento das partículas, mas também à incorporação de fibras na mistura (ANDREW et al., 2017). O UHPC é um concreto que além da elevada durabilidade apresenta excelentes propriedades mecânicas como resistência à compressão e à tração, sendo que a resistência à tração do UHPC supera os 10% da resistência à compressão trivialmente evidenciada nos concretos convencionais (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014).

A elevada resistência à tração do UHPC e o aumento da tenacidade é devido principalmente pela incorporação de fibras na matriz, que é de suma importância e imprescindível para que o desempenho do material seja alcançado. As fibras empregadas no UHPC são de elevado módulo de elasticidade e de elevada resistência mecânica, possuindo dimensões reduzidas pelo fato da matriz não possuir agregados graúdos.

As fibras usualmente utilizadas em misturas de UHPC são microfibras metálicas, de qualquer tipo. Porém, estudos como de Kang et al. (2016), Khan, Abbas e Fares (2017); Soliman e Tagnit-Hamou (2017) e Wille e Naaman (2012) mostram que o desempenho mecânico é alterado com a utilização de diferentes formatos da fibra, materiais e dimensões.

As propriedades reológicas e mecânicas do UHPC tornam o produto promissor e com grande potencial de uso nas mais variadas situações e engenharia, pois sua elevada resistência mecânica permite o uso em situações adversas e com dimensões reduzidas. Além da elevada durabilidade que permite que o UHPC seja empregado nas mais variadas situações de agressividade, sem que se tenha perda de desempenho.

Porém, estudos que permitam o desenvolvimento de um traço, ou seja a determinação dos quantitativos de cada material a ser utilizado para a obtenção de uma mistura de UHPC são necessários. O desenvolvimento de um método para a obtenção da melhor proporção entre os constituintes é necessário para que se tenha um UHPC com as propriedades reológicas e mecânicas adequadas para cada situação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Estudos desenvolvidos com o UHPC em diferentes países avaliaram os benefícios do material e as propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e tenacidade. Porém poucos estudos focaram na dosagem racional do composto, sem que seja possível a reprodução do traço com diferentes materiais.

Até o momento, os estudos realizados não propuseram um método de dosagem experimental ou científico, apenas avaliaram as misturas com variações do proporcionamento de aglomerantes e fibras.

A busca pelo aperfeiçoamento e melhor entendimento sobre o UHPC é uma preocupação recorrente no meio técnico (WALRAVEN, 2009). Cada vez mais estão ocorrendo congressos e simpósios técnicos científicos, como o *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, na cidade de Kassel, na Alemanha, desde 2004, e a *International Conference UHPFRC* na França, em 2017. Nestes eventos, a finalidade foi de disseminar as diferentes pesquisas e buscar um consenso quanto às definições do compósito.

Várias pesquisas (AITCIN, 1998; BEN GRAYBEAL, 2011; CWIRZEN; PENTTALA; VORNANEN, 2005; FEHLING et al., 2015; SCHMIDT; FEHLING, 2015; TOUTLEMONDE; RESPLENDINO, 2013) relacionam a proporção dos constituintes do UHPC diretamente ao empacotamento das partículas, utilizando equações de empacotamento de partículas.

Por isso, há necessidade de se aprofundar o estudo do proporcionamento do UHPC, buscando um material com propriedades específicas e que atendam a condições de utilização, como uma elevada trabalhabilidade e um alto teor de fibras, uma determinada resistência à compressão e tração, ou até mesmo uma tenacidade que possa proporcionar ao material uma capacidade de suportar uma deformação específica.

Com o intuito de evidenciar alguns dos trabalhos já realizados, a Tabela 1 mostra as principais pesquisas relacionadas à dosagem do UHPC, onde é possível verificar o objetivo do desenvolvimento de cada trabalho específico e evidenciar que não há um estudo que apresenta uma metodologia para a dosagem do UHPC.

Tabela 1 - Principais pesquisas desenvolvidas sobre a dosagem do UHPC

Referência	Objetivo da pesquisa	País
(PARK et al., 2008)	Determinação dos constituintes através de programa experimental, de forma empírica.	Alemanha
(FENNIS; WALRAVEN, 2012)	Determinação da proporção dos materiais através da densidade da mistura.	Alemanha
(TORREGROSA, 2013)	Determinação do empacotamento de partículas pelo método ternário.	Espanha
(CHRIST, 2014)	Desenvolvimento de um UHPC com fibras híbridas.	Brasil
(YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014)	Utilização do método de empacotamento de partículas de A&A _{modificado} para a determinação das proporções entre os materiais de uma única mistura, não podendo ser replicado caso tenha-se materiais distintos.	Holanda China
(SHI et al., 2015)		
(WANG et al., 2017b)		
(ALSALMAN; DANG; MICAH HALE, 2017)	Estudo de UHPC com materiais locais, sem a utilização de um método específico. Autores relatam que foi empregado um estudo de empacotamento, sem apresentar a forma.	Vietnã
(PYO; KIM, 2017)	Utilização de várias pozolanas em substituição do cimento, sem apresentação do método de dosagem apresentado.	Coréia do Sul
(SPIESZ; HUNGER, 2017)	Desenvolvimento de um traço para a realização e avaliação de estruturas em tamanho real, com o desenvolvimento de dois traços distintos sem uma metodologia definida.	Holanda
(ARORA et al., 2018)	Estudo de dosagem de aglomerantes para desenvolvimento de misturas de UHPC através de algoritmos de empacotamento.	Estados Unidos

Como pode ser evidenciado, muitas pesquisas foram e estão sendo realizadas com o UHPC em diferentes partes do mundo. Porém, percebe-se uma lacuna na apresentação de um método de dosagem que possa ser utilizado com materiais locais, aplicável em diferentes regiões, de modo generalista. Diante desta lacuna, justifica-se o desenvolvimento do estudo desta tese de doutorado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo propor um método para determinar a proporção ideal dos constituintes de um concreto de ultra alto desempenho (UHPC).

1.2.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) analisar as diferentes misturas desenvolvidas através do método proposto e relacionar a compacidade de cada mistura com as resistências à compressão;
- b) analisar a influência dos teores de fibras na resistência à compressão e na tração;
- c) comparar as resistências à compressão e tração na flexão nas idades de cura de 7, 14, 28, 56 e 91 dias;
- d) comparar a tenacidade das misturas com diferentes teores de fibras nas idades de cura de 7, 28 e 91 dias;
- e) elaborar o diagrama do desempenho mecânico da mistura, relacionando resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à tração equivalente e o teor de fibras.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi realizado em ambiente laboratorial. O programa experimental foi desenvolvido com a utilização de materiais encontrados na região Sul do Brasil, à exceção das fibras metálicas, que foram importadas da China. As misturas utilizaram cimento Portland do tipo CPV-ARI, dois tipos de agregados miúdos finos de diferente distribuição granulométrica utilizadas no processo de fundição, cinza volante, sílica ativa, carbonato de cálcio utilizado na produção de PVC, aditivo superplastificante e modificador de viscosidade.

As misturas foram desenvolvidas utilizando um misturador de eixo vertical com controle de velocidade. O processo de mistura de todos os traços seguiu o

mesmo procedimento. Todos os corpos de prova seguiram o mesmo procedimento de execução e de cura, não tendo variações nas temperaturas de cura e armazenamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo e aprofundamento dos conhecimentos sobre o concreto, possibilitou o desenvolvimento de diferentes tipos de misturas. A resistência mecânica foi uma das propriedades alteradas e que gerou grande interesse da indústria da construção civil na utilização deste novo material.

Larrard (1999) descreve que, os concretos não são mais apenas confeccionados com cimento Portland, areia, brita e água, isso já em 1999. A utilização de aditivos e adições se tornou comum e de grande valia para que se obtenha misturas com melhor desempenho e durabilidade. Os concretos utilizados na construção civil devem atender não apenas aos requisitos de resistência mecânica, mas também propriedades reológicas e de deformabilidade.

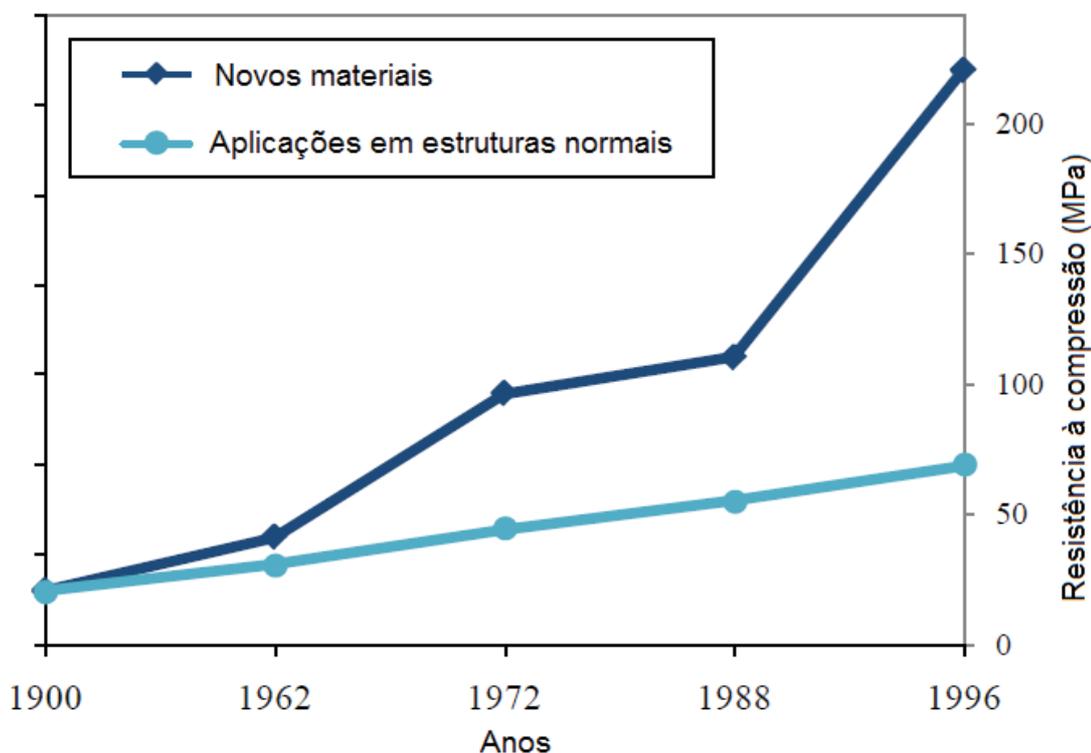
A tecnologia do concreto está em constante desenvolvimento. O uso de misturas com maior resistência em obras civis, com elevada fluidez na indústria de pré-fabricado e com propriedades que garantem maior durabilidade nas estruturas em geral são evidentes (DAY, 2006).

A evolução nas propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo é notória. Na década de 50, mesmo já dominando a tecnologia de se produzir concretos com resistência à compressão de 70 MPa, a cadeia produtiva não absorveu este tipo de material. Porém, a grande evolução iniciou quando os profissionais perceberam que o processo de produção poderia ser realizado com a incorporação de aditivos (FEHLING et al., 2014).

Ao desenvolver concretos com maior resistência mecânica, a utilização do concreto em diferentes áreas se modifica, tornando necessário inclusive a modificação de normas técnicas para o dimensionamento dos elementos de concreto armado no Brasil.

O avanço tecnológico dos concretos fez com que o desenvolvimento dos compostos a base de cimento apresentou um aumento ao longo do tempo. A Figura 1 apresenta os valores de resistência dos concretos comumente utilizados nas obras e os novos compostos desenvolvidos a partir de 1900 (SOLIMAN, 2016).

Figura 1 - Desenvolvimento da resistência máxima à compressão do concreto em 100 anos



Fonte: Soliman (2016, p. 14).

O surgimento do concreto de alta resistência (CAR), a partir do ano de 1980, fez com que a especificação deste material pudesse viabilizar estruturas esbeltas e que necessitassem de uma elevada resistência mecânica. A descoberta dos benefícios da incorporação das pozolanas, como a sílica ativa, e a incorporação dos aditivos é a grande responsável pelo desenvolvimento do setor (FEHLING et al., 2014).

Existe uma grande quantidade de nomes dado ao UHPC, geralmente em função de algumas propriedades e aspectos, como resistência à compressão, resistência à tração, ductilidade e ou teor de fibras. Os concretos que apresentam resistência superior a 150 MPa são chamados de UHPC, porém, como em sua composição exige a adição de fibras, é comum chamar o compósito de concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (TORREGROSA, 2013). Inicialmente, o UHPC era chamado de concreto de ultra alta resistência (YAZICI, 2007), porém o nome atual é mais aceito devido ao material não apresentar apenas elevada

resistência mecânica mas também outras propriedades que garantem maior desempenho.

2.1 DEFINIÇÕES DO UHPC

A Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC) define o UHPC como uma matriz cimentícia reforçada com fibras de aço de alta resistência à compressão, superior a 150 MPa aos 28 dias, podendo chegar à resistência de 250 MPa, possuindo elevada resistência à tração, superior a 8 MPa, e excelentes propriedades reológicas no seu estado fresco (AFGC, 2013).

Já o ACI 239 (2013) define o UHPC como sendo um concreto que deve apresentar, no mínimo, a resistência à compressão de 150 MPa e um requisito de durabilidade específica para uma determinada situação, apresentando elevada ductilidade e resistência à tração, além da introdução de fibras no composto.

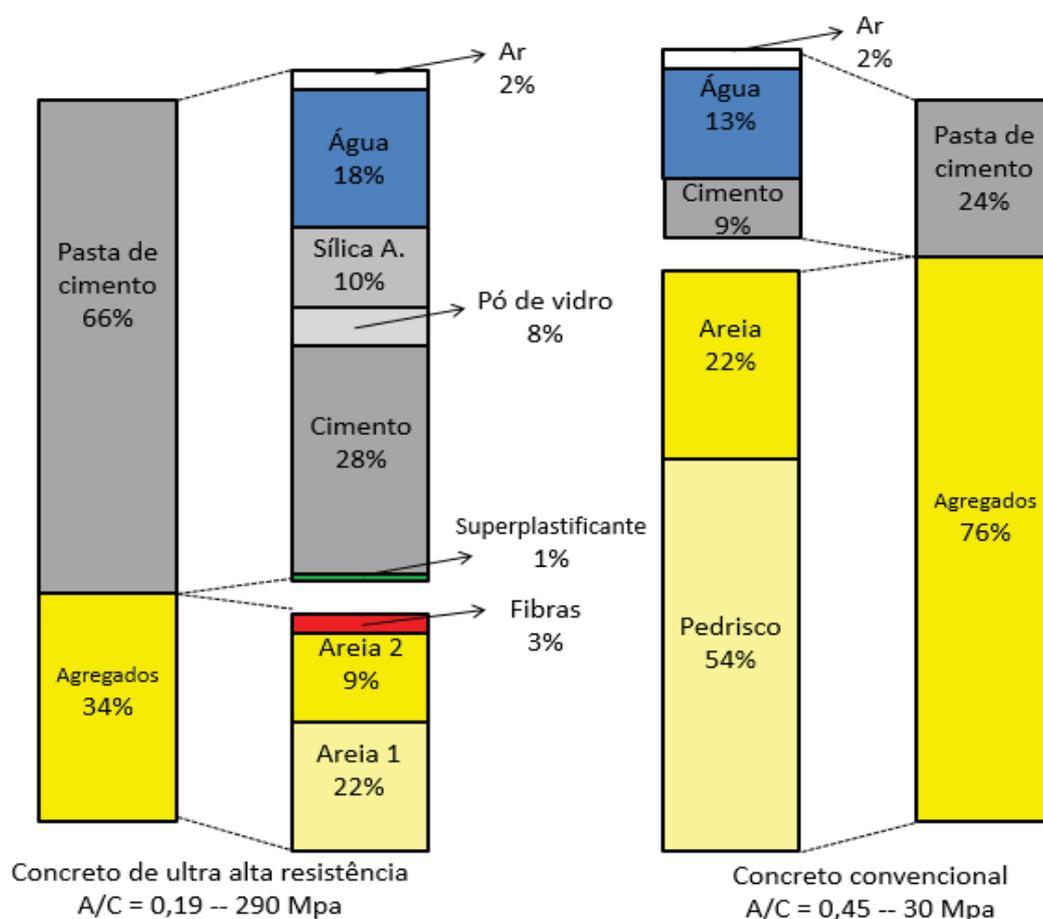
O UHPC pode ser classificado como um compósito cimentício reforçado com fibras, sendo que em sua composição são inseridos os aglomerantes, agregados finos e fibras. A compatibilidade entre os constituintes é de fundamental importância e requer um estudo específico e alto controle no processo de produção (TORREGROSA, 2013).

A produção do UHPC requer alguns cuidados, e a escolha correta dos materiais é um deles. Os constituintes comumente presente no UHPC são cimento, areias muito finas, pozolanas como sílica ativa e cinza volante, aditivo superplastificante, fibras metálicas e água (SOBOLEV, 2004). Tratando especificamente dos constituintes presentes nas misturas usuais de UHPC, pode-se perceber a inexistência do agregado graúdo.

A inexistência do agregado graúdo na composição do UHPC auxilia na diminuição dos vazios internos, devido ao empacotamento das partículas, e também diminui a zona de transição, que é a ligação da pasta de cimento e o agregado graúdo, ponto mais frágil de um concreto (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Ao comparar uma mistura de UHPC com uma mistura de um concreto convencional (CC), considerando a mesma quantidade de ar incorporado, nota-se uma grande diferença quanto às proporções de cada material e a inexistência do agregado graúdo no UHPC, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Comparação entre as proporções dos constituintes de um UHPC e um CC



Fonte: Naaman e Wille (2012, p.8).

A quantidade de aglomerante presente no UHPC é superior em 2,5 vezes ao do CC, compensando com os demais agregados presentes nos compósitos.

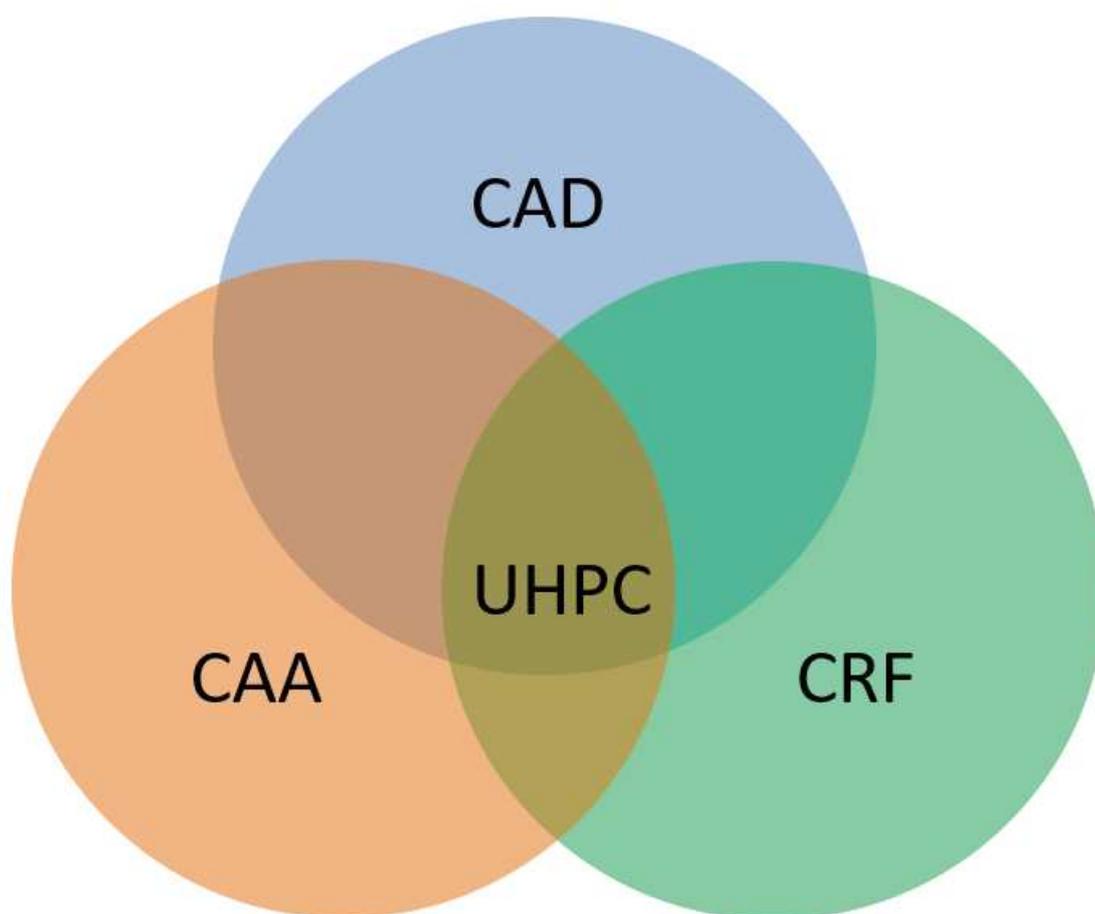
O elevado teor de aglomerante faz com que o consumo de cimento seja maior, mesmo não sendo o único aglomerante presente na mistura, fazendo com que o custo do UHPC seja maior do que o do CAR. Estudos mostram que o consumo de cimento neste tipo de concreto é, em torno de 700 a 1100 kg/m³ (WILLE; NAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011). Porém, algumas pesquisas mostram que há viabilidade em se produzir UHPC com consumos inferiores a 300 kg/m³, utilizando pozolanas na mistura (CHRIST, 2014; YUNSHENG et al., 2008).

A utilização de concretos com menor consumo de cimento muitas vezes não é a solução para o aumento da sustentabilidade na construção civil. Tutikian e Helene (2011) relatam que há um rendimento ótimo da relação entre a resistência à compressão e o consumo de cimento em um traço de concreto. Para um concreto de 20 MPa, por exemplo, pode-se ter um rendimento de 0,08 MPa/kg de cimento. Já

traços de UHPC, como o desenvolvido por Christ (2014), o rendimento pode ser de 0,82 MPa/kg de cimento, o que corresponde a um aumento de mais de 10 vezes.

A interação entre o concreto de alto desempenho (CAD), o concreto reforçado com fibras (CRF) e o concreto autoadensável (CAA), como mostra a Figura 3, resulta no UHPC (TORREGROSA, 2013).

Figura 3 – Combinações das propriedades dos diferentes concretos



Fonte: Torregrosa (2013, p. 37).

O excelente desempenho do concreto se dá devido a alguns princípios fundamentais (FEHLING et al., 2014; HABEL et al., 2006; RESPLENDINO, 2004; WALRAVEN, 2009; WILLE; NAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011):

- ✓ o material apresenta, geralmente, elevado consumo de cimento, baixa demanda de água, relação água/aglomerante menor do que 0,20, e, portanto, exige a utilização de aditivo superplastificante;

- ✓ incorporação de pozolanas, como sílica ativa, que potencializa a resistência mecânica do material;
- ✓ visando garantir satisfatórias resistências à tração e tenacidade, a incorporação de fibras metálicas deve superar os 2,5% (175 kg/m³) em relação ao volume total de concreto, na maioria das aplicações;
- ✓ alta densidade da mistura, devido ao excelente empacotamento das partículas e o elevado volume de materiais finos, fazendo com que o material apresente um baixo índice de vazios e reduzidas tensões na superfície de contato entre os constituintes, assegurando que as microfissuras não serão geradas precocemente.

Devido a estes princípios, o material torna-se uma excelente alternativa para a execução das mais diversas obras na construção civil. A elevada resistência à compressão, resistência à tração, ductilidade, dureza, durabilidade e rigidez são as propriedades mais notáveis do material (TORREGROSA, 2013).

2.2 APLICAÇÕES DO UHPC

A utilização do UHPC na construção civil iniciou no ano de 1997, com a construção de uma passarela na cidade de Sherbrooke, no Canadá. Na ocasião, a estrutura da ponte foi confeccionada com o concreto de pós reativos (CPR), com resistência à compressão de 200 MPa (WARNOCK, 2005).

Após a utilização do UHPC na primeira obra, diversas passarelas e outras obras de arte foram confeccionadas pelo mundo, como no Japão, na Coreia do Sul, nos Estados Unidos, na França e na Alemanha. O UHPC já foi utilizado em diferentes países e nas mais variadas estruturas, como passarelas, pontes de pequeno e alto tráfego, painéis de fachada, paredes portantes, painéis balísticos, escadas e diversas obras de arte.

Outro exemplo da aplicação deste material em uma obra de arte é a ponte do aeroporto de Tóquio, na qual transitam aeronaves (Figura 4). A ponte foi construída sobre a rodovia que liga o sul e o norte do país, possui 46 metros de comprimento e 16 metros de largura, e a carga de projeto é de 125 kN por eixo (TOUTLEMONDE; RESPLENDINO, 2013).

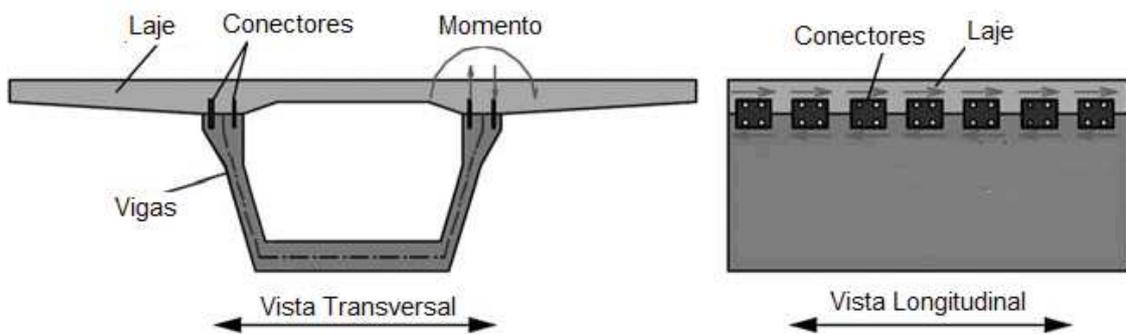
Figura 4 - Ponte no aeroporto de Tóquio, com 46 metros de comprimento e 16 metros de largura



Fonte: Toutlemonde e Resplendino (2013, p. 172).

A estrutura é formada por vigas com formato em “U” na parte superior, nas quais se apoiam placas com o mesmo material, que, posteriormente, foram solidificadas, conforme mostra a Figura 5. Os elementos foram confeccionados com um UHPC de resistência à compressão de 180 MPa.

Figura 5 - Peças pré-fabricadas, montagem e detalhamento da concepção da ponte.



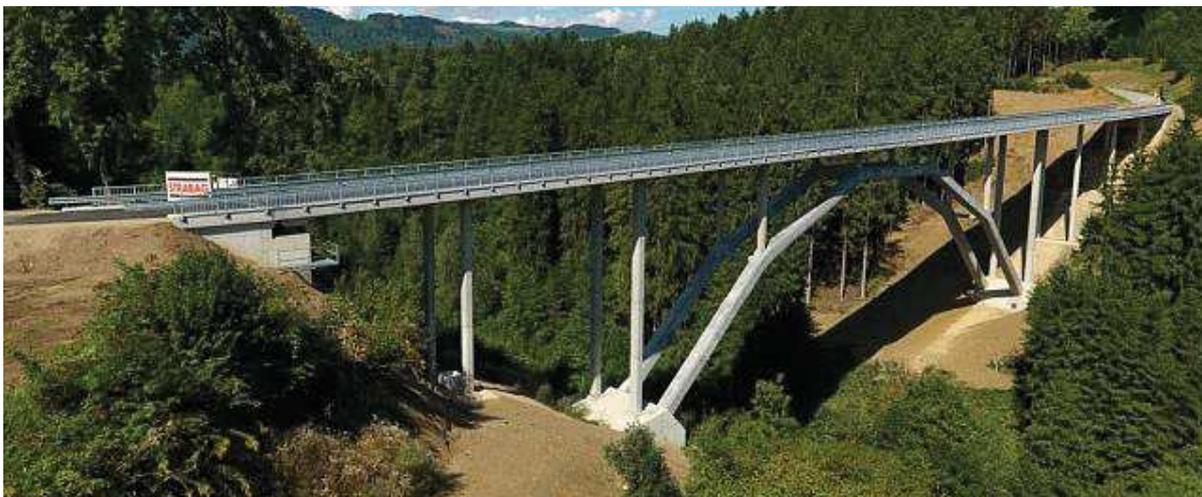
Fonte: Toutlemonde e Resplendino (2013, p. 174).

Os elementos pré-fabricados desta estrutura são protendido o que possibilitou a diminuição da sessão transversal da mesma. De maneira a garantir a qualidade e a eficácia da produção dos elementos em UHPC, os mesmos foram moldados de cabeça para baixo, onde a base do “U” permaneceu para cima.

A estrutura foi confeccionada seguindo um rigoroso controle de qualidade na indústria. Cada elemento necessitou de um grande volume de material, o que necessitou de um programa de produção especial, para que não houvesse juntas de concretagem. Para isso foi necessário separar, antecipadamente os constituintes de cada misturas, garantindo assim que a produção fosse sequencial.

Outro exemplo de ponte é a “*Road Bridge – Wild*”, Figura 6, construída em um vale na Áustria. A ponte possui um comprimento de 157 metros, com um arco central de 70 metros de comprimento (FEHLING et al., 2014).

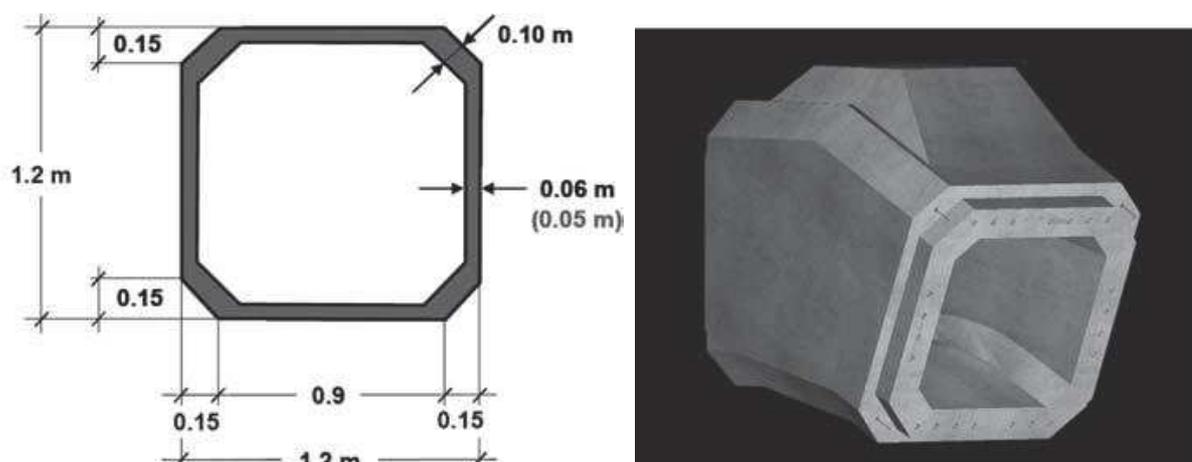
Figura 6 - Ponte confeccionada com UHPC na Áustria



Fonte: KHP Leipzig (2019) Disponível em http://www.khp-leipzig.de/?page_id=539 acesso em: 12 de julho de 2019.

Os arcos que constituem a ponte são ocos e possuem uma espessura de parede de 6 cm, sendo as dimensões externas do elemento quadrado de 1,2 metros de lado. Estes elementos retos são unidos entre si por um conector, conforme mostra a Figura 7 (FREYTAG et al., 2012).

Figura 7 - Secção transversal das vigas que formam os arcos



Fonte: Fehling et al. (2014, p. 143).

Toda a estrutura da ponte é pré-fabricada, e a construção da mesma foi realizada de maneira em que os elementos fossem encaixados um a um e, posteriormente, articulados até a posição final, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Ilustração da sequência de montagem dos elementos que forma o arco



Fonte: Toutlemonde; Resplendino (2013, p. 213).

Em muitas destas utilizações se desenvolveu uma mistura a partir de estudos de dosagens empíricas, sem que fosse utilizado um método definido de dosagem. Em algumas foram utilizados os materiais comercialmente fornecidos em uma grande parte do mundo, como o DUCTAL®, CERACEM® e o CEMTEC®.

O desenvolvimento do UHPC em grande parte dos elementos já confeccionados e aplicados, foram criados a partir de traços desenvolvidos em pesquisas, onde buscou-se os materiais utilizados nestes trabalhos e sem que fosse necessário o desenvolvimento de novos traços.

Mas a utilização do UHPC não se restringe apenas a passarelas ou obras de arte, pois suas propriedades mecânicas e de durabilidade permitem que se tenha uma gama de aplicações na engenharia (TOUTLEMONDE; RESPLENDINO, 2013). Arquitetos e projetistas, estimulados pela possibilidade de desenvolver novos empreendimentos com novas formas e diferentes volumes, desenvolveram diversas aplicações arquitetônicas, como abrigos de ônibus, móveis de rua em grandes centros, painéis de fachada, entre outras utilizações (ACKER; BEHLOUL, 2004).

Elementos decorativos de sistemas de fachadas de edificação podem ser confeccionados com o UHPC, conforme a Figura 9, que mostra o centro de controle de ônibus da cidade de *Thiais*, fachada do complexo habitacional na cidade de *Montpellier* e uma vista dos painéis da fachada do estádio *Jean Bouin*, todas obras na França. O material foi viabilizado devido a suas elevadas propriedades mecânicas, fazendo com que as peças possuíssem uma espessura reduzida (TORREGROSA, 2013).

Figura 9 - Painéis decorativos de fachadas confeccionadas com UHPC na França



Fonte: Toutlemonde; Resplendino (2013, p. 102).

Porém, segundo Torregrosa (2013, p. 24), existem dificuldades na utilização do compósito para algumas aplicações, como:

- ✓ elevada variação do compósito, o que faz com que o método de dosagem tenha de ser ajustado para cada tipo de moldagem e insumos;
- ✓ a classificação do UHPC ainda não está bem clara, existe divergências entre pesquisadores;
- ✓ a sua utilização ocorre predominantemente na indústria de pré-fabricados, devido à necessidade de utilização de materiais selecionados e de rigoroso controle de produção;
- ✓ o valor unitário do compósito é mais elevado, se comparado com os concretos tradicionalmente utilizados.

2.3 REOLOGIA

O desempenho do UHPC e sua viabilidade de utilização em elementos estruturais dependem da trabalhabilidade do composto. A trabalhabilidade interfere diretamente no custo e no tempo necessário para a execução do elemento estrutural, tendo relevante importância (TANG, 2004).

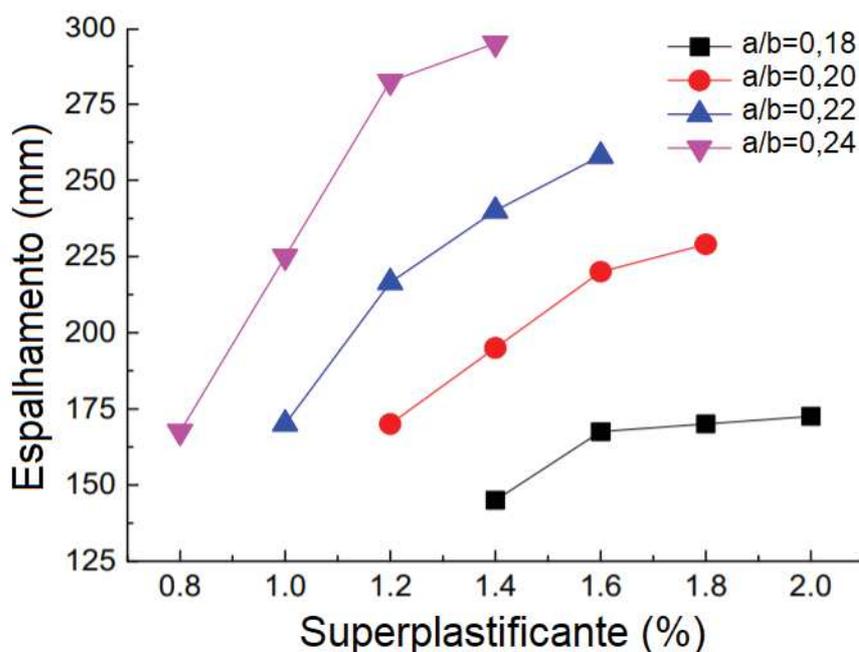
Os concretos, em geral, apresentam uma determinada capacidade de fluir, sem que os constituintes sejam separados e, assim, consigam preencher as fôrmas. Denominar “fluida” a mistura é um termo muito simples para descrever a alta complexidade do comportamento dos concretos em seu estado fresco (ROUSSEL, 2012). Os constituintes utilizados no UHPC são materiais de reduzida granulometria, e a quantidade de água presente na mistura é extremamente baixa. Assim, de modo a garantir uma boa trabalhabilidade, é de fundamental importância a utilização de aditivos superplastificantes (AÏTCIN et al., 1998).

A água adicionada ao composto modifica a fluidez da mistura. O aumento da quantidade de água aumentará a fluidez do material, porém, pode provocar a segregação do composto, caso haja excesso de água (TORREGROSA, 2013).

A quantidade de água utilizada nas misturas de UHPC afeta diretamente na fluidez do material. Estudo desenvolvido por WANG et al. (2017) mostra que quanto mais baixa a relação água/aglomerante menor é a fluidez do UHPC mesmo

aumentando significativamente o aditivo superplastificante, isso pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Variações do espalhamento de mistura com diferentes relações água/aglomerante e aditivos superplastificantes.



Fonte: WANG et al. (2017a p.69)

Com base nestes resultados, podemos notar que a relação água/aglomerante apresenta maior influência na trabalhabilidade do que a quantidade de aditivo superplastificante, onde para relações abaixo de 0,20 a influência da porcentagem de aditivo a ser inserida na mistura é menor.

Da mesma forma em que a quantidade de água interfere na fluidez das misturas, ela afeta na segregação nos materiais. Para que o composto atinja as propriedades requeridas, é preciso que os constituintes permaneçam estáveis na mistura, sem que haja a segregação, exsudação ou a hidratação precoce do cimento. A avaliação destes parâmetros compreende o estudo reológico da mistura. Por isso, o estudo da reologia do UHPC é de grande importância para garantir a trabalhabilidade (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

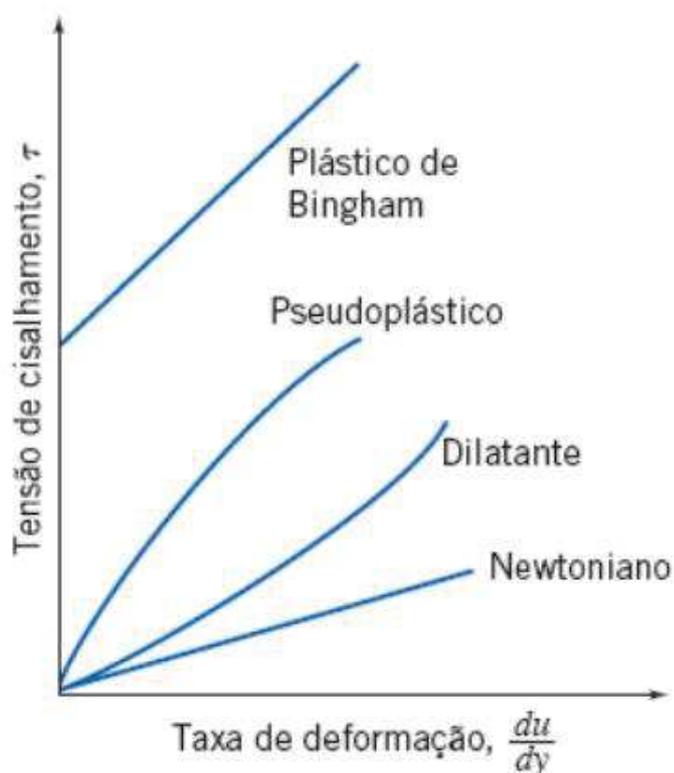
Quando se avaliam as propriedades reológicas dos concretos, através de métodos normatizados ou de forma empírica, busca-se avaliar a capacidade da mistura em realizar alguma movimentação, e adota-se a premissa de que o comportamento do material será conforme um fluido newtoniano, quando a tensão

de cisalhamento é proporcional ao deslocamento (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Esta premissa é equivocada, pois o comportamento dos concretos não obedece ao modelo newtoniano. Em concretos, para que haja uma movimentação, é necessária que seja aplicada uma quantidade mínima de tensão no material, que não é constante (ROUSSEL, 2012).

Os materiais que possuem comportamento não-newtoniano são divididos quanto à sua fluidez em: fluidos pseudoplásticos, fluidos dilatantes e fluidos binghamianos ou plásticos (CASTRO, 2007). A Figura 11 apresenta os diferentes comportamentos que os materiais podem possuir quanto à fluidez.

Figura 11 - Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo

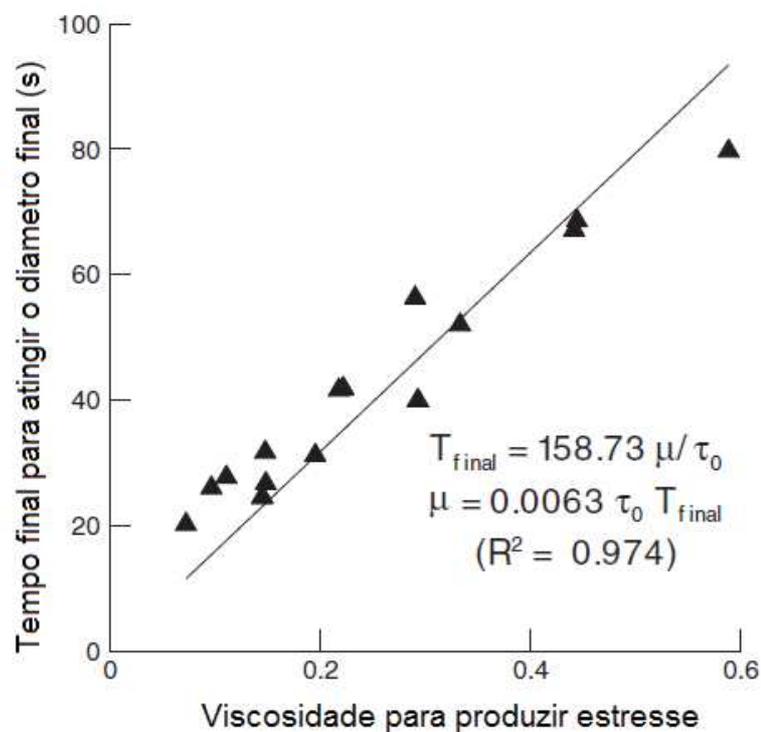


Fonte: Fox et al. (2014, p. 57).

A avaliação das propriedades reológicas requer equipamentos específicos e caros, o que, muitas vezes, inviabiliza sua avaliação em empresas (FERRARA et al., 2012). Estudos como os de Choi et al (2016) e Ferrara et al (2012) mostram que é possível relacionar os ensaios de trabalhabilidade, como o de abatimento de *mini-slump*, com parâmetros reológicos, como a viscosidade plástica, determinada nos ensaios utilizando reômetro de alta precisão.

Ferrara et al. (2012) apresentam uma correlação entre a viscosidade plástica e o tempo final para que a mistura tenha um diâmetro final, apresentada na Figura 12, na qual pode ser observado que há uma relação entre os parâmetros do ensaio de mini-*slump* e a viscosidade encontrada no reômetro. À medida em que a viscosidade aumenta, o tempo para atingir o espalhamento máximo também aumenta.

Figura 12 – Correlação entre a viscosidade e o tempo final de abertura de uma pasta de cimento



Fonte: Ferrara et al. (2012, p. 1142).

Em relação ao estado fresco, as seguintes propriedades do composto são importantes: trabalhabilidade, consistência, capacidade de escoamento e capacidade de bombeamento. Outra propriedade fundamental e com grande importância no estudo da reologia do UHPC é a tixotropia. Esse fenômeno é a variação da viscosidade da mistura ao longo do tempo e em função de um movimento externo aplicado. Essa variação ocorre quando se aplica uma determinada tensão de cisalhamento, uma vibração ou qualquer outra intervenção no material (ROUSSEL, 2007).

O fenômeno tixotrópico dos concretos é caracterizado por uma diminuição da tensão (*stress*) *versus* tempo, enquanto que a taxa de cisalhamento é constante. Isso se dá devido a existência de uma estrutura instável no material, que pode ser quebrada com determinada quantidade de energia (HU; DE LARRARD, 1996).

Os compósitos cimentícios que apresentam elevada fluidez são tixotrópicos, cujo estado de fluidez é governado pelo modelo constitutivo de Bingham e a suspensão das partículas com o tempo. A tensão necessária para garantir a fluidez é relativamente baixa (0 a 60 Pa), juntamente com a sua viscosidade plástica (10 – 120 Pa-s) (RAHMAN; BALUCH; MALIK, 2014).

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do UHPC é diretamente afetada pela relação a/aglo e a quantidade de cimento da mistura. Outros parâmetros influenciam na resistência à compressão do UHPC, como a quantidade e tipo de fibras, o empacotamento dos constituintes e a cura térmica.

A quantidade de água a ser empregada em uma matriz cimentícia, afeta diretamente na resistência à compressão de todos os tipos de concreto. Além desta evidência, as principais normas de dimensionamento de estruturas de concreto, apresentam valores máximos de a/c para os concreto, com a finalidade de assegurar parâmetros de durabilidade para as estruturas (PACHECO, 2016).

A quantidade de água presente no UHPC, afeta diretamente na trabalhabilidade, durabilidade e resistência à compressão. A determinação da quantidade de água a ser inserida, pode ser definida através dos três parâmetros por consequência.

A faixa da relação água/aglomerante normalmente utilizada para a produção do UHPC é entre 0,16 a 0,20. Nesta faixa, há a necessidade de se utilizar aditivos para que as partículas sejam dispersadas, uma vez que, na matriz, tem-se apenas materiais muito finos (EIDE; HISDAL, 2012).

A resistência à compressão do UHPC também é afetada pela incorporação de fibras na matriz. Os concretos reforçados com fibras, de maneira geral, não apresentam um acréscimo expressivo na resistência à compressão. Porém, a

quantidade de fibras inseridas no UHPC altera significativamente a resistência à compressão.

Estudos como Alsalman, Dang e Micah Hale, (2017), Soliman e Tagnit-Hamou, (2016) mostram que o crescimento da resistência do UHPC com 2% de fibras é de, aproximadamente 8%. Este aumento de resistência é devido, principalmente, pela inibição da propagação das fissuras provocadas pelo esforço axial durante o carregamento (FEHLING; BUNJE; LEUTBECHER, 2004).

Outro fator que altera diretamente a resistência à compressão do UHPC é a cura térmica. A realização de cura térmica em temperatura de até 150°C acelera a reação de hidratação do cimento. Se aplicada uma cura térmica com temperatura de 200°C a 300°C as propriedades do pó de quartzo são alteradas e pode provocar reações pozolânicas, conferindo assim um aumento de resistência à compressão (SOLIMAN, 2016).

A resistência mecânica do UHPC pode ser acelerada com o tratamento térmico a temperatura de até 90°C combinado com uma elevada umidade relativa. O tratamento térmico acelera a hidratação dos compostos do cimento, além de acelerar a complementação da hidratação da sílica ativa e do pó de quartzo quando a ligação destes compostos com a portlandita (HEINZ; URBONAS; GERLICHER, 2012).

Richard e Cheyrezy (1995) desenvolveram um concreto com resistência à compressão de 200 MPa, ao aplicarem pressão confinante no material ainda em seu estado fresco e cura térmica no material. Há a possibilidade de se confeccionar um UHPC sem a aplicação da cura térmica, porém as propriedades mecânicas serão inferiores.

Estudos desenvolvidos em vários países com diferentes proporções dos constituintes e diferentes materiais mostram que todos possuem uma característica em comum, o aumento significativo da resistência com a aplicação de cura térmica nas primeiras 48 horas. Esta característica pode ser evidenciada na Tabela 2, apresentada por Soliman (2016).

Tabela 2 – Resistência à compressão em diferentes regimes de cura

Autores	Resistência à compressão (MPa)		
	Cura normal 20°C	Cura térmica 90°C	Cura térmica 150°C
Richard e Cheyrezy (1994)	170	230	630
Colleparadi et al. (1997)	155	160	195
Ma e Schneider (2002)	150	200	---
Schmidt et al. (2003)	150	162	---
Heinz et al. (2004)	178	222	273
Soutsos et al. (2005)	135	185	---
Graybeal (2005)	130	193	---
Lee, Chisholm (2005)	160	205	230
Cwirzen (2007)	153	200	---
Tam e Tam (2012)	---	144	200

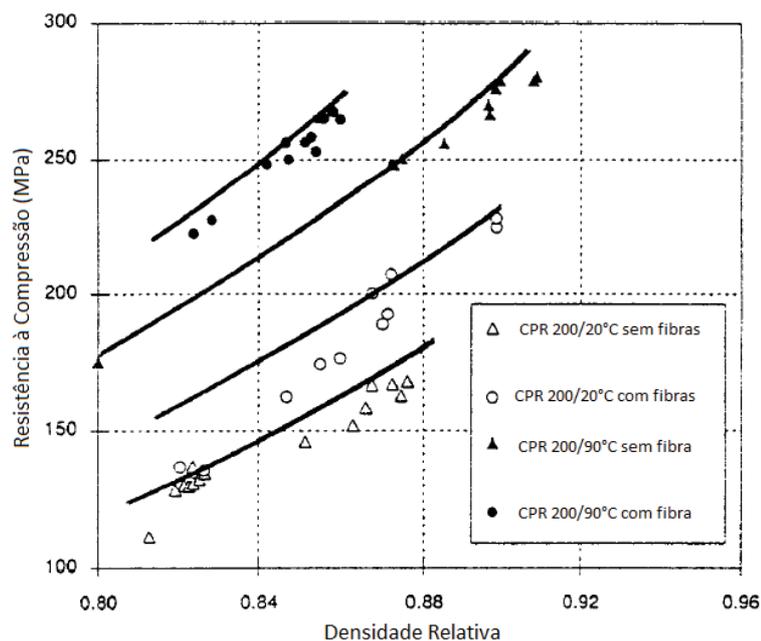
Fonte: Soliman (2016, p. 44).

É possível notar que grande parte das pesquisas não atingiram a resistência mínima de 150 MPa para as amostras curadas com temperatura de 20 °C. A cura térmica potencializa a resistência do UHPC, porém é uma técnica muitas vezes cara e inviável para aplicação do compósito em larga escala. A aplicação da cura térmica faz com que os produtos hidratados sejam formados mais rapidamente e, segundo Richard e Cheyrezy (1995), ativa reações pozolânicas do pó de quartzo. O aquecimento do material em condições hidrotérmicas faz com que haja a transformação dos hidratados amorfos em hidratados cristalinos.

A densidade da mistura também é um item crucial para se obter o desempenho mecânico do UHPC. Para garantir uma maior densidade é necessário que o empacotamento das partículas vise o menor índice de vazios, o que gera um aumento da resistência e de durabilidade (YUNSHENG et al., 2008). Segundo Shi et al (2015), é através do empacotamento adequado das partículas que se garante uma matriz densa e compacta.

A partir da Figura 13 é possível notar que, com o aumento da densidade do concreto, devido ao empacotamento das partículas, pode-se alcançar um aumento na resistência à compressão, em diferentes tipos de concreto, com e sem tratamento térmico.

Figura 13 - Comparação da resistência em função da densidade do material



Fonte: Richard; Cheyrezy (1995, p. 1506).

Para confeccionar um UHPC é necessário que os constituintes a serem empregados na mistura apresentem uma elevada resistência. Como nos CAR, o rompimento do concreto ocorre nos agregados graúdos, pois a resistência do agregado é menor do que a da matriz cimentícia. Ainda que os agregados no UHPC sejam de reduzidas dimensões, deve-se buscar agregados com resistência mecânica de compressão elevada, como o quartzo, visando se equivaler à resistência da matriz.

É importante a incorporação de finos no UHPC, para gerar uma menor quantidade de vazios. A incorporação de finos também melhora a reologia do concreto, fazendo com que o material apresente melhor desempenho no estado fresco (HUNGER, 2010).

2.4.2 Resistência à tração

Um dos grandes diferenciais do UHPC, se comparado com os diferentes concretos é a elevada resistência à tração. Mesmo comparando o UHPC com os concretos reforçados com fibras, o seu desempenho quanto à resistência à tração é superior (EIDE; HISDAL, 2012).

A resistência à tração dos concretos convencionais é da ordem de 7% a 10% em relação à resistência à compressão do composto (MEHTA; MONTERIRO, 2014). O UHPC apresenta resistências à tração direta na ordem de 9,7 a 11 MPa e resistência à tração na flexão na ordem de 26 MPa, que representa aproximadamente 17% da resistência à compressão (SOLIMAN, 2016).

Ao incorporar fibras de aço, o UHPC apresenta um aumento significativo da resistência à tração, mesmo após o surgimento da primeira fissura, dando ao material um aumento da tenacidade e maior ductilidade se comparado com mistura sem a incorporação de fibras (VOORT; SULEIMAN; SRITHARAN, 2008).

As fibras de aço são as mais utilizadas em UHPC, devido suas excelentes propriedades mecânicas, tais como, alto módulo de elasticidade, alta resistência, alta ductilidade e elevada durabilidade frente ao ambiente alcalino. Devido a estes fatores, a falha sempre será evidenciada na ligação entre as fibras e a matriz (EIDE; HISDAL, 2012).

A incorporação de fibras no composto é de fundamental importância, pois proporciona elevada ductilidade e resistência à tração. Fehling, Bunje, Leutbecher (2004, p. 329) descrevem os principais aspectos que devem ser considerados para que as fibras promovam os benefícios esperados:

- ✓ o teor de fibras a ser incorporado;
- ✓ a geometria das fibras, comprimento e diâmetro;
- ✓ a relação entre o comprimento das fibras e o tamanho máximo do agregado;
- ✓ a aglomeração das fibras, quando utilizadas fibras compostas por diversos filamentos, se são facilmente desprendidos ou se há um acúmulo dos filamentos em um ponto;
- ✓ a orientação das fibras na mistura.

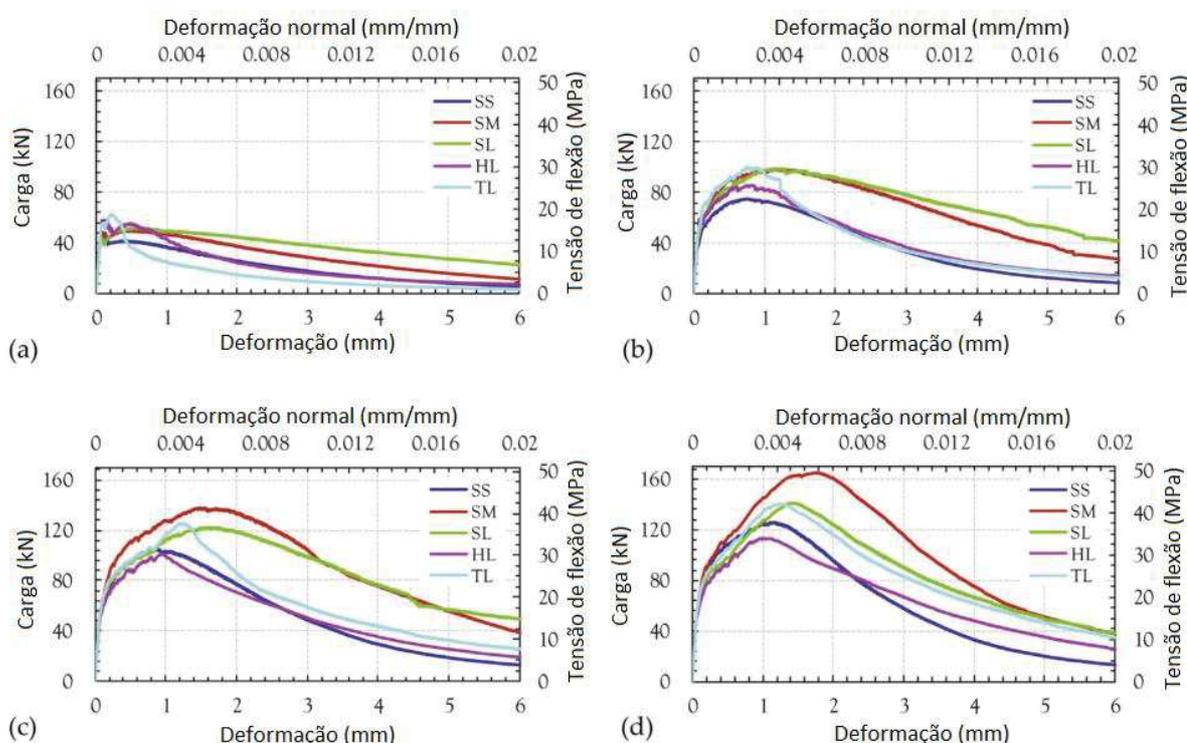
Além destes aspectos, as propriedades mecânicas das fibras exercem grande influência para o benefício da sua incorporação. Fibras com módulo de elasticidade inferior ao módulo de elasticidade da matriz terão ruptura antes da primeira fissura surgir, e, portanto, não contribuirão para o aumento da resistência à tração do UHPC (QUININO, 2015).

A aderência das fibras com a matriz é um ponto importante. Tendo as fibras propriedades mecânicas superior à da matriz, o prolongamento das fissuras serão controladas pelas fibras, pois geram grandes solicitações de ancoragem a

(FEHLING et al., 2014). Ainda o teor de fibras inserido nas misturas de UHPC interfere diretamente na resistência à tração. Além disso alteram significativamente a trabalhabilidade da mistura (KHALIL, 2013).

O desempenho do UHPC, com relação à resistência à tração na flexão, se relaciona diretamente ao fator de forma das fibras, módulo de elasticidade e resistência à tração (YOO et al., 2017a). Isto pode ser evidenciado na Figura 14, que apresenta o comportamento mecânico do UHPC com fibras de aço de distintos fatores de forma e resistências.

Figura 14 - Comportamento mecânico de UHPC com diferentes tipos e percentagens de fibras: (a) 0,5%; (b) 1,0%; (c) 1,5%; (d) 2,0%



Fonte: Yoo et al. (2017, p.378).

O estudo apresenta cinco diferentes fibras, ambas de mesmo material, porém com diferentes dimensões. As fibras denominadas SS são de aço curtas, SM fibras de aço médias, SL de aço longas, HL longas com gancho e TL longas trançadas. As fibras denominadas na Figura 14 são apresentadas na Tabela 3 com sua característica de resistência à flexão.

Tabela 3 - Descrição dos tipos de fibras apresentadas na Figura 23

Nomenclatura	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Resistência à flexão (MPa)
SS	0,20	13,0	2788
SM	0,20	19,5	2500
SL	0,30	30,0	2580
HL	0,38	30,0	2500
TL	0,30	30,0	2428

Fonte: Yoo et al. (2017, p.377).

A partir da Tabela 3 pode-se perceber que as fibras SL e SM apresentaram maiores resistências à flexão, e à medida em que se acrescentaram as fibras na mistura, a capacidade de resistir à carga e se deformar aumentou.

Além das fibras de aço, há outras que podem ser inseridas no concreto, como fibras de carbono, diferentes tipos de fibras a base de polímeros e também algumas fibras naturais. Cada um destes materiais possui características específicas e proporcionam benefícios distintos (BHUTTA et al., 2017).

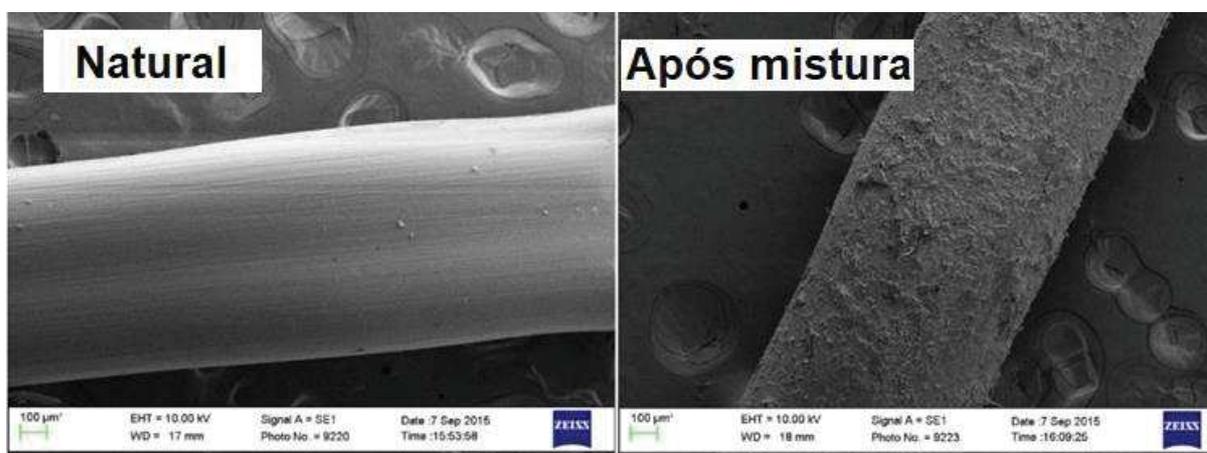
Além das propriedades mecânicas das fibras, que dependem diretamente do seu material, outro fato que interfere na resistência à tração do UHPC é o formato que a fibra possui. A utilização de fibras com ancoragem pode proporcionar maior aderência a matriz, garantindo assim uma maior capacidade de suporte de cargas.

Este benefício é evidenciado nas fibras de aço, pois as fibras de aço não rompem durante a fratura do UHPC. A fratura ocorre na matriz cimentícia, e há um escorregamento das fibras durante a fissura (QUININO, 2015).

A relação entre o comprimento e o diâmetro das fibras e a rugosidade da superfície são propriedades que interferem no desempenho do concreto reforçado (LERCH et al., 2018).

Estudo de Lerch et al. (2018), utilizando microscopia eletrônica de varredura, mostra que o formato superficial das fibras interfere no desempenho do concreto, sendo que as fibras que apresentam maior rugosidade aumentam a resistência ao arrancamento da matriz cimentícia. A Figura 15 evidencia que a superfície das fibras sintéticas é alterada durante o processo de mistura.

Figura 15 - Alteração da rugosidade superficial das fibras sintéticas gerando maior aderência com a matriz cimentícia



Fonte: Lerch et al. (2018, p.136).

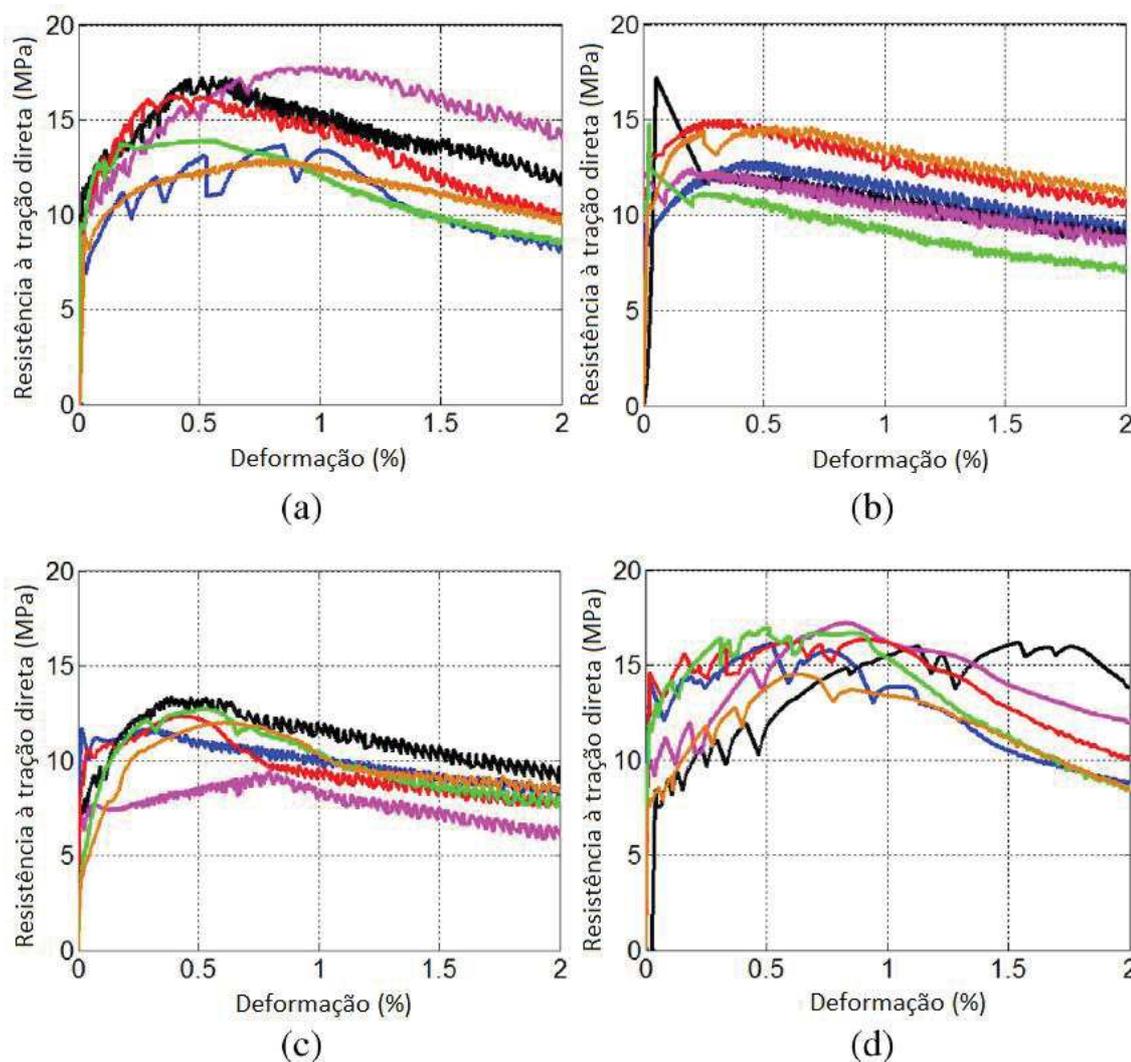
Em algumas aplicações, algumas fibras são submetidas aos ataques ácidos, gerando uma alteração na rugosidade da superfície das fibras, o que provoca uma maior aderência entre as fibras e a matriz. Em fibras de carbono são empregados tratamentos superficiais com a utilização do método químico pela ação de substâncias oxidantes, a oxidação eletroquímica ou anódica ou aplicação de um tratamento térmico (BURAKOWSKI; REZENDE, 2001).

A modificação da rugosidade da superfície das fibras garante que haja uma maior resistência de aderência entre as fibras e a matriz. A realização deste procedimento só é viável em fibras com elevada resistência à tração e módulo de elasticidade. Uma vez que se as fibras utilizadas, possuem propriedades mecânicas inferiores à da matriz, o filamento irá romper antes que a resistência de aderência seja atingida.

A resistência à tração pode ser potencializada utilizando uma mistura híbrida de fibras no UHPC. Esta hibridização pode ser tanto com fibras de mesmo material, porém tamanhos distintos, ou também por diferentes materiais (SONG et al., 2018).

Estudo desenvolvido por Kang et al. (2016) demonstra o grande benefício de se utilizar uma mistura híbrida de fibras quanto à resistência à tração do UHPC. Foram avaliadas misturas com 1,5% de fibras no total, em quatro misturas híbridas de fibras de aço, basalto, PVA e de polietileno. A Figura 16 apresenta o comportamento de cada mistura, sendo a (a) apenas com fibra de aço, (b) com aço e basalto, (c) com aço e PVA e (d) com aço e polietileno.

Figura 16 - Resistência x deformação de UHPC com fibras híbridas



Fonte: KANG et al (2016, p. 40).

Em todas as misturas é possível verificar que, mesmo após o surgimento da fissura, as amostras continuaram a suportar carga. Pode-se perceber que as misturas híbridas (b) e (d) proporcionaram um aumento da resistência à tração na primeira fissura se comparado com a mistura apenas com as fibras de aço (a).

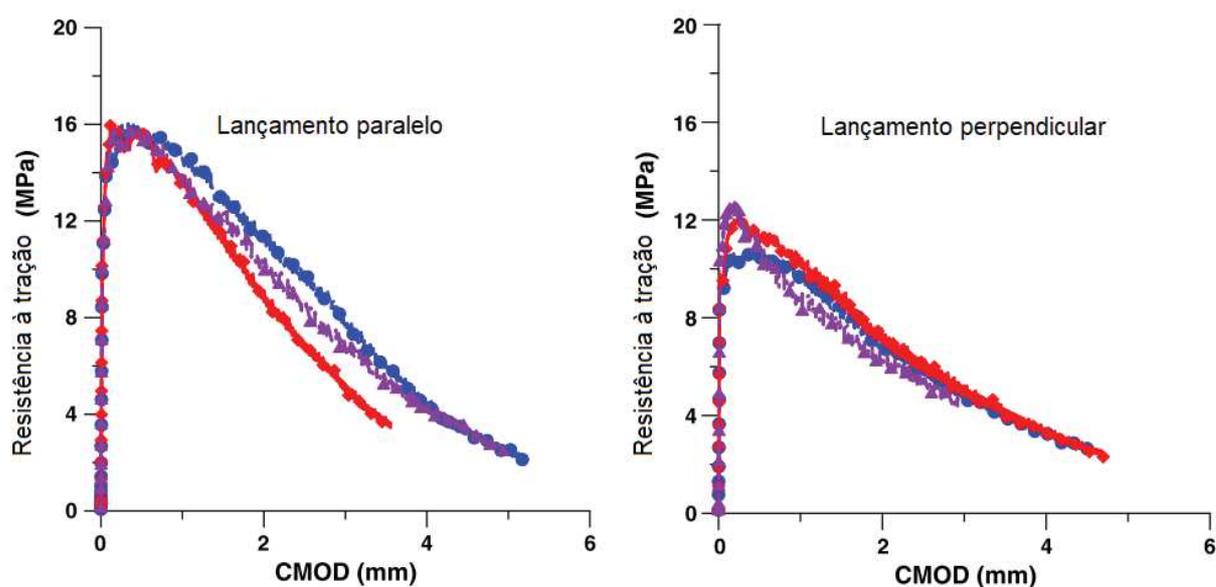
Pode-se perceber ainda que as misturas com apenas fibras de aço e a mistura com fibras de aço e polietileno apresentaram melhor comportamento após fissuração, se comparado com as outras misturas. Isso está relacionado com as propriedades mecânicas das fibras, como módulo de elasticidade e resistência à tração.

Outro fator que interfere na resistência à tração do UHPC é a forma como o material é lançado. As dimensões das formas influenciam na orientação que as

fibras terão, pois as fibras são deslocadas dentro da mistura, mudando a sua orientação. Ao lançar o UHPC em uma forma os obstáculos, a orientação das fibras sejam modificadas (YOO et al., 2016). A orientação das fibras em uma matriz de UHPC apresenta grandes variações no desempenho mecânico do produto.

Kang e Kim (2011) avaliaram a influência da forma de lançamento do concreto e por consequência, a orientação das fibras foi alterada. Foram estudadas duas formas de lançamento do concreto, (a) lançamento paralelo ao corpo de prova e (b) lançamento perpendicular ao corpo de prova. Esta variação fez com que o desempenho mecânico do material fosse alterado, como pode ser evidenciado na Figura 17.

Figura 17 - Resistência à tração direta de UHPC com diferentes formas de lançamentos



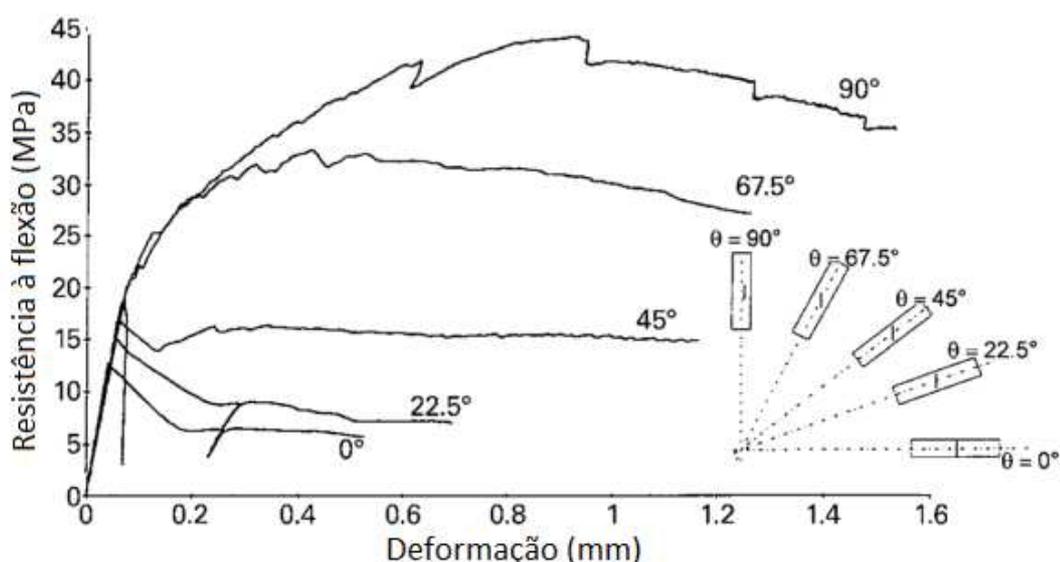
Fonte: Kang e Kim (KANG; KIM, 2011).

O lançamento do UHPC paralelo à amostra, fez com que houvesse uma maior quantidade de fibras perpendicular ao sentido da fissura, fazendo com que a resistência à tração fosse superior. Para a mesma matriz de UHPC, o tipo de lançamento do material ocasionou uma variação de, aproximadamente, 33% na resistência à tração direta.

O posicionamento das fibras em relação à trajetória da fissura, para a um esforço de tração direta ou flexão pura, altera significativamente a resistência à tração do UHPC. Como pode ser percebido na Figura 18, a orientação das fibras

possibilita uma maior capacidade de suportar cargas, quando perpendiculares ao sentido das fissuras.

Figura 18 - Resistência à tração na flexão de elementos com diferentes orientação das fibras



Fonte: Fehling et al. (2014, p.37).

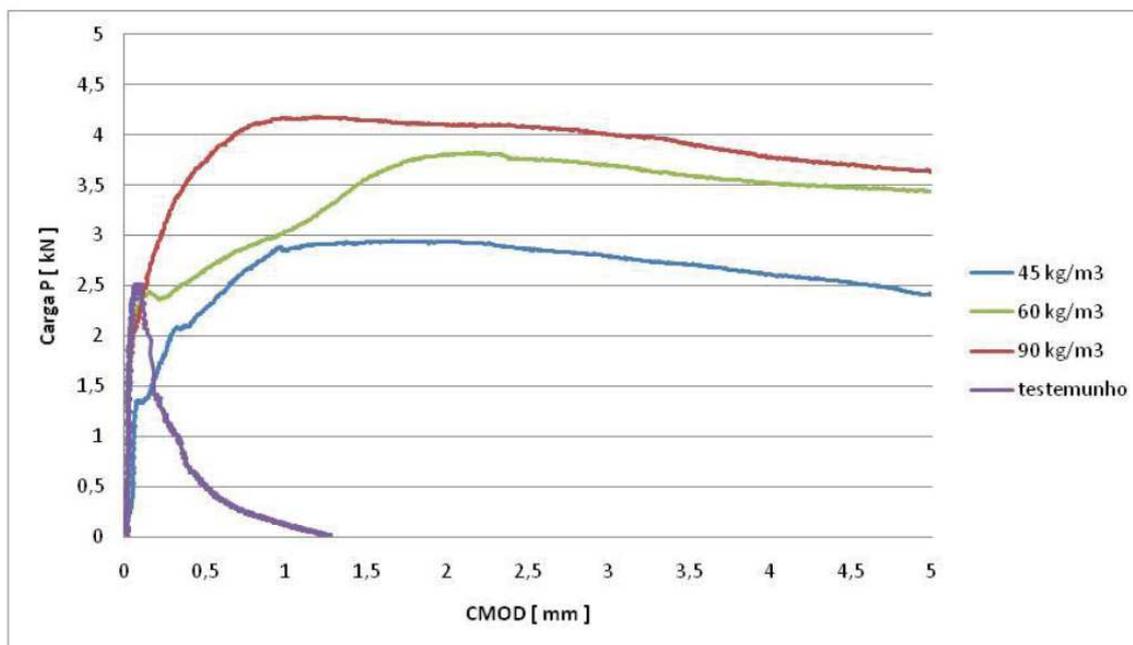
Percebe-se que o comportamento do UHPC até a tensão de 20 MPa, para ambas orientações das fibras, é similar. Isso mostra que até esta tensão as fibras ainda não foram acionadas e as tensões estão sendo absorvidas apenas pelo material. Ao passo em que a orientação das fibras é alterada a tensão resistente do material aumenta.

2.4.3 Tenacidade

O UHPC sem a incorporação de fibras é um material com propriedades frágeis, ou seja, não suporta grandes deformações. Quando do surgimento da primeira fissura, tem-se seu prolongamento rapidamente e ocorre o rompimento do material. Com a incorporação de fibras no composto, o UHPC passa a ter um comportamento dúctil (BANTHIA; GUPTA, 2004).

A incorporação de fibras no UHPC proporciona um aumento considerável na capacidade do composto em suportar carga e se deformar, o que caracteriza um aumento da tenacidade. A Figura 19 apresenta a comparação de diferentes teores de fibras em uma mistura de concreto comparado com mistura referência sem fibras.

Figura 19 – Comportamento de misturas com diferentes percentuais de fibras



Fonte: Quinino (2015, p.124).

Através da Figura 19, é possível perceber que o teor de fibras aumenta significativamente a capacidade do material de se deformar e ao mesmo tempo suportar carga, pós pico de carga.

O aumento da ductilidade com a incorporação de fibras é evidenciado em várias pesquisas (BANTHIA; GUPTA, 2004; FEHLING et al., 2015; SHI et al., 2015; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015a). As fibras que são introduzidas no composto proporcionam uma maior conservação das tensões. Após a formação das primeiras fissuras, as fibras agem e transferem entre si as tensões, mas sua capacidade em resistir depende da resistência do material de que são constituídas e também da resistência de ancoragem com a matriz (FEHLING et al., 2014).

Incorporar mais de um tipo de fibra no composto, seja esta variação volumétrica ou na natureza do material, ou ainda nas duas características, proporciona uma melhor eficácia quanto à prevenção da formação e propagação das fissuras geradas na zona tracionada. A hibridização pode desempenhar uma importante detenção das fissuras e atingir alto desempenho em concretos (BANYHUSSAN et al., 2016).

2.5 DURABILIDADE

As estruturas de concreto armado, quando projetadas e executadas corretamente, possuem excelente durabilidade. A má especificação dos constituintes e dos elementos estruturais acabam diminuindo consideravelmente a vida útil das estruturas de concreto armado (DAL MOLIN et al., 2016).

A durabilidade de uma estrutura de concreto armado está ligada à qualidade do concreto, em função da agressividade do meio onde a estrutura está inserida (PACHECO, 2016). As normas que prescrevem o dimensionamento dos elementos estruturais de concreto armado, como a NBR 6118 (ABNT, 2014), AUSTRALIAN STANDARD 3600 (2009), EUROPEAN STANDARD 1992-1 (2004), FIB CEB 238 (1997) e INDIAN STANDARD 456 (2007), estabelecem parâmetros de durabilidade, sendo um deles a relação água/cimento máxima.

As estruturas são agredidas pelas intempéries. Porém, mesmo diante de um ambiente extremamente agressivo pode-se garantir durabilidade das estruturas. Uma das propriedades de influência na durabilidade do concreto é a porosidade, e o transporte de substâncias agressivas no concreto pode ocorrer por absorção, difusão e ou permeabilidade (HELENE; TERZIAN, 1992; KHAYAT, 1999; MEHTA; MONTERIRO, 2014; PACHECO, 2016). A entrada de agentes agressivos pode ocasionar a despassivação das armaduras, que corresponde quando a frente de carbonatação ou de íons cloreto atinge às armaduras (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

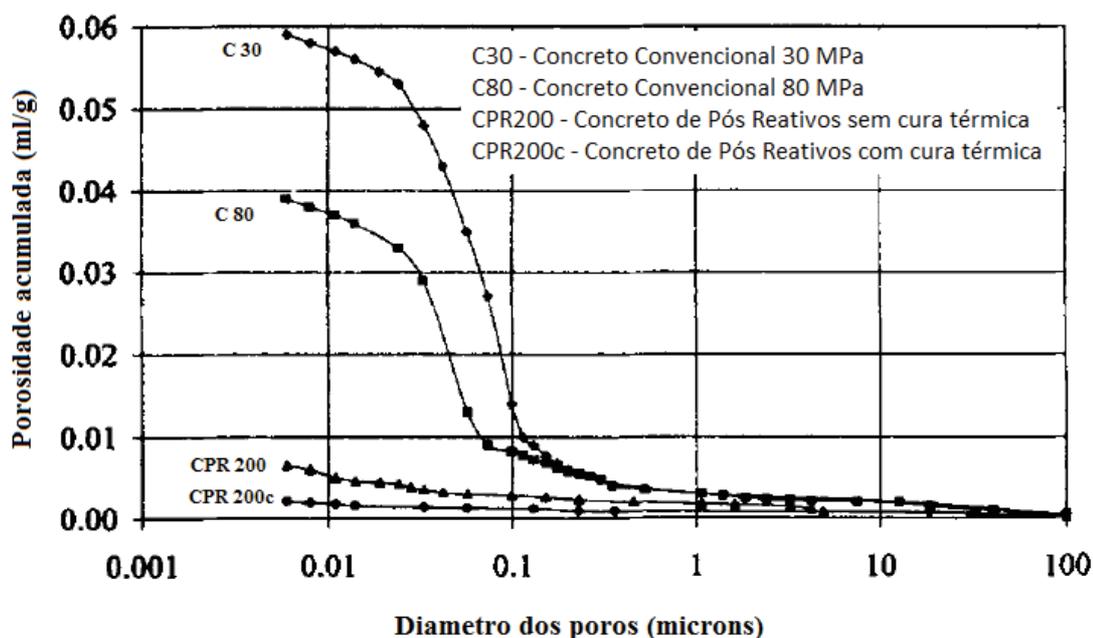
A porosidade dos concretos pode ser diminuída, de modo a proporcionar uma maior durabilidade. A quantidade de água presente na mistura, que representa em torno de 15 a 20% do volume total do concreto no estado fresco, proporciona uma alteração significativa na porosidade do concreto. Quando a relação água/cimento exceder a 0,38, em massa, nem toda a água será consumida, gerando uma alteração significativa na permeabilidade da mistura (DAY, 2006).

Em todos os tipos de concreto a permeabilidade do material depende do sistema de poros e de sua distribuição interna, dependendo da composição química e mineralógica da matriz cimentícia (ROUX; ANDRADE; SANJUAN, 1996).

A estrutura dos poros, sua distribuição interna e seu diâmetro interferem significativamente na durabilidade do material. Roux, Andrade e Sanjuan (1996)

mostram que a quantidade de poros e seus respectivos diâmetros variam para cada tipo de concreto, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Quantidades e diâmetros de poros em concretos de classe de resistência C30 e C80 e em UHPC de 200 MPa com e sem aplicação de cura térmica



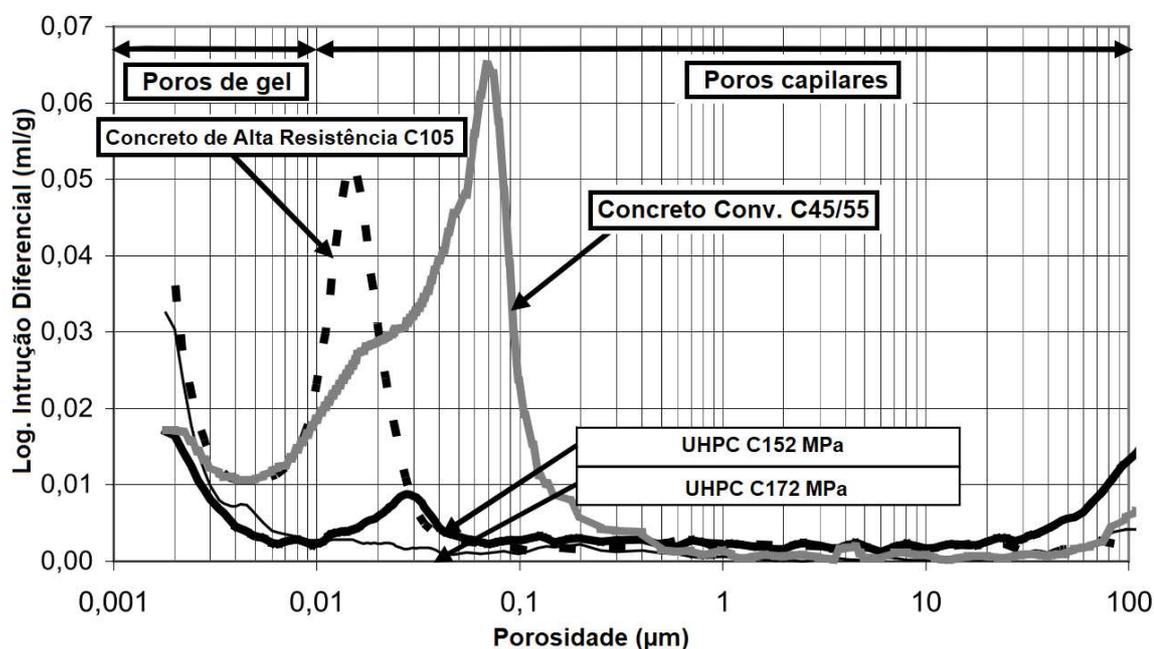
Fonte: Roux; Andrade; Sanjuan (1996, p.02).

A presença de vazios no concreto pode ser provinda de diferentes situações, como da falta de continuidade dos grãos, ou da incorporação de ar durante o processo de mistura dos constituintes, entre outros. Estes vazios são determinantes para a durabilidade do concreto. (HEROLD; MÜLLER, 2004).

A aplicação de cura térmica no UHPC melhora as propriedades mecânicas e as reações de hidratações dos silicatos e aluminatos presentes no composto, bem como a formação dos silicatos hidratados proveniente da reação secundária do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e das pozolanas ricas em silício.

A Figura 21 traz uma comparação realizada pelos pesquisadores Fehling et al. (2004), na qual pode-se identificar a diferença entre a porosidade de concretos convencionais, CAR e UHPC. Cabe ressaltar que, dentro da porosidade de um material, há poros capilares e poros de gel, os quais não influenciam na durabilidade do concreto.

Figura 21 - Distribuições dos tamanho de poros e volumes de poros de UHPC com e sem aplicação de cura térmica no material



Fonte: Fehling et al. (2004 p.61).

Poros de gel são tão pequenos que os agentes agressivos não conseguem migrar por eles, ao contrário dos poros capilares. Com isso, é possível notar que os concretos de resistências de 45/55 MPa possuem uma distribuição de poros maior do que os CAR. Porém, a distribuição de poros capilares é extremamente reduzida nos UHPC.

2.6 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Um dos grandes diferenciais das estruturas confeccionadas com UHPC, é a inexistência de armadura passiva. A propriedade estrutural do UHPC não segue os mesmos limites de deformação que tradicionalmente se usa para o dimensionamento de estruturas de concreto armado. As propriedades do UHPC podem ser comprovadas através de testes estruturais em grande escalas, demonstrando o desempenho estrutural do material (BEN GRAYBEAL, 2011).

Para que se possa utilizar de forma eficiente o UHPC, nas mais diferentes situações, é preciso criar novas recomendações de comportamento para este tipo de material. Muitas estruturas executadas com o UHPC foram dimensionadas através da comprovação do atendimento das solicitações calculadas com a realização de

ensaio no elemento em tamanho real (CRANE, 2010). A Figura 22 mostra uma estrutura sendo ensaiada.

Figura 22 - Viga confeccionada com UHPC, sendo ensaiada em tamanho real



Fonte: Crane (2010, p. 121).

Antes do ano de 2013, o dimensionamento dos elementos estruturais confeccionados com UHPC era feito pelo atendimento da resistência do material ser maior do que as solicitações internas, em função das cargas existentes (TOUTLEMONDE; RESPLENDINO, 2013).

O dimensionamento de elementos estruturais confeccionados com UHPC foi estudado pela Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC, 2013). A associação estabeleceu parâmetros para o seu dimensionamento, baseados no Eurocode 2 e nas propriedades mecânicas do composto em seu estado limite de serviço (ELS) e no estado de limite último (ELU). O documento publicado pela associação (AFGC, 2013) apresenta o comportamento mecânico do material, tendo sido definida uma lei comportamental do composto referente às propriedades mecânicas.

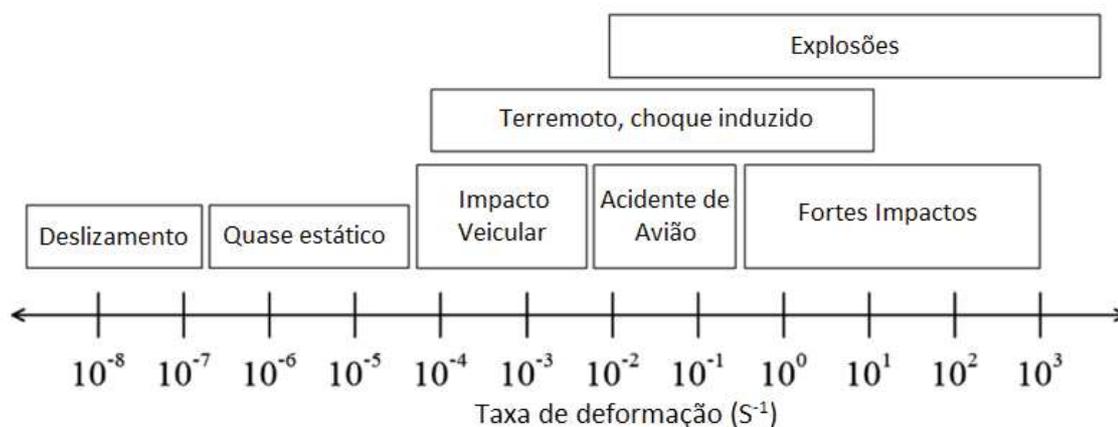
Nos elementos estruturais confeccionados com o UHPC pode não ser utilizada qualquer tipo de armadura passiva ou ativa. A elevada resistência mecânica, aliada à elevada ductilidade, faz com que o material não necessite de armadura em alguns casos. A não utilização das armaduras passivas faz com que

seja possível a confecção de elementos com formas variadas (TOUTLEMONDE; RESPLENDINO, 2013).

A ductilidade do UHPC é uma das propriedades mecânicas que mais se difere dos demais concretos. A absorção de energia do material, devido à grande capacidade do UHPC em se deformar e resistir a um determinado carregamento, torna o material propício para resistir aos efeitos de cargas dinâmicas e de impactos como de projeteis ou explosões (THOMAS; SORENSEN, 2017).

O estudo das deformações do concreto é muito importante quando se trata do dimensionamento do material. Todas as estruturas de concreto se deformam e estas deformações causam fissuras e danos estruturais, além da perda de durabilidade. Segundo Thomas e Sorensen (2017, p. 847), as taxas de deformações em estruturas de concreto variam em função do tipo de carregamento e podem variar na ordem de 10^{-8} (s^{-1}) a 10^3 (s^{-1}). Os intervalos das taxas de deformações típicas em função do tipo de carregamento são apresentados pelos autores na Figura 23.

Figura 23 - Faixas de taxa de deformação típicas para estruturas de concreto



Fonte: Thomas e Sorensen (2017, p. 847).

Pode-se perceber que as deformações apresentadas pelas estruturas em condições normais de utilização estão submetidas a uma deformação negativa (faixa de deformação de 10^{-7} a 10^{-4} s^{-1}).

Segundo Fehling et al. (2014, p. 66), a análise estrutural dos elementos a serem dimensionados com o UHPC segue o mesmo raciocínio utilizado para os demais tipos de concreto. O conhecimento de algumas características específicas

do material e a utilização de coeficientes de segurança são empregados com relação ao material e ao carregamento.

Os autores ainda apresentam os coeficientes a serem empregados no projeto e no dimensionamento dos elementos estruturais, utilizando o UHPC, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores de segurança parciais γ_m para determinar a resistência final no estado limite último do UHPC

	Coefficientes de projeto	
	Permanentes e variáveis	Acidentais
Resistência à compressão		
Alta qualidade	$\gamma_c = 1,35$	$\gamma_c = 1,15$
Qualidade normal	$\gamma_c = 1,5$	$\gamma_c = 1,3$
Qualidade não satisfatória	$\gamma_c = 1,2$	
Resistência à tração		
Situações Normais	$\gamma_{cf} = 1,5$	$\gamma_{cf} = 1,3$
Situações Específicas	$\gamma_{cf} = 2,0$	$\gamma_{cf} = 1,5$
Aço utilizado como reforço ou protensão	$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,0$

Fonte: Fehling et al. (2014, p. 67).

O UHPC, quando submetido a um carregamento, apresenta um comportamento superior aos concretos reforçados com fibras, devido a grande quantidade de pequenas fibras presente na mistura e às dimensões dos constituintes (KHAN; ABBAS; FARES, 2017).

Os elementos estruturais estão submetidos a diversos esforços, como o cisalhamento. Vigas e lajes apresentam diferentes princípios quanto estes esforços, devido, principalmente, as variações das dimensões. Estudos desenvolvidos na Universidade de Kassel, na Alemanha evidenciaram que o cisalhamento é um dos pontos fracos quando os elementos projetados possuem apenas armadura passiva longitudinal (FEHLING et al., 2014).

2.7 MÉTODOS DE DOSAGEM

Uma dosagem de concreto visa encontrar a proporção ideal dos constituintes de uma mistura para que algumas propriedades e princípios sejam garantidos, tais como viabilidade econômica, trabalhabilidade, homogeneidade, resistência mecânica, durabilidade, retração por secagem, fluência, entre outros (COLLEPARDI; COLLEPARDI; TROLI, 2007).

Ao desenvolver uma mistura de um concreto, todas estas propriedades influenciam no custo do concreto. O aumento do custo do concreto deve ser avaliado no momento da dosagem.

O conhecimento sobre as proporções dos constituintes dos concretos e argamassas até o século XIX era limitado ou praticamente nenhum. Pesquisadores como *Louis J. Vicat*, *René Ferét*, *Duff A. Abrams*, entre outros, desenvolveram e apresentaram as primeiras leis e comportamentos constitutivos com relação à mistura de compostos formados por cimentos hidráulicos e agregados (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Diante do conhecimento das leis e comportamentos constitutivos com relação à mistura de compostos (TUTIKIAN; HELENE, 2011), foram estabelecidas leis constitutivas, surgindo os métodos de dosagem de concreto que se possui atualmente.

Há, atualmente, métodos de dosagem baseados em parâmetros e realizados por programas experimentais para definição de uma determinada composição de materiais, obtendo respostas como resistência mecânica, abatimento, consumo de cimento, relação água/cimento ou qualquer outra informação pertinente.

O Comitê 211 do ACI (*American Concrete Institute*) apresenta algumas recomendações que baseiam o método de dosagem proposto pelo próprio ACI (GONZÁLEZ, 1993).

As leis clássicas e fundamentais do comportamento dos concretos são os principais parâmetros nos métodos de dosagem. Estas leis, por exemplo, definem que a resistência de um concreto em uma determinada idade (f_{cj}) é inversamente proporcional à relação água/cimento (a/c) e pode ser expressa pela equação (1).

A consistência do concreto fresco depende da quantidade de água adicionada em uma mistura, sendo a proporção do cimento e dos agregados fixas, e pode ser

expressada pela equação (2). E o consumo do cimento varia na proporção inversa da relação de agregados/cimento, conforme a equação (3) (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2 \frac{a}{c}} \quad (1)$$

$$m = k_3 + k_4 * \frac{a}{c} \quad (2)$$

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 * m} \quad (3)$$

Em que:

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

m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg;

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

C = consumo de cimento por m³ de concreto adensado em kg/m³;

*k*₁, *k*₂, *k*₃, *k*₄, *k*₅ e *k*₆ são constantes particulares de cada conjunto de mesmos materiais.

Algumas outras propriedades podem ser requeridas para complementar os métodos, como a consistência da mistura, tamanho máximo dos agregados, tipo de agregado entre outros (GARCIA, 2004).

O desenvolvimento de um concreto por diferentes métodos de dosagem visa encontrar uma proporção ideal de agregado graúdo e argamassa, sendo ainda necessário fixar alguns parâmetros como quantidade de cimento, relação *a/c* entre outras necessidades específicas (COLLEPARDI; COLLEPARDI; TROLI, 2007).

Os processos de mistura e os métodos de dosagem dos concretos evoluem como todas as novas tecnologias. Novos materiais são incorporados nos compostos, tais como fíler calcário, metacaulim, sílica ativa, cinza volante, entre outros.

A introdução destes materiais pode, se dosados adequadamente, proporcionar um desempenho superior, devido, principalmente, à reação química gerada entre estes componentes e o hidróxido de cálcio gerado na hidratação dos compostos do cimento (TORREGROSA, 2013).

2.7.1 Aspectos importantes para dosagem do UHPC

De Larrard e Sedran desenvolveram um método para otimizar o esqueleto granular dos materiais não aglomerantes das misturas, conhecido como o modelo de empacotamento granular (DE LARRARD; SEDRAN, 1994). Este método é constituído por dois procedimentos, um é o empacotamento determinado através de modelo matemático e o outro é obtido através de um procedimento físico de adensamento dos grãos.

Mesmo com os estudos para obter uma proporção ideal dos constituintes, muitas vezes se alcançava um UHPC com um consumo de cimento muito elevado, chegando a 1500 kg/m^3 , e este consumo gerou grande insatisfação por parte dos ambientalistas (SOLIMAN, 2016).

As dosagens de UHPC são predominantemente empíricas, tendo sido abordadas em diversos estudos (CHRIST, (2014); FORMAGINI, (2005); PEREIRA DE OLIVEIRA et al., (2013); TORREGROSA, (2013); TOUTLEMONDE; RESPLENDINO, (2011); WILLE; BOISVERT-COTULIO, (2015);). Tais estudos, através da escolha adequada dos constituintes, buscaram a melhor proporção com base em alguns princípios, que são:

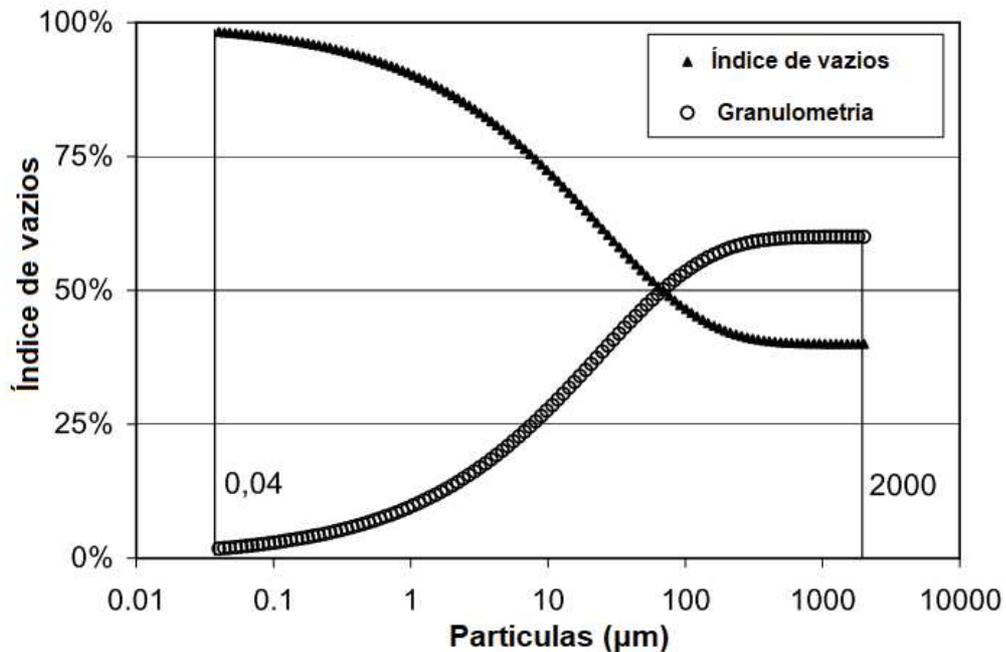
- ✓ obter a máxima compacidade granular;
- ✓ adotar reduzido consumo de água na mistura;
- ✓ adicionar aditivos para melhorar a trabalhabilidade;
- ✓ incorporar fibras na mistura para aumentar a resistência à tração.

Seguindo estes princípios, busca-se a máxima compacidade para se obter o menor volume de vazios. É preciso que os materiais empregados no composto tenham uma distribuição granulométrica mais variada possível.

Fehling et al. (2014) descrevem que o primeiro passo para a obtenção de uma mistura de UHPC é a escolha correta de materiais ultra finos, pois a partir desta premissa é possível obter-se uma mistura com máxima compacidade e baixa porosidade.

Geisenhanslüke (2008) apresenta a Figura 24, na qual evidencia-se que misturas com um único diâmetro de grãos apresentam maior índices de vazios, ou seja, é importante combinar agregados com diferentes tamanhos e distribuições granulométricas para obter máxima compacidade.

Figura 24 – Relação entre tamanho dos grãos e índice de vazios de uma mistura



Fonte: Geisenhanslüke (2008, p.34).

Hüsken e Brouwers (2008) constataram que a quantidade de finos a ser incorporada nas misturas deve ser limitada, porém este limite depende da distribuição granulométrica dos demais constituintes. A presença de um grande percentual de finos acaba demandando uma maior quantidade de água, o que fará com que o traço tenha sua durabilidade prejudicada, devido ao aumento da relação água/cimento.

É possível evidenciar que, quanto mais fino o agregado, maior é o índice de vazios da mistura. Com um tamanho de partícula de 0,04 micrômetros, o índice de vazios aproximado é de 98,3%. Ocorre um aumento de 40% no índice de vazios em relação a uma mistura com partículas de tamanho de 2000μm, com o índice de vazios de 58,3%.

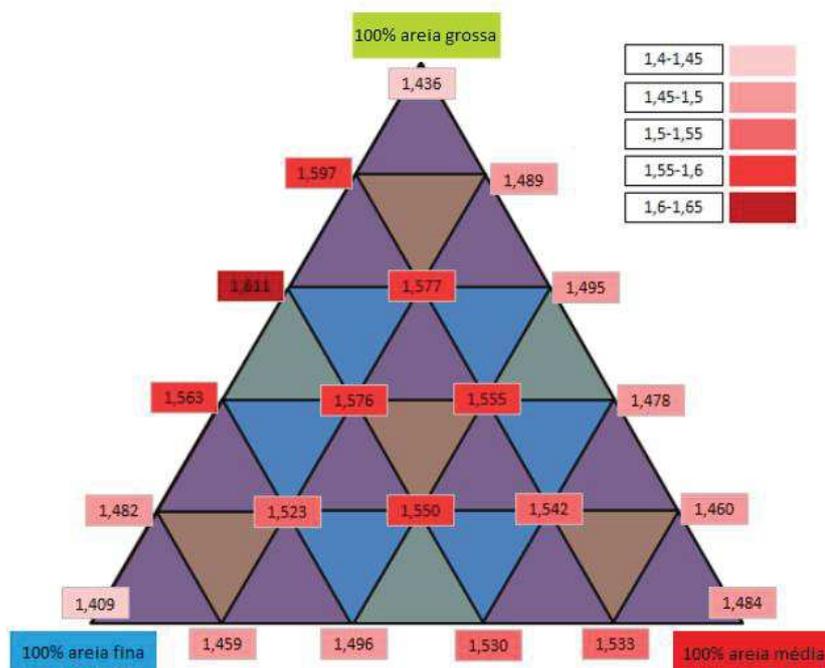
O estudo de dosagem dos UHPC passa por uma avaliação da qualidade (origem, dureza, material orgânico) dos materiais a serem empregados, bem como a sua distribuição granulométrica. O comportamento do UHPC também segue as mesmas leis fundamentais do concreto convencional, sendo que a relação água/cimento interfere diretamente na resistência mecânica do composto (FEHLING et al., 2014).

2.7.2 Desenvolvimento dos traços em diferentes estudos

A busca por um traço de UHPC deve atender algumas premissas. Diversos estudos de dosagem de diferentes tipos de concretos, como CAA e CAR, foram realizados visando desenvolver um novo método para obtenção das proporções ideais dos constituintes (ALRIFAI et al., 2010; KHOKHAR et al., 2010; LIN; KARADELIS; XU, 2013; MANGULKAR; JAMKAR, 2013; NATARAJA; SANJAY, 2013). Há a busca por um determinado método para a determinação do empacotamento das partículas, visando uma mistura com maior compacidade possível. Pesquisas realizadas nos últimos anos propuseram um método para a obtenção de um traço de UHPC, como as propostas por Torregrosa (2013) e Yu, Spiesz e Brouwers (2014).

Torregrosa (2013) utiliza a técnica do Diagrama de Empacotamento Ternário (*Ternary Packing Diagram*) para desenvolver um método de dosagem de UHPC com fibras. O método consiste em elaborar uma mistura, na qual são introduzidas quantidades distintas de três materiais diferentes. À medida em que cada material é introduzido, a densidade da mistura é aumentada, até o momento em que esta densidade passa a ser menor devido ao aumento de vazios. A resposta obtida através deste método pode ser obtida através do ábaco da Figura 25.

Figura 25 - Diagrama de empacotamento ternária de três areias distintas



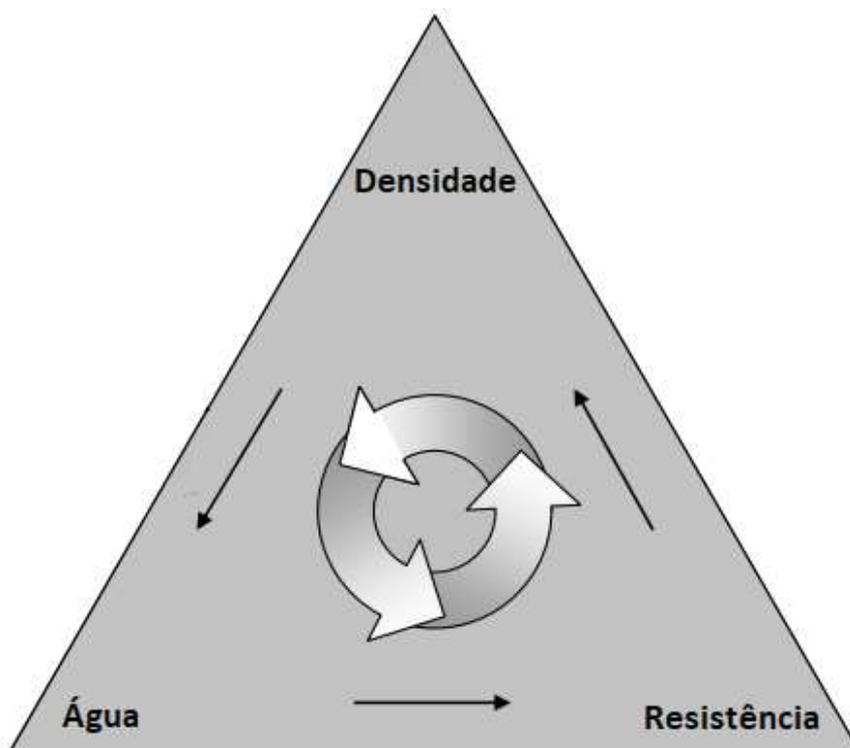
Fonte: Torregrosa (2013 p.149).

As três variáveis analisadas e expressas no diagrama ternário podem ser qualquer uma. A simplicidade do método ternário é evidente, traz benefícios como a melhora na reologia da mistura, conferindo uma trabalhabilidade maior. Todavia, tal método não é usualmente utilizado para a produção de UHPC, pois na elaboração da quantidade ideal de agregados não se contempla o cimento (TORREGROSA, 2013).

Yu, Spiesz e Brouwers (2014) propuseram um método de dosagem de UHPC reforçado com fibras. O método se baseia em dois princípios básicos, aumentar a compacidade da mistura granular e incorporar fibras. Os pesquisadores utilizaram a técnica do empacotamento das partículas proposto por Andreasen e Andersen (1930) modificado para obter uma matriz densa e com mínimo de vazios possível, sem considerar as fibras na mistura.

A utilização das relações entre o empacotamento das partículas e a demanda de água para obter uma mistura fluida e com determinada resistência foi desenvolvida por Fennis e Walraven (2012). Os autores realizaram um diagrama ternário para correlacionar a densidade da mistura com a demanda de água e a resistência à compressão, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Ilustração do gráfico ternário para determinação do traço do concreto



Fonte: Fennis e Walraven (2012 p.87).

O procedimento para determinar a mistura do concreto inicia-se pelo cálculo da densidade da mistura. A partir da determinação da perfeita densidade da mistura, se busca a perfeita quantidade de água a ser empregada e, por último, se tem a estimativa da resistência à compressão.

2.8 PROPRIEDADES IMPORTANTES DO ESTUDO DE DOSAGEM

Tratando-se da dosagem de UHPC, cabe atender algumas premissas relacionadas ao desempenho do material. Estas premissas são balizadas a partir dos conceitos fundamentais identificados por diversas pesquisas ABRISHAMBAF; PIMENTEL; NUNES, (2016); CAGGIANO et al., (2017); CHOI et al., (2016); HEROLD; MÜLLER, (2004); HÜSKEN; BROUWERS, (2008); KHOKHAR et al., (2010); OZTURK; ONAL, (2013); SOLIMAN, (2016).

Neste subcapítulo está apresentada a importância dos principais parâmetros que influenciam no desempenho do material e que servirão para fundamentar um estudo de dosagem de UHPC.

2.8.1 Empacotamento granular

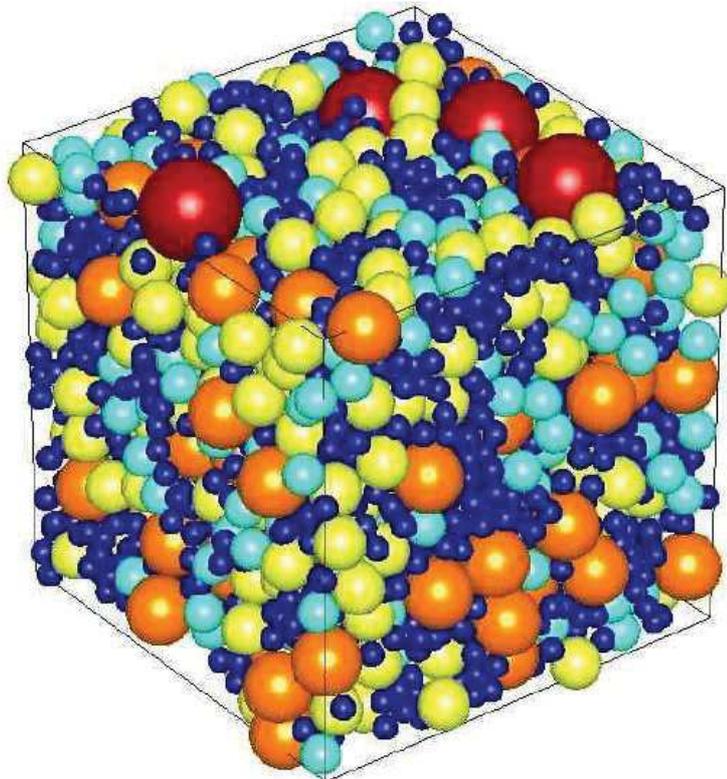
A inexistência de vazios de uma mistura de UHPC é sem dúvida um dos principais parâmetros almejado em sua dosagem. Para isso, desenvolver uma mistura com uma proporção adequada de cada tamanho de partícula em cada faixa granulométrica é o princípio do processo (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

A determinação das proporções de cada material em uma mistura acaba sendo o grande obstáculo a ser vencido. Os materiais empregados no UHPC são materiais de pequeno diâmetro, porém tendo uma faixa de granulometria ampla, o que ocasiona muitas vezes a sobreposição de diâmetros iguais em distintos materiais.

O empacotamento de partículas é utilizado em um amplo campo do conhecimento, como na indústria cerâmica, metalúrgica, farmacêutica e em outros ramos que tenham o pó como sua principal matéria prima (GUISES et al., 2009).

A Figura 27 ilustra o resultado de uma modelagem numérica de um empacotamento de partículas, na qual é possível perceber que as esferas menores preenchem os vazios deixados pelas maiores.

Figura 27 – Empacotamento granular de uma mistura



Fonte: Fidjestol, Thorsteinsen, Svennevig (2012).

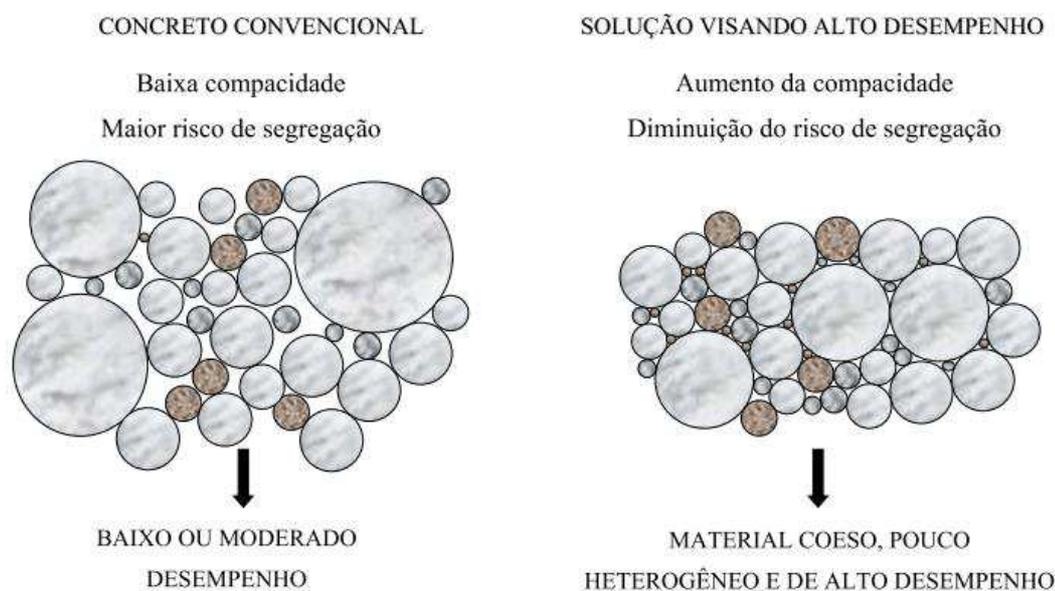
O conceito do empacotamento granular é de que um determinado volume seja preenchido por completo com diferentes tamanhos de grãos. O compósito que contém uma quantidade de materiais de diferentes origens e faixas granulométricas proporciona uma distribuição dos grãos, de forma que os grãos maiores são circundados pelos grãos menores, e assim o fechamento adequado entre os grãos é efetivado (JONES; ZHENG; NEWLANDS, 2002).

Existem diferentes maneiras de se conseguir o melhor empacotamento de uma determinada mistura, através de métodos experimentais ou de forma numérica, através de modelagem (FEHLING et al., 2014). Em ambas as situações se busca obter uma maior densidade e menor quantidade de vazios na mistura (CHRIST; TUTIKIAN; PACHECO, 2011).

A utilização de métodos de empacotamento das partículas na dosagem de concretos, visando uma maior resistência, é de fundamental importância. A utilização desta técnica possibilita a concepção de misturas com elevada compacidade, auxilia na homogeneidade da mistura, diminuindo a segregação do composto, e ajuda a baixar a relação água/cimento, que faz com que a mistura

tenha uma baixa porosidade (FORMAGINI, 2005). Na Figura 28 pode-se perceber a diferença entre uma mistura com diferentes compacidades.

Figura 28 – Misturas com diferentes compacidades em função do empacotamento granular da mistura



Fonte: Formagini (2005, p.8).

A utilização dos métodos de empacotamento de partículas passou a ser mais comum nos estudos de dosagem de concretos especiais, como os CAR, CAA e os UHPC. Os métodos de otimização granular podem ser divididos em três grandes grupos (FENNIS; WALRAVEN, 2012):

- ✓ curva granulométrica ótima – este grupo conta com métodos que determinam a quantidade ótima de cada faixa granulométrica das partículas que devem estar presentes em uma determinada mistura para que se obtenha o mínimo de vazios no composto;
- ✓ densidade da mistura – trata-se de métodos que se baseiam na determinação através de modelos analíticos das partículas presentes na mistura para a maior densidade possível. São utilizadas equações que determinam como as diferentes partículas e seus respectivos tamanhos e formas geométricas interagem;
- ✓ modelos virtuais de misturas – nestes modelos é gerada uma mistura aleatória dos vários tamanhos de materiais que existem e são colocados virtualmente em uma posição e o modelo considera que

estas não se movem. Este método ocorre em um espaço tridimensional como seria a melhor forma que as diversas partículas deveriam estar posicionadas para se ter a melhor mistura.

O empacotamento granular em uma mistura é de grande importância para as propriedades mecânicas e durabilidade de um concreto. Porém, não há apenas preocupação com relação ao tamanho do grão, dado que a forma e a textura de sua superfície também são de extrema importância (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

A obtenção de uma mistura com o mínimo índice de vazios, e por consequência uma baixa porosidade e elevada densidade, pode ser obtida por uma série de métodos. Existem modelos de empacotamento das partículas que podem ser binários, terciários, multi-modais ou contínuos, sendo que eles podem ser classificados como experimentais ou numéricos (TORREGROSA, 2013).

Os modelos mais utilizados para dosagem de concreto são os modelos multi-modal e contínuos. Métodos propostos por Fuller, Bolomey, Andreasen and Andersen são exemplos de métodos contínuos e método multi-modal são métodos como o proposto por De Larrard (LAPPA, 2007).

Alguns métodos para se obter um empacotamento das partículas não são eficazes para uma mistura ideal de UHPC, como o de Fuller e Bolomey (TORREGROSA, 2013). A equação (4) de Fuller não considera a utilização de agregados finos na mistura.

$$\frac{PAD}{100\%} = \sqrt{\frac{D}{D_{max}}} \quad (4)$$

Em que:

PAD = percentual acumulado do diâmetro avaliado

D = diâmetro a ser avaliado em mm

D_{max} = diâmetro da maior partícula em mm

Para que seja possível obter uma correta e elevada densidade da mistura deve-se considerar todos os tamanhos de partículas a serem inseridos. A presença de finos interfere diretamente na demanda de água e na trabalhabilidade do compósito. Assim, não considerar sua presença pode acarretar na imprecisão na dosagem de um UHPC (TORREGROSA, 2013).

Andreasen e Andersen, em 1930, desenvolveram um método através de estudos experimentais baseados no método de empacotamento de Fuller, porém acrescentaram na equação (5) um fator de ajuste “q”, que é o coeficiente de distribuição de intervalo de 0 a 1. Trivialmente, em misturas que possuem predominância de materiais finos abaixo de 250 µm, o valor do coeficiente deve ser menor (TORREGROSA, 2013). Esse fator de ajuste pode ser determinado experimentalmente, sendo que a mudança deste parâmetro serve para modificar a curva em função dos diâmetros das partículas presentes na mistura (FENNIS; WALRAVEN, 2012; ZHENG; JOHNSON; REED, 1990).

$$\frac{PAD}{100\%} = \frac{D^q}{D_{max}^q} \quad (5)$$

Em que:

PAD = percentual acumulado do diâmetro avaliado

D = diâmetro a ser avaliado em mm

Dmax = diâmetro da maior partícula em mm

q = coeficiente de distribuição

Décadas mais tarde, em 1980, Funk e Dinger verificaram que, para que uma mistura tenha uma máxima otimização granular, é necessário que se tenha uma determinada quantidade de finos. A partir disso, os pesquisadores modificaram a equação de Andreasen e Andersen e criaram uma equação que chamaram de Andreasen e Andersen modificado, equação (6) (WALKER, 2003).

$$\frac{PAD}{100\%} = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (6)$$

Em que:

PAD = percentual acumulado do diâmetro avaliado

D = diâmetro a ser avaliado em mm

Dmax = diâmetro da maior partícula em mm

Dmin = diâmetro da menor partícula em mm

q = coeficiente de distribuição

O coeficiente de distribuição utilizado nas equações interfere diretamente no formato da curva e, desta forma, a distribuição granulométrica ideal terá porcentagens distintas em cada diâmetro dos materiais. A utilização de coeficientes de distribuição maior de 0,30 apresenta maior potencial de resultados mecânicos para misturas obtidas através da curva de empacotamento (REGINATO et al., 2013).

A obtenção de uma estrutura granular sem a existência de vazios é uma das prioridades no desenvolvimento de um UHPC. A máxima compactidade de uma mistura pode ser determinada através dos métodos apresentados e que são de fácil utilização.

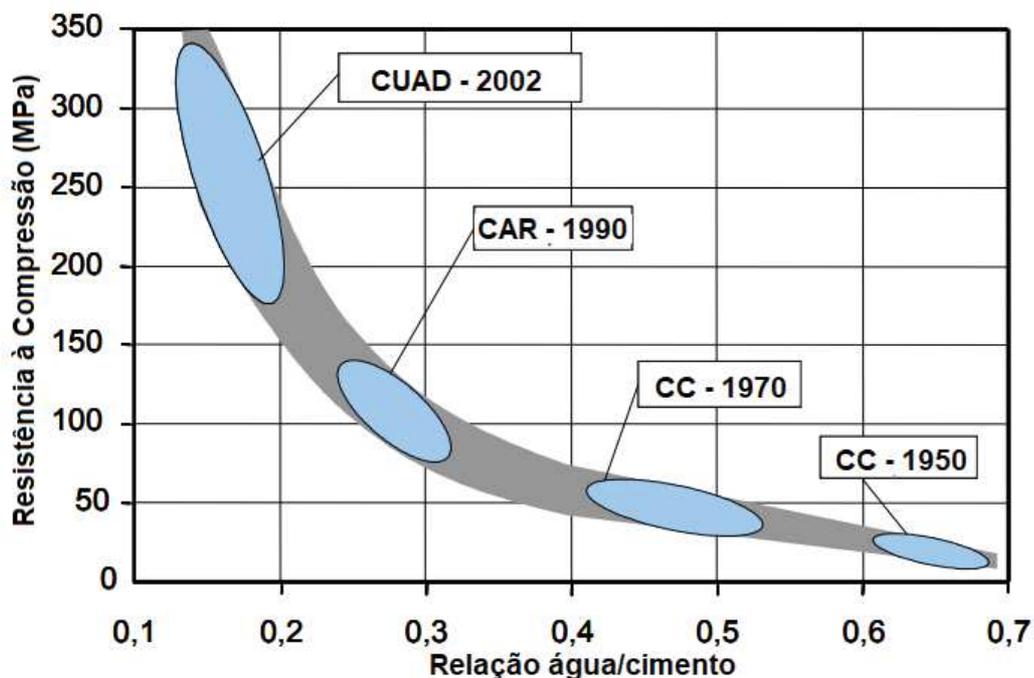
2.8.2 Relação água/cimento

As excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade que o UHPC possui estão relacionadas com a quantidade de água em sua composição. A água a ser introduzida em uma mistura tem duas funções primordiais em um traço, de enchimento e ficando absorvida nas partículas (CWIRZEN; PENTTALA; VORNANEN, 2005). A demanda da água em misturas de concreto é bastante complexa, pois como ela interfere nas propriedades finais do composto, a sua determinação exata é fundamental (GEISENHANSLÜKE; SCHMIDT, 2004).

O conhecimento e o desenvolvimento de novos compósitos permitiram que fossem criados materiais com maior capacidade de resistir às solicitações previstas. Este avanço se deu graças à possibilidade de se reduzir drasticamente a quantidade de água nas misturas cimentícias (MÜLLER, 2006).

A redução da introdução de água nas misturas só é possível devido ao avanço dos aditivos, sem o avanço destes materiais o avanço dos concretos não seria possível. A redução da água foi gradual, sendo possível desenvolver vários novos tipos de concreto e com propriedades mecânicas e reológicas distintas. A Figura 29 apresenta esta evolução dos concretos e da redução de água nas misturas ao longo do tempo.

Figura 29 – Comparativo das relações água/cimento em diferentes tipos de concretos. (CC-Concreto Convencional; CAR-Concreto de Alta Resistência; UHPC - Concreto de Ultra Alto Desempenho)



Fonte: Müller (2006).

A quantidade de água a ser incorporada na mistura não apenas interfere na resistência mecânica do material, mas também impacta na trabalhabilidade da mistura, propriedade compensada com a utilização de aditivo superplastificantes (EUGEN BRÜHWILER; EMMANUEL DENARIÉ, 2008). Devido à baixa quantidade de água presente no UHPC, a quantidade de aditivos superplastificantes a serem inseridos é de grande importância para garantir o comportamento reológico desejado (EDEN, 2010).

O momento da introdução do aditivo ao concreto e o tempo de mistura interferem nas propriedades reológicas e na porosidade do material, afetando sua resistência mecânica (TUE; ORGASS; MA, 2008).

A influência da sequência de mistura do UHPC, principalmente com relação à introdução do aditivo superplastificante, foi estudada pelos pesquisadores Tue, Orgass, Ma (2008). Para isso, se desenvolveu um programa com três misturas, modificando-se a adição do aditivo superplastificante.

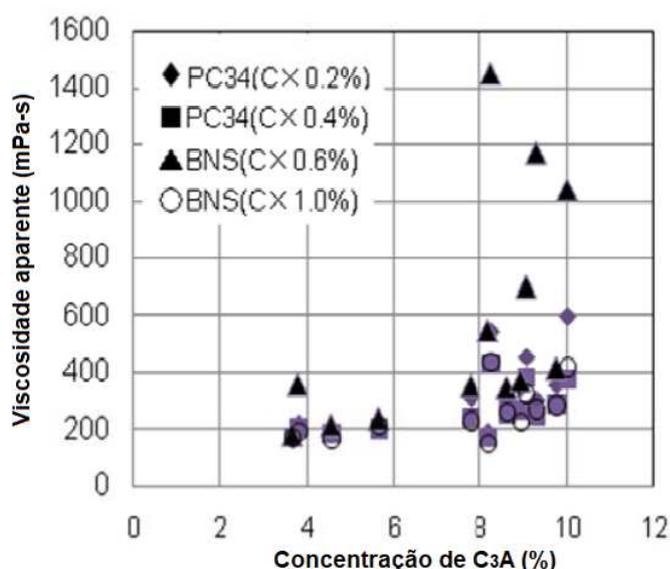
Uma mistura foi desenvolvida incorporando todo o aditivo superplastificante com a água, outra o adicionou o em pequenas doses após a adição da água, e a

última adicionou o aditivo ao final da água em um tempo maior de mistura. Os resultados apresentados pelos pesquisadores mostraram que a fluidez e a viscosidade da mistura foram melhoradas quando se acrescentou doses graduais de superplastificante na mistura, sendo que quanto mais tarde a introdução do aditivo melhor foi seu desempenho.

A introdução de aditivos superplastificantes na matriz cimentícia é de suma importância para garantir a reologia da pasta. Porém, a quantidade a ser introduzida e a sua interação com os tipos de cimento é de grande importância.

Um dos principais compostos presentes nos cimentos, que afeta diretamente a eficiência dos aditivos, é o aluminato tricálcico (C_3A). Estudos desenvolvidos por Etsuo et al. (2008) mostram a relação entre o teor de C_3A e a viscosidade aparente do composto. A Figura 30 mostra que a viscosidade aparente variou muito para os cimentos com concentrações de C_3A superiores a 8%.

Figura 30 – Viscosidade aparente em função da concentração de C_3A do cimento



Fonte: Etsuo et al. (2008 p. 88).

Como é possível perceber, os concretos que apresentavam teores acima de 8% de C_3A apresentaram uma maior viscosidade aparente, não apresentando boa fluidez.

A falta de água pode causar perda de fluidez da mistura, ineficiente hidratação dos compostos do cimento e a não reação do aditivo superplastificante com o cimento, entre outras (SOLIMAN, 2016).

2.8.3 Teor de aglomerante

Tradicionalmente, os concretos com maior resistência possuem um maior consumo de cimento. Efetivamente o cimento é o material que proporciona a resistência nos compostos, porém, em muitos casos, além da quantidade necessária, há a presença de cimentos anidros no composto.

O consumo de aditivo superplastificante em concretos está ligado diretamente à concentração do composto C₃A, sua finura e área superficial (WANG et al., 2015). Os cimentos apresentam compostos químicos tradicionais, porém, dependendo da matéria prima utilizada e variáveis na produção, pode haver variações destes constituintes. A Tabela 5 mostra as variações encontradas em seis diferentes tipos de cimento belgas com relação aos compostos químicos tradicionalmente encontrados, sua respectiva finura e área superficial, destacando a quantidade de C₃A.

Tabela 5 - Composição química e física de seis tipos de cimentos belgas

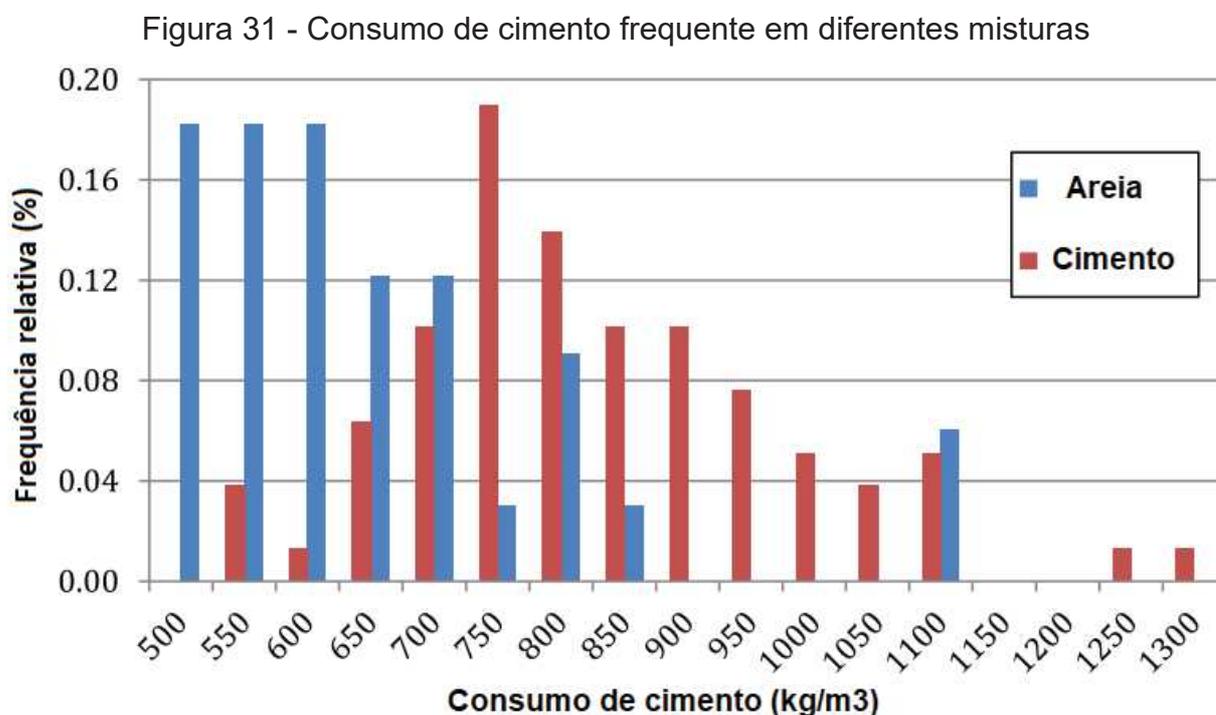
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
SiO₂	21,4	21,35	21,48	20,90	21,03	21,24
Al₂O₃	3,60	3,58	3,61	3,64	4,06	3,87
Fe₂O₃	4,20	4,09	4,20	5,19	5,06	5,18
CaO	63,20	64,25	63,37	63,68	63,86	64,11
MgO	2,00	1,77	1,64	0,77	1,06	0,95
SO₃	2,90	2,64	2,54	3,03	1,75	2,30
Na₂O	0,15	0,17	0,17	0,17	0,25	0,18
K₂O	0,54	0,50	0,56	0,63	0,59	0,52
Blaine (cm²/g)	5600	3490	4392	3975	3300	4300
d₅₀(µm)	9,90	18,59	13,08	10,40	16,27	11,27
C₃S	56,12	57,74	57,16	59,82	60,58	59,53
C₂S	19,10	17,74	18,55	14,88	14,68	16,07
C₂S+C₃S	75,22	75,48	75,71	74,70	75,26	75,60
C₃A	2,44	2,57	2,47	0,87	2,21	1,50
C₄AF	12,80	12,40	12,80	15,80	15,40	15,70
C₃A-spec.surf.(cm²/g)	136,75	89,86	108,42	34,78	72,85	64,56

Fonte: Dils, Boel, De Schutter (2013 p.456).

Na pesquisa de Dils, Boel, De Schutter (2013) foi percebido que a quantidade de C₃A, a quantidade de álcalis (K₂O, Na₂O), SO₃ e a granulometria interferem no desempenho do UHPC.

A quantidade de cimento presente nas misturas de UHPC é superior a dos CAR (CHASIOTI; VECCHIO, 2017; CHRIST, 2014; TOUTLEMONDE; RESPLENDINO, 2013; WANG et al., 2015; WILLE; NAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011). O consumo de cimento neste tipo de concreto é na ordem de 700 a 1200 kg/m³. Este aumento considerável de cimento proporciona uma grande variação em relação ao calor de hidratação e na retração autógena do concreto (TORREGROSA, 2013).

Torregrosa (2013) buscou em 112 pesquisas o consumo de cimento utilizado, visando traçar um panorama envolvendo misturas desenvolvidas em vários países. A Figura 31 mostra este espectro do consumo de cimento e de areia utilizada nas pesquisas realizadas.



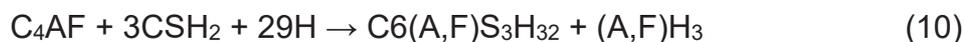
Fonte: Torregrosa (2013 p. 42).

Para que todo o cimento presente em uma mistura seja completamente hidratado, a relação água/cimento deve ser superior a 0,42 (HABEL et al., 2006). Os UHPC apresentam baixa relação água/cimento, como já apresentado no item 2.6.2. Considerado a relação água/cimento normalmente usada dos UHPC, de 0,20, cerca de apenas 26% do cimento realmente pode ser hidratado (BONNEAU et al., 2000).

Considerando que apenas 26% do cimento é de fato hidratado, o elevado consumo não se justifica. Parte do cimento inserido na mistura será utilizado apenas

como filler, sendo possível a utilização de um material de mesma granulometria porém mais barato e com processos produtivos que não agredam o meio ambiente. Estudos visando desenvolver UHPC com menor consumo de cimento foram desenvolvidos, onde se chegou em resistências à compressão de 200 MPa com consumo de cimento de 250 kg/m³ (CHRIST, 2014; YUNSHENG et al., 2008).

Os principais compostos presentes nos cimentos (silicatos e aluminatos) responsáveis pela resistência mecânica, quando hidratados, geram reações químicas conforme apresentadas nas equações, onde tem-se na sequência das mesmas a equação da hidratação do silicato tricálcico (Equação 7), equação da hidratação do silicato dicálcico (Equação 8), equação da hidratação do aluminato tricálcico (Equação 9) e equação de hidratação do ferroaluminato tricálcico (Equação 10) (JOLICOEUR; SIMARD, 1998).



As reações provocadas pela hidratação do cimento são compostas por fases, sendo que cada fase possui uma reação específica com a água. A hidratação do cimento gera vários compostos, porém, dois compostos químicos são os principais, os silicatos hidratados e o hidróxido de cálcio. Os silicatos são responsáveis pela resistência do concreto, enquanto que os hidróxidos de cálcio são responsáveis pela conservação do pH elevado da mistura, promovendo a passivação das armaduras (CINCOTTO, 2011).

A adição de pozolanas em concretos gera grandes benefícios, tanto químicos como físicos. As pozolanas entram em contato com o hidróxido de cálcio gerado no processo de hidratação dos silicatos e aluminatos, formando produtos hidratados hidráulicos que melhoram o desempenho mecânico do material, por apresentarem estrutura muito parecida com os silicatos formados na hidratação do cimento, onde a Equação 11 apresenta a equação de hidratação da pozolana em função do hidróxido de cálcio.



A incorporação de materiais com elevado teores de sílica amorfa é uma forma de se buscar um aumento das propriedades mecânicas e de durabilidade de uma matriz cimentícia. A incorporação de materiais com elevado teores de sílica amorfa podem ser realizado a partir do cálculo estequiométrico das reações de hidratação de cimento e assim encontrar a quantidade de hidróxido de cálcio que de fato irá reagir com a sílica amorfa. Porém para que a reação ocorra, é necessário a presença de água, o que muitas vezes, pelo fato de a matriz ter uma baixa quantidade de água isso não é possível.

Além disso, tem-se a diminuição no calor de hidratação e na porosidade do composto e aumento de resistência mecânica em idades mais avançadas. A otimização de uso desses materiais pode ser realizada com o emprego do cálculo estequiométrico.

A partir da determinação correta da quantidade de hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, pode-se obter a quantidade de pozolana a ser inserida na mistura, sabendo a quantidade de materiais silicosos e silicoaluminosos da pozolana (PAPADAKIS, 1999).

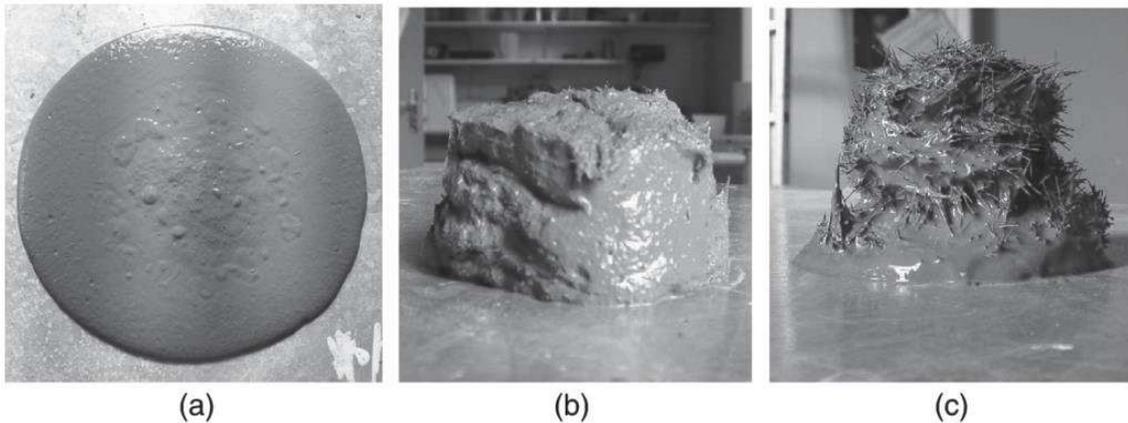
A cinza volante é uma pozolana bastante utilizada em misturas de concreto, tratando-se de um material provindo da produção de energia térmica. A cinza volante atua como um lubrificante dentro da mistura, devido a esfericidade dos grãos, ajudando a melhorar a reologia do concreto no seu estado fresco (ZENG et al., 2012).

2.8.4 Métodos de dosagem de fibras

Martinie, Rossi e Roussel, (2010) mostram que há uma relação entre a fração volumétrica (\emptyset_{fm}) das fibras e a trabalhabilidade do concreto. Os autores descrevem que se a quantidade de fibras apresentar uma fração volumétrica inferior a $\emptyset_{fm} = 3,2/r$ onde r é o fator de forma da fibra, a interferência no comportamento reológico da matriz é desprezível, como pode ser evidenciado na Figura 32 (a). Já para fração volumétrica próximas a $\emptyset_{fm} = 3,2/r$, a trabalhabilidade começa a ser prejudicada, Figura 32 (b).

E para fração volumétrica superiores a $\emptyset_{fm} = 3,2/r$, a trabalhabilidade é totalmente comprometida, Figura 32 (c). Para valores de \emptyset_{fm} superiores a 4 o concreto não apresenta mais trabalhabilidade e se torna um material não utilizável.

Figura 32 - Consistência de uma pasta de cimento misturada com fibras com várias proporções. (a) $\emptyset_{fm} = 0,18$; (b) $\emptyset_{fm} = 0,83$; (c) $\emptyset_{fm} = 1,02$



Fonte: Martinie, Rossi e Roussel, (2010 p. 229).

As fibras acabam ocupando um volume superior ao seu volume efetivo. Este volume pode ser determinado pela equação (12, sendo que a fração volumétrica das fibras depende do volume total de fibras e a relação entre seu comprimento e diâmetro.

$$x_f = V_f * \frac{l_f}{d_f} \quad (12)$$

Em que:

x_f = fração volumétrica das fibras

V_f = volume total de fibras

l_f = comprimento efetivo das fibras

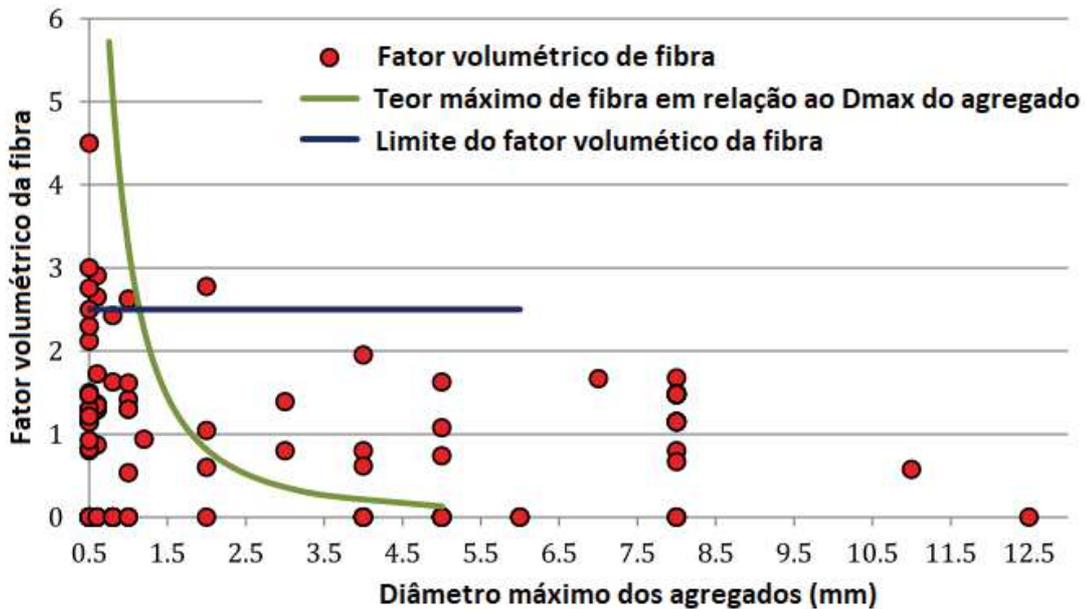
d_f = diâmetro efetivo das fibras

Outro fator que influencia diretamente na orientação das fibras e nas propriedades do concreto é o diâmetro máximo do agregado. Há um limite entre a relação da fração de volume de fibras e o diâmetro máximo dos agregados da mistura, para que não ocorra um acúmulo de fibras (TORREGROSA, 2013).

A Figura 33 mostra a relação entre estas variáveis, sendo que a linha verde traz os valores ideais, fração volumétrica e o diâmetro máximo do agregado em

misturas de concreto. Segundo estas definições, só as dosagens de fibras que ficarem sob as linhas verde e azul terão um desempenho aceitável.

Figura 33 - Fator de volume de fibra relacionado com o diâmetro máximo agregado



Fonte: Torregrosa (2013 p. 50).

A incorporação de fibras afeta na densidade da mistura. A utilização de apenas areia faz com que a fibra seja totalmente envolvida com o material, diferente do que acontece com misturas com agregados graúdos (MARTINIE; ROSSI; ROUSSEL, 2010).

Com relação a este princípio, Martinie, Rossi e Roussel (2010) propuseram a equação (13, através da qual é possível determinar a quantidade de fibras em função de suas características e dos agregados.

$$\phi_{fmax} = \frac{400}{r} * \left(1 - \frac{\phi_s}{\phi_m} \right) \quad (13)$$

Em que:

ϕ_{fmax} – Teor máximo de fibras;

r – relação entre o comprimento e diâmetro da fibra;

ϕ_s – fração de volume de areia da dosagem;

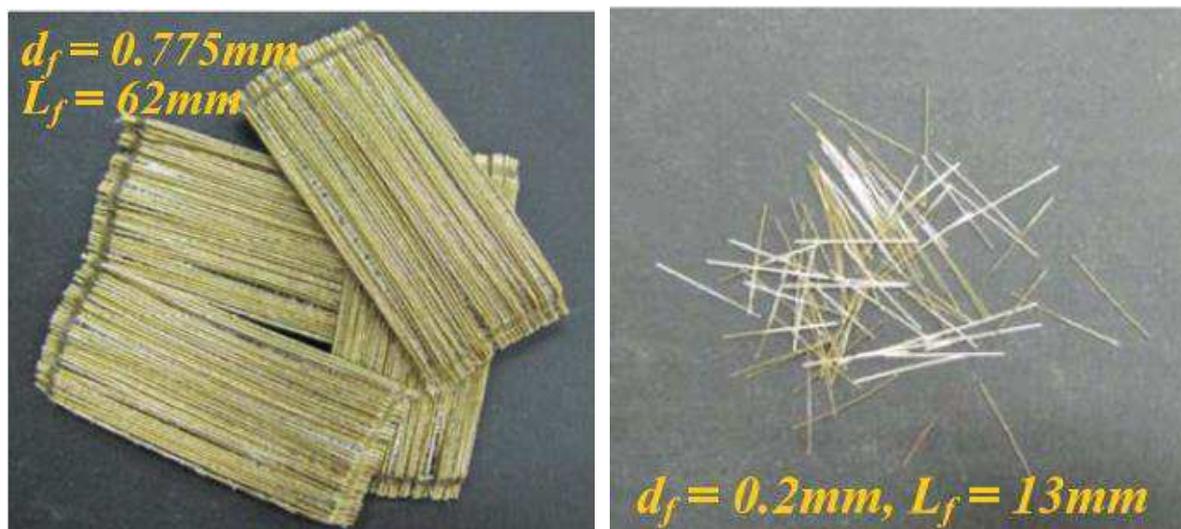
ϕ_m – fração de embalagem densa da mistura.

A equação 12 foi desenvolvida para misturas que em o agregado graúdo está presente. Os autores recomendam que a razão entre $\varnothing_s / \varnothing_m$ não seja maior do que 0,8. Assim, o concreto atinge o maior potencial quanto à trabalhabilidade e resistência mecânica do material. O resultado desta razão depende do peso específico do concreto e a massa unitária da areia.

Esta teoria aplica-se apenas para a inserção de um tipo de fibra. Porém, muitas pesquisas já foram realizadas mostrando os benefícios de se utilizar mais do que um tipo de fibra para melhorar as propriedades mecânicas do concreto (CHASIOTI; VECCHIO, 2017; CHELLAPANDIAN; SURIYA PRAKASH; SHARMA, 2017; CHRIST, 2014; PARK et al., 2012; QUININO, 2015; SHIN; MIN; MITCHELL, 2017; YOO; KIM; PARK, 2017).

Estudo desenvolvido por Kim et al. (2011) mostra a melhora nas propriedades mecânicas em uma mistura de UHPC com a hibridização das fibras metálicas. Os autores desenvolveram uma pesquisa com fibras metálicas de fator de forma distintos, conforme a Figura 34.

Figura 34 – Fibras metálicas utilizadas na pesquisa (d_f – diâmetro; L_f – comprimento)

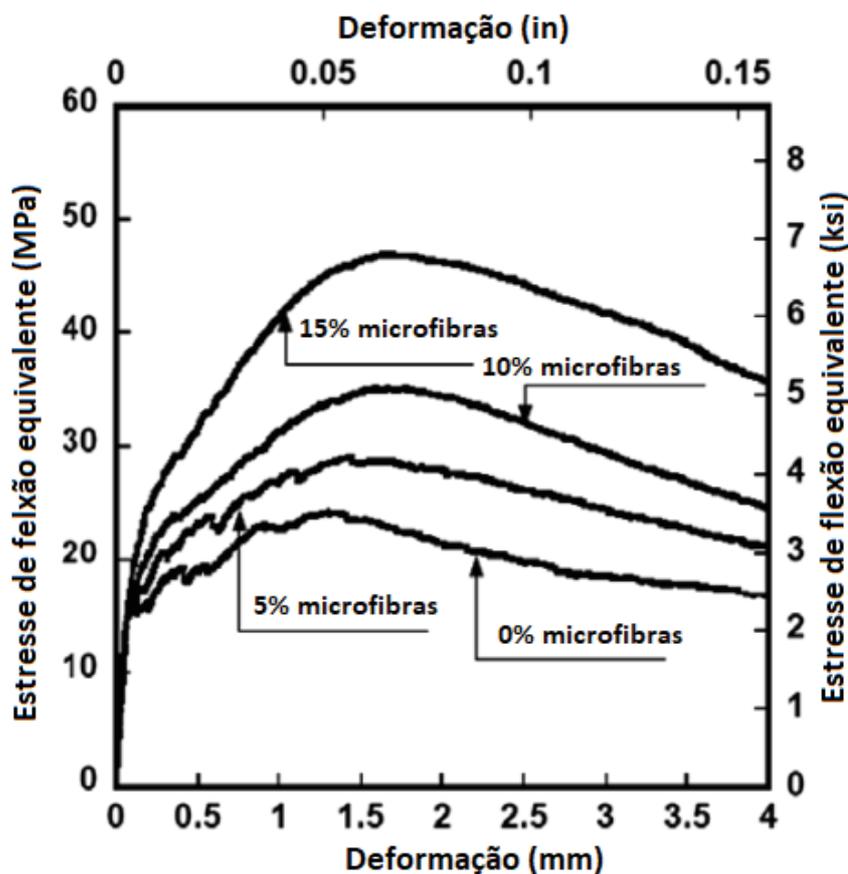


Fonte: Kim et al. (2011 p.4145).

O estudo avaliou o desempenho mecânico da mistura, avaliando a resistência à flexão e a ductilidade do composto. A Figura 35 mostra um dos resultados encontrados pelos pesquisadores, utilizando-se na mistura um volume fixo da

macrofibra ($d_f = 0,775\text{mm}$; $L_f = 62\text{mm}$) e variando as porcentagens de microfibras em 0%, 5%, 10% e 15%.

Figura 35 – Comportamento das misturas com diferentes concentrações de microfibras na matriz de UHPC

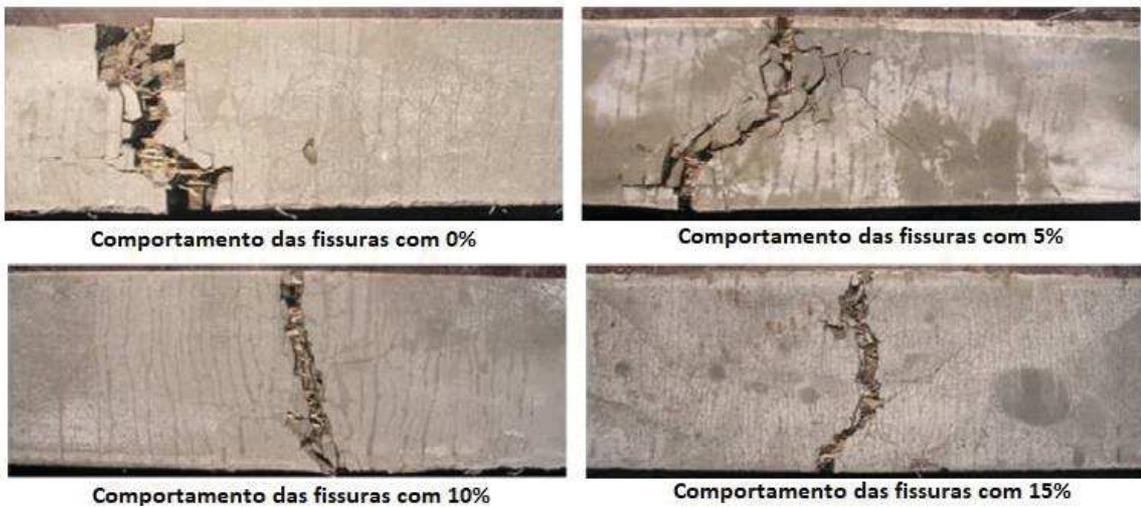


Fonte: Kim et al. (2011 p.4148).

É possível perceber que as misturas com maiores quantidades de microfibras, apresentam uma suavização na propagação das fissuras. Este efeito é provocado pela ativação das fibras menores em tempos diferentes das fibras maiores, fazendo com que a propagação da fissura seja mais suavizada.

Isso pode ser evidenciado na Figura 36, que mostra que as misturas com maior quantidade de microfibras metálicas melhoram o comportamento de fissuração do composto.

Figura 36 - Comportamento das fissuras formadas nas diferentes misturas

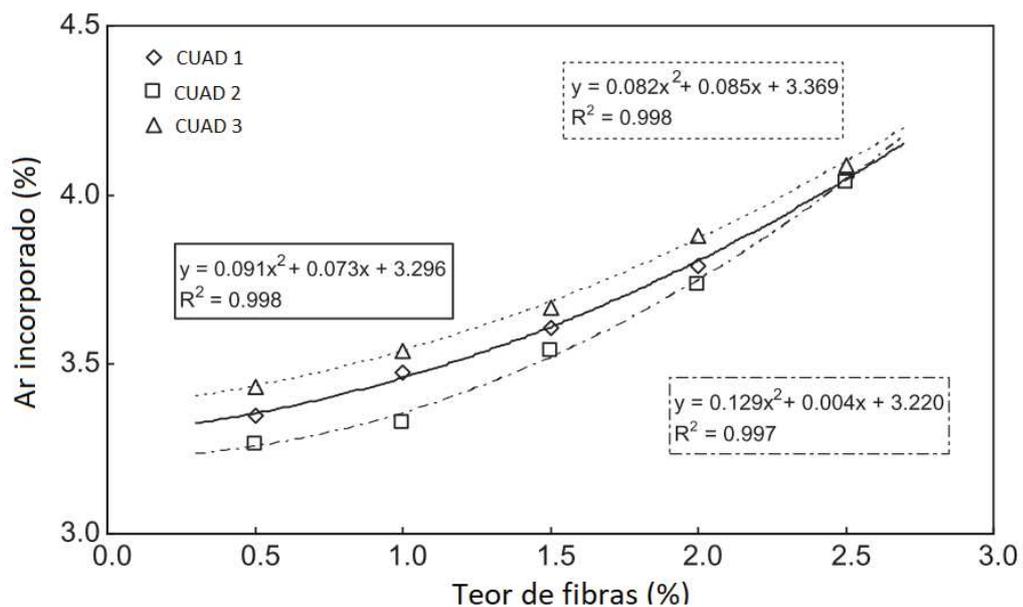


Fonte: Fonte: Kim et al. (2011 p.4148).

No mesmo passo que o percentual de fibras aumenta a resistência à tração da mistura, a porosidade da mistura pode ser alterada pelo fato das fibras alterarem o comportamento reológico da mistura e assim causando falhas.

Este fato pode ser evidenciado na Figura 37, na qual em diferentes traços de UHPC há um aumento da porosidade em função do aumento da quantidade de fibras introduzidas.

Figura 37 - Variação de ar incorporado em UHPC com diferentes teores de fibra de aço



Fonte: Yu, Spiesz, Brouwers (2014 p. 34).

É possível perceber que a porosidade das misturas tende a ser maior quando se aumenta o teor de fibras introduzidos nas misturas. A quantidade de ar nas misturas tem um aumento mais expressivo quando ultrapassa os 2,5% (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014).

Outra pesquisa desenvolvida com o intuito de propor as quantidades ideais de fibras em uma mistura de concreto foi desenvolvida por Ferrara, Park e Shah (2007). Os autores desenvolveram um método de dosagem de fibras em concreto autoadensável, no qual as fibras foram introduzidas como se fossem agregados na mistura. Para que as fibras fossem consideradas como agregado, foi proposta a Equação (14, que determina um diâmetro equivalente das fibras em função da sua área superficial, e assim as fibras são substituídas por agregados de diâmetro equivalente.

$$d_{eq-fibras} = \frac{3L_f}{1 + 2\frac{L_f}{d_f}} \frac{\gamma_{fibra}}{\gamma_{agregados}} \quad (14)$$

Fonte: Ferrara, Park e Shah (2007 p.959)

Em que:

$d_{eq-fibras}$ – diâmetro equivalente das fibras;

L_f – comprimento da fibra;

d_f – diâmetro da fibra;

γ_{fibras} – massa específica da fibra;

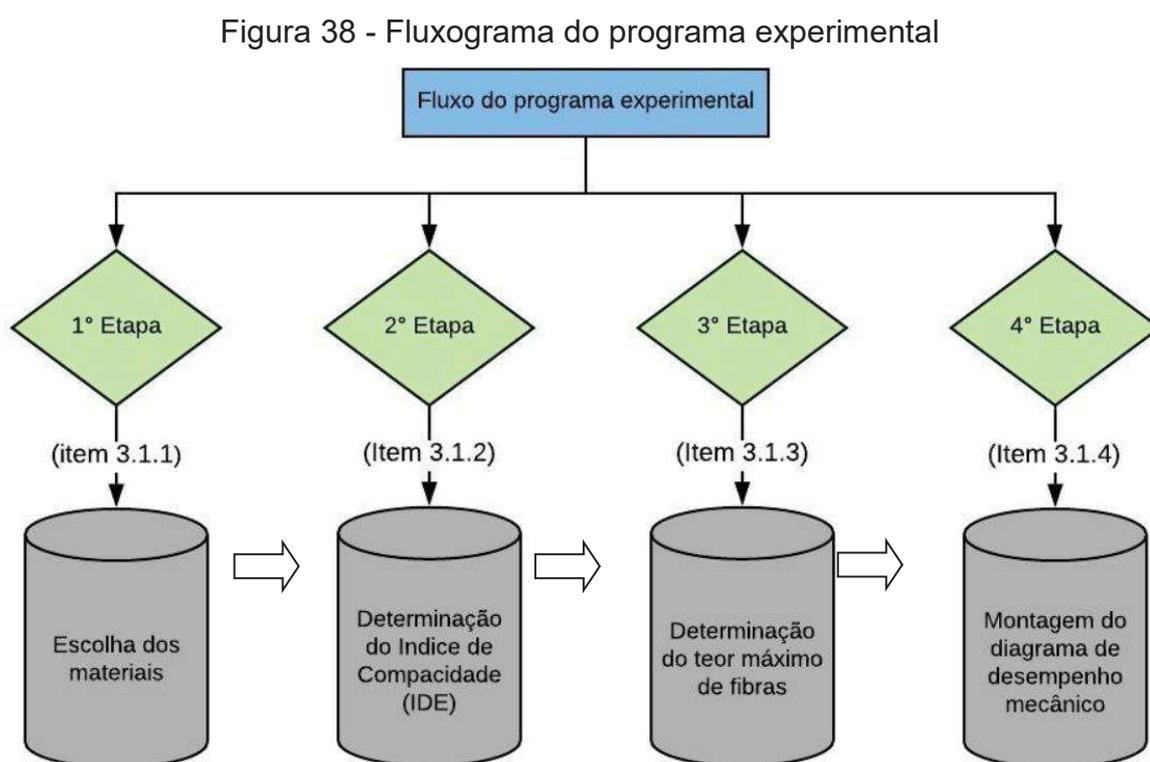
$\gamma_{agregado}$ – massa específica do agregado.

Encontrar a melhor proporção de fibras em uma mistura de maneira que a reologia do material não seja alterada significativamente e o máximo desempenho mecânico possa ser alcançado é o que se busca as equações propostas pelos pesquisadores.

3 MÉTODO E MATERIAIS

Neste capítulo é apresentado o método empregado para que o objetivo da pesquisa fosse alcançado. O estudo foi fundamentado em etapas, sendo que cada uma delas visou obter um determinado resultado que embasou o método desenvolvido. Com a revisão bibliográfica elaborada, pode-se perceber que há algumas imposições que são comuns a todos os traços de UHPC. Assim, foram geradas alternativas para desenvolver um UHPC com materiais locais.

As etapas desenvolvidas para que se tenha uma mistura com as características desejadas, como a resistência à compressão mais próxima a 150 MPa e resistência à tração na flexão mínima de 8 MPa, estão apresentadas na Figura 38.



Fonte: Autor

Em cada etapa do programa experimental foram determinados parâmetros para os quantitativos dos materiais, sendo obtida a dosagem do UHPC, que posteriormente foi verificado o seu atendimento quanto aos requisitos. Entende-se como um estudo de dosagem, os procedimentos necessários para a obtenção do proporcionamento dos materiais que constituem o composto (TUTIKIAN, 2007).

As etapas do programa experimental foram detalhadas a seguir, que são requisitos para que a determinação da proporção dos materiais do traço.

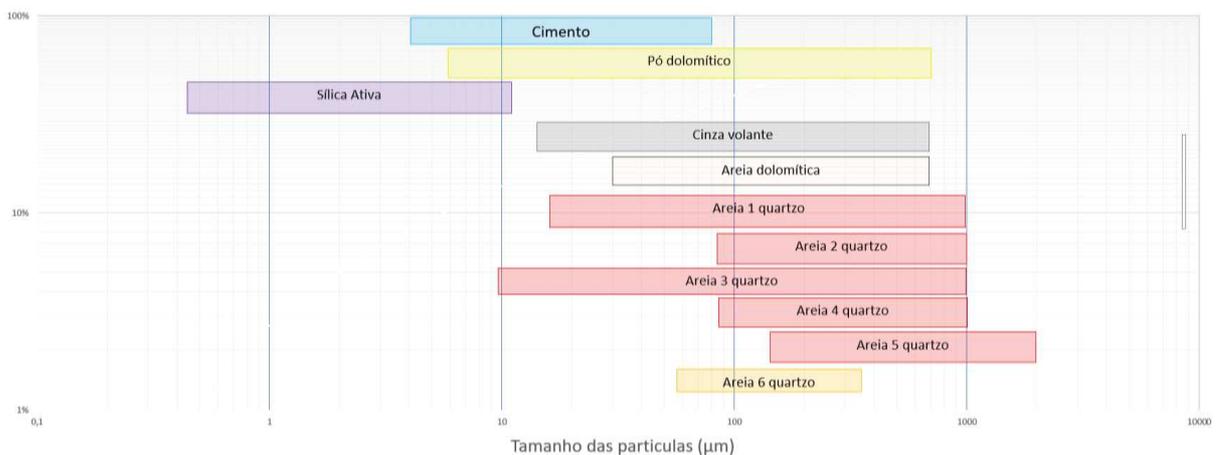
3.1 ETAPAS DO MÉTODO PROPOSTO

3.1.1 Etapa 1 – Escolha dos Materiais

Nesta etapa do método de dosagem, buscou-se materiais, preferencialmente com granulometria inferior a 3 milímetros. Os materiais comumente empregados em UHPC são livres de matéria orgânica e preferencialmente de origem pétreo. Outro parâmetro muito importante é a determinação da faixa granulométrica do material. Ou seja, quais os diâmetros de grão existentes. Esta informação é de suma importância, pois é preciso buscar materiais que apresentem faixas granulométricas distintas, fazendo com que não haja sobreposição de granulometrias.

Outro fator de grande relevância para a escolha dos materiais a serem empregados no traço de UHPC é o custo. Como os materiais empregados possuem uma granulometria muito fina, inferior a 200 μm e com uma distribuição granulométrica excelente, pode se tornar um produto mais caro do que o próprio cimento. O seu elevado custo está associada à necessidade de moagem, pois muitas vezes são provenientes de rochas calcárias, basáltica, dolomíticas entre outros. A Figura 39 ilustra alguns materiais e suas faixas granulométricas.

Figura 39 - Faixas granulométrica de alguns materiais



Fonte: Autor

É possível perceber que alguns materiais não têm utilidade no traço a ser desenvolvido. A sobreposição de granulometrias não traz benefício quanto ao empacotamento das partículas, podendo, inclusive, aumentar o índice de vazios.

Nesta análise preliminar não é avaliada a distribuição granulométrica, ou seja, qual a porcentagem retida em cada diâmetro, mas sim quais os diâmetros que existem de cada elemento. Após a escolha dos materiais em função da faixa granulométrica, é necessário obter a sua distribuição granulométrica.

Os materiais tradicionalmente empregados no UHPC são os com diâmetro de elevada finura, mas, em alguns casos, há a incorporação de agregados com diâmetros de até 12 mm. O mais trivial é a utilização de agregados com diâmetros inferiores a 0,3 mm, pois a maior quantidade de materiais presentes em uma mistura de UHPC é de materiais muito finos, com diâmetros na ordem de 30 μm .

Para a determinação destas propriedades, se faz necessária a utilização da difração à laser e a teoria Mie de espalhamento da luz com base no modelo esférico de volume equivalente. A obtenção das propriedades granulométricas dos constituintes que foram utilizados na pesquisa foi determinada utilizando o equipamento do Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais- LCVMat da Unisinos, Figura 40.

Figura 40 – Equipamento para verificação da granulometria a laser da Universidade do Vale do Rio do Sinos



Fonte: Autor

Esta técnica é utilizada para determinar as granulometrias dos materiais finos, como o cimento, sílica ativa, pozolanas entre outras. Para que a teoria Mie possa ser utilizada, algumas propriedades ópticas são necessárias, como o índice de refração.

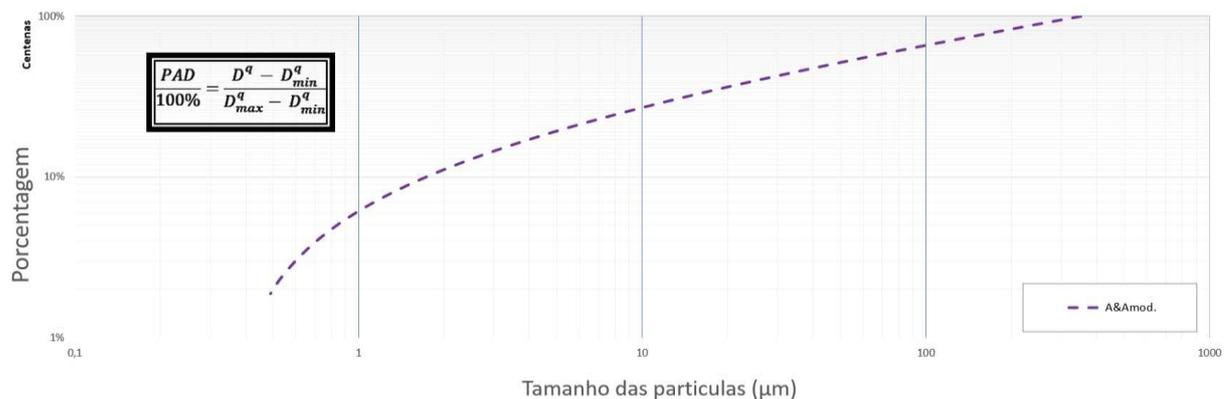
Para os materiais com diâmetro superior a 150 µm, foi utilizada a série de peneiras padrão do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Unisinos. O peneiramento seguiu as prescrições de ensaio estabelecido pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A obtenção de cada distribuição granulométrica serve como subsídio para a realização da etapa 2.

3.1.2 Etapa 2 – Determinação do Índice de Desvio do Empacotamento (IDE)

Esta etapa da pesquisa consiste em obter o melhor empacotamento entre os diferentes materiais presentes na mistura, utilizando um modelo de empacotamento de partículas proposto por Funk e Dinger. Como visto na revisão bibliográfica, muitos métodos de dosagem já foram elaborados utilizando o empacotamento de partículas, porém, no presente estudo buscou-se desenvolver uma relação em que possa ser determinado um índice de desvio do empacotamento.

O método de empacotamento proposto por Funk e Dinger, também conhecido como A&A_{modificado}, determina a quantidade em porcentagem de um determinado diâmetro ideal a ser empregado na mistura, conforme Equação 6. Com posse destes valores pode-se gerar uma curva, que corresponde ao empacotamento perfeito da mistura, Figura 41.

Figura 41 – Curva teórica do empacotamento utilizando a equação de Funk e Dinger.



Fonte: Autor

Para que se possa gerar esta curva basta definir o intervalo dos diâmetros a serem utilizados em uma mistura. No exemplo mostrado na Figura 41, tem-se uma curva nos intervalos de 0,34 μm a 704 μm .

A obtenção desta curva teórica pelo método de Funk e Dinger requer que seja definido o valor do coeficiente de distribuição (q). Conforme visto no referencial bibliográfico, o valor deste coeficiente pode ser obtido através de estudos experimentais. Caso haja a predominância de materiais com diâmetros dos grãos inferiores a 250 μm , o coeficiente deverá ser inferior a 0,25.

Nesta pesquisa foi adotado o valor do coeficiente de 0,20, pois foi o que apresentou uma melhor curva de empacotamento das misturas. Este fato se deve a predominância de materiais com diâmetros inferiores a 250 μm . Para a elaboração desta curva de empacotamento, é de fundamental importância que as porcentagens de cada tamanho de partícula de todos os materiais sejam determinadas.

Se for estabelecida uma porcentagem de cada material dentro da mistura, pode-se somar todas as porcentagens em cada diâmetro para obter a porcentagem de cada material da mistura. Para se chegar nesta porcentagem deve ser utilizada a equação 15.

$$\frac{PAM}{100} = \sum (Q * D_{retido}) \quad (15)$$

Em que:

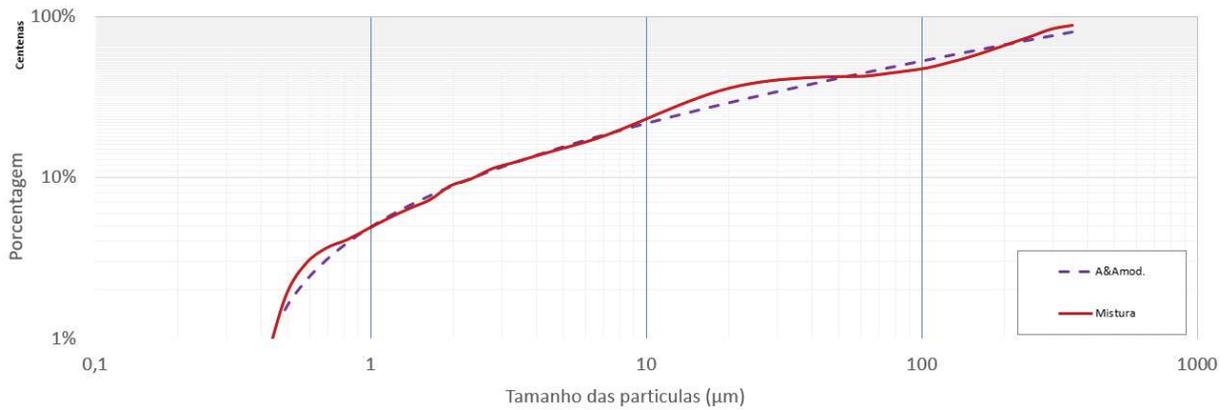
PAM – porcentagem acumulada da mistura;

Q – porcentagem de cada material na mistura;

D_{retido} –porcentagem retida do determinado diâmetro.

Com a equação 14 é possível obter uma curva do empacotamento da mistura. Devido aos materiais apresentarem distribuição granulométrica distinta, a escolha e a quantidade de cada material são de fundamental importância. A Figura 42 apresenta duas curvas, uma é a curva ótima obtida pela equação do empacotamento proposta por Funk e Dinger, e a outra é a curva de uma mistura obtida através da Equação 15.

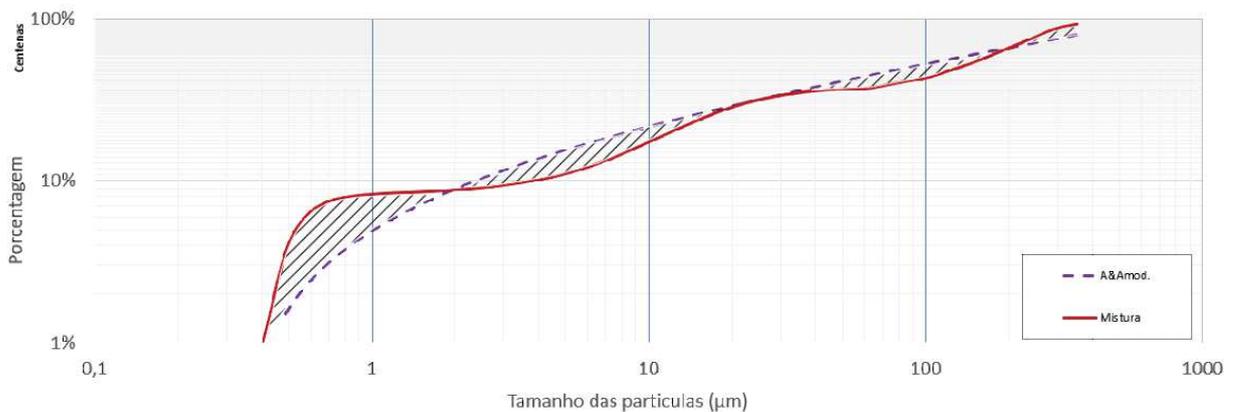
Figura 42 - Curvas de empacotamento ótimo e da mistura



Fonte: Autor

Não existe uma maneira de se obter a quantidade de cada material a ser inserido na mistura para garantia do empacotamento perfeito. Esta tentativa de obter o melhor empacotamento de uma mistura é feita de maneira empírica. Esta relação é chamada de Índice de Desvio do Empacotamento (IDE), e a sua determinação foi realizada através da diferença entre as duas curvas, representada pela parte hachurada mostrada na Figura 43.

Figura 43 – Área entre o empacotamento perfeito e o empacotamento da mistura



Fonte: Autor

Quanto menor for esta área, menor será o índice de desvio do empacotamento e, portanto, melhor será o empacotamento da mistura. É complexo obter-se uma mistura com o empacotamento idêntico ao teórico (linha tracejada azul). Sempre se tem uma variação do empacotamento da mistura, isso devido às faixas granulométricas de cada material e sua proximidade.

O método de empacotamento das partículas funciona e se tem diversos trabalhos que comprovam isso. Porém, propõe-se uma nova ideia, o índice de desvio do empacotamento (IDE). Se este índice for zero, por exemplo, significa que as porcentagens de cada diâmetro das partículas da mistura geram o empacotamento perfeito das partículas. Não foi avaliado neste método qual é o valor ideal de IDE que se deve buscar, para esta pesquisa apenas foi determinado parâmetros que levam a investigar se o IDE com menor valor irá ter o melhor desempenho.

Para a determinação do IDE, foram elaborados os gráficos de empacotamento com a ferramenta Excel, utilizando a equação 6, sendo necessária a obtenção dos dados da primeira etapa deste trabalho, que é a obtenção das granulometrias dos materiais. Com o auxílio de ferramentas do Excel que realizam testes de hipóteses, podem-se obter as melhores porcentagens de cada material e, assim, obterem-se as proporções de cada material na mistura, o passo a passo desenvolvido para a obtenção do melhor traço de uma mistura utilizando esta ferramenta é apresentado no Apêndice A.

Nesta etapa do trabalho, foram determinados quatro traços, variando os materiais entre as misturas. Esta variação tem o objetivo de verificar se de fato o método proposto para a obtenção dos quantitativos é válido, independente do material.

3.1.3 Etapa 3 – Determinação do Teor Máximo de Fibras

Nesta etapa da pesquisa, o método para a definição da quantidade de fibras a ser inserida na mistura é apresentado. A partir da revisão bibliográfica, foi evidenciado que a dosagem de fibras em concretos pode ocorrer de duas formas: Determinando-se o teor máximo de fibras em função da massa específica da mistura granular ou considerando o diâmetro equivalente das fibras e as inserindo no empacotamento da mistura.

O método para determinar o teor máximo das fibras em função da massa específica da mistura é mais eficiente quando se trata de um UHPC. O emprego deste método no estudo de dosagem depende do fator de forma da fibra, da massa unitária da areia e da densidade da mistura. Porém, o método proposto neste trabalho não contemplou agregados graúdos, e desta forma foi proposta uma

adaptação do método, mas foi mantida a mesma ideia com relação às propriedades que influenciam no resultado.

A equação para a determinação do teor máximo de fibras é proposta pelos autores Martinie, Rossi e Roussel, (2010). Porém, para que o método possa ser empregado é preciso realizar algumas adaptações na equação, devido a não presença do agregado graúdo. A fração de volume de areia da dosagem e a fração de embalagem densa da mistura foi substituída pela massa unitária da areia e massa específica da areia, respectivamente. Assim o teor de fibras máximo da mistura foi determinado através da equação 16, adaptada em relação à equação proposta pelos autores supracitados.

$$T_{fibras} = \frac{400}{r} * \left(1 - \frac{M_{unitária}}{M_{específica}} \right) \quad (16)$$

Fonte: Adaptado de Martinie, Rossi e Roussel, (2010, p.232)

Sendo:

T_{fibras} – Teor máximo de fibras (%) a ser inserido na mistura;

r – Relação de forma da fibra (comprimento/espessura);

$M_{unitária}$ – Massa unitária da areia;

$M_{específica}$ – Massa específica da areia;

Com a determinação do teor máximo de fibras a ser inserido na mistura, sem que haja uma perda significativa do abatimento, três teores distintos foram determinados e as propriedades reológicas e mecânicas das misturas foram encontradas. Com posse destas informações, pode-se desenvolver uma curva de dosagem para uma determinada mistura.

3.1.4 Etapa 4 – Diagrama de Desempenho Mecânico

A última etapa do método proposto é a elaboração do diagrama de desempenho mecânico da mistura. Nos métodos de dosagem de concreto é apresentado o diagramas de dosagem, como proposto por HELENE; TERZIAN, (1992); TUTIKIAN, (2007). Porém, o diagrama proposto nesta pesquisa apresenta variações com relação aos diagramas empregados para outros tipos de concreto.

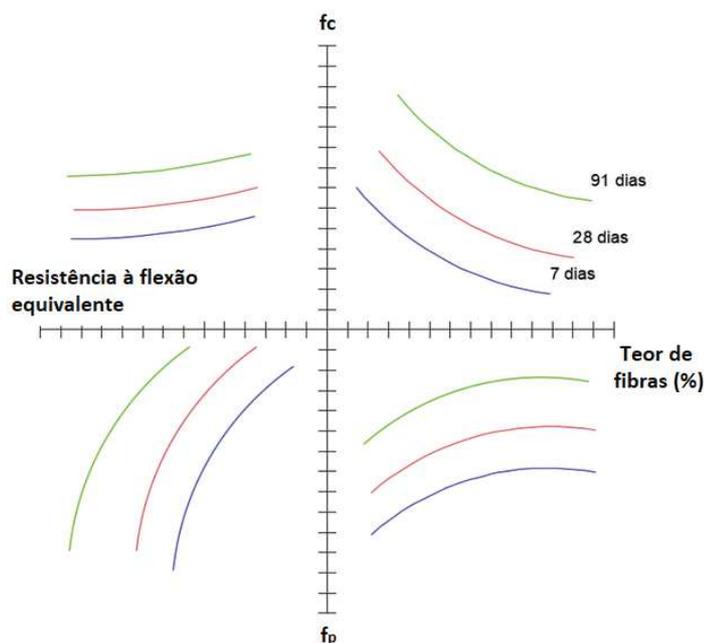
As variações propostas neste método são em função das quantidades de fibras a serem inseridas na mistura. Assim, quando determinada a melhor mistura em função do IDE (mais baixo conforme etapa 2), a mistura terá variações de abatimento e de resistências à compressão e tração em função das quantidades de fibras a serem inseridas na mistura.

O diagrama proposto neste método terá em seus quadrantes a seguinte relação:

- ✓ primeiro quadrante – resistência à compressão (f_c) e teor de fibras (Tf);
- ✓ segundo quadrante – teor de fibras (Tf) em função da resistência à tração ($f_{ct,f}$);
- ✓ terceiro quadrante – resistência à tração ($f_{ct,f}$) e o fator de tenacidade (ft);
- ✓ quarto quadrante – resistência à flexão equivalente (ft) e a resistência à compressão (f_c).

O diagrama de dosagem proposto tem a finalidade de demonstrar o comportamento do composto com as variações de teores de fibras que proporcionaram maior ou menor desempenho em função das variações de incremento. A Figura 44 ilustra um exemplo de diagrama de desempenho mecânico proposto.

Figura 44 - Exemplo de diagrama de desempenho mecânico.



Uma das grandes vantagens do emprego do UHPC em diferentes aplicações é a sua elevada resistência à tração e elevada tenacidade, além da elevada resistência à compressão. Com o diagrama de desempenho mecânico proposto e com as equações de tendência das propriedades determinadas, pode-se determinar as proporções de fibras a serem inseridas na mistura para um determinado desempenho mecânico desejado.

3.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Neste subcapítulo é apresentado o método para se obter as proporções dos materiais do UHPC. A partir da escolha dos materiais e a análise da sua distribuição granulométrica, quatro misturas foram desenvolvidas utilizando o método proposto para que se obtivesse uma melhor compactação das misturas.

As misturas foram desenvolvidas com variações entre os materiais utilizados, apenas o cimento, sílica ativa, aditivos e fibras foram mantidos. A Tabela 6 apresenta as porcentagens passante de cada diâmetro dos materiais utilizados, caracterizando a distribuição granulométrica dos materiais utilizados.

Pode ser percebido que muitos materiais possuem os mesmos diâmetros específicos de grãos, apenas com a quantidade de cada diâmetro sendo alterada. Assim, é possível perceber que alguns materiais podem gerar uma sobreposição de um determinado diâmetro, gerando uma curva não ideal.

Seguindo com a preposição do método, utilizando a equação 6, a porcentagem ideal de cada material retido para cada diâmetro dos grãos foi determinada e assim se obteve a curva granulométrica ideal, para uma determinada faixa granulométrica. Neste procedimento do método proposto está sendo utilizado a equação proposta por Funk e Dinger para determinar a curva ideal para uma faixa de granulometria, que corresponde a mínima e a máxima granulometria dos constituintes dos materiais da mistura.

Tabela 6 - Porcentagens passante de cada diâmetro dos materiais

Diâmetros (µm)	Cimento	Silica Ativa	Cinza volante	Carbonato de cálcio	Pó de quartzo	Areia 1	Areia 2
1000	100	100	100	100	100	100	100
704	100	100	100	100	100	100	99,9
592	100	100	100	100	100	100	98,07
497,8	100	100	100	100	100	98,00	92,49
418,6	100	100	100	100	100	87,40	87,79
352	100	100	100	100	100	78,49	78,46
296	100	100	100	100	100	71,00	70,61
248,9	100	100	100	100	100	54,45	55,96
209,3	100	100	100	100	100	40,54	43,65
176	100	100	100	100	99,85	28,84	32,26
148	100	100	100	100	99,64	19,00	22,68
124,5	100	100	100	100	99,17	15,51	15,27
104,7	100	100	99,66	100	98,52	12,56	9,02
88	99,64	100	99,18	100	97,61	10,08	5,52
74	99,10	100	98,44	100	96,32	8,00	2,58
62,2	98,25	100	97,24	100	94,42	0	0
52,3	96,86	100	95,31	100	91,60	0	0
44	94,55	100	85,33	100	87,55	0	0
37	90,80	100	75,97	100	82,10	0	0
31,1	85,13	100	64,51	100	75,38	0	0
26,2	77,32	100	52,46	100	67,71	0	0
22	67,61	100	40,91	100	59,70	0	0
18,5	56,84	100	30,80	100	51,67	0	0
15,6	25,89	100	22,35	100	44,38	0	0
13,1	23,75	100	15,48	100	38,23	0	0
11	21,74	99,61	10,13	100	33,20	0	0
9,25	19,88	98,84	6,23	99,90	29,01	0	0
7,78	18,13	98,37	3,63	99,60	25,34	0	0
6,54	16,48	97,64	2,00	98,79	22	0	0
5,5	14,95	96,93	1,01	97,15	18,92	0	0
4,62	13,49	96,03	0,40	93,25	16,10	0	0
3,89	12,15	95,05	0	87,12	13,55	0	0
3,27	10,88	94,17	0	79,60	11,22	0	0
2,75	9,69	93,43	0	72,60	9,05	0	0
2,31	8,56	92,78	0	60	7,06	0	0
1,94	7,51	92,26	0	52,50	5,28	0	0
1,64	6,56	91,93	0	39,20	3,76	0	0
1,38	5,64	91,93	0	32,0	2,54	0	0
1,16	4,77	91,93	0	25	1,60	0	0
0,97	3,93	90,78	0	18,45	0,90	0	0
0,82	3,20	88,41	0	13,50	0,38	0	0
0,69	2,48	82,56	0	10,83	0	0	0
0,58	1,81	67,75	0	8,19	0	0	0
0,49	1,20	41,70	0	5,33	0	0	0
0,41	0,60	12,11	0	2,54	0	0	0
0,34	0	3,32	0	0,8	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor

A seguir, é mostrado exemplo da aplicação da equação (6) e determinação da porcentagem retida para alguns diâmetros. A determinação da porcentagem de cada diâmetro, que correspondente à faixa de 704 μm a 0,34 μm foi realizada, e esta porcentagem corresponde aos valores que gera a curva de empacotamento ideal da mistura. O coeficiente de distribuição utilizado para a determinação deste percentual foi de 0,20, em função dos materiais utilizados possuem diâmetros inferiores a 250 μm , como visto no referencial bibliográfico.

$$\% \text{ do diâmetro } 704 \mu\text{m} = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} = \frac{704^{0,20} - 0,34^{0,20}}{704^{0,20} - 0,34^{0,20}} * 100 = 100\%$$

$$\% \text{ do diâmetro } 296 \mu\text{m} = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} = \frac{296^{0,20} - 0,34^{0,20}}{704^{0,20} - 0,34^{0,20}} * 100 = 79,68\%$$

$$\% \text{ do diâmetro } 22 \mu\text{m} = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} = \frac{22^{0,20} - 0,34^{0,20}}{704^{0,20} - 0,34^{0,20}} * 100 = 36,13\%$$

Ao resolver a equação para cada diâmetro de grão, é obtido o percentual passante em cada diâmetro para que se tenha o melhor empacotamento da faixa de granulometria estudada e assim obtém-se uma ideal porcentagem de cada diâmetro. Esta curva é a curva de referência para o método, onde esta curva é comparada com a curva de empacotamento da mistura de alguns materiais. Conhecendo os quantitativos de cada diâmetro de cada material podemos gerar uma curva de empacotamento da mistura. Esta curva de empacotamento serve como base para a obtenção do Índice de Desvio do Empacotamento (IDE), calculado através da equação 15.

O IDE é obtido através da diminuição da porcentagem ideal pela porcentagem da mistura obtida, em módulo. Para facilitar o processo, neste trabalho foi usada a ferramenta "Solver", do software Excel, que faz uma interação entre as porcentagens de maneira que se obtenha um IDE de menor valor, e por tanto uma mistura com melhor empacotamento da mistura.

Alguns parâmetros de referência foram definidos para os traços, como o percentual de cimento de 21%, devido ao cimento possuir uma distribuição granulométrica intermediária dentro da faixa granulométrica existente. Este condicionante é necessário para que a interação entre os materiais não forneça uma quantidade nula de cimento, fixando um consumo de, aproximadamente, 650 kg/m^3 .

Outro parâmetro de referência utilizado para a obtenção dos traços foi de utilizar materiais distintos em cada mistura, para evidenciar a eficácia do método com diferentes materiais.

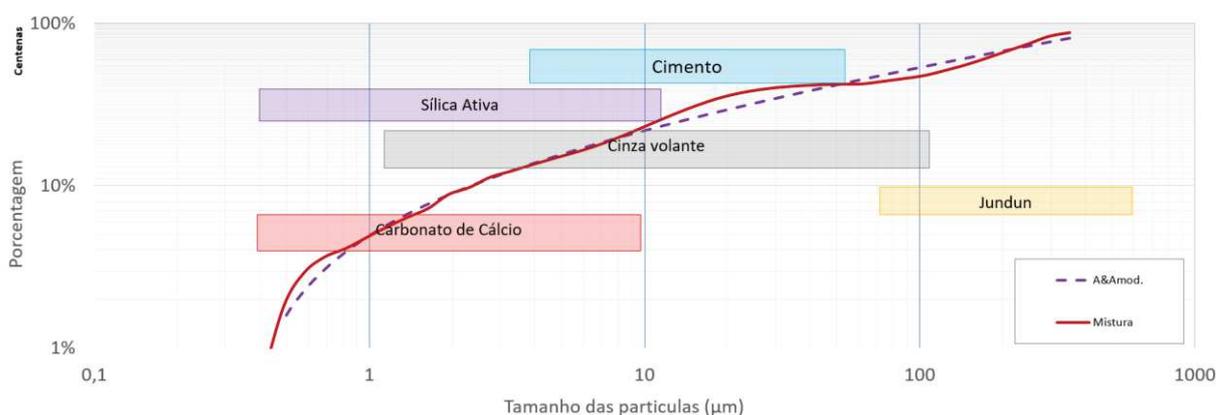
Para o desenvolvimento dos traços e para a utilização do método proposto buscou-se variar alguns materiais em cada mistura, sendo apenas utilizado o mesmo cimento e sílica ativa para todas as misturas. Esta variação foi realizada pelo fato de os materiais possuírem granulometrias similares.

Assim para o desenvolvimento de cada traço buscou-se utilizar materiais com variações granulométricas distintas, e aplicando o método proposto nesta tese comparando a curva granulométrica de cada mistura com a curva granulométrica encontrada usando a equação proposta por Funk e Dinger.

Foram propostas quatro misturas com diferentes composições de materiais onde a identificação dos quatro traços IDE 87, IDE 98, IDE 113 e IDE 133, que correspondem ao valor do IDE de cada mistura.

A Figura 45 apresenta as curvas do empacotamento ideal (linha tracejada) e a curva do empacotamento da mistura (linha vermelha) bem como as faixas granulométricas de cada material. A área entre estas curvas corresponde ao índice de compactidade, e o menor índice corresponde ao melhor empacotamento.

Figura 45 – Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 87

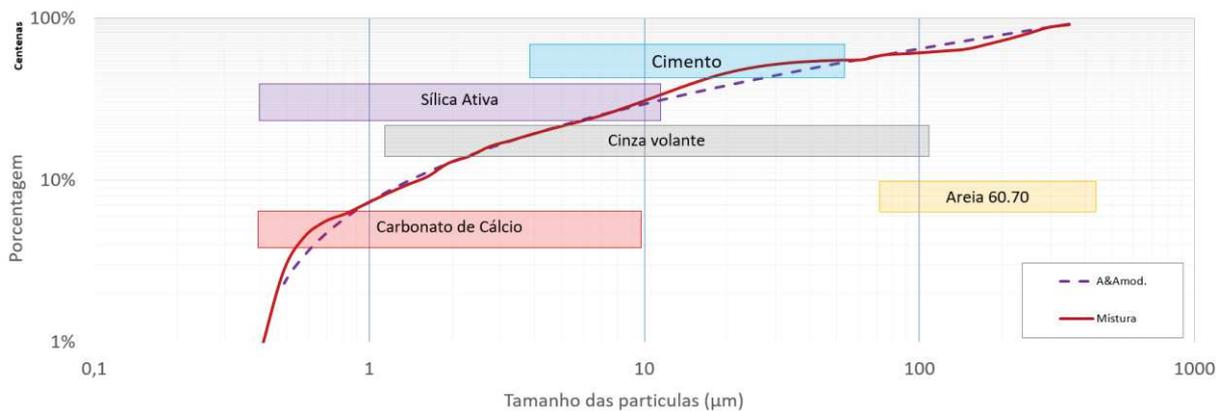


Fonte: autor

É possível perceber na Figura 45 que a curva de empacotamento ideal (linha tracejada) e a curva de empacotamento da mistura (linha contínua) são muito parecidas, gerando um IDE baixo. Nota-se ainda que o cimento apresenta uma faixa

granulométrica que se sobrepõe com a sílica ativa, carbonato de cálcio e a cinza volante, motivo da fixação do percentual de cimento. A Figura 46 apresenta as curvas do traço IDE 98. A variação nesta mistura em relação à primeira foi a troca da areia, onde buscou-se avaliar a variação de uma areia com granulometria distinta de maneira que possa ser evidenciado se o método proposto possa ser eficaz com relação a obtenção de uma mistura com menor vazios.

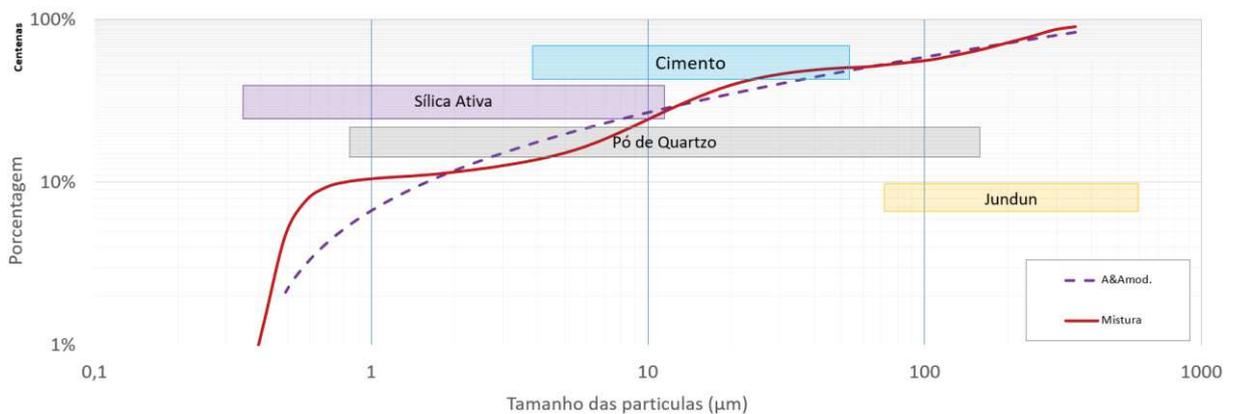
Figura 46 - Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 98



Fonte: autor

É possível verificar na Figura 46 que a curva de empacotamento da mistura também é parecida com a da mistura que apresentou o IDE de 87. A Figura 47 apresenta as curvas encontradas para o terceiro traço, no qual foi retirada a cinza volante e o carbonato de cálcio e acrescentado na mistura o pó de quartzo, que é largamente utilizado em pesquisas com o UHPC.

Figura 47 - Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 118

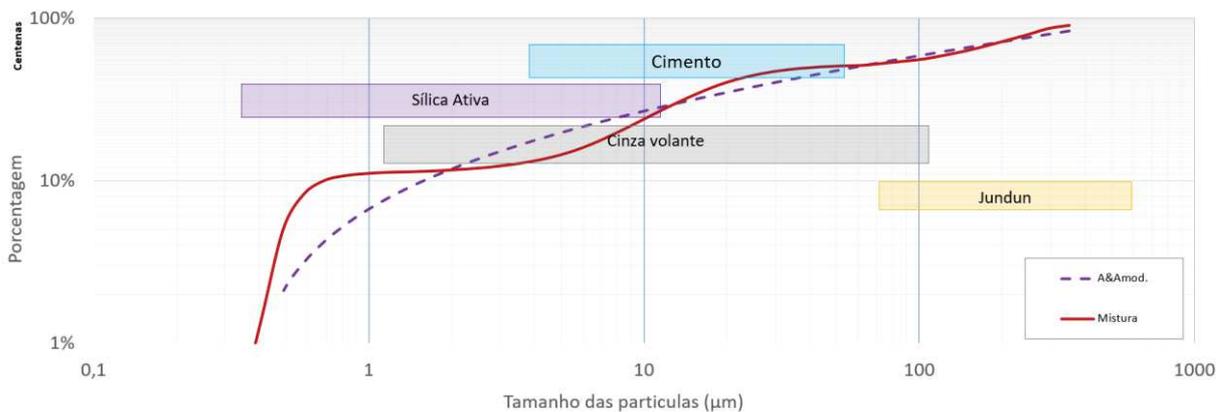


Fonte: autor

É possível notar que a curva do empacotamento da mistura sofreu variações, se comparada com as outras misturas. Estas variações foram devido a falta de uma distribuição granulométrica descontínua dos materiais utilizados.

A Figura 48 apresenta as curvas encontradas da quarta mistura realizada. Nesta mistura foi substituído o pó de quartzo pela cinza volante, que possuem faixa granulométrica parecidas, porém com distribuição granulométrica disitinta, como pode ser identificado na Figura 48.

Figura 48 - Curvas de empacotamento ideal e da mistura do traço IDE 133



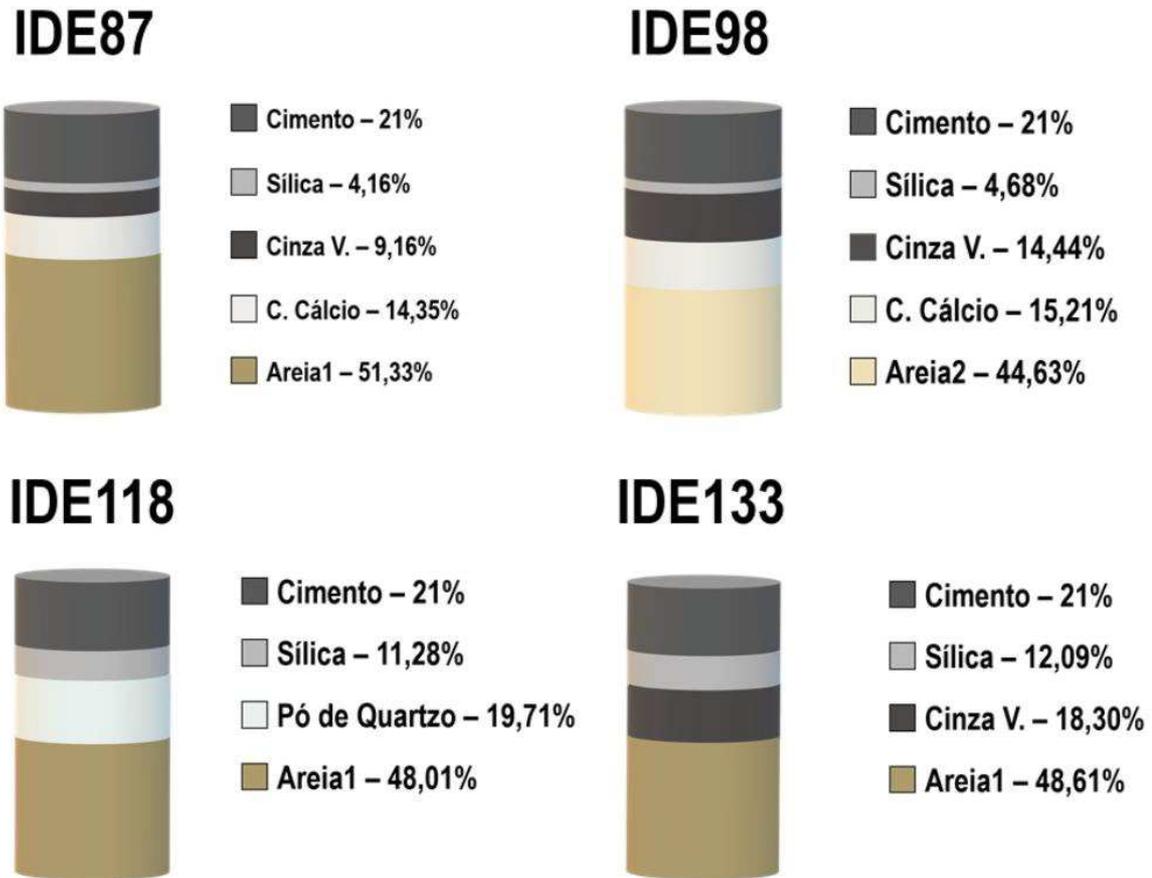
Fonte: autor

Com a comparação de todas as curvas encontradas, foi possível perceber que a mistura IDE 87 possuiu maior compacidade, logo, teoricamente, terá melhor trabalhabilidade e maior resistência. Os índices de desvio de empacotamento modificaram-se de mistura para mistura devido à alguns materiais terem modificados de mistura para mistura.

Esta mudança resulta em uma modificação no empacotamento das partículas pelo fato dos materiais não possuírem a mesma distribuição granulométrica. Mesmo tendo a mesma faixa granulométrica, se os materiais tiverem diferente distribuição, ocasionará uma sobreposição de mesmos diâmetros que poderá gerar assim uma diminuição na compacidade da mistura.

A Figura 49 apresenta as variações entre os materiais para que fosse possível verificar a eficiência do método.

Figura 49 - Composição dos materiais em cada mistura



Fonte: Autor

A partir da determinação dos traços, foram realizadas as quatro misturas, com as quantidades de cada material apresentadas na Tabela 7. O teor de aditivo superplastificante e modificador de viscosidade foi definido através de ensaios preliminares, onde a água foi dosada buscando obter um espalhamento superior a 600 mm. Após a verificação do desempenho mecânico das misturas, foi definido qual destas apresentou o melhor resultado e se prosseguiu com a determinação do teor máximo de fibras.

Para cada mistura foi avaliada a resistência à compressão, aos 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Para isso, foram confeccionados três corpos de provas cilíndricos de 10 x 20 cm e três cúbicos de 10 cm de arestas.

Tabela 7 - Traço unitário das misturas desenvolvidas pelo método proposto

Materiais	IDE 87		IDE 98		IDE 118		IDE 133	
	Unit.	kg/m ³	Unit.	kg/m ³	Unit.	kg/m ³	Unit.	kg/m ³
Cimento	1	493,5	1	493,5	1	493,5	1	493,5
Sílica	0,198	97,7	0,223	109,98	0,537	256,1	0,576	284,1
Cinza Volante	0,436	215,3	0,688	339,34	----		0,871	430,0
Pó de Quartzo	----		----		0,939	463,19	----	
Carbonato de Cálcio	0,683	337,2	0,726	358,38	----		----	
Areia 1	2,444	1206,3	----		2,286	1128,2	2,315	1142,3
Areia 2	----		2,125	1048,8	----		----	
Água/aglomerante	0,23	185,5	0,25	276,53	0,26	230,6	0,23	241,5
Superplastificante (%)	3	24,20	3	18,86	3	22,76	3	36,23
Modificador de Viscosidade (%)	1	16,13	1	24,23	1	15,17	1	24,15

Fonte: Autor

A fibra utilizada neste trabalho possui um fator de forma de 62. Com o auxílio da equação 16 obteve-se o teor máximo de fibras (T_{fibras}) a ser inserido na mistura, e definido os teores inferiores para a obtenção da curva de tendência das variações. apresenta-se o cálculo do teor máximo de fibras da mistura, sendo que o valor da massa unitária de 1,45 kg/m³ e da massa específica de 2660 kg/m³, de acordo com a equação 15.

$$T_{fibras} = \frac{400}{62} * \left(1 - \frac{1,450}{2,660}\right) = 2,93 \%$$

Com o teor máximo definido, três teores distintos de fibras, inferiores ao máximo, foram definidos, para que seja possível a obtenção das propriedades reológicas e mecânicas da mistura, e gerar o diagrama de dosagem. Os teores de fibras em relação ao volume de material utilizados foram de 1,0%; 2,0% e 2,9%.

3.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

Para a aplicação do método proposto, foi utilizado materiais que possuem diferentes distribuição granulométrica. Parcialmente todos materiais usados neste

trabalho são facilmente encontrados na região sul do país, apenas a fibra de aço utilizada não é encontrada no Brasil, onde alguns materiais são aplicados em misturas de concreto ou argamassas.

3.3.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CPV – ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial), pelo fato de ter menor teor de adições e facilmente encontrado na região. As propriedades químicas e físicas do cimento estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição químicas e físicas do cimento utilizado na pesquisa

Composição Química	Teores %	
Óxido de cálcio (CaO)	63,19	
Dióxido de Silício (SiO ₂)	19,53	
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,91	
Trióxido de enxofre (SO ₃)	3,07	
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,89	
Anidrido Carbônico (CO ₂)	2,45	
Óxido de magnésio (MgO)	1,94	
Óxido de cálcio livre (CaOI)	1,27	
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,61	
Resíduo Insolúvel (RI)	0,54	
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,04	
Perda ao fogo (PF)	3,76	
C ₃ S	79,56	
C ₂ S	--	
C ₃ A	3,3	
C ₄ AF	7,5	
Resistência à compressão (MPa)	1 Dia	25,3
	3 Dias	35,7
	7 Dias	40,9
	28 Dias	48,3
Massa específica (g/cm ³)	3,10	
Superfície Específica (cm ² /g)	4989	

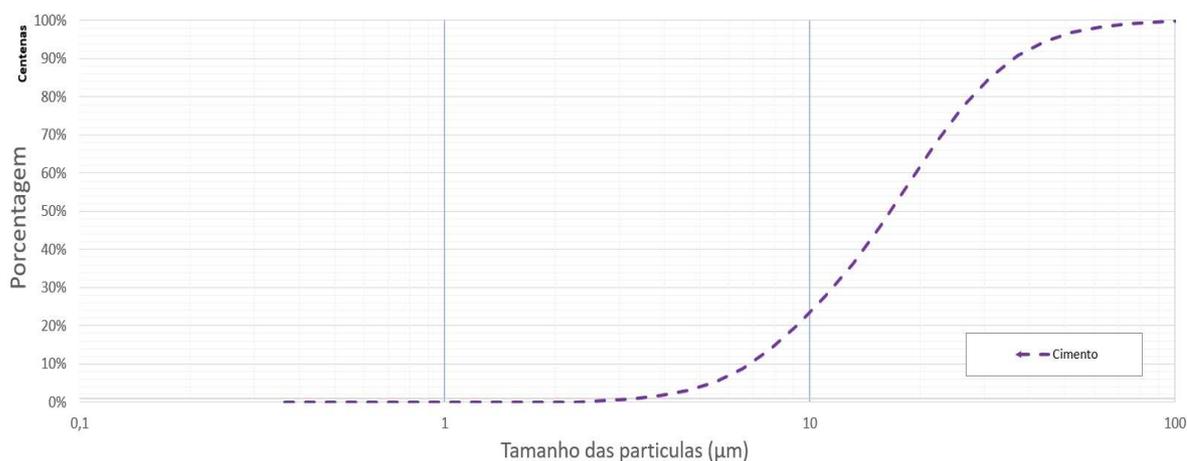
Fonte: Votorantim cimentos outubro de 2018.

O cimento escolhido apresenta elevada resistência inicial, proporcionando uma ativação das reações pozolânicas presentes na mistura de forma mais rápida. Cabe ressaltar que o cimento do tipo CPV-ARI utilizado já atende a norma NBR

16697 (ABNT, 2018) onde o cimento referido passa a ter uma adição de materiais carbonáticos de até 10%.

A distribuição granulométrica do cimento foi determinada através do ensaio de granulometria a laser e a Figura 50 apresenta as faixas granulométricas.

Figura 50- Distribuição granulométrica do cimento



Fonte: Autor

3.3.2 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada é proveniente do processo de fabricação do silício metálico, também conhecido por ferro silício. Devido a sua origem, a composição química e física do material apresenta maior estabilidade. As características químicas e físicas do material estão apresentados nas Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 - Características químicas da sílica ativa

Composição Química	Teores %
Silício (Si)	88,43
Sódio (Na)	2,786
Potássio (K)	0,658
Alumínio (Al)	0,316
Cálcio (Ca)	0,286
Magnésio (Mg)	0,122
Titânio (Ti)	0,091
Ferro (Fe)	0,015

Fonte: Dow Corning

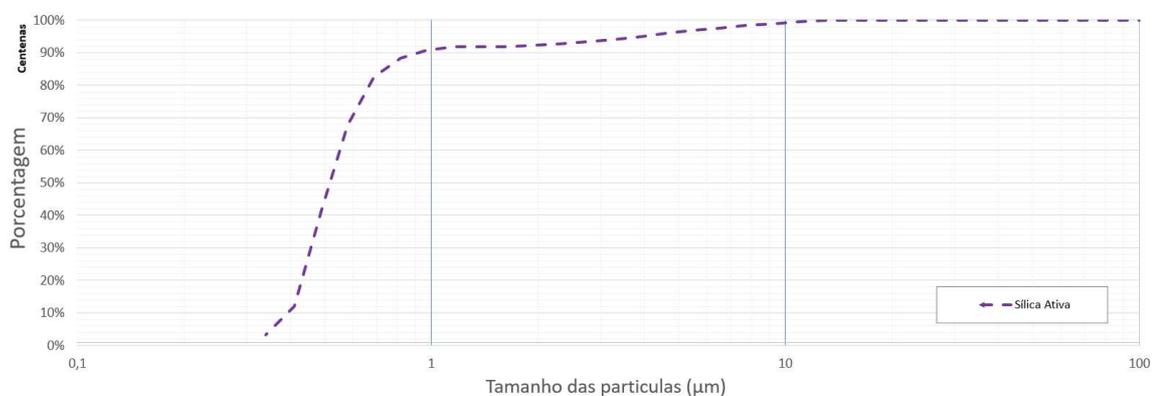
Tabela 10 - Características físicas da sílica ativa

Características físicas	Teores %
Umidade (%)	2
Massa específica (g/cm ³)	2,35
Densidade aparente	0,375
pH	10
Área específica B.E.T (m ² /kg)	20.000
Estado Físico	Sólido
Diâmetro médio (µm)	0,004
Perda ao fogo (%)	6

Fonte: Dow Corning

A distribuição granulométrica da sílica ativa também foi determinada através do ensaio de granulometria a laser. A Figura 51 apresenta as faixas granulométricas da sílica utilizada.

Figura 51 - Distribuição granulométrica da sílica ativa



Fonte: Autor

3.3.3 Cinza Volante

A cinza volante utilizada nesta pesquisa é proveniente de uma empresa que utiliza o carvão mineral como combustível, e foi obtida por precipitador eletrostático. Esta cinza é habitualmente utilizada por concreteiras da região metropolitana e na serra do Estado do Rio Grande do Sul.

A massa específica da cinza volante foi determinada através da NBR 16605 (ABNT, 2017), sendo o resultado obtido de 2,10 g/cm³. A perda ao fogo do material é

de 2,71%. A composição química da cinza, obtida através do ensaio de fluorescência de raios X de forma qualitativa, está apresentada na Tabela 11.

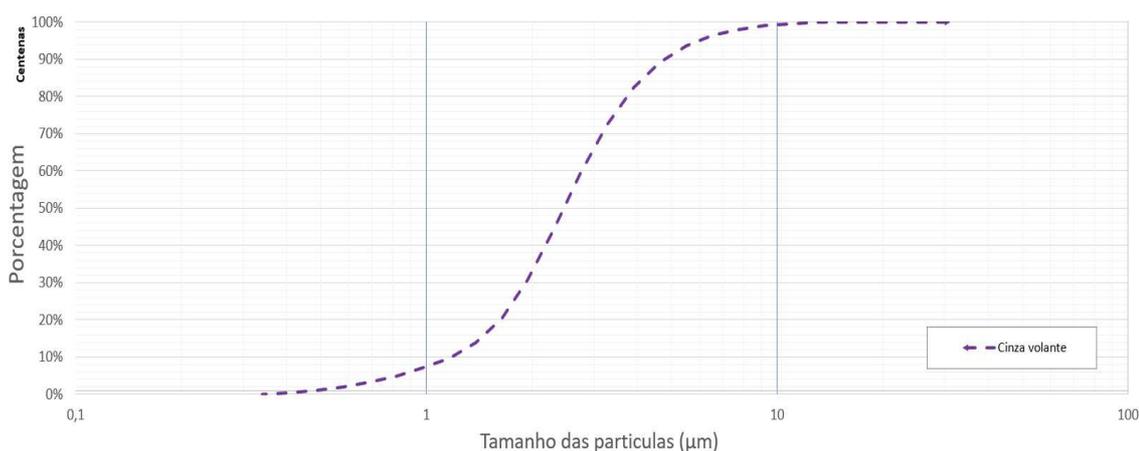
Tabela 11 - Composição química da cinza volante

Composição química	Teores %
Si	> 50
Al, Fe, K	5 < x < 50
Ca, Ti, Ba, S, Zr, Y, Rb, Sr, Zn	< 5

Fonte: Autor

A distribuição granulométrica da cinza volante foi determinada através do ensaio de granulometria a laser. A Figura 52 apresenta a curva granulométrica da cinza volante utilizada.

Figura 52 - Distribuição granulométrica da cinza volante



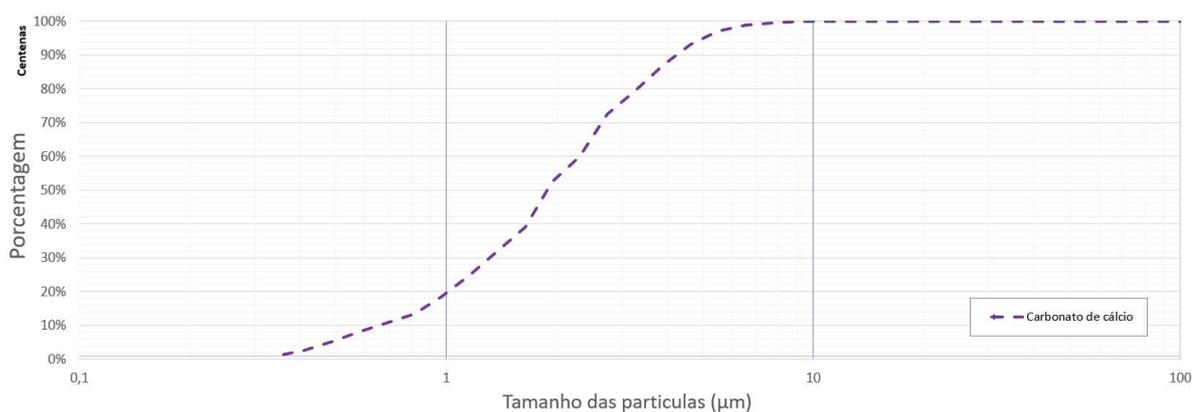
Fonte: Autor

3.3.4 Carbonato de Cálcio

O carbonato de cálcio utilizado nesta pesquisa é proveniente de rocha calcítica, finamente moído e com ótima alvura. Apresenta baixa absorção de água, inferior a 3%, peso específico de 2,71 g/m³, pH de 9 e umidade inferior a 0,3%. Este material é largamente utilizado como carga mineral na produção de compostos plásticos, especialmente de compostos de PVC.

A distribuição granulométrica do carbonato de cálcio foi determinada através do ensaio de granulometria a laser. A Figura 53 apresenta a curva granulométrica do carbonato de cálcio.

Figura 53 - Distribuição granulométrica do carbonato de cálcio



Fonte: Autor

Foi realizado o ensaio BET (Brunauer, Emmett, Teller) para determinar a área superficial específica do material, sendo o resultado desta análise de 3.3686 m²/g. A composição química do carbonato de cálcio foi obtida através do ensaio de fluorescência de raios X, de forma qualitativa, onde o resultado desta análise está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Composição química do carbonato de cálcio

Composto	Teores %
MgO	4,996
Al₂O₃	0,336
SiO₃	0,672
P₂O₅	0,470
SO₃	0,005
K₂O	0,086
CaO	46,36
MnO	0,001
Perda ao fogo	42,03

Fonte: Autor

3.3.5 Pó de Quartzo

O pó de quartzo utilizado nesta pesquisa é um material inorgânico e inerte, composto basicamente por dióxido de silício (SiO_2). É amplamente utilizado como carga mineral de tintas, borrachas, abrasivos entre outros materiais. A Tabela 13 apresenta as principais características físicas do material.

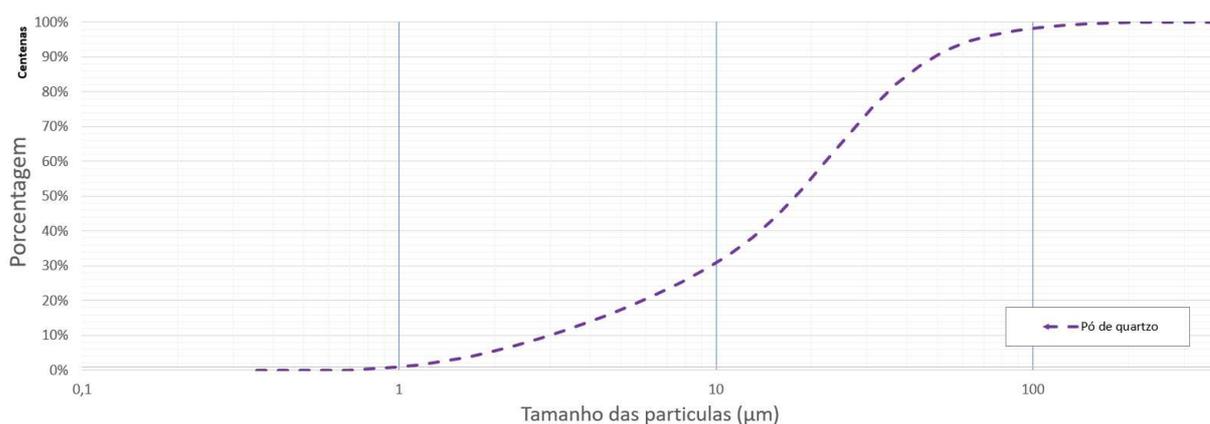
Tabela 13 - Características físicas do pó de quartzo.

Características	Teores %
Umidade (%)	< 1
Massa específica (g/m^3)	2,8
Densidade aparente	1,35
pH	11
Estado físico	sólido
Perda ao fogo	0,6

Fonte: Aralsul

A distribuição granulométrica do pó de quartzo foi determinada através do ensaio de granulometria a laser. A Figura 54 apresenta a curva granulométrica do pó de quartzo utilizado.

Figura 54 - Distribuição granulométrica do pó de quartzo



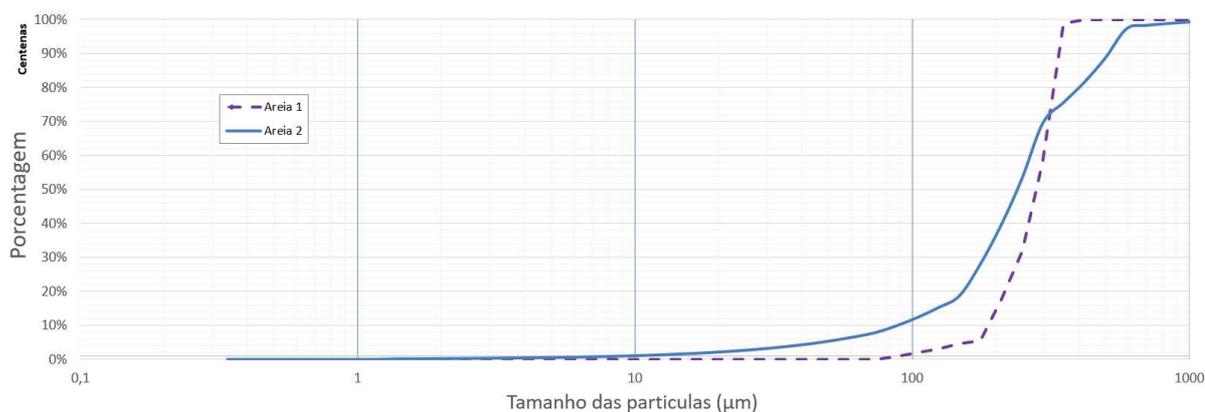
Fonte: Autor

3.3.6 Areias

As areias utilizadas nesta pesquisa são naturais de rio, porém sofrem um processo de lavagem, na qual todos os materiais orgânicos são separados. Estas

areias são utilizadas para a produção de ferro fundido, e a sua distribuição granulométrica foi determinada através do ensaio de peneiramento, segundo as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003). As massas unitária e específica foram determinadas conforme prescrições das NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR 9776 (ABNT, 1988). A Figura 55 apresenta as distribuições granulométricas das duas areias, denominadas areia 1 e areia 2.

Figura 55 - Distribuição granulométrica das areias



Fonte: Autor

A Tabela 14 apresenta os dados que originaram a distribuição granulométrica das areias, bom com as informações como módulo de finura e diâmetro máximo de cada areia.

Tabela 14 - Composição granulométrica das areias

Peneira #	Areia 1		Areia 2	
	Retida (%)	Acumulada (%)	Retida (%)	Acumulada (%)
1,2	0	0	0	0
0,6	0	0	0,99	1,0
0,3	1,48	1,73	76,61	77,60
0,15	60,62	62,35	21,61	99,21
0,075	33,04	95,39	0,79	100
Fundo	4,61	100	0	100
Diâmetro máximo	0,3 mm		0,6 mm	
Módulo de finura	2,59		2,78	
Massa específica	2590 kg/m ³		2660 kg/m ³	
Massa unitária	1390 kg/m ³		1450 kg/m ³	

Fonte: Autor

3.3.7 Fibras

As fibras utilizadas nesta pesquisa são de aço com formato reto, com 13 mm de comprimento e 0,21 mm de diâmetro. As propriedades mecânicas são de 2750 N/mm² de resistência à tração e módulo de elasticidade de 200 GPa. São comercializadas com a nomenclatura Dramix® OL 13/.20. A Figura 56 apresenta a fibra utilizada.

Figura 56 - Fibra de aço utilizada na pesquisa



Fonte: Autor

3.4 PROCEDIMENTO DE MISTURA E ENSAIOS

Para a produção de todos os traços, o mesmo procedimento de mistura foi utilizado. As misturas foram realizadas utilizando um misturador planetário com capacidade de 300 litros, instalado no Laboratório de Segurança Estrutural e de Durabilidade do Instituto itt Performance da Unisinos. O misturador, Figura 57, possui controle de velocidade de giro das pás, com faixa de velocidade de 0 a 100 RPM.

Figura 57 - Misturador planetário utilizado para a realização das misturas



Fonte: Autor

Para a realização das misturas foram seguidas as etapas descritas na Tabela 15, que apresenta a velocidade de giro das pás e o tempo estimado de cada etapa da mistura.

Tabela 15 - Procedimentos realizados para a execução de todas as misturas

Descrição da etapa	Tempo (min)	RPM
Introdução dos constituintes secos no misturador	0 – 1	0
Início da pré-mistura dos materiais	1 - 2	5
Inserção de 90% da água da mistura	2 – 3	10
Introdução de todo o aditivo superplastificante	3 – 4	10
Introdução de todo o aditivo modificador de viscosidade	3 – 4	10
Inserção do restante da água na mistura	3 – 4	10
Mistura de todos os materiais com maior velocidade	4 – 10	40
Introdução das fibras	10 - 12	10
Final da mistura	12 – 15	40

Fonte: Autor

Após a mistura finalizada, foi realizado o ensaio do espalhamento, de acordo com as prescrições da NBR 15823-2 (ABNT, 2017), conforme pode ser visto na Figura 58. Buscou-se obter um espalhamento maior do que 600 milímetros.

Figura 58 - Sequência do ensaio de espalhamento realizado em todas as misturas



Fonte: Autor

As misturas que não apresentaram um espalhamento maior do que 600 milímetros foram ajustadas, e quantidade de água foi alterada. Após, os corpos de prova foram moldados em camada única. Após 24 horas da moldagem, foram desformados e acomodados na sala de cura úmida com controle de temperatura e umidade de $25 \pm 3^\circ\text{C}$ e 100%, respectivamente.

3.5 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Para a avaliação da mistura em seu estado fresco foi realizado o ensaio de espalhamento e determinado o índice de estabilidade visual e o tempo de escoamento, conforme NBR 15823-2 (ABNT, 2017). A utilização deste método para a determinação da trabalhabilidade do UHPC foi escolhida devido a reologia do UHPC ser muito similar ao do CAA.

A determinação do espalhamento foi obtida através da leitura de duas medidas perpendiculares do diâmetro do círculo formado pelo concreto após o término do seu escoamento. No mesmo instante em que se retirou o tronco de cone,

foi determinado o tempo de escoamento da mistura, que consiste no tempo que o círculo formado pela mistura atinge a marcação circular de diâmetro 500 mm na placa base. A ocorrência de segregação ou exsudação da mistura foi observada através do índice de estabilidade visual. A evidência destes parâmetros foi verificada através do formato da pilha central da mistura e pela auréola de finos nas extremidades da mesma.

3.6 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios realizados no concreto em seu estado endurecido compreenderam na determinação da resistência à compressão axial, fator de tenacidade e a resistência à flexão equivalente das misturas.

3.6.1 Resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão das misturas foi realizada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) para os corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm diâmetro e 20 cm de altura.

Foram moldados corpos de prova cúbicos de 10 cm de arresta, sendo que os ensaios foram realizados de acordo com a EN 12390-3 (BS, 2009), ensaiados no Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil da Unisinos – itt Performance, utilizando a prensa servo hidráulica da marca Emic/Instron, com capacidade de carga de 2000 kN. Para cada tipo de corpo de prova foram moldados três exemplares os quais tiveram as superfícies retificadas.

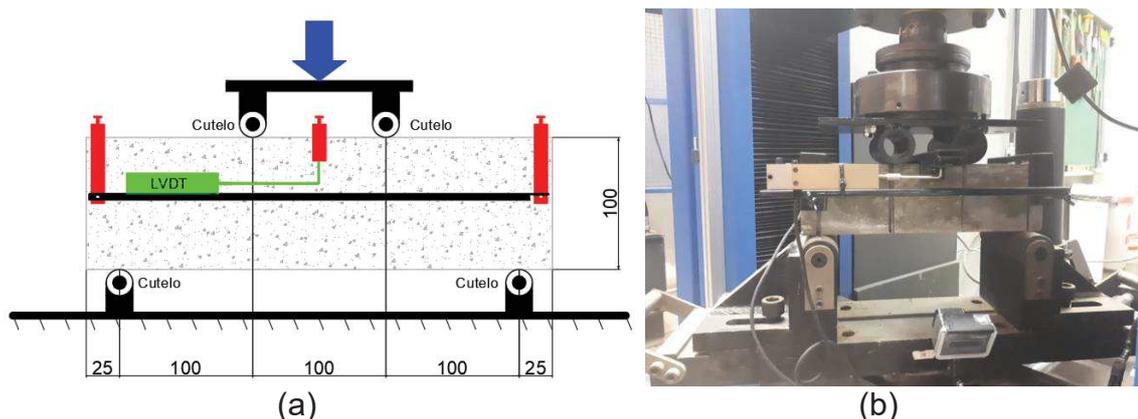
3.6.2 Resistência à flexão e fator de tenacidade

A resistência à tração na flexão equivalente e a tenacidade dos concretos foram determinadas através do ensaio prescrito pela ASTM C1906-12 (ASTM, 2012). O método prevê a obtenção da resistência à tração na flexão máxima (f_P), resistência à tração na primeira fissura (f_1), tenacidade e a resistência à flexão equivalente ($R_{R,150}^D$).

Para obtenção das propriedades foram confeccionados três corpos de prova prismático com dimensões de 100 mm de largura, 100 mm de altura e 350 mm de

comprimento, com um carregamento com deslocamento prescrito de 0,2 mm por minuto. O carregamento aplicado no prisma foi realizado através de quatro pontos, sendo dois pontos de apoio inferior e dois de aplicação da carga superior, conforme pode ser evidenciado na Figura 59.

Figura 59 - Ensaio de tenacidade e resistência à flexão: (a) esquema do dispositivo e (b) ensaio sendo realizado



Fonte: Autor

A resistência à tração na flexão do concreto na primeira fissura e após a primeira fissura foi determinada a partir da relação entre a carga de ruptura (P), correspondente a carga de cada ponto, e o comprimento entre os cutelos inferiores (L) pela largura (b) e a altura ao quadrado (d) do corpo de prova, conforme a equação 17.

$$f = \frac{P * L}{b * d^2} \quad (17)$$

A tenacidade do material, que corresponde a capacidade de absorção de energia, foi determinada através do cálculo da área sob a curva carga *versus* deslocamento.

3.6.3 Análise e tratamento dos dados

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório, estes foram tratados e analisados estatisticamente por meio de uma Análise de Variância (ANOVA), de modo a verificar quais fatores exercem efeito significativo sobre as

variáveis de resposta. A análise de variância consiste na comparação das médias entre as amostras e a verificação de hipóteses, nula e alternativa, para determinação da região crítica.

Os cálculos associados à análise de variância são apresentados em tabela, onde o valor resultante do teste é comparado com um valor crítico, que indica o valor máximo para a hipótese ser verdadeira, a um determinado nível de confiança e de acordo com os graus de liberdade.

Para a realização das análises foi utilizado o software excel, com um nível de confiança de 95% entre os efeitos dos fatores de controle sobre as propriedades dos concretos produzidos nos estados fresco e endurecido.

4 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados e as análises de cada mistura com o método proposto nesta pesquisa. São apresentados os resultados no estado fresco e no estado endurecido.

4.1 AVALIAÇÃO DAS PROPORÇÕES ENCONTRADAS COM O MÉTODO PROPOSTO

Os resultados apresentados na sequência são provenientes das proporções dos constituintes encontrados com o método proposto para os materiais utilizados nesta pesquisa. Nesta etapa da pesquisa não foram introduzidas as fibras, uma vez que foi apenas avaliada a eficiência do método com relação a proporções dos materiais para se obter a maior resistência à compressão.

4.1.1 Resultados no estado fresco das misturas sem fibras

Todas as quatro combinações desenvolvidas tiveram a mesma sequência de mistura, tanto com relação ao tempo de mistura, velocidade e sequência da colocação dos materiais. O UHPC apresentou uma excelente trabalhabilidade, similar a um concreto autoadensável. Os espalhamentos encontrados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados do espalhamento das misturas avaliadas

Misturas	Relação a/agl	Espalhamento mm			T ₅₀₀
		B1	B2	$\mu \pm \sigma$	
IDE 87	0,23	620	630	625 \pm 2,8	3,82
IDE 98	0,25	730	780	755 \pm 35,3	1,71
IDE 118	0,26	730	770	750 \pm 28,3	1,65
IDE 133	0,23	610	640	625 \pm 21,2	2,74

Onde: μ = média; σ = desvio padrão

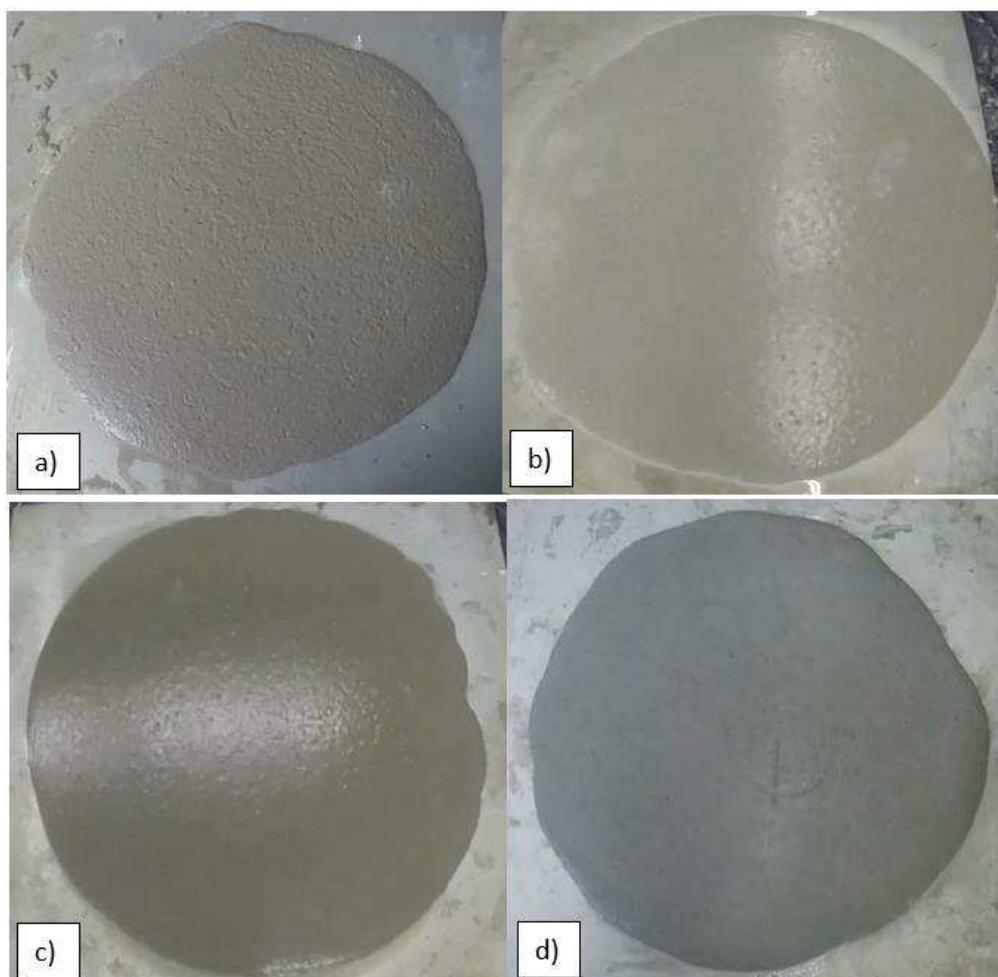
Fonte: Autor

As diferentes misturas avaliadas neste trabalho, por se tratar de um UHPC e não possuírem agregados graúdos em sua composição, tendem a apresentar uma boa trabalhabilidade. Porém, pode-se verificar que o espalhamento foi maior nas

misturas que possuem uma relação a/agl maior, este comportamento está de acordo com a literatura, como foi evidenciado por Choi et al. (2016) e Pyo e Kim (2017).

A avaliação da viscosidade plástica aparente para um fluxo livre (T_{500}), mostra que as misturas com maior espalhamento apresentaram uma menor viscosidade, apresentando uma maior velocidade de fluidez. Esta propriedade influencia diretamente na velocidade em que o material preenche a forma durante a concretagem. É possível perceber que a viscosidade é influenciada pela relação a/agl das misturas. Ambas as amostras apresentaram um espalhamento homogêneo, sem apresentar um volume de material retido no centro da placa, como pode ser visto na Figura 60, que mostra o espalhamento encontrado em cada traço desenvolvido pelo método proposto.

Figura 60 - Formas do espalhamento das misturas, a) IDE 87; b) IDE 98; c) IDE 118; d) IDE 133



Fonte: Autor

Nesta pesquisa buscou-se desenvolver uma mistura que apresentasse um espalhamento mínimo de 600 milímetros, e para isso foi fixada a quantidade de aditivo superplastificante, sendo a água ajustada em função da fluidez desejada. Este ajuste não é muito simples de ser realizado, pois uma pequena quantidade de água pode proporcionar um aumento muito grande na fluidez, mas como já evidenciado em pesquisas anteriores, pode também alterar significativamente a estabilidade do concreto.

O ajuste de água para as misturas de UHPC pode requerer a realização de pré-misturas para a verificação do atendimento do abatimento requerido. Diferentemente de estudos de dosagens em concretos convencionais, o reajuste de materiais para corrigir alguma variável para o UHPC não se aplica. A relação água/aglomerante foi ajustada em função do espalhamento desejado e, devido a isso, os valores apresentaram variações, ficando inclusive superiores às encontradas por Fehling et al. (2015), Soliman, Tagnit-hamou (2016), Soliman (2016) e Torregrosa (2013).

Ainda, pode-se verificar que nenhuma mistura apresentou espalhamento inferior a 600 milímetros, porém houve variações entre elas, de até de 130 milímetros na média, devido a grande sensibilidade do UHPC.

O comportamento reológico da mistura de UHPC foi ligeiramente afetado com o aumento da demanda de água, proporcionando ao material maior fluidez. Estas evidências foram encontradas pelos pesquisadores Choi et al. (2016), Torregrosa (2013), Toutlemonde e Resplendino (2011).

4.1.2 Resistência à compressão das misturas sem fibras

A resistência à compressão das misturas avaliadas com o método proposto, sem a incorporação de fibras, foi estudada com corpos de prova cilíndricos e cúbicos. Os resultados da resistência à compressão das misturas desenvolvidas através do método proposto estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultado da resistência à compressão das misturas desenvolvidas

CPs	Traço	7 Dias			14 Dias			28 Dias			56 Dias			91 Dias		
		MPa			MPa			MPa			MPa			MPa		
		Individual	Potencial	Média												
	IDE	52			79,4			81			100,7			96,8		
		44,9	52	46,5	61,7	79,4	70,7	84,8	84,8	82,3	114,4	118,9	111,3	98	98	90,5
		42,5			70,9			81,1			118,9			76,7		
	87	43,4			81,1			76,6			94,7			91,8		
		44,8	51,8	46,7	79,2	81,1	78,0	87,6	87,6	81,7	94,8	94,8	93,6	92,3	120	101,4
		51,8			73,7			80,8			91,2			120		
	IDE	53,9			64,5			59,8			82,1			81,9		
		52,2	53,9	52,6	66,5	66,5	61,7	66	66	61,8	81,9	87,1	83,7	85,7	89	85,5
		51,7			54,1			59,6			87,1			89		
	98	48,5			65,6			68,9			86,1			93,3		
		49,4	53	50,3	64,7	65,6	64,2	61	76,6	68,8	80,2	86,1	82,6	90,6	95,5	93,1
		53			62,2			76,6			81,6			95,5		
	IDE	78,1			76,8			102,6			77,4			93,9		
		63,2	78,1	72,2	74,6	76,8	73,6	85,6	102,6	88,9	73,1	103,4	84,6	118,3	118,3	109,4
		75,4			69,5			78,5			103,4			116		
	118	58,4			73,3			82,6			99,2			103,7		
		61,4	61,4	58,5	74,1	75,5	74,3	90,7	90,7	86,0	99,3	105,9	101,5	112,1	112,1	75,8
		55,7			75,5			84,7			105,9			11,7		
	IDE	49			74			73,9			86,1			95,9		
		52	52,1	51,0	60,3	74	67,1	78,4	78,4	64,6	82,3	86,1	82,0	71,3	95,9	77,6
		52,1			67,1			41,6			77,5			65,5		
	133	56,2			69,5			77			86,7			68,9		
		58,9	67,9	61,0	75,9	75,9	72,2	77	77	76,5	93,1	93,1	89,7	92,3	92,3	72,0
		67,9			71,1			75,6			89,3			54,8		

Fonte: Autor

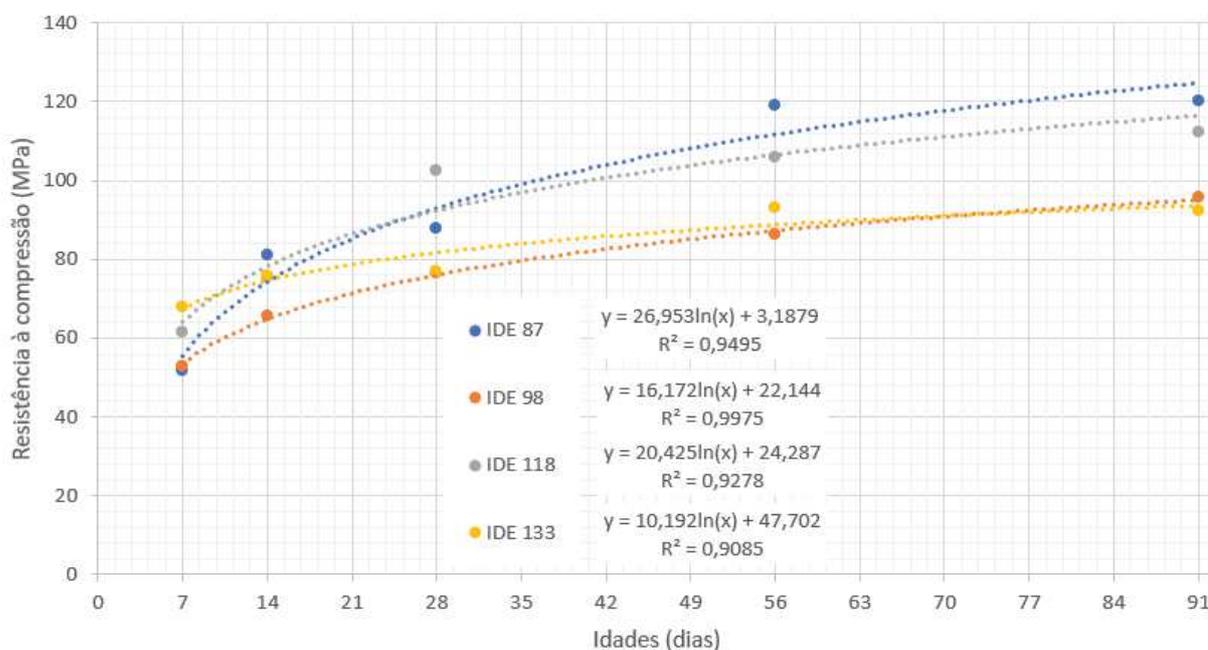
Houve variação de resultados em função do tipo de corpo de prova, cilíndricos e cúbicos, como previsto na norma EN 1992-1 (EUROPEAN STANDARD, 2004).

Segundo a norma EN 1992-1 (EUROPEAN STANDARD, 2004), os corpos de prova cúbicos apresentam maior resistência à compressão com relação aos corpos de prova cilíndricos. Os resultados encontrados nesta pesquisa, em diferentes idades, não seguiram esta tendência. Para algumas idades, a maior resistência foi encontrada em corpos de prova cilíndricos, divergindo do que a EN 1992-1 (EUROPEAN STANDARD, 2004) prescreve. É importante destacar que a norma se refere especialmente para concretos convencionais e não para UHPC.

Ao se analisar as resistências potenciais de cada mistura, pode-se perceber que a mistura que apresentou melhor resultado foi a com o menor índice de desvio do empacotamento (IDE), ou seja, a mistura com melhor empacotamento em função das dimensões dos agregados de cada mistura.

A Figura 61 apresenta a evolução das resistências potenciais encontradas para cada traço, para os corpos de prova cilíndricos, na qual pode ser verificado que cada mistura apresentou diferente evolução da resistência em função da idade de cura.

Figura 61 - Resistências potenciais de cada mistura em diferentes idades para os corpos de prova cilíndricos



Fonte: o autor

A evolução da resistência de cada mistura, representada pelas curvas de tendências, evidencia que a resistência à compressão foi maior quanto maior o tempo de cura, como esperado. Pode ser evidenciado que a mistura IDE 87 apresentou um índice logaritmo superior se comparada com as demais, evidenciando que o IDE com valor mais baixo apresenta o melhor desempenho mecânico.

É possível perceber ainda, com relação a curva de tendência apresentada que as misturas com IDE de 98 apresenta um crescimento inferior ao IDE 118. Porém, cada mistura foi avaliada com diferentes materiais e não apenas proporções variadas dos mesmos. Com isso é possível concluir também que os materiais a serem utilizados também interferem no desempenho do traço a ser desenvolvido.

Se analisarmos os materiais utilizado nas misturas IDE 87, IDE 98 e IDE 118, onde observamos que o IDE de 98 obteve uma tendência de crescimento da resistência ao longo do tempo menor, pode-se perceber que duas variações são evidências.

Uma destas variações é a quantidade de areia utilizada, sendo que as misturas de IDE 87 e IDE 118 possuem 51,33% e 48,01% respectivamente e o IDE 98 possui uma quantidade menor de areia possuindo 44,63%. A outra variação entre as misturas, é a quantidade de materiais com granulometria inferior a 100 μm , sendo que para as misturas IDE 87 e IDE 118 apresentam uma quantidade de 48,67% e 51,99% respectivamente e para a mistura com IDE 98 apresenta uma quantidade de 55,33%.

Pode ser evidenciado então que, além de obtermos um baixo índice de desvio de empacotamento, a quantidade de materiais finos, abaixo de 100 μm , deve ser mais próximo possível de 50% da mistura.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas (variável independente) com relação a resistência à compressão (variável dependente) para cada idade de cura, foi realizado uma análise de variância (ANOVA), cujo resultados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Análise de variância da resistência à compressão para cada idade de cura

ANOVA 7 dias						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre os traços	1152,81	3	384,27	10,02282	0,000305	3,098391
Dentro dos traços	766,79	20	38,3395			
Total	1919,6	23				
ANOVA 14 dias						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre os traços	506,2646	3	168,7549	6,068845	0,004135	3,098391
Dentro dos traços	556,135	20	27,80675			
Total	1062,4	23				
ANOVA 28 dias						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre os traços	1859,593	3	619,8644	7,431002	0,001562	3,098391
Dentro dos traços	1668,32	20	83,416			
Total	3527,913	23				
ANOVA 56 dias						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre os traços	1339,788	3	446,5961	4,856109	0,010693	3,098391
Dentro dos traços	1839,317	20	91,96583			
Total	3179,105	23				
ANOVA 91 dias						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre os traços	1563,59	3	521,1967	0,978646	0,422551	3,098391
Dentro dos traços	10651,38	20	532,5692			
Total	12214,97	23				

Fonte: Autor

Analisando os resultados da análise estatística para cada idade de cura, considerando um nível de significância de 5% ($p < 0,05$) e implicando a um nível de confiança de 95%, é possível constatar que os valores de F são maiores do que

$F_{\text{crítico}}$, o que significa que há diferença significativa entre a resistência com relação aos traços desenvolvidos para todas as idades exceto para a idade de 91 dias.

Avaliando todos os resultados estatísticos encontrados com relação a variação da resistência em função do tempo de todas as misturas, tem-se o resumo apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Resumo da análise estatística da influência da idade na resistência à compressão das misturas

Variação das idades	F	F_{crítico}	Valor-P
7 dias	10,02282	3,098391	0,000305
14 dias	6,068845	3,098391	0,004135
28 dias	7,431002	3,098391	0,001562
56 dias	4,856109	3,098391	0,010693
91 dias	0,978646	3,098391	0,422551

Fonte: Autor

Pode-se perceber que à medida em que a idade de cura aumenta, o nível de significância diminui, mostrando que quanto maior o tempo de cura percebe-se diferença significativa com relação a resistência à compressão em função do tempo para as misturas desenvolvidas. Esta análise mostra que, o tempo de cura interfere significativamente na resistência à compressão para ambas as misturas.

Observa-se pelos resultados de resistência à compressão apresentados, que a mistura com menor IDE proporcionaram uma maior resistência à compressão da mistura e uma trabalhabilidade adequada. Portanto, o método se mostrou satisfatório para estes materiais.

Os valores de resistência à compressão encontrados nesta etapa da pesquisa não ultrapassaram a resistência característica que algumas entidades, como AFGC (2013) e ACI COMMITTEE 239 (2013), definem como sendo um UHPC. Cabe ressaltar que para esta pesquisa ambos os traços utilizaram o mesmo consumo de cimento que foi de 493,5 kg/m³, consumo este 29,5% inferior ao consumo médio utilizado em traços de UHPC, que é de 700 kg/m³ conforme estudo apresentado pelo pesquisador Torregrosa (2013). Este consumo inferior ao praticado trivialmente em

diferentes pesquisas, aliado com o tipo de cimento utilizado, com 10% de adições pode levar a uma redução na resistência à compressão da matriz.

Diversas pesquisas, como de Alsalman, Dang, Micah Hale (2017), Kang et al. (2016), Soliman (2016) e Wang et al. (2017) evidenciaram que a cura térmica a mais de 100°C potencializa a resistência à compressão da matriz. Ainda, o UHPC definido pelas entidades citadas tem fibras em sua composição, o que interfere nos resultados finais. Nesta etapa da pesquisa, sem o uso de fibras, o intuito foi de validar o método de dosagem dos constituintes com diferentes materiais, e avaliar se de fato estas misturas tenderiam a obter uma mistura com elevada resistência à compressão e boa trabalhabilidade.

4.2 RESULTADOS DA MISTURA COM FIBRAS

Com a determinação da melhor proporção entre os constituintes, o método proposto indica a porcentagem máxima de fibras a ser utilizada, baseada na equação 16 que estabelece o percentual máximo a ser empregado na mistura sem perder a trabalhabilidade da mesma, como mostrado no capítulo 3.

A mistura escolhida foi a IDE 87, que apresentou a maior resistência potencial em relação às quatro misturas avaliadas. Sendo assim esta mistura foi a utilizada para avaliar a influência das propriedades reológicas e mecânicas com a incorporação de 1%, 2% e 2,9% de fibras de aço na matriz, como apresentado no capítulo 3 desta pesquisa, obtendo uma mistura de UHPC.

4.2.1 Resultados no estado fresco das misturas com fibras

A trabalhabilidade da mistura com os diferentes percentuais de fibras foi avaliada através do ensaio de espalhamento prescrito pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017), onde também foi avaliada a viscosidade plástica aparente para fluxo livre (T_{500}). De maneira geral, a trabalhabilidade com as quantidades de fibras avaliadas não teve significativas mudanças. Os resultados do espalhamento das misturas estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do espalhamento da mistura IDE87 e com diferentes teores de fibras

Teores de fibras	Espalhamento mm			T ₅₀₀
	B1	B2	$\mu \pm \sigma$	
REF.	620	630	625 \pm 2,8	3,82
1% fibras	630	640	635 \pm 7,0	3,58
2% fibras	630	610	620 \pm 14,1	4,45
2,9% fibras	630	620	625 \pm 21,2	4,68

Onde: μ = média; σ = desvio padrão

O espalhamento das misturas, permaneceu superior a 600 milímetros, sendo que as misturas com fibras apresentaram maior trabalhabilidade do que a mistura sem fibras, concordando com os estudos Martinie, Rossi, Roussel (2010) e Choi et al. (2016).

O método utilizado para determinar a quantidade de fibras máxima da mistura, sem que houvesse uma perda da trabalhabilidade, pode ser comprovado. A variação média do espalhamento entre as misturas foi de no máximo 10 milímetros, inferior a variação entre as classes de espalhamento prescrito para concretos autoadensável, mostrando que o método proposto tem coerência com relação a conservar a trabalhabilidade da mistura mesmo com a variação da quantidade de fibras.

O método proposto nesta pesquisa, com relação ao teor de fibras máximo, evidencia que a trabalhabilidade não foi afetada com relação a quantidade das fibras inseridas na mistura, o que já foi verificado em outras publicações como por exemplo Martinie, Rossi, Roussel (2010), Soroushian, Bayasi (1991) e Banfill et al. (2006).

O método proposto leva em consideração o fator de forma das fibras e a densidade da mistura para poder chegar em uma porcentagem máxima de fibras em uma mistura, onde em todas as publicações citadas, também apresentam relações com o fator de forma das fibras.

Estudos como Yu, Spiesz, Brouwers (2014) mostram que a trabalhabilidade do UHPC é afetada com o teor de fibras na matriz, porém esta sensibilidade pode variar conforme as proporções dos materiais e suas propriedades específicas. O método proposto nesta pesquisa leva em consideração estes fatores, mostrando-se adequado para o tipo de fibra empregado nesta pesquisa.

A avaliação da viscosidade plástica aparente, realizada pelo ensaio prescrito pela norma NBR 15823-2 (ABNT, 2017), onde é evidenciado o tempo em que a mistura leva para ter um espalhamento de 500 milímetros. Os resultados do T_{500} apresentados na Tabela 20 evidencia que as misturas mesmo com diferentes teores de fibras não apresentaram grandes variações quanto a sua capacidade de fluir.

Pode ser evidenciado que, na medida em que o teor de fibra aumentou, a velocidade de fluidez diminuiu, e por tanto a sua viscosidade foi maior. Nota-se que, pelos resultados de T_{500} , as misturas, apresentam alterações em relação ao tempo em que levaram para atingir um espalhamento de 500 milímetros, sendo maior em função do teor de fibras empregado.

O método utilizado nesta pesquisa mostrou que a quantidade máxima de fibras encontrada não afeta a trabalhabilidade da mistura significativamente e, garante assim, uma maior capacidade do material em resistir as solicitações de tração, e assim fazendo com que o composto tenha maior benefício quando utilizado em elementos submetidos a flexocompressão por exemplo. A Figura 62 apresenta o espalhamento encontrado em cada mistura desenvolvida nesta etapa.

Figura 62 - Espalhamento das misturas, a) Ref.; b) 1% fibras; c) 2% fibras; d) 3% fibras



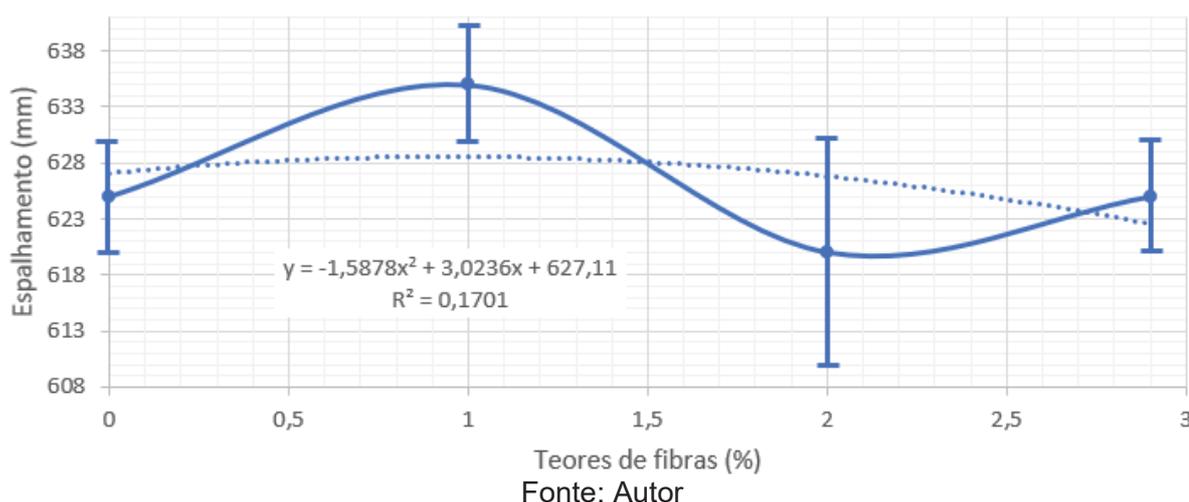
Fonte: Autor

Ao analisar visualmente as misturas com diferentes percentuais de fibras, não houve significativa mudança. Pode-se perceber que na mistura com 2,9% de fibras (d), houve uma presença maior de fibras na superfície, uma vez que havia uma quantidade de aproximadamente, 230 kg/m³ de fibras, acima da praticada em concretos reforçados com fibras, que é de 1% em relação ao volume de concreto, que corresponde a, aproximadamente, 80 kg/m³ (FIGUEIREDO, 2011; ZOLLO, 1997).

O UHPC apresenta grandes variações quanto à trabalhabilidade, estudo apresentado por Torregrosa (2013), mostram que estas variações são comuns e podem chegar a uma variação de 650 à 800 milímetros, onde estas variações estão relacionadas a relação água/aglomerante, teor de finos e tipo de fibras.

Mas se considerarmos que a variação de classe de espalhamento de um concreto fluido como o concreto autoadensável é de 110 milímetros, a variação encontrada nesta pesquisa entre a mistura sem fibras e com o máximo teor de fibras teve uma variação máxima de 15 milímetros, como pode ser evidenciado na Figura 63.

Figura 63 - Variação do espalhamento do UHPC com relação ao teor de fibras



Comparando a trabalhabilidade encontrada em diferentes pesquisas, tais como Torregrosa (2013), Soliman (2016) e Pyo, Kim (2017), pode-se evidenciar que os valores de trabalhabilidade encontrados nesta pesquisa apresentam similaridade para os percentuais de fibras utilizados.

Poucas pesquisas realizaram o mesmo ensaio para verificar a trabalhabilidade do UHPC com o ensaio de espalhamento, pelo fato destas não

utilizarem uma mistura com quantidades mínimas para a execução do ensaio, o que dificulta a comparação dos resultados.

Soliman, Tagnit-hamou (2016) e Yu, Spiesz, Brouwers (2014) realizaram pesquisas com menor quantidade de material e nestes casos a trabalhabilidade foi medida com o ensaio de mini-slump. A confrontação com outros trabalhos é orientativa e comparatória, mas não deve ser fielmente seguida uma vez que muitas pesquisas são realizadas em volumes de materiais menores o que dificulta a análise com o ensaio de espalhamento.

Avaliando a influência do teor de fibras (variável independente) com relação a trabalhabilidade medida pelo espalhamento das misturas (variável dependente), foi realizada uma análise de variância (ANOVA), cujos resultados estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Análise de variância dos teores de fibras com relação a trabalhabilidade

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teores de fibras	237,5	3	79,16667	0,904762	0,513284	6,591382
Dentro dos grupos	350	4	87,5			
Total	587,5	7				

Fonte: Autor

Analisando o resultado do tratamento estatístico, é possível concluir que com 95% de confiança que não há variação significativa na trabalhabilidade em função das variações dos teores de fibras empregados. Mostrando que o método proposto para a determinação da quantidade máxima de fibra a ser inserida nas misturas, para os materiais utilizados neste trabalho foi eficiente.

4.2.2 Resistência à compressão das misturas com fibras

A avaliação da resistência à compressão das misturas com as adições de fibras, da mesma forma como a sem adição de fibras, ocorreu com dois tipos de corpos de provas, cúbicos e cilíndricos. Os resultados das resistências estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resistências à compressão das misturas com diferentes teores de fibras

CPs	Fibras	7 Dias			28 Dias			91 Dias		
		MPa			MPa			MPa		
		Ind.	Potencial	Média	Ind.	Potencial	Média	Ind.	Potencial	Média
	0%	52			81			96,8		
		44,9	52	46,5	84,8	84,8	82,3	98	98	90,5
		42,5			81,1			76,7		
	0%	43,4			76,6			91,8		
		44,8	51,8	46,7	87,6	87,6	81,7	92,3	120	101,4
		51,8			80,8			120		
	1%	75,8			102,9			122,5		
		77,4	78,8	77,3	109,4	111,5	107,9	123,2	123,5	123,1
		78,8			111,5			123,5		
	1%	71			100,1			130,2		
		73,2	73,2	71,9	110,8	110,8	95,9	113,4	130,2	121,6
		71,4			76,9			121,2		
	2%	85,2			116,2			129,8		
		78,6	85,2	82,7	115,2	116,2	115,2	129,7	129,8	122,6
		84,3			114,3			108,4		
	2%	76,6			101,5			132,1		
		72,1	76,6	74,2	106,1	117,5	108,4	127,9	132,1	130,4
		74			117,5			131,2		
	3%	95,9			126,6			115,5		
		79,8	95,9	87,4	106,6	126,6	119,5	132,3	138,5	128,8
		86,5			125,2			138,5		
	3%	80,6			110,7			137,6		
		79,3	80,6	79,6	113,7	113,7	112,5	136	137,6	136,2
		78,8			113			135		

Fonte: Autor

Analisando os resultados das resistências à compressão é possível identificar que as maiores resistências não foram em sua totalidade encontradas nos corpos de prova cúbicos, como evidencia a norma EN 1992-1 (EUROPEAN STANDARD 1992-1, 2004), e como foi identificado nos resultados dos corpos de prova sem fibras.

Para as misturas com 0% e 2% de fibras as resistências potenciais maiores foram evidenciadas nos corpos de prova com formato cilíndrico, sendo que a resistência potencial aos 91 dias da mistura com 1% de fibras também foi evidenciada no corpo de prova com formato cilíndrico. Na mistura com 3% de fibras, ambas resistências potenciais em relação a idade de cura foram evidenciadas no corpo de prova com formato cúbico.

A resistência à compressão potencial de maior valor foi encontrada na mistura com 2,9% de fibra e na idade de 91 dias, com 138,5 MPa. Comparando as resistências à compressão das misturas com e sem fibras, tem-se um aumento superior a 13% da resistência à compressão. Mesmo tendo este aumento com a incorporação de fibras, a resistência da matriz não ultrapassou os 150 MPa de

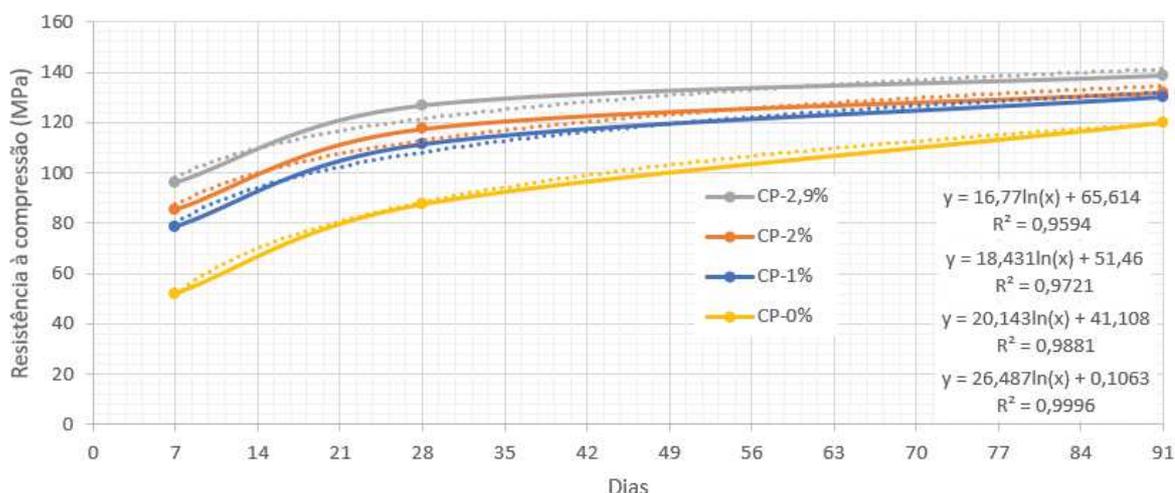
resistência à compressão, valor apresentado como sendo a resistência mínima para ser considerado um UHPC.

Sabe-se que a resistência à compressão de uma mistura cimentícia evolui com o tempo (MEHTA, MONTERIRO (2014) E NEVILLE, BROOKS (2010)), logo a resistência pode ser alcançada com um tempo maior de cura, ou inclusive com a aplicação de cura térmica, como é evidenciado em trabalhos como Hüsken, Brouwers (2008), Richard, Cheyrezy (1995), Wang et al. (2015), Yigiter et al. (2012) e Yu, Spiesz, Brouwers (2014).

Nesta pesquisa não se buscou avaliar a influência da cura térmica na matriz, porém é sabido que este tratamento influencia diretamente na resistência à compressão. O tratamento térmico após 24 horas da moldagem, com temperatura de 105 °C por um período de 24 horas, pode aumentar a resistência à compressão em mais de 20%, segundo Heinz, Ludwig (2004).

Para facilitar a visualização da evolução da resistência à compressão com o tempo, um gráfico com as diferentes misturas foi gerado e é apresentado bem como a equação e o coeficiente de determinação que para todos foi superior a 0,9, como pode ser evidenciado na Figura 64.

Figura 64 - Evolução da resistência em função do tempo das diferentes misturas



Fonte: Autor

Pode-se analisar que há um acréscimo de resistência à compressão com o tempo de cura para todas as misturas independente do teor de fibras. É possível perceber que quanto maior o teor de fibras na mistura maior é a resistência à compressão. É de conhecimento e apresentado em várias pesquisas e inclusive

normas de dimensionamento de estruturas que a resistência à compressão de concreto evolui com o passar do tempo, onde esta evolução depende do tipo de cimento utilizado na mistura.

Aliando esta evidência ao crescimento da resistência ao longo do tempo mostrado na Figura 64, utilizando a equação gerada pela curva de tendência com coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 pode-se verificar que a resistência à compressão da mistura com 2,9 % de fibra atingiria o valor de 150 MPa em aproximadamente 150 dias. Para avaliar a significância do teor de fibras (variável independente) com relação a resistência à compressão de todos os corpos de prova (variável dependente) para as três idades, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), cujo resultados estão apresentados nas Tabela 23.

Tabela 23 -Análise de variância da resistência à compressão em relação ao teor de fibras para a idade de 7 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teores de fibras	4928,025	3	1642,675	64,49513	1,8429E-10	3,098391
Dentro dos grupos	509,395	20	25,46975			
Total	5437,42	23				

Fonte: Autor

A análise de variância para a resistência à compressão aos 7 dias indica que há diferença significativa na resistência à compressão entre os teores de fibras avaliado, com 95 % de confiança. A Tabela 24 apresenta a análise para a idade de 28 dias.

Tabela 24 - Análise de variância da resistência à compressão em relação ao teor de fibras para a idade de 28 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teores de fibras	4130,325	3	1376,775	18,80281	4,8759E-06	3,098391
Dentro dos grupos	1464,435	20	73,22175			
Total	5594,76	23				

Fonte: Autor

Para a análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias, tem-se a indicação de haver diferença significativa com relação a resistência à compressão em função do teor de fibras avaliado. É possível identificar que a significância da análise realizada afirma a evidência de que há diferença significativa na resistência à compressão. A mesma análise foi realizada para a resistência à compressão aos 91 dias, e a Tabela 25 apresenta a análise de variância realizada.

Tabela 25 - Análise de variância da resistência à compressão em relação ao teor de fibras para a idade de 91 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teores de fibras	4686,49	3	1562,163	16,4158	1,2832E-05	3,098391
Dentro dos grupos	1903,243	20	95,16217			
Total	6589,733	23				

Fonte: Autor

A análise de variância da resistência à compressão aos 91 dias também indica que há diferença significativa com relação a resistência à compressão em função do teor de fibras. É possível perceber analisando cada idade de cura que a significância da relação entre a resistência à compressão e teor de fibras está variando conforme o tempo, onde para idades iniciais a confiabilidade é maior, mesmo todas apresentando uma significância considerada.

O método de dosagem proposto nesta pesquisa mostra evidências de que a resistência à compressão tende a apresentar acréscimo com relação ao tempo e com o aumento do teor de fibras incorporado na mistura.

4.2.3 Resistência à tração na flexão e tenacidade das misturas com fibras

A resistência à tração na flexão máxima (f_p) e a resistência à tração na primeira fissura (f_1), bem como a tenacidade e a resistência à flexão equivalente ($R^D_{R,150}$) para cada mistura com diferentes teores de fibras nas diferentes idades são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados à tração na flexão máxima (f_p), na primeira fissura (f_1), tenacidade (T_{150}) e resistência a flexão equivalente ($R^D_{R,150}$) das amostras

Traço	MPa		Joule		$R^D_{T,150}$
	f_p	f_1	T_{150}		
CP01-07-1%	11,3		10,6		0,099
CP02-07-1%	9,0	11,3	8,8	10,6	0,097
CP03-07-1%	10,5		10,0		0,099
CP01-07-2%	14,4		10,6		0,121
CP02-07-2%	12,2	14,5	12,1	12,1	0,085
CP03-07-2%	14,5		11,4		0,110
CP01-07-2,9%	17,8		9,2		0,160
CP02-07-2,9%	16,5	17,8	11,6	11,6	0,130
CP03-07-2,9%	14,7		10,5		0,120
CP01-28-1%	12,3		10,1		0,110
CP02-28-1%	18,5	18,5	12,4	12,4	0,120
CP03-28-1%	14,3		10,8		0,120
CP01-28-2%	20,5		12,9		0,129
CP02-28-2%	18,9	21,4	13,4	13,4	0,115
CP03-28-2%	21,4		12,4		0,132
CP01-28-2,9%	16,7		13,5		0,109
CP02-28-2,9%	24,5	24,5	12,4	13,5	0,165
CP03-28-2,9%	17,0		12,4		0,119
CP01-91-1%	15,0		13,1		0,096
CP02-91-1%	14,0	15,0	14,0	14,0	0,078
CP03-91-1%	13,3		12,4		0,093
CP01-91-2%	22,1		14,0		0,138
CP02-91-2%	23,8	23,8	14,1	14,1	0,145
CP03-91-2%	17,9		12,0		0,131
CP01-91-2,9%	19,4		15,2		0,113
CP02-91-2,9%	26,1	26,1	13,4	15,2	0,163
CP03-91-2,9%	22,4		15,1		0,128

Fonte: Autor

A partir dos resultados apresentados pela Tabela 26, que exhibe os valores individuais e o potencial é possível realizar uma análise global dos resultados e evidenciar o grande diferencial com relação às propriedades mecânicas do UHPC.

A resistência à tração máxima encontrada nesta pesquisa para as diferentes misturas é o grande diferencial do UHPC para os demais concretos, sendo que os resultados encontrados para os percentuais de fibras estudados foi similar aos apresentados nas pesquisas por Yoo, Banthia, Yoon (2016), Yoo et al. (2017b), Abbas, Soliman, Nehdi (2015), Yu, Spiesz, Brouwers (2015a).

A resistência à tração máxima e na primeira fissura evoluiu com a idade de cura, sendo que, para cada teor de fibras avaliada o acréscimo de resistência à tração para as idades de 7, 28 e 91 dias de cura foi de a 63%, 75% e 57%, respectivamente. Para evidenciar esta evolução, a Tabela 27 apresenta uma comparação entre os valores potenciais da resistência à tração com relação a idade de cura e porcentagem de fibras, aos 28 dias, como proposto pelos pesquisadores Hassoun, Al-manaseer (2015) e Pacheco (2016).

Tabela 27 – Porcentagens da evolução da resistência à tração máxima do UHPC com os diferentes teores de fibras e a idade de cura comparando com a resistência aos 28 dias

Teores de fibras (%)	Idade de cura (dias)		
	7	28	91
1	0,61	1	0,81
2	0,68	1	1,11
2,9	0,73	1	1,06

Fonte: Autor

Conforme apontado na Tabela 27, comparando a resistência à tração máxima aos 28 dias de cura com as demais idades é possível identificar que as misturas com 1% de fibras não obteve significativa variação na resistência à tração em relação ao tempo de cura, e este comportamento pode estar ligado ao teor crítico de fibras. Conforme Figueiredo (2011), o volume crítico de fibras corresponde ao teor que mantém a mesma capacidade de carga após a ruptura da matriz.

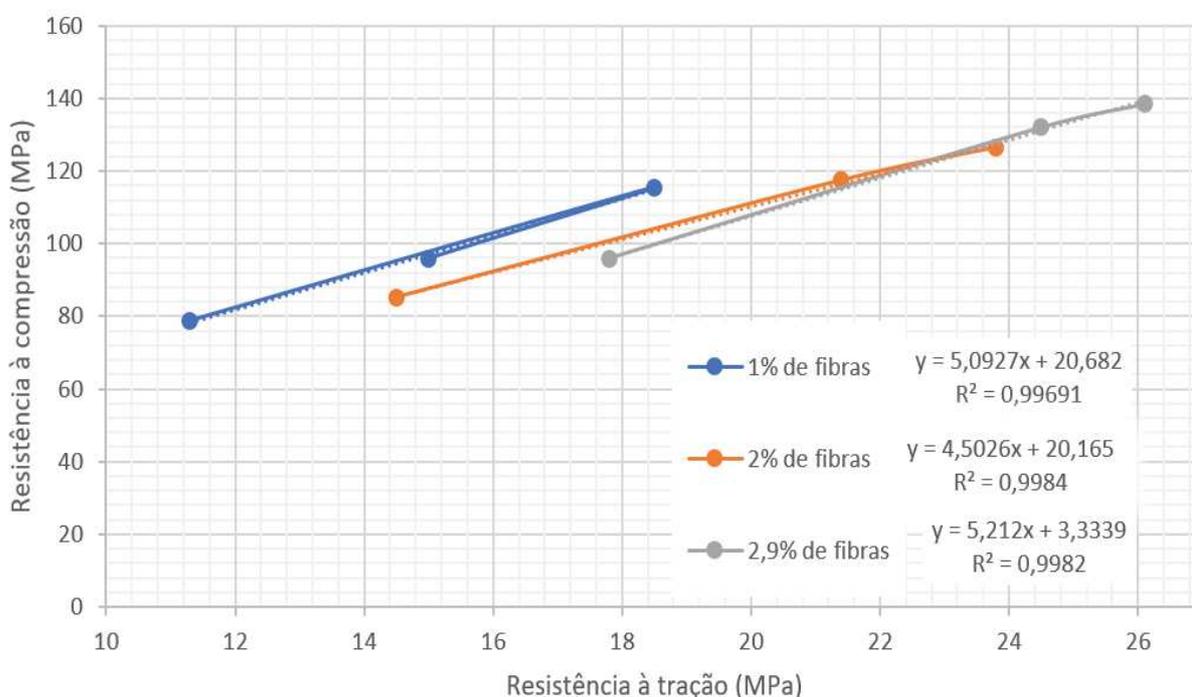
Pode-se perceber que para teores maiores que 1% há um acréscimo de carga com relação a idades maiores que 28 dias, sendo que para 2% de fibras, houve um acréscimo de 11% do valor obtido aos 28 dias.

A resistência à tração de uma matriz cimentícia com incorporação de fibras como é o caso do UHPC, apresenta superior resistência se comparada com uma matriz sem fibras. É comum usar uma equação para correlacionar a resistência à compressão com a resistência à tração de uma matriz cimentícia. Comparando as resistências à compressão e à tração do UHPC desenvolvido pode-se notar que esta

relação supera significativamente as relações convencionalmente apresentadas por diversos pesquisadores, como Mehta e Monteriro (2014), Neville e Brooks (2010) onde a relação entre a resistência à tração e resistência à compressão para concretos pode variar de 7% a 11% dependendo da classe de resistência.

Para esta pesquisa a relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração é apresentado na Figura 65, juntamente com as equações de tendência e o coeficiente de determinação de cada porcentual de fibras.

Figura 65 - Relação entre a resistência à compressão e resistência à tração máxima das idades de cura para 1% de fibra



Fonte: Autor

Analisando as relações das resistências, pode-se verificar que há uma linearidade com a relação em função da idade de cura para todos os teores de fibras. Quanto maior a idade de cura, maior é a resistência à compressão e maior é a resistência à tração. Apenas para o teor de 1%, como já visto, a idade de cura de 28 dias apresentou maior resistência com relação aos 91 dias.

Para todas as relações realizadas é possível verificar que o valor de R^2 , de todas as equações, apresenta valor maior que 0,99. A relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração encontrada nesta pesquisa, para as misturas

com 1% de fibra foi de no mínimo 14,3% e a máxima de 18,6% em relação à resistência à compressão. Para as misturas com 2% foi de, no mínimo, 16% e a máxima de 18,5%, já para a mistura com 2,9% de fibras foi de 15,6% no mínimo e no máximo de 18,6% da resistência à compressão.

Para todos os teores de fibras avaliados, a relação entre as resistências são semelhantes aos encontrados nas pesquisas, tais como Fehling et al. (2004), Fehling et al. (2014), Yu, Spiesz e Brouwers (2015) e Yu et al. (2009).

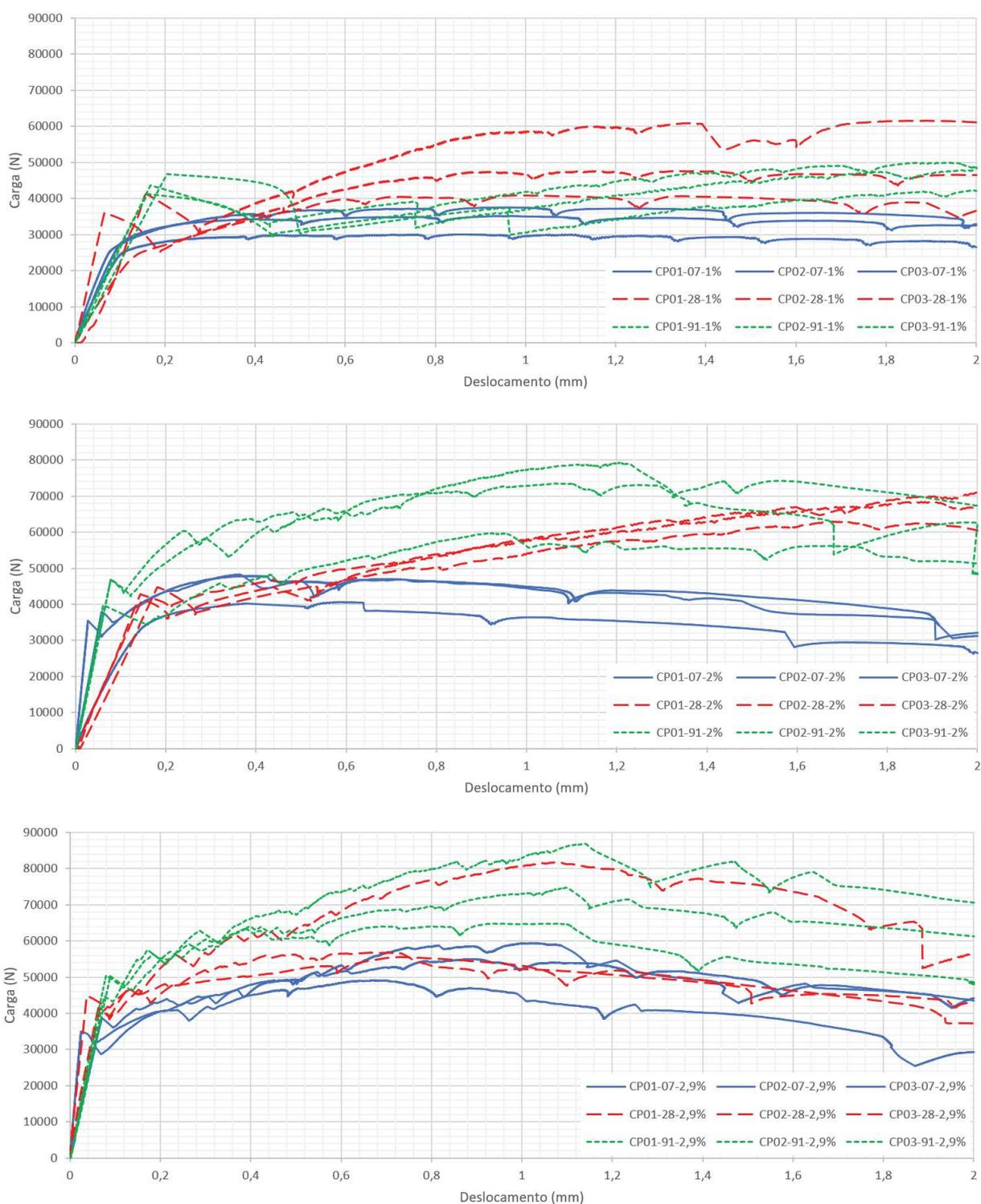
Com isso é possível perceber que independentemente da idade de cura, há uma tendência de quanto maior o percentual de fibras na matriz, maior é a resistência à tração máxima e a resistência da primeira fissura encontrada. Apenas na mistura com 1% de fibras com a idade de cura de 91 dias, a resistência à tração máxima não superou a resistência encontrada aos 28 dias de cura.

Analisando os resultados de tenacidade, esta tendência também é parcialmente observada, onde a mistura com 1% de fibras com a idade de cura de 91 dias apresentou menor tenacidade se comparado com o valor encontrado aos 28 dias. Este fato pode estar ligado ao percentual de fibras, a quantidade de fibras de 1% estar muito próximo do teor crítico de fibras na mistura, e isso pode ter contribuído nesta evidência.

A resistência à tração do concreto reforçado com fibra depende diretamente do percentual de fibras na matriz, sendo que se uma matriz cimentícia tiver volumes acima do crítico, sua resistência à tração pode ser ligeiramente maior do que a resistência à tração da primeira fissura, como evidenciam os autores Ferrara, Park, Shah (2007) e Yoo et al. (2017b).

Avaliando o comportamento das curvas carga x deslocamento das misturas, Figura 66, pode-se evidenciar que as misturas com 1% de fibras na idade de 7 dias apresenta um comportamento trivial de uma mistura com teor de fibras igual ao crítico.

Figura 66 – Diagrama carga x deformação das amostras com 1%, 2% e 2,9%



Fonte: Autor

É possível observar nos gráficos, que as misturas que possuem maior teores de fibras apresentam maior intensidade de carga, sendo que a maior carga foi evidenciada nas amostras com 91 dias de cura. Pode-se perceber também que a resistência à tração na primeira fissura é afetada pela idade de cura, mostrando que

esta propriedade depende diretamente da resistência da matriz e não da quantidade e tipo de fibra inserida na mistura. Após a primeira fissura surgir, as fibras começam a atuar e transferem as cargas pela fissura formada, fazendo a ponte de ligação entre a matriz.

Podemos notar nos gráficos que as misturas com maior quantidade de fibras, apresentam maior controle de fissuração e deformação no início dos deslocamentos, isso devido ao grande percentual de fibras inseridas na mistura.

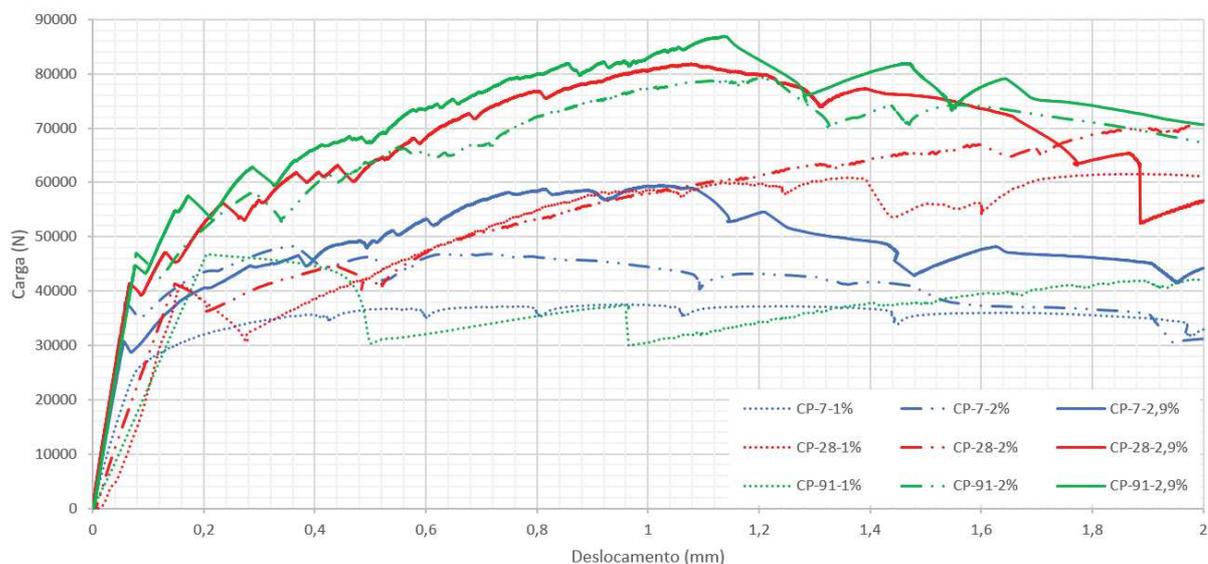
Uma amostra com 1% de fibra e com 28 dias de idade apresentou comportamento divergente, como pode ser visto no primeiro gráfico pela linha vermelha tracejada, onde devido a isso sua resistência comparada com a idade de 28 dias foi menor. Como evidenciado na resistência à compressão, a resistência tende a ser maior com o passar do tempo, logo o comportamento evidenciado nesta amostra é anormal.

É possível perceber em todas as mostras, mesmo a com 1% de fibras, que o teor crítico de fibras foi superado, e que o comportamento carga x deformação das amostras foram lineares para as deformações iniciais até a primeira fissura. Após o surgimento da primeira fissura, houve um aumento da capacidade de suportar carga das amostras e um controle das fissurações, fator de extrema importância para elementos estruturais.

Foi possível verificar que as primeiras fissuras nas primeiras idades foram bastante divergentes com relação ao teor de fibras avaliado. Nas amostras com idade de cura de 91 dias, esta variação foi menor, porém as misturas com maior teor de fibras tendem a apresentar maior resistência nas primeiras fissuras.

Para melhor evidenciar o comportamento das amostras que apresentam maior desempenho submetidas ao ensaio de flexão, a Figura 67 apresenta as curvas carga x deslocamento em cada idade de cura e teor de fibras.

Figura 67 - Diagrama carga x deformação de cada idade de cura e teor de fibras



Fonte: Autor

Pode-se verificar que as misturas com maior teor de fibras tenderam a apresentar uma maior resistência à tração e apresentaram uma maior capacidade de suportar um acréscimo de carga mesmo fissurada, conferindo ao material um excelente comportamento estrutural. Foi possível comprovar que o material passou a ter um comportamento pseudo-dúctil, uma vez que suportou carga e se deformou de maneira não linear até a sua ruptura completa.

A mistura com 1% de fibras e com idade de cura de 91 dias apresentou um comportamento após pico de fissura divergente dos demais teores, tendo um controle da fissuração menor do que a mistura com 1% de fibras na idade de cura de 28 dias. Como já evidenciado esta mistura, especificamente, pode ter tido um erro na moldagem ou ensaio.

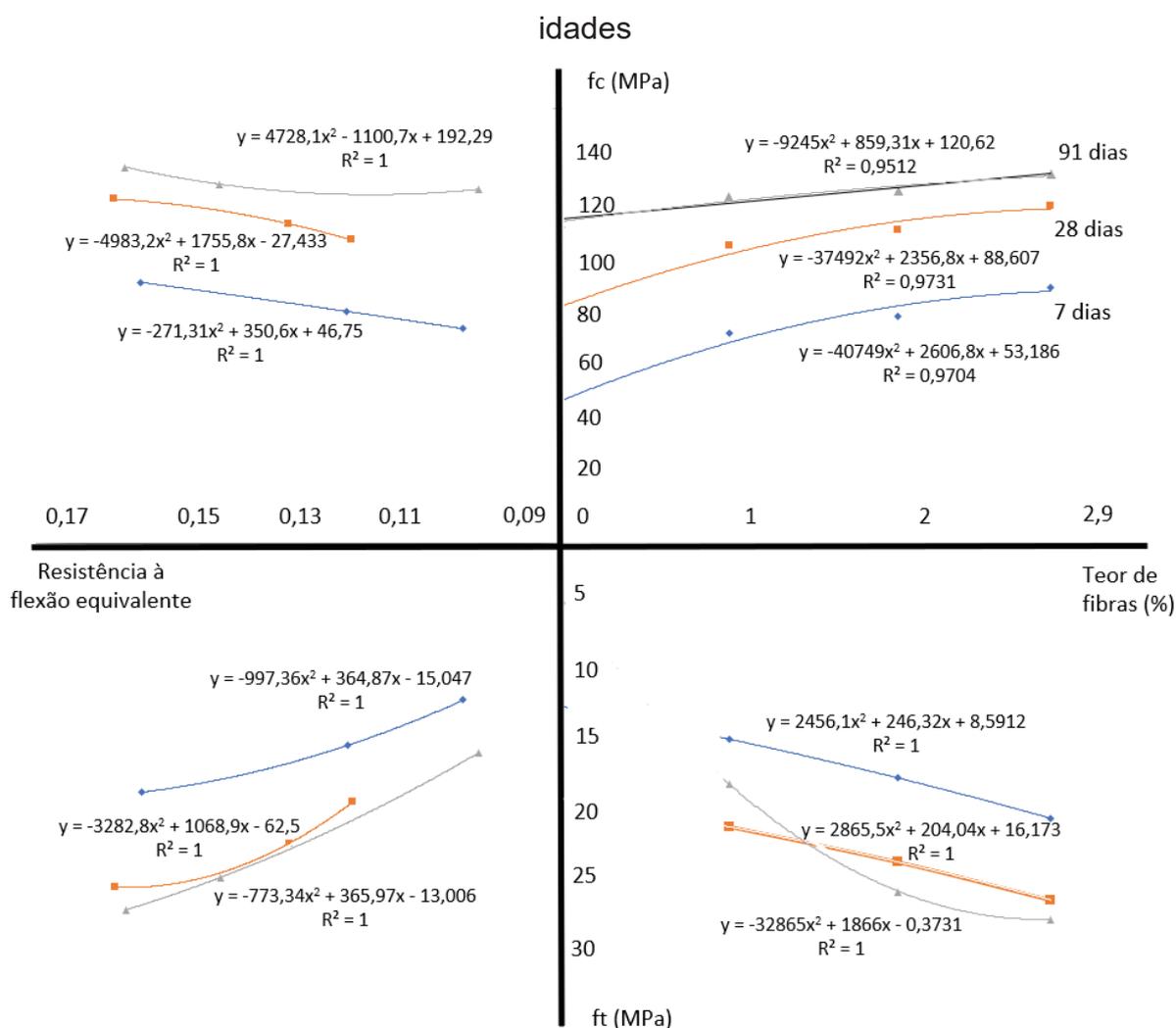
O concreto de maneira geral tem um comportamento frágil quando submetido a um carregamento, tendo limitações de suportar carga após a primeira fissura. Nos UHPC dosados com o método proposto nesta tese esta fragilidade foi superada com a introdução de diferentes teores de fibras, sem que a trabalhabilidade fosse prejudicada.

4.2.4 Diagrama do comportamento mecânico da mistura

Para evidenciar o desempenho mecânico das misturas desenvolvidas no método de dosagem proposto nesta pesquisa, foi criado um diagrama do comportamento mecânico das misturas em função do teor de fibras inserido.

Ao relacionar as resistências à compressão, resistência à tração, resistência à flexão equivalente com o teor de fibras das misturas analisadas, é possível observar que estas propriedades mecânicas são influenciadas pelo teor de fibras. A Figura 68 apresenta o diagrama do comportamento mecânico da mistura, onde este fato pode ser observado.

Figura 68 - Diagrama do comportamento mecânico do traço para as diferentes



Analisando a Figura 68, pode-se notar que a resistência à compressão e a resistência à tração tem influência com relação ao teor de fibras incorporada. Como visto nos resultados de trabalhabilidade, as misturas com diferentes teores de fibras, não tiveram perdas significativas na trabalhabilidade. Porém a quantidade de fibras em uma mistura, influencia tanto no desempenho mecânico como no custo do material.

Este diagrama proposto pode ser utilizado para evidenciar qual a quantidade de fibras necessária em um determinado traço para que o desempenho mecânico requerido possa ser alcançado.

Desta forma, o diagrama pode auxiliar na escolha adequada da quantidade máxima de fibras a ser utilizada para garantir um desempenho mecânico adequado e requerido.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo propor um método de dosagem de UHPC para diferentes materiais. A motivação desta pesquisa se deu devido a pesquisas desenvolvidas com o UHPC não apresentarem um método de dosagem eficaz e possível de ser realizado com materiais encontrado nos diferentes locais de um país.

Os materiais encontrados em um determinado país podem ser diferentes de outro, em termos de granulometria por exemplo, e isso gera variações quando realizado uma mistura de UHPC mesmo usando os mesmos materiais com relação a sua composição química.

O método proposto nesta pesquisa mostrou eficaz quanto a determinação da melhor proporção entres os materiais para se obter uma mistura com maior resistência à compressão e quanto a quantidade de fibras máxima a ser empregada na mistura sem que se houvesse a perda de trabalhabilidade da mistura.

As considerações que podem ser sintetizadas do presente trabalho servem como orientação para que se obtenha a proporção ideal de uma mistura de materiais de diferentes granulometrias e de origem pétreo para compor um UHPC, sendo que pode ser concluído que:

- a) o Índice de Desvio do Empacotamento (IDE) proposto nesta pesquisa tende a apresentar a maior resistência à compressão quanto mais baixo for;
- b) o método para se obter a melhor proporção entre os materiais empregados, devido a sua composição granulométrica, se mostrou eficaz quando avaliado em função da resistência à compressão;
- c) o método para a obtenção do teor máximo de fibras a ser empregado, mostrou-se eficaz, pois o teor máximo de fibras calculado não afetou significativamente a trabalhabilidade da mistura;
- d) as resistências à compressão encontradas na pesquisa não ultrapassaram os 150 MPa, que é considerada a mínima resistência para ser considerado um UHPC pelas entidades internacionais. Porém, acredita-se que a resistência mínima pode ser alcançada com um tempo maior de cura, devido a evidência do crescimento da resistência

- à compressão ao longo do tempo, aplicação de cura térmica ou pressão confinante no estado fresco;
- e) a resistência à compressão das misturas evoluiu com relação ao tempo de cura e com relação ao aumento do teor de fibras. Para uma mesma idade de cura, as misturas com 2,9% de fibra apresentam um aumento máximo de 6,2% com relação às misturas com 1% de fibras;
 - f) a resistência à tração das misturas foi afetada diretamente com relação ao teor de fibras da mistura. Quanto maior a quantidade de fibras, maior foi a resistência à tração;
 - g) a resistência à tração na primeira fissura foi afetada com relação ao teor de fibras empregada. Para as misturas com 2,9% de fibras apresentaram um acréscimo de 1,2 MPa na resistência o que corresponde a um aumento de 7,2% em relação às misturas com 1% de fibras, para a idade de cura de 91 dias;
 - h) o teor de fibras influenciou diretamente na tenacidade do material. Com o aumento da quantidade de fibras na mistura, maior foi a capacidade do material em suportar carga e se deformar até os 2mm;
 - i) a relação das resistências à compressão e à tração mostrou linearidade, onde as relações encontradas evidenciam o excelente desempenho mecânico do material;
 - j) o diagrama do comportamento mecânico proposto nesta pesquisa possibilitou a identificação do melhor teor de fibras a ser utilizado na mistura para se obter a resistência à compressão ou à tração desejada para um determinado uso.

De maneira geral, os objetivos propostos nesta pesquisa foram atingidos, e o método proposto tende a apresentar a melhor proporção entre os materiais para que se obtenha a melhor mistura com relação às propriedades mecânicas de um UHPC.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os trabalhos futuros há a possibilidade de investigar, utilizando o método proposto, a influência do tipo de cimento utilizado na mistura, uma vez que os cimentos utilizados no Brasil possuem grande diferença com relação aos teores de clínquer. Também pode ser uma melhoria no método de dosagem a investigação da

quantidade de cimento e as pozolanas em função da estequiometria das reações químicas do cimento e a sílica amorfa.

Ainda quanto ao método proposto, os trabalhos futuros podem investigar a equação proposta nesta pesquisa com relação a diferentes tipos de fibras. As fibras de outra natureza podem apresentar diferentes fatores de forma, o que vão gerar alterações significativas com relação aos teores máximos para não afetar a trabalhabilidade. Assim os trabalhos futuros podem avaliar a influência do fator de forma nos teores de fibras a serem introduzidas e os benefícios que estes teores proporcionam no traço com relação às propriedades mecânicas.

Os trabalhos futuros podem buscar uma nova metodologia para a incorporação de uma mistura híbrida de fibras. Esta mistura pode proporcionar maior economia do traço uma vez que os percentuais de fibras podem ser menores pela sinergia das fibras inseridas.

Ao avaliar estes pontos sugeridos, o avanço do UHPC no Brasil será evidente e trará grandes benefícios para a comunidade técnica e produtiva, uma vez que o material já é consolidado em nível mundial e tem grande potencial no desenvolvimento, proporcionando maior durabilidade para as estruturas.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, Safeer; SOLIMAN, Ahmed M.; NEHDI, Moncef L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 75, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2: Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do conde de Abrams**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento** São Paulo, 2014.
- ABRISHAMBAF, Amin; PIMENTEL, Mário; NUNES, Sandra. **The effect of fibre orientation on the uniaxial tensile response of UHPFRC: experimental evaluation and analytical modelling**. [s.l.] : CONSTRUCT-LABEST, Faculty of Engineering (FEUP), University of Porto, Portugal., 2016.
- AMERICAM CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 239 ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE 2012 ACI Fall Convention. In: 2013, Toronto, Ontario, Canada. **Anais...** Toronto, Ontario, Canada
- ACKER, Paul; BEHLOUL, Mouloud. **DUCTAL® TECHNOLOGY: A LARGE SPECTRUM OF PROPERTIES, A WIDE RANGE OF APPLICATIONS**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.upress.uni-kassel.de/katalog/abstract.php?978-3-89958-376-2>>
- AFGC. Documents scientifiques et techniques Bétons fibrés à ultra-hautes performances - recommandations. In: (Edition Révisée, Ed.) 2013, France. **Anais...** France
- AITCIN, Pierre Claude. **High Performance Concrete**. 1. ed. London and New York: 1, 1998.
- AITCIN, Pierre Claude et al. The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge. **Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 140–144, 1998.
- ALRIFAI, A. et al. Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. **6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and 4th North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete**, [s. l.], v. 47, p. 969–976, 2010.
- ALSALMAN, Ali; DANG, Canh N.; MICAH HALE, W. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 133, p. 135–145, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.040>>

ANDREW, Tag et al. Dynamic strength and ductility of ultra-high performance concrete with flow-induced fiber alignment. **International Journal of Impact Engineering**, [s. l.], v. 111, p. 37–45, 2017.

ARORA, Aashay et al. Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 103, n. October 2017, p. 179–190, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.013>>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 1609-12 - Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)**, 2012.

AUSTRALIAN STANDARD 3600. **Concrete structures**Australian, 2009.

BANFILL, PFG et al. Rheology of low carbon fibre content reinforced cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 28, n. 9, p. 773–780, 2006.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 37, n. 10, p. 707–716, 2004. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/BF02480516>>

BANYHUSSAN, Qais Sahib et al. Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 125, p. 41–52, 2016.

BEN GRAYBEAL. Ultra-High Performance Concrete. **Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center.**, Georgetown Pike, p. 8, 2011.

BHUTTA, Aamer et al. Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 80, 2017.

BONNEAU, Olivier et al. Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 30, n. 12, p. 1861–1867, 2000.

BS, EN BRITISH STANDARD. **BS EN 12390:3 - Testing hardened concrete**, 2009.

BURAKOWSKI, Liliana; REZENDE, Mirabel C. Modificação da rugosidade de fibras de carbono por método químico para aplicação em compósitos poliméricos. **Polímeros**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 51–57, 2001.

CAGGIANO, Antonio et al. On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 147, p. 286–295, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817308103>>

CASTRO, A. L. De; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - Revisão. **Cerâmica**, [s. l.], v. 57, p. 63–75, 2011.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti De. **APLICAÇÃO DE CONCEITOS REOLÓGICOS NA TECNOLOGIA DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO**. [s.l: s.n.].

CHASIOTI, Stamatina G.; VECCHIO, Frank J. Shear behavior and crack control characteristics of hybrid steel fiber-reinforced concrete panels. **ACI Structural Journal**, [s. l.], v. 114, n. 1, p. 209–220, 2017.

CHELLAPANDIAN, M.; SURIYA PRAKASH, S.; SHARMA, Akanshu. Strength and ductility of innovative hybrid NSM reinforced and FRP confined short RC columns under axial compression. **Composite Structures**, [s. l.], v. 176, p. 205–216, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.033>>

CHOI, Myoung Sung et al. Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 106, p. 632–639, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.106>>

CHRIST, Roberto. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**São LeopoldoDissertação de Mestrado, , 2014.

CHRIST, Roberto; TUTIKIAN, Bernardo F.; PACHECO, Fernanda. Estudo comparativo entre concretos de alto desempenho e compósitos cimentícios avançados. **Concreto e Construção - IBRACON**, São Paulo, p. 72–76, 2011.

CINCOTTO, Maria Alba. **Reações de Hidratação e Pozolânicas**. 1º Edição ed. São Paulo: Concreto: Ciência e Tecnologia - IBRACON, 2011.

COLLEPARDI, Mario; COLLEPARDI, Silvia; TROLI, Roberto. **Concrete Mix Design**. Grafiche T ed. Italy.

CRANE, Charles Kennan. **SHEAR AND SHEAR FRICTION OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE BRIDGE GIRDERS**. 2010. Georgia Institute of Technology, [s. l.], 2010.

CWIRZEN, A.; PENTTALA, V.; VORNANEN, C. Rpc Mix Optimization By Determination of the Minimum Water Requirement of Binary and Polydisperse Mixtures. [s. l.], n. May 2016, 2005.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho et al. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto. [s. l.], p. 223–270, 2016.

DAY, Ken W. **Concrete Mix Design, Quality Control and Specification**. 3rd. ed. New York.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.

DILS, J.; BOEL, V.; DE SCHUTTER, G. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 41, p. 455–463, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.050>>

EDEN, Wolfgang. **Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohddichte von Kalksandsteinen**. 2010. Universität Kassel Fachbereich - Deutschland, Kassel, 2010.

EIDE, Mari Bohnsdalen; HISDAL, Jorun-Marie. **Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art**. [s.l: s.n.].

ETSUO, Sakai et al. Influence of superplasticizers on the fluidity of cements with different amount of aluminate phase. In: **2° International Symposium on Ultra High Performance Concrete**,., 2008.

EUGEN BRÜHWILER; EMMANUEL DENARIÉ. Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. In: **2° International Symposium on Ultra High Performance Concrete**,., 2008.

EUROPEAN STANDARD 1992-1. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings**European, 2004.

FEHLING, Ekkehard et al. **Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)**. [s.l: s.n.].

FEHLING, Ekkehard et al. **Ultra-High Performance Concrete UHPC**. Kassel.

FEHLING, Ekkehard et al. **Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples**. [s.l: s.n.].

FEHLING, Ekkehard; BUNJE, Kai; LEUTBECHER, Torsten. Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete. In: (C. Geisenhanslüke M. Schmidt, E. Fehling, Ed.)**INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE 2004**, Kassel. **Anais...** Kassel

FENNIS, Sonja A. A. M.; WALRAVEN, Joost C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **Heron**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 73–101, 2012.

FERRARA, Liberato et al. On the identification of rheological properties of cement suspensions: Rheometry, Computational Fluid Dynamics modeling and field test measurements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 8, p. 1134–1146, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.007>>

FERRARA, Liberato; PARK, Yon Dong; SHAH, Surendra P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 957–971, 2007.

FIB CEB 238. **New Approach to Durability Design - An example for carbonation induced corrosion**.SUÍÇA, 1997.

FIDJESTOL, Per; THORSTEINSEN, Rein Terje; SVENNEVIG, Paul. Making UHPC with Local Materials - The Way Forward. In: **3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials**., 2012.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. USP, [s. l.], 2011.

FORMAGINI, Sidiclei. Dosagem Científica E Caracterização Mecânica De Concretos De Altíssimo Desempenho. [s. l.], p. 285, 2005.

FOX, Robert W. et al. Introdução a Mecânica dos Fluidos. [s. l.], 2014.

FREYTAG, Bernhard et al. WILD-Bridge Scientific Preparation for Smooth Realisation Bernhard. In: **3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials.**, 2012.

GARCIA, Pérez Judith. **Diseño de hormigones dirigido a la aplicación**. 2004. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona, [s. l.], 2004.

GEISENHANSLÜKE, Carsten. **Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen**. 2008. Universität Kassel, Kassel, 2008.

GEISENHANSLÜKE, Carsten; SCHMIDT, Michael. Methods for Modelling and Calculation of High Density Packing for Cement and Fillers in UHPC. In: **Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete.**, 2004.

GONZÁLEZ, Germán Isabel. **Hormigon de alta resistencia**. Madri.

GUISES, Romain et al. Granular packing: Numerical simulation and the characterisation of the effect of particle shape. **Granular Matter**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 281–292, 2009.

GUO, Wei et al. Constitutive model of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for low-velocity impact simulations. **Composite Structures**, [s. l.], v. 185, n. October 2017, p. 307–326, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.022>>

HABEL, Katrin et al. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 1362–1370, 2006.

HASSOUN, M. Nadim; AL-MANASEER, Akthem. **Structural Concrete: Theory and Design**. Canada.

HEINZ, Detlef; LUDWIG, Horst-Michael. Heat Treatment and the Risk of DEF Delayed Ettringite Formation in UHPC. In: **Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete.**, 2004.

HEINZ, Detlef; URBONAS, Liudvikas; GERLICHER, Tobias. Effect of Heat Treatment Method on the Properties of UHPC. In: **3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials.**, 2012.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. PINI ed. São Paulo.

HEROLD, G.; MÜLLER, H. S. Measurement of porosity of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete. In: **Ultra High Performance Concrete (UHPC)**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete - University of Kassel, Germany, 2004.

HU, Chong; DE LARRARD, François. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 283–294, 1996.

HUNGER, Martin. **An integral design concept for ecological self-compacting concrete**. 2010. Universiteit Eindhoven, [s. l.], 2010.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 38, n. 10, p. 1246–1259, 2008.

INDIAN STANDARD 456. **PLAIN AND REINFORCED CONCRETE - CODE OF PRACTICE** India, 2007.

JOLICOEUR, Carmel; SIMARD, Marc-André M. A. Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 20, n. 2–3, p. 87–101, 1998. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWF-3VY60XX-2/2/b336e0333dca0a7f6451a17b5b2b9f41%5Cnhttp://www.sciencedirect.com.gate6.inist.fr/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWF-3VY60XX-2&_user=4013381&_coverDate=12%2F31%2F1998&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search>

JONES, Rod; ZHENG, Li; NEWLANDS, Moray. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 35, n. February 2016, p. 301–309, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02482136>>

KANG, Su Tae et al. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. **Composite Structures**, [s. l.], v. 145, p. 37–42, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.075>>

KANG, Su Tae; KIM, Jin Keun. The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPRCC). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 10, p. 1001–1014, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.009>>

KHALIL, Wasan I. Flexural Strength of Fibrous Ultra High Performance. **APRN Journal of Engineering and Applied Sciences**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 200–214, 2013. Disponível em: <www.arpnjournals.com>

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**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 339–347, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.006>>

KHAYAT, Kamal H. Workability , testing , and performance of self- consolidating concrete Workability , Testing , and Performance of Self-Consolidating. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 96, p. 346–353, 1999.

KHOKHAR, M. I. A. et al. Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 377–385, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.006>>

KIM, Dong Joo et al. Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 11, p. 4144–4155, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051>>

LAPPA, Eleni Sofia. **High Strength Fibre Reinforced Concrete Static and fatigue behaviour in bending door**. 2007. Delft University, The Netherlands, 2007.

LARRARD, F. De. **Concrete mixture proportioning: A scientific approach**. [s.l.: s.n.]. v. 9

LERCH, J. O. et al. The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 103, n. 2018, p. 130–139, 2018.

LIN, Yougui; KARADELIS, John N.; XU, Yi. A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 48, p. 333–341, 2013.

MANGULKAR, Mn; JAMKAR, Ss. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. **International Journal Of Scientific & Engineering Research**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 143–148, 2013. Disponível em: <<http://www.ijser.org/researchpaper%5CReview-of-Particle-Packing-Theories-Used-For-Concrete-Mix-Proportioning.pdf%5Cnhttp://www.ijser.org/researchpaper/Review-of-Particle-Packing-Theories-Used-For-Concrete-Mix-Proportioning.pdf>>

MARTINIE, Laetitia; ROSSI, Pierre; ROUSSEL, Nicolas. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 226–234, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.032>>

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. São Paulo. v. 1

MEHTA, P. Kumar; MONTERIRO, Paulo J. .. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MÜLLER, Harald S. Betonbautechnik – neue Entwicklungen im Überblick. In: **Innovationen in der Betonbautechnik 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung**., 2006.

NAAMAN, Antoine E.; WILLE, Kay. The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress. In: **3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials**., 2012.

NATARAJA, M. C.; SANJAY, M. C. Modified Bolomey equation for the design of concrete. **Journal of Civil Engineering IEB**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 59–69, 2013.

NEVILLE, A. M. M.; BROOKS, J. J. J. **Concrete Technology Building and Environment**, 2010.

OZTURK, Ali Ugur; ONAL, Okan. Identification of water/cement ratio of cement pastes, basing on the microstructure image analysis data and using artificial neural network. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 763–768, 2013.

PACHECO, Fernanda. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade**. 2016. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, [s. l.], 2016.

PAPADAKIS, Vagelis G. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 11, p. 1727–1736, 1999.

PARK, Jung Jun et al. Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion. In: **2° International Symposium on Ultra High Performance Concrete.**, 2008.

PARK, Seung Hun et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 172–184, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009>>

PEREIRA DE OLIVEIRA, L. A. et al. Evaluation of dry mortar ratio as mix design parameter for steel fibre reinforced self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 40, p. 642–649, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.030>>

PYO, Sukhoon; KIM, Hyeong Ki. Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 131, p. 459–466, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.109>>

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/118825>>

RAHMAN, M. K.; BALUCH, M. H.; MALIK, M. A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 50, p. 710–717, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.025>>

REGINATO, Lucas Alexandre et al. Dosagem de concreto de pós reativos : avaliação da influência do coeficiente de distribuição q no modelo de empacotamento de partículas proposto por Alfred. In: 55 CBC 2013, Gramado - RS. **Anais...** Gramado - RS

RESPLENDINO, Jacques. First recommendations for Ultra-High-Performance Concretes and examples of application. In: **Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete.**, 2004.

RICHARD, Pierre; CHEYREZY, Marcel. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.

ROUSSEL, Nicolas. Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 40, n. 10, p. 1001–1012, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org.gate6.inist.fr/10.1617/s11527-007-9313-2%5Cnhttp://www.springerlink.com.gate6.inist.fr/content/j2l4g5p746t231t7/fulltext.pdf>>

ROUSSEL, Nicolas. **Understanding the rheology of concrete**. Woodhead P ed. Philadelphia.

ROUX, N.; ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A. EXPERIMENTAL STUDY OF DURABILITY OF REACTIVE POWDER CONCRETES By N. Roux,t C. Andrade,z and M. A. Sanjuan 3. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], n. February, p. 1–6, 1996.

SCHMIDT, Michael; FEHLING, Ekkehard. **Ultra-High-Performance Concrete : Research , Development and Application in Europe**.Deuchland, 2015.

SHI, Caijun et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 101, p. 741–751, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815305092>>

SHIN, Hyun-Oh; MIN, Kyung-Hwan; MITCHELL, Denis. Confinement of ultra-high-performance fiber reinforced concrete columns. **Composite Structures**, [s. l.], v. 176, p. 124–142, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822316308170>>

SOBOLEV, Konstantin. The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 26, n. 7, p. 901–907, 2004.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder ? Towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 125, p. 600–612, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>>

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 139, p. 374–383, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.084>>

SOLIMAN, Nancy Ahmed. **DEVELOPMENT OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE (UHPC) USING WASTE GLASS MATERIALS – TOWARDS INNOVATIVE ECO-FRIENDLY CONCRETE**. 2016. [s. l.], 2016.

SONG, Qiulei et al. A novel Self-Compacting Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (SCUHPC) derived from compounded high-active powders. **Construction and Building Materials**, [s. l.], 2018.

SOROUSHIAN, P.; BAYASI, Z. FIBER-TYPE EFFECTS ON THE PERFORMANCE OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 88, n. 2, p. 129–134, 1991. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/acimaterialsjournal.aspx>>

SPIESZ, P. R. ;; HUNGER, M. Towards a more common use of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) – development of UHPC for ready-mix and prefabrication concrete plants. **11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso 2017**, [s. l.], p. 1–10, 2017. Disponível em: <https://pure.tue.nl/ws/files/58624276/46_UHPC_Przemek_Spiesz.pdf>

TANG, Man-Chung. High Performance Concrete – Past, Present and Future. In: **International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany September 13-15, 2004 Edited by:**, 2004.

THOMAS, R. J.; SORENSEN, Andrew D. Review of Strain Rate Effects for Concrete in Tension. **Materials Journal**, [s. l.], v. 153, p. 846–856, 2017.

TORREGROSA, Esteban Camacho. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties**. 2013. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA Dosage, [s. l.], 2013.

TOUTLEMONDE, François; RESPLENDINO, Jacques (EDS.). **Designing and Building with UHPFRC**. Hoboken, NJ USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118557839>>. Acesso em: 3 fev. 2017.

TOUTLEMONDE, François; RESPLENDINO, Jacques. **Designing and Building with UHPFRC**. [s.l: s.n.].

TUE, Nguyen Viet; ORGASS, Marko; MA, Jianxin. Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC. In: **2° International Symposium on Ultra High Performance Concrete**,., 2008.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Proposição De Um Método De Dosagem Experimental Para Concretos Auto-Adensáveis Proposição De Um Método De Dosagem Experimental Para Concretos Auto-Adensáveis**. 2007. Univerisdade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, [s. l.], 2007.

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

VOORT, Thomas Vande; SULEIMAN, Muhannad T.; SRITHARAN, Sri. **DESIGN AND PERFORMANCE VERIFICATION OF UHPC PILES FOR DEEP FOUNDATIONS**SA report from Center for Transportation Research and Education Iowa State University, 2008.

WALKER, William J. Persistence of granular structure during compaction processes. **KONA Powder and Particle Journal**, [s. l.], v. 21, n. March, p. 133–142, 2003.

WALRAVEN, Joost. High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 1247–1260, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1617/s11527-009-9538-3>>

WANG, Dehui et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 96, p. 368–377, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>>

WANG, Rui et al. Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 144, p. 65–73, 2017. a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.173>>

WANG, Xinpeng et al. Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete incorporating recycled coral based materials. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 165, p. 70–80, 2017. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.096>>

WARNOCK, Robyn. **Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Reactive Powder Concrete Beams**. 2005. UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES, [s. l.], 2005.

WILLE, Kay; BOISVERT-COTULIO, Christopher. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 86, p. 33–43, 2015.

WILLE, Kay; NAAMAN, Antoine E. Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 109, n. 4, p. 479–488, 2012.

WILLE, Kay; NAMAN, Antoine E.; PARRA-MONTESINOS, Gustavo J. Ultra - High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22ksi) : A Simpler Way. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 108, n. 1, p. 46–53, 2011.

YAZICI, Halit. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. **Building and Environment**, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 2083–2089, 2007.

YIGITER, Hüseyin et al. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC). **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 8, p. 2907–2914, 2012.

YOO, D. Y. et al. Nonlinear finite element analysis of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams. **International Journal of Damage Mechanics**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 735–757, 2017. a.

YOO, Doo Yeol et al. Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Composite Structures**, [s. l.], v. 157, p. 62–70, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.08.023>>

YOO, Doo Yeol et al. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. **Composite Structures**, [s. l.], v. 174, p. 375–388, 2017. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.069>>

YOO, Doo Yeol; BANTHIA, Nemkumar; YOON, Young Soo. Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 74, p. 71–87, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.005>>

YOO, Doo Yeol; KIM, Sung Wook; PARK, Jung Jun. Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 132, p. 219–229, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.104>>

YU, Mingzhi et al. Influence of moisture content on measurement accuracy of porous media thermal conductivity. **Heat Transfer-Asian Research**, [s. l.], v. 38, n. 8, p. 492–500, 2009.

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**, [s. l.], v. 56, p. 29–39, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884613002275>>

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**, [s. l.], v. 79, 2015. a.

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**, [s. l.], v. 55, p. 383–394, 2015. b.

YUNSHENG, Zhang et al. Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 30, n. 9, p. 831–838, 2008.

ZENG, Qiang et al. Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 560–569, 2012.

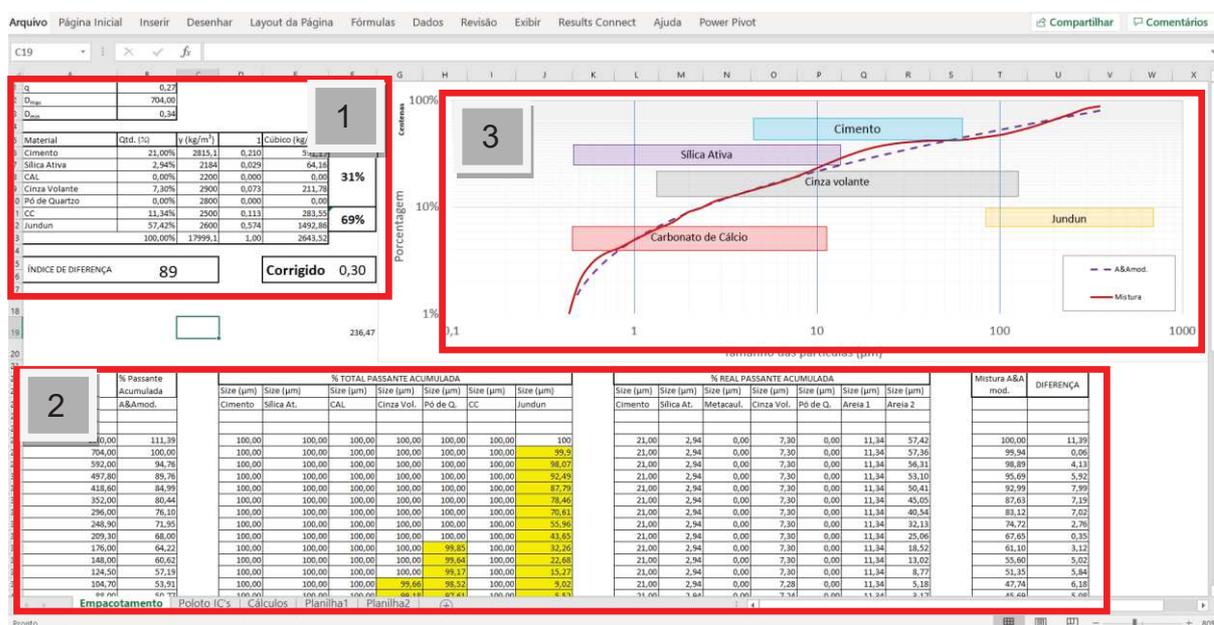
ZHENG, Jingmin; JOHNSON, Paul F.; REED, James S. Improved Equation of the Continuous Particle Size Distribution for Dense Packing. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 73, n. 5, p. 1392–1398, 1990.

ZOLLO, Ronald F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 107–122, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com.libproxy1.nus.edu.sg/science/article/pii/S0958946596000467>>

APÊNDICE A – SEQUÊNCIA PARA A DETERMINAÇÃO DO IDE DAS MISTURAS

Para a determinação do IDE de cada mistura este trabalho utilizou o software excel. Para isso foi criada uma planilha com algumas informações como, Distribuição granulométrica de cada material utilizado na mistura, coeficiente de distribuição (q), diâmetro máximo e mínimo dos materiais utilizados na mistura e uma tabela com as porcentagens de cada material a ser inserido na mistura. A Figura 69 mostra a tela da tabela criada para esta tese.

Figura 69 - Imagem da planilha criada para a obtenção das proporções dos constituintes



A Figura 69 apresenta uma imagem geral da planilha, porém temos três partes da planilha que serão apresentadas na sequência. A primeira parte, trata-se das informações que devem ser colocadas em função dos diâmetros máximo e mínimo dos constituintes utilizados na mistura, e o coeficiente de distribuição que depende da distribuição granulométrica dos materiais.

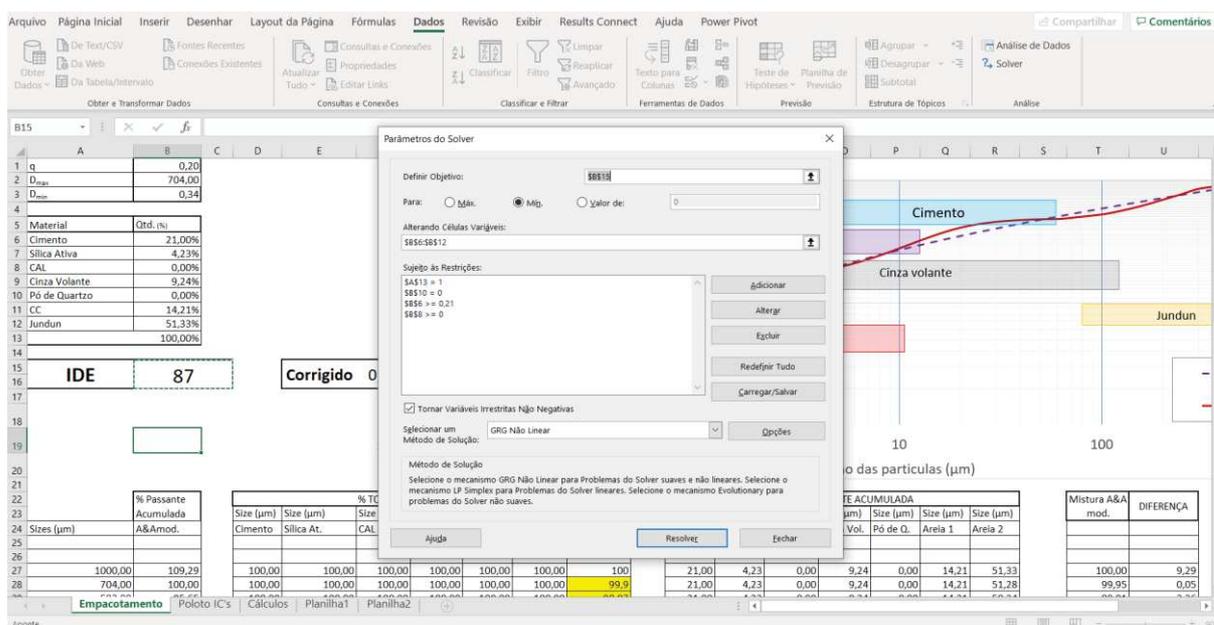
O coeficiente de distribuição pode variar, ele faz com que a curva de empacotamento ideal (linha azul tracejada) seja modificada. Como visto na revisão bibliográfica, o valor deste coeficiente pode ser obtido através de estudos experimentais, ou se houver predominância de materiais com diâmetros dos grãos inferiores a 250 µm, o coeficiente deverá ser inferior a 0,25. Neste trabalho foi utilizado o coeficiente de distribuição 0,20 como pode ser visto na Figura 70.

E a terceira parte da planilha é o gráfico com as curvas da mistura e do empacotamento ideal. Através da variação destas curvas se obtém o IDE da mistura.

A partir do preenchimento então das informações referente ao diâmetro máximo e mínimo dos agregados que compõem o traço, o coeficiente de distribuição da mistura a ser utilizada e a distribuição granulométrica dos materiais a ser inseridos na mistura, é utilizado o comando solver do excel para que possa ser realizado a interação entre os quantitativos de cada material a ser inserido na mistura de maneira que tenhamos a curva do empacotamento da mistura seja mais próxima possível do empacotamento ideal.

O comando solver está localizado no caminho dados do excel, acessando este caminho, na aba análise existe o comando solver. Após clicar no comando, abrirá a seguinte janela no software, conforme mostra a Figura 72.

Figura 72 - Tela após o comando solver ser aberto



Neste comando podemos colocar algumas regras, por exemplo a quantidade mínima de um determinado material, ou a não utilização de um material que esteja na planilha. Após a definição das regras que se deseja, basta clicar em resolver que o comando irá fazer a interação das células que você indicou que sejam modificadas para que uma outra célula tenha uma resposta que você busca.

Assim, para o método de dosagem proposto, foi solicitado a alteração das células que corresponde aos quantitativos de cada material a ser inserido na mistura, de maneira que estas quantidades levam a uma curva da mistura mais próxima a curva do empacotamento perfeito.