

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

RADUAN KRAUSE LOPES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UHPC
DOSADOS PELO MÉTODO UNISINOS**

São Leopoldo

2022

RADUAN KRAUSE LOPES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UHPC
DOSADOS PELO MÉTODO UNISINOS**

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(a): Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Christ

São Leopoldo

2022

RADUAN KRAUSE LOPES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UHPC
DOSADOS PELO MÉTODO UNISINOS**

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 12 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Roberto Christ - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Profa. Dra. Andrea Parisi Kern - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Profa. Dra. Elaine Guglielmi Pavesi Antunes - Universidade do Extremo Sul
Catarinense

Prof. Dr. Sérgio Elías Gavilán Martínez - Universidad Nacional de Asunción

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, que me deu
forças e saúde para chegar até esse ponto, e a minha
família, em especial minha esposa Jayne Carlos
Piovesan, por ser minha parceira de vida e estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tem iluminado e me guiado pelos caminhos dessa jornada chamada vida. Sem suas bênçãos eu nada seria e não teria chegado aonde cheguei.

Agradecer aos meus pais, Mariuza Krause e Sueldo Ferreira Soares, por desde cedo me mostrarem a importância da educação. Por terem me proporcionado de todas as formas ter uma educação de qualidade, que graças ao apoio desde cedo deles me guiaram até esse momento máximo acadêmico. Sou muito grato por todas as horas sentados ao meu lado desde pequeno e ao amor incondicional de vocês, amo-lhes do fundo do coração.

Agradecimento especial para minha esposa, Jayne Carlos Piovesan, que é meu porto seguro na vida e na caminhada acadêmica. Ela que me incentivou desde o mestrado a percorrer esse caminho e me mostrar como é fantástico o mundo da pesquisa e da docência. Que me inspira a sempre dar o meu melhor, sendo meu exemplo de dedicação e excelência em tudo que faz. Espero que possamos trilhar esse caminho para o resto de nossas vidas com muito amor e companheirismo.

Gostaria de agradecer meu orientador Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, por ter aceitado me orientar nesse trabalho, mesmo não tendo vagas disponível para orientação e ter brigado por essa vaga. Também não ter medido esforços na construção desse trabalho, que sempre teve uma palavra de motivação para a conclusão dessa jornada. Saiba que o senhor é uma inspiração como pesquisador e professor.

Agradeço também ao meu coorientador Dr. Roberto Christ, que abraçou esse trabalho e foi como um irmão mais velho que nunca tive, que soube ser paciente nas minhas dúvidas e angústias e trazer sempre uma palavra de apoio. Sua ajuda foi fundamental para a finalização da pesquisa. Esse trabalho é fruto do seu empenho também e serei eternamente grato.

Aos laboratoristas do itt performance, Simone, Arthur, Norman, Debora e do laboratório de materiais de engenharia civil, Igor, André, Leonardo e Bianca, vocês também são parte desse trabalho.

Aos colegas de PPGEC que ajudaram de alguma forma na confecção desse trabalho, seja nas discussões de avaliação do método da pesquisa e dos resultados

obtidos ou apenas pelas palavras de incentivo, Angélica Koppe, David Nunes, Vanessa Oerle, Monique Lunardi. Obrigado por estarem nessa jornada.

Agradecer a minha amiga Livia Maria Palácio Ribeiro, que esteve desde o começo desse trabalho sempre com uma palavra amiga e em oração para o termino desse trabalho. Suas orações ajudaram muito e chegamos ao final. As minhas orações também estão agora para você também concluir sua tese.

As empresas que contribuíram para essa pesquisa: a Premold que doou o cimento CP V-ARI, a Construrohr pela doação da areia, a MC Bauchemie pela doação do superplastificante empregado nos traços.

Agradecer a Fundação Universidade Federal de Rondônia, pelo incentivo para a capacitação docente, por meio do edital de afastamento promovido pela Universidade. Ao Centro Universitário São Lucas – PVH, pelo convênio firmado com a UNISINOS para o desenvolvimento da turma especial de mestrado e doutorado.

Agradecer a todos que de alguma forma puderam ajudar e participar desse trabalho, saibam que todos vocês foram fundamentais para que a caminhada até aqui fosse concluída. A todos, o meu muito obrigado.

“Você não sabe o quanto caminhei, para chegar até aqui.

Percorri milhas e milhas antes de dormir”

A estrada – Toni Garrido

RESUMO

O Concreto de Ultra Alto Desempenho (*Ultra-High Performance Concrete - UHPC*) é a evolução mais significativa nos últimos anos dos compósitos cimentícios, e, por apresentar propriedades mecânicas aliadas à durabilidade elevada em comparação aos concretos convencionais (CC), torna-se um material estrutural com grande potencial de utilização. Apesar desse potencial promissor, seu processo de mistura por vezes é complexo para emprego de forma mais ampla. Na busca de tornar o uso do UHPC mais abrangente, foi desenvolvido o método de dosagem UNISINOS, que tornou o processo de mistura desse compósito mais simples e racional. Entretanto, faltavam definir alguns parâmetros que influenciavam na busca das melhores propriedades mecânicas dos UHPC's. Assim o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a variação do módulo de distribuição das partículas – q - com valores de 0,20 e 0,25 e o percentual de consumo de cimento (15%, 20% e 25%) na obtenção dos menores índices de desvio de empacotamento (IDE) do método. As propriedades de resistência à compressão e à flexão foram avaliadas quanto a variação dos dois parâmetros bem como a trabalhabilidade das misturas por meio do ensaio de espalhamento. Os resultados a resistência à compressão mostraram que a variação do módulo q não evidenciou mudanças nessa propriedade, em contrapartida, o percentual de cimento de 20% que gerou os menores IDE's (190 e 180) obtiveram as maiores resistências à compressão, 151,16 MPa e 147,03 MPa, respectivamente aos 91 dias de cura normal. Para os resultados obtidos à flexão, o módulo q também não foi preponderante para variações significativas nos valores obtidos, e quanto ao percentual de cimento atrelado ao IDE, evidencia-se uma correção inversa a resistência à compressão, sendo que os maiores resultados de compressão, apresentaram os menores valores a flexão. Com base nos resultados obtidos, principalmente as resistências à compressão aos 28 e 91 dias, é possível afirmar que o método de dosagem UNISINOS é promissor na busca de propriedades mecânicas normativas mínimas para UHPC.

Palavras-chave: Concreto de Ultra Alto Desempenho. Método de dosagem. Propriedades mecânicas. Índice de desvio de empacotamento (IDE).

ABSTRACT

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is the most significant evolution in recent years of cementitious composites, and, due to its mechanical properties combined with high durability compared to conventional concrete (CC), it becomes a structural material with great potential use. Despite this promising potential, its mixing process is sometimes complex to use more widely. In the quest to make the use of UHPC more comprehensive, the UNISINOS dosing method was developed, which made the process of mixing this composite simpler and more rational. However, some parameters that influenced the search for the best mechanical properties of UHPC's still needed to be defined. Thus, the objective of this research was to evaluate the variation of the particle distribution modulus - q - with values of 0.20 and 0.25 and the percentage of cement consumption (15%, 20% and 25%) in obtaining the lowest indices marshaling deviation (IDE) of the method. The compressive and flexural strength properties were evaluated regarding the variation of the two parameters, as well as the workability of the mixtures through the spreading test. The compressive strength results showed that the variation of the modulus q did not show changes in this property, on the other hand, the cement percentage of 20% that generated the lowest IDE's (190 and 180) obtained the highest compressive strength, 151.16 MPa and 147.03 MPa, respectively at 91 days of normal curing. For the results obtained in flexion, the modulus q was also not predominant for significant variations in the values obtained, and as for the percentage of cement linked to the FDI, an inverse correction to the compressive strength is evident, with the highest compression results, showed the lowest values in flexion. Based on the results obtained, mainly the compressive strengths at 28 and 91 days, it is possible to state that the UNISINOS method of measurement is promising in the search for minimum normative mechanical properties for UHPC.

Key-words: Ultra High Performance Concrete. Method of dosage. Mechanical properties. Packing Deviation Index (IDE).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Passarela de UHPC na cidade de Sherbrooke.	20
Figura 2 – Evolução da resistência máxima à compressão de concretos em 100 anos	22
Figura 3 – Transferência de tensão (a) CC e (b) UHPC.	25
Figura 4 – Seções transversais de vigas em UHPC Ductal®, aço, concreto pré- fabricado, protendido com a mesma solicitação.	27
Figura 5 – Painéis de UHPC da Fundação Louis Vuitton.	28
Figura 6 – Estrutura da fachada, cobertura e passarela em UHPC do MUCEM.	28
Figura 7 – Estrutura de fachada e cobertura do Estádio Jean Bouin.	29
Figura 8 – Unidade Habitacional confeccionada em UHPC pela empresa New House	29
Figura 9 – Relação entre viscosidade plástica e tempo final de abertura de mini- slump.	31
Figura 10 – Comportamento quanto à flexão UHPC Ductal®	42
Figura 11 – Quantidade de tamanho de poros de diferentes concretos	45
Figura 12 – Distribuição do tamanho e volume de poros em CC, CAR e UHPC.	46
Figura 13 – Típico arranjo de empacotamento de misturas simples, binárias e ternárias	47
Figura 14 – Modelos de distribuição de partículas, Funk e Dinger, Andreasen e Andersen, Fuller e Thompson.	49
Figura 15 – Efeito parede e afrouxamento em sistema ternário de mistura granular	51
Figura 16 – Densidade de empacotamento x razões de finos na mistura segundo modelos LPDM e SSM.	52
Figura 17 – Relação entre vazios de uma mistura e tamanho de partícula.	56
Figura 18 – Faixas granulométricas de materiais diversos.	58
Figura 19 – Curva teórica de mistura com base no modelo de Funk e Dinger.	59
Figura 20 – Curvas de empacotamento ótima e da mistura.	60
Figura 21 – Área entre o empacotamento perfeito e o empacotamento a mistura. ...	60
Figura 22 – Fluxograma programa experimental.	62
Figura 23 – Máquina de desbastamento (a) e coleta do resíduo de vidro (b)	73
Figura 24 – Fibra de aço aplicada nas misturas da pesquisa.	75
Figura 25 - Curva de empacotamento ideal e da mistura de IDE 87.	76

Figura 26 – Verificação das superposições de faixas granulométricas.	77
Figura 27 – Resumo das misturas de UHPC.....	80
Figura 28 – Traços com cimento CP V-ARI.....	81
Figura 29 – Curvas granulométricas mistura ideal A&A _{mod} x misturas propostas pelo método UNISINOS.	82
Figura 30 – misturador planetário utilizado na pesquisa.	84
Figura 31 – Espalhamento de mistura de UHPC.....	85
Figura 32 – Esquema de ensaio normativo e ensaio sendo realizado.	87
Figura 33 – Identificação dos traços.....	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Composição granulométrica do cimento Portland branco estrutural.....	64
Gráfico 2 – Granulometria CP V-ARI.....	66
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da sílica ativa.....	67
Gráfico 4 – Distribuição granulométrica pó de quartzo #200.....	69
Gráfico 5 - Distribuição granulométrica pó de quartzo #325.....	69
Gráfico 6 – Granulometria Fíler de Basalto.	70
Gráfico 7 – Composição granulométrica Cinza Volante.	71
Gráfico 8 – Granulometria areia de Osório.....	72
Gráfico 9 – Granulometria resíduo de vidro industrial	74
Gráfico 10 – Distribuição granulométrica dos materiais disponíveis.	78
Gráfico 11 – Média das resistências aos 7 dias (MPa).....	93
Gráfico 12 – Resistência à compressão 28 dias	96
Gráfico 13 – Resistência à compressão 91 dias.	99
Gráfico 14 – Carga x deflexão misturas 28 dias.....	104
Gráfico 15 – Carga x deflexão misturas 91 dias.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tamanho máximo de agregado em UHPC.....	37
Tabela 2 – Resistência à compressão com cura térmica	40
Tabela 3 – composição química cimento Portland Branco Supremo.	63
Tabela 4 – propriedades físicas do cimento Portland branco Supremo.	64
Tabela 5 – Caracterização química do CP V-ARI.	65
Tabela 6 – propriedades físicas do CP V-ARI.....	65
Tabela 7 – Parâmetros químicos sílica ativa	67
Tabela 8 – Parâmetros físicos sílica ativa.	67
Tabela 9 – Características físicas e químicas do pó de quartzo.	68
Tabela 10 – Composição química do fíler de basalto.....	70
Tabela 11 – Composição química da cinza volante	71
Tabela 12 – Características físicas e químicas do resíduo de vidro industrial.	73
Tabela 13 – D_{90} , D_{50} e D_{10} das misturas de UHPC da pesquisa.....	82
Tabela 14 – Procedimentos de etapas de misturas para todos os traços.	85
Tabela 15 – Resultados do espalhamento das misturas	90
Tabela 16 – resultados das resistências à compressão MPa.....	92
Tabela 17 – ANOVA resistência à compressão 7 dias.....	94
Tabela 18 – Comparações das médias entre as misturas para resistência à compressão 7 dias.	95
Tabela 19 – Agrupamento das misturas por IDE para 7 dias de resistência à compressão.....	95
Tabela 20 – ANOVA das resistências à compressão aos 28 dias.....	97
Tabela 21 – Comparações das médias entre as misturas para resistência à compressão 28 dias.	97
Tabela 22 - Agrupamento das misturas por IDE para 28 dias de resistência à compressão.....	98
Tabela 23 - ANOVA das resistências à compressão aos 91 dias.	101
Tabela 24 - Comparações das médias entre as misturas para resistência à compressão 91 dias.	101
Tabela 25 - Agrupamento das misturas por IDE para 91 dias de resistência à compressão.....	102

Tabela 26 – Resultados ensaio a flexão 28 e 91 dias das misturas de UHPC da pesquisa.....	102
Tabela 27 – ANOVA resistência máxima (F_p) a flexão aos 28 dias.....	105
Tabela 28 – Comparações das resistências máximas (F_p) entre IDE's 28 dias.	106
Tabela 29 – Resumo comparações das resistências máximas (F_p) entre IDE's 28 dias.....	106
Tabela 30 – ANOVA resistência máxima (F_p) a flexão 91 dias.	107
Tabela 31 – interação entre os IDE's resistência à flexão máxima (F_p) 91 dias.....	107
Tabela 32 – Resumo das interações resistências máximas (F_p) à flexão 91 dias...	107

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
UHPC	Ultra High Concrete Performance
CPR	Concreto de Pós Reativos
CC	Concreto Convencional
CAR	Concreto de Alta Resistência
CAD	Concreto de Alto Desempenho
IDE	Índice de Desvio de Empacotamento
A&A _{mod}	Método de Andreasen e Andersen modificado
PE	Polietileno
PVA	Poliacetato de vinila
q	Módulo de distribuição das partículas
CO ₂	Dióxido de carbono
a/c	Relação água/cimento
MCS	Materiais cimentícios suplementares
CUAD	Concreto de ultra alto desempenho
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
MTP	Espessura máxima da pasta
a/ag	Relação água/aglomerante
P(D)	Fração das partículas passantes pela peneira de abertura D
PSD	Particle size distributions
D _{min}	Menor tamanho de partículas da mistura
D _{máx}	Maior tamanho de partículas da mistura
LPDM	Linear packing-density model
SSM	Solid suspension model
CPM	Compressive packing model
DEM	Modelo de elementos discretos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	JUSTIFICATIVA.....	20
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	22
2.1	CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO	22
2.1.1	Definições de UHPC	24
2.1.2	Aplicações do UHPC	26
2.1.3	Reologia do UHPC	29
2.1.4	Materiais Constituintes	32
2.1.4.2	Sílica Ativa.....	33
2.1.4.3	Fibras	34
2.1.4.4	Aditivo superplastificante.....	35
2.1.4.5	Agregado miúdo	36
2.1.4.6	Materiais cimentícios suplementares em UHPC.....	38
2.1.5	Propriedades Mecânicas do UHPC	39
2.1.5.1	Resistência à compressão	39
2.1.5.2	Resistência à flexão e tração direta.....	41
2.1.5.3	Tenacidade.....	43
2.1.5.4	Durabilidade	44
2.1.6	Métodos de Dosagem UHPC	46
2.1.6.1	Otimização das curvas de distribuição de tamanho de partículas.....	48
2.1.6.2	Modelos analíticos de densidade de empacotamento.....	50
2.1.6.3	Modelo de Elementos Discretos para empacotamento	54
2.1.7	Aspectos relevantes no estudo de dosagem para UHPC	55
2.1.8	Método de dosagem para UHPC UNISINOS (2019)	57
2.1.8.1	Etapa de seleção dos materiais.....	57
2.1.8.2	Etapa de determinação do índice de desvio de empacotamento (IDE).....	58
3	MATERIAIS E MÉTODO	62
3.1	MATERIAIS	63
3.1.1	Cimentos	63

3.1.1.1 Cimento Branco Estrutural	63
3.1.1.1 Cimento Portland V – ARI	65
3.1.2 Sílica Ativa	66
3.1.3 Pó de Quartzo	68
3.1.4 Fíler Basáltico	69
3.1.5 Cinza Volante	70
3.1.7 Resíduo de vidro industrial	72
3.1.8 Aditivo superplastificante.....	74
3.1.9 Fibras metálicas	74
3.2 MÉTODO.....	76
3.2.1 Avaliação dos materiais para determinação dos traços	76
3.2.2 Determinação do teor máximo de fibras	83
3.2.3 Processo de misturas	84
3.2.4 Ensaio no estado fresco	86
3.2.5 Ensaio no estado endurecido.....	86
3.2.5.1 Resistência à compressão axial	86
3.2.5.2 Resistência à flexão e fator de tenacidade	87
3.2.6 Identificação e apresentação dos resultados dos ensaios	88
3.2.7 Avaliação e tratamento estatístico dos dados.....	88
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	90
4.1 RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DAS MISTURAS	90
4.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MISTURAS.....	92
4.3 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E TENACIDADE	102
5 CONCLUSÃO	109
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	110
REFERÊNCIA	112

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado pelo homem, com ampla difusão da indústria da construção civil e uma ótima opção para as mais variadas construções. Mas dessa ampla utilização em diferentes campos de trabalho da humanidade, o concreto convencional (CC), segundo Raheem, Mahdy e Mashaly (2019), apresenta alguns problemas para as exigências mais atuais das construções, como a baixa resistência à compressão, segundo os autores concretos com fck menores de 65 MPa, além de déficit na durabilidade e nas propriedades como tração e tração na flexão.

Desenvolver novos concretos que possam suprir as falhas nas propriedades dos CC é uma justificativa para os avanços dentro do campo das pesquisas. A união das melhores características de dois ou mais concretos já conhecidos, como a fluidez e alta resistência à tração, são exemplos desses novos concretos (CHRIST, 2019).

Nessa vertente, o concreto de ultra alto desempenho (*ultra-high performance concrete - UHPC*) surge, no século XXI, com a premissa de aprimorar as propriedades mecânicas do concreto convencional. Dentro dessas características, a resistência à compressão acima dos 150 MPa, resistência à flexão superior aos 10 MPa aos 28 dias, alta durabilidade, ductibilidade, tenacidade, além de resistir muito bem a agentes externos, como ataques de íons cloretos e outros agentes químicos (RAHEEM; MAHDY; MASHALY, 2019).

O UHPC, também conhecido como concreto de pós reativos (CPR), é formado, basicamente, por pós finos sem a presença de agregados graúdos (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016a). As dosagens de UHPC, da década de 90, envolviam uma grande quantidade de cimento, sílica ativa, pó de quartzo, superplastificante, contendo adições de fibras, em sua grande parte de origem metálica (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

As fibras adicionadas no UHPC também são responsáveis pelos ganhos nas propriedades mecânicas desse compósito. Usualmente são utilizadas as fibras metálicas, porém alguns estudos, como de Soliman e Tagnit-Hamou (2017), Kang et al. (2016) e Khan, Abbas e Fares (2017), mostraram que pode ser obtido UHPC com propriedades mecânicas com outras fibras, tais como as de polietileno (PE) e de poliacetato de vinila (PVA), equivalentes a misturas de UHPC com fibras metálicas.

A não existência de agregado graúdo é justificada pela diminuição dos vazios deixados no arranjo granular pela ausência dessas partículas maiores, o que gera uma maior compactação do UHPC; ainda melhora a zona de transição entre agregados e a pasta, que, em concretos convencionais, é a região de ruptura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Christ (2019), a reologia e as propriedades mecânicas do UHPC tornam o produto promissor e com alto potencial para o uso de obras de engenharia, pois, devido à alta resistência, é possível ter dimensões reduzidas das peças. Além disso, a sua durabilidade permite que o UHPC seja empregado nas mais variadas situações de agressividade, sem que se tenha perda de desempenho.

Como já exposto, os traços padrões de UHPC eram ricos em cimento, com valores variando entre 800 a 1100 kg/m³, fato que vai na contramão da produção de concretos mais sustentáveis que buscam a redução da geração de gases de efeito estufa produzida pela indústria do cimento. Na linha de produção do UHPC mais ecológicos, vários autores demonstraram a produção desse concreto com substituição do cimento por resíduos industriais. Grande parte das pesquisas tem utilizado escoria granular de alto forno, cinzas volantes, entre outros materiais pozzolânicos como o resíduo de vidro (YAZICI et al., 2010; YIGITER et al., 2012; RANDL et al., 2014; SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017).

Ainda na vertente de UHPC mais sustentáveis, a seleção racional de materiais é um dos pontos mais avaliados nos últimos tempos, uma vez que apenas uma parte do cimento é hidratado (KORPA; KOWALD; TRETTIN, 2009; YIN et al., 2022), sendo o restante apenas empregado como material de enchimento, deve-se buscar métodos cada vez mais abrangentes para aplicação desse compósito.

Para o desenvolvimento do UHPC, um dos princípios mais importantes é a otimização do empacotamento das partículas granulares da mistura, sendo que a dimensão similar entre as classes de materiais constituintes do UHPC é um ponto crítico (KANG et al., 2017). Segundo Fehling, Leutbecher e Bunge (2004), a densificação dessa mistura leva à diminuição de porosidade da matriz, o que leva o UHPC a apresentar elevada durabilidade, pois os agentes agressivos não conseguem penetrar com facilidade nos poros existentes.

Para se obter as propriedades esperadas de um UHPC, o estudo da dosagem é primordial. Boa parte das dosagens propostas para esse compósito envolvem a teoria de empacotamento, ou seja, a busca por uma mistura densificada com poros

pequenos (AİTCIN, 1998; GRAYBEAL, 2011; CWIRZEN e PENTTALA, 2005; FEHLING *et al.*, 2014; RESPLENDINO e TOUTLEMONDE 2013). Mas esses projetos de misturas envolvem estudos empíricos, com a tentativa e erro quanto a uma curva de empacotamento ideal. Assim, Christ (2019) relata que o desenvolvimento de um método para que a obtenção das proporções ideais dos materiais na confecção do UHPC é essencial para que o mesmo possa apresentar propriedades reológicas e mecânicas adequadas para cada situação. Assim o autor propôs um método para determinação das proporções ideais dos constituintes da mistura de UHPC, envolvendo os princípios de empacotamento ideal das partículas.

Dessa forma, busca-se nessa pesquisa avaliar a eficiência do método de dosagem proposto por Christ (2019), analisando a influência do módulo de distribuição das partículas “q” e o percentual do consumo de cimento na variação do índice de desvio de empacotamento (IDE) nas propriedades do estado fresco e endurecido de misturas de UHPC.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa avaliar o método de dosagem UNISINOS em misturas de UHPC.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral dessa pesquisa, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a influência do módulo de distribuição das partículas “q” e o percentual de consumo de cimento quanto à trabalhabilidade;
- b) Avaliar a resistência à compressão na variação do módulo de distribuição das partículas “q” e o percentual de consumo de cimento;
- c) Analisar a mudança do módulo “q” e o percentual de consumo de cimento na propriedade à flexão das misturas de UHPC;

1.2 JUSTIFICATIVA

O UHPC é um compósito especial com qualidades de resistência e durabilidade superiores aos concretos convencionais (CC). Sua utilização em construções iniciou no ano de 1997, aplicado em uma passarela no Canadá, na cidade de Sherbrooke (Figura 1) (WARNOCK, 2005). Após isso, outros países como Alemanha, Japão, Coreia do Sul e Estados Unidos também utilizaram a tecnologia na construção de passarelas, pontes e pavimentos rodoviários.

Figura 1 – Passarela de UHPC na cidade de Sherbrooke.



Fonte: (WARNOCK, 2005, apud Dowd, 2000)

Mas tal tecnologia ainda é considerada dispensiosa para aplicação em grande escala, uma vez que uma grande quantidade de cimento, superior a 850 kg/m^3 , é necessária para se obter os projetos padrões de UHPC. Esses valores são de 2 a 5 vezes maiores que dosagens convencionais, o que encarece os custos iniciais do UHPC, além do alto consumo de recursos naturais e geração de CO_2 , que gera grandes impactos ambientais na adoção do UHPC em larga escala (ZHANG et al., 2019). Ainda, segundo os autores, a viabilidade do UHPC passa pela substituição do cimento por materiais cimentícios suplementares.

Um dos impedimentos mais significativos para uma adoção mais ampla de materiais da classe do UHPC em aplicações estruturais está ligado a falta de procedimentos padrões para um projeto de mistura a fim de se alcançar propriedades desejadas com determinados materiais. Na comparação entre UHPC e o CC, o primeiro apresenta uma quantidade significativa maior de materiais envolvidos na mistura, o que torna a maioria dos projetos complexos. Essas misturas

normalmente são desenvolvidas com base em misturas anteriores que vão apenas mudando as proporções e os materiais até se alcançar as propriedades ideais desejadas (RAGALWAR et al., 2020).

Christ (2019) propôs um método para a dosagem racional de UHPC – Método UNISINOS. O método consiste na obtenção do índice de desvio de empacotamento (IDE) que consiste na diferença da área entre a curva da mistura real obtida com os materiais disponíveis e a curva idealizada de $A \& A_{mod}$. Para obtenção da curva real, o método é condicionado aos parâmetros que geram a curva idealizada, tais como módulo de distribuição das partículas – q , diâmetros máximos e mínimos dos materiais empregados, bem como os percentuais de cada material. O IDE apresentado no método de dosagem UNISINOS é um aspecto importante na busca das propriedades inerentes a definição para um UHPC, atrelando-se a busca do menor índice ao refinamento do empacotamento granular dos materiais da mistura.

Apesar do caminho promissor apresentado pelo método UNISINOS, esse ainda carece de estudos que avaliem os fatores que estão conectados a busca dos menores IDE's. Assim essa pesquisa se justifica na avaliação de dois pontos do método, o módulo de distribuição das partículas – q e o percentual de consumo de cimento com o propósito de se verificar suas influências nas propriedades de resistência à compressão e à flexão bem como na trabalhabilidade das misturas de UHPC.

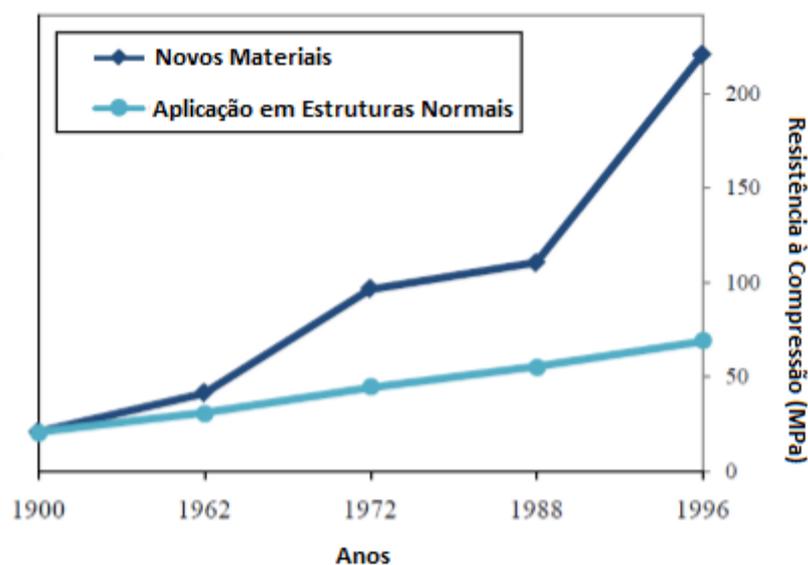
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Nesse capítulo apresenta-se o estado da arte referente ao UHPC, como definições, propriedades físico e mecânicas, durabilidade e aplicações. Também foram abordados os métodos de dosagem até a evolução para método de dosagem UNISINOS, bem como uma revisão acerca dos parâmetros que estão envolvidos no método.

2.1 CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO

Na última década houve um grande avanço para desenvolvimento de materiais cimentícios, principalmente a partir do ano de 1930, quando iniciaram intensos esforços de pesquisa para melhorar as propriedades do concreto (SOLIMAN, 2016). A Figura 2 apresenta essa evolução dos últimos cem anos.

Figura 2 – Evolução da resistência máxima à compressão de concretos em 100 anos



Fonte: Adaptada de Soliman (2016)

Essa evolução só foi possível pois a definição do concreto não se restringe mais apenas à mistura simples entre cimento, areia, brita e água, mas sim com a utilização de aditivos e adições, que passaram a garantir para tal composto cimentício uma mistura com maior desempenho e durabilidade, devendo não apenas atender os requisitos de resistência mecânica, mas também as propriedades reológicas e de deformação (CHRIST, 2019). Para Soliman (2016) tal evolução se

deve a densificação da pasta de cimento no estado fresco juntamente com o uso de superplastificantes e partículas ultrafinas, o que gerou um compósito com o mínimo de defeitos na sua microestrutura.

Para Christ (2014), devido às exigências as quais as estruturas estão sendo submetidas, o concreto deve sofrer evolução, uma vez que a determinação dos esforços a que essas estruturas estão submetidas estão cada vez mais precisos. Assim a busca por concretos especiais é objeto da evolução dos estudos quanto a tecnologia do concreto.

O conceito de material cimentício de alta resistência e alto desempenho iniciou-se na década de 1970 quando se passou a entender melhor os mecanismos das reações de hidratação, retração, fluência e porosidade, bem como no desenvolvimento de redutores de água e processos avançados de cura. Na década de 80 concretos com até 60 MPa de resistência e utilizando uma menor relação água/cimento (a/c) e também a introdução dos materiais cimentícios suplementares (MCS) tiveram sua denominação para concreto de alta resistência (CAR). O CAR com propriedades de aprimoramento de durabilidade foi designado concreto alto desempenho (CAD) (MENDONÇA, 2019).

Conforme mostrado por Tutikian, Isaia e Helene (2011), as evoluções nos cálculos estruturais aliado com o maior conhecimento do comportamento mecânico do concreto e do aço, estão permitindo a elaboração de estruturas mais arrojadas, onde o concreto convencional (CC) não atende aos requisitos desejados. Assim foram desenvolvidas misturas especiais para o concreto, chamados de concreto de alta resistência (CAR), concreto de alto desempenho (CAD) e concreto de ultra alto desempenho (CUAD).

Segundo Norhasri, Hamidah e Fadzil (2019), os primeiros estudos quanto ao concreto de ultra alto desempenho iniciou-se na década de 90, onde o uso do UHPC no mundo da construção vem para superar as propriedades limitadas de resistência e de durabilidade dos concretos comuns de alta resistência para aplicação em condições extremas e projetos exclusivos.

O concreto de Ultra Alto Desempenho (do inglês *Ultra-High Performance Concrete – UHPC*), também conhecido como concreto de pós reativos (CPR), é um material cimentício avançado, advindo da evolução dos concretos de Alto desempenho (CAD). Tem por características fundamentais altos valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade e durabilidade superior a outros

concretos. Os traços padrões de UHPC, segundo Richard e Cheyrezy (1995), contém uma mistura com grande quantidade de cimento, sílica ativa, pó de quartzo, superplastificante, podendo conter ou não fibras de aço, e seu alto desempenho é garantido devido aos princípios básicos a seguir:

- melhoria da homogeneidade da mistura com a eliminação do agregado graúdo;
- melhoria da densidade pela otimização da granulometria dos grãos das misturas e aplicação de pressão durante e depois da confecção dessas misturas;
- microestrutura aperfeiçoada pelo processo de cura térmica;
- aumento da ductibilidade da mistura pelo acréscimo de fibras curtas de aço;
- processo entre confecção e moldagem dos traços de UHPC realizados no menor tempo possível.

Segundo Zhou et al. (2018), o UHPC é uma compósito cimentício, sendo um produto mais inovador na tecnologia do concreto nos último trinta anos, tendo vantagens em comparação ao concreto comum, como desempenho mecânico superior, excelentes propriedades antissistemas além de ser um produto com menor agressão ambiental do ponto de vista de durabilidade das estruturas.

2.1.1 Definições de UHPC

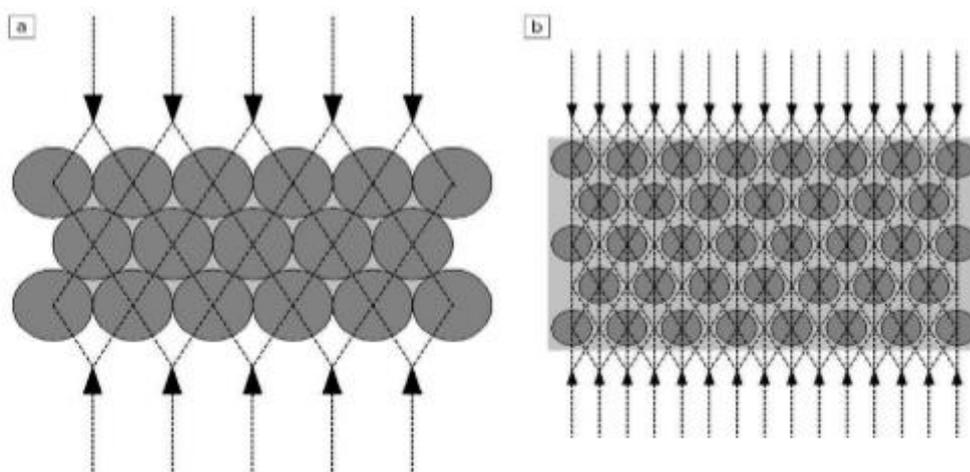
O UHPC é definido pela norma americana, ASTM C1856 (2017), como sendo um material com resistência à compressão superior a 120 MPa, utilizando agregados inferiores a 5 mm e apresentando um espalhamento entre 200 e 250 mm, medido pela mesa de consistência.

Já a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC) tem por definição do UHPC uma matriz cimentícia reforçada com fibras de aço, com característica de resistência à compressão superior a 150 MPa aos 28 dias, resistência à tração superior a 8 MPa, além de propriedades elevadas de sua reologia no estado fresco.

Para o Instituto Americano de Concreto (ACI), a 239R-18 (2018) estabelece o UHPC como um material cimentício avançado com maior resistência à compressão e tração, ductibilidade, além de maior durabilidade do que o CC ou até o CAD, tendo

como característica uma resistência à compressão mínima de 150 MPa. Ainda segundo a norma, o alto desempenho do UHPC está relacionado a estrutura porosa descontínua e a redução dos vazios na matriz. Segundo Mendonça (2019), está implícito que o nível de tensão transferido entre as partículas é reduzido com o aumento dos pontos de contato entre elas, por isso a seleção adequada de materiais é muito importante. A Figura 3 mostra a distribuição das tensões entre o concreto convencional (a) e no UHPC (b).

Figura 3 – Transferência de tensão (a) CC e (b) UHPC.



Fonte: Walraven, 2002

Raheem, Mahdy e Mashaly (2019) definem que o concreto de ultra alto desempenho é um compósito superior ao concreto convencional, apresentando resistência à compressão superiores a 150 MPa, resistência à flexão maiores do que 10 MPa, aos 28 dias, além da alta durabilidade, ductibilidade, tenacidade e boa resistência a ataques químicos e a difusão de cloretos.

Mendonça (2019) define que o UHPC é uma nova classe de concreto, com alta fluidez, durabilidade e propriedades mecânicas superiores. Tal fato se deve à baixa relação água/cimento, aliado à alta quantidade de ligante, o uso de fibras de aço e à ausência de agregado graúdo, tornando o UHPC significativamente diferente do CC nos estados frescos e endurecido.

Para se obter tais características, a seleção dos materiais a serem utilizados é muito importante. Zhou et al. (2018) afirmam que as propriedades do UHPC estão intrinsecamente ligadas aos materiais e condições climática da região de produção desse compósito, por isso os autores relatam que para uma mistura de UHPC obter

um desempenho ideal, o estudo de dosagem deve ter como base nas características dos materiais regionais.

Outra característica do UHPC para que o mesmo possa obter tais propriedades elevadas é a granulometria dos materiais empregados na sua confecção. Esse compósito cimentício tem na sua constituição basicamente pós, materiais com granulometria muito fina, sem a presença de agregados graúdo (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016b). Para Richard e Cheyrezy (1995), a ausência do agregado graúdo gera a diminuição dos vazios internos e da zona de transição, que em CC é o ponto de maior fragilidade.

Segundo El-Tawil et al. (2016), as propriedades elevadas de durabilidade e desempenho estão relacionadas à otimização do empacotamento das partículas dos materiais, pois os componentes do UHPC são rigorosamente selecionados pelo tamanho e distribuição das partículas, visando maximizar sua densidade de empacotamento. Essa alta densidade de empacotamento é obtida quando as partículas são dispostas na matriz, de forma a minimizar seus vazios (MENDONÇA, 2019).

2.1.2 Aplicações do UHPC

Para Soliman (2016), à medida que o UHPC evolui, o mercado para esse compósito deve se desenvolver para a utilização da sua maior resistência mecânica e durabilidade. O UHPC tem suas aplicações mais abrangentes em obras de artes, painéis acústicos, elementos pré-moldados, algumas pontes rodoviárias e de pedestres, construções de edifícios altos, vigas de pontes pré-fabricadas pré tensionadas, aplicações marítimas e aeronáuticas (VOORT; SULEIMAN; SRITHARAN, 2008; AKHNOUKH; BUCKHALTER, 2021).

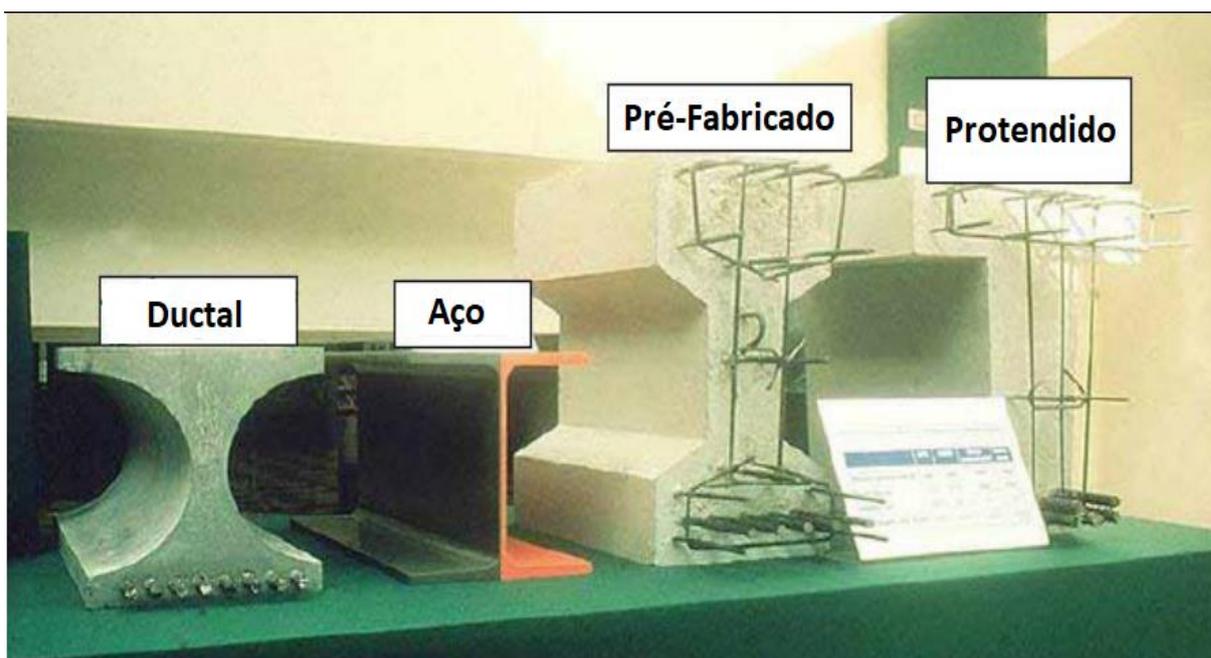
Como o uso do UHPC resultará de fato no aumento significativo da capacidade estrutural e na durabilidade dos elementos estruturais, vários problemas relacionados a rachaduras e infiltrações em conexões de pontes podem ser mitigados de maneira significativa (MENDONÇA, 2019).

Segundo Mendonça (2019), o uso do UHPC nos Estados Unidos está prioritariamente em produtos pré-fabricados fornecidos por empresas especializadas internacionais, por apresentar um processo de mistura desenvolvido, além da disponibilidade limitada de matérias-primas, o que acarreta aos um custo que passe

dos U\$ 2.000,00/m³, mais os custos de transporte e aplicação das peças, o que acaba impedindo o uso extensivo do UHPC.

Soliman, 2016) relata que o UHPC pode ser empregado em estruturas de grandes extensões, com peças mais esbeltas em comparação ao concreto convencional e de alto desempenho. Perry (2006) realizou uma comparação entre UHPC Ductal®, aço, concreto pré-fabricado e concreto protendido, para o dimensionamento de seção de uma viga. A seção de concreto pré-fabricado e protendido foram 50% maiores que a seção de UHPC, o que reduziu seu peso em 70%, e quando comparada com o aço. A peça de UHPC obteve a mesma seção transversal com um peso ligeiramente maior. A Figura 4 mostra essa comparação.

Figura 4 – Seções transversais de vigas em UHPC Ductal®, aço, concreto pré-fabricado, protendido com a mesma solicitação



Fonte: Perry (2006)

Dentre as aplicações em edificações do UHPC pode-se destacar a Fundação Louis Vuitton, na Cidade de Paris, sendo que foram confeccionados 19.000 painéis pré-fabricados de UHPC, unidos por junta de topo (Figura 5) (Aubry et al, 2013). Também o Museu das Civilizações da Europa e do Mediterrâneo (MUCEM), com seus painéis treliçados da fachada, telhado e passarela confeccionados em UHPC (Figura 6), bem como o estádio Jean Bouin com sua cobertura de 23 metros quadrados em UHPC (Figura 7) (Mazzacane et al. 2013).

Figura 5 – Painéis de UHPC da Fundação Louis Vuitton.



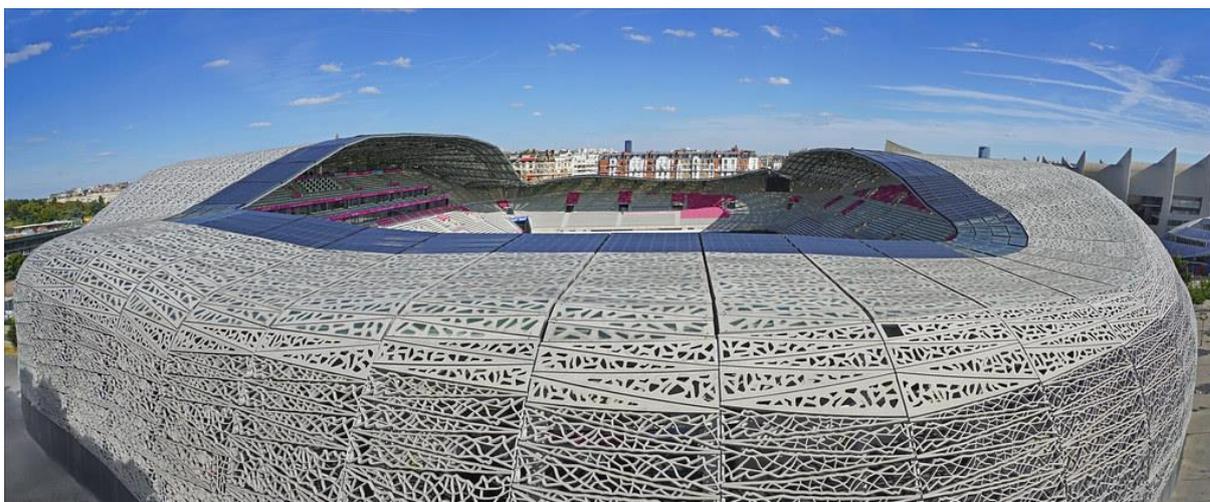
Fonte: bleuscape (2014)

Figura 6 – Estrutura da fachada, cobertura e passarela em UHPC do MUCEM.



Fonte: Frequence Sud (2013).

Figura 7 – Estrutura de fachada e cobertura do Estádio Jean Bouin.



Fonte: Flickr (2018)

No Brasil, as aplicações de UHPC ainda são pequenas, limitadas a trabalhos acadêmicos e algumas comerciais pontuais. Destaca-se o trabalho de Christ et al. (2019) que desenvolveu a aplicação do UHPC em conjunto com a empresa New house, localizada na cidade de São Paulo/SP. A aplicação consiste na construção de casas pré-fabricadas com uma estrutura metálica interna e revestidas com painéis tipo sanduíche de UHPC, sem juntas, com espessura de 10 mm e preenchidos com material termorrígido para melhor conforto termoacústico (Figura 8).

Figura 8 – Unidade Habitacional confeccionada em UHPC pela empresa New House



Fonte: Christ et al. (2019)

2.1.3 Reologia do UHPC

Para que o compósito atinja as propriedades exigidas de projeto, é preciso que os materiais que constituem a mistura permaneçam estáveis, sem que haja

segregação, exsudação ou hidratação precoce do cimento. Tais parâmetros compõem o estudo da reologia do compósito cimentício (CHRIST, 2019). Por isso, para Castro, Liborio e Pandolfeg (2011), o estudo da reologia do UHPC é fundamental para garantir sua trabalhabilidade. Ainda segundo os autores, ao se avaliar as propriedades reológicas do concreto por meio de métodos normatizados ou de forma empírica, se busca avaliar a capacidade da mistura realizar alguma movimentação, adotando a premissa que esse material terá o comportamento de um fluido newtoniano, com tensão de cisalhamento proporcional ao seu deslocamento. Mas tal análise se mostra equivocada, segundo Martinie, Rossi e Roussel (2010), uma vez que o comportamento do concreto não é regido pelo modelo newtoniano, pois, para que aja movimentação nos concretos, é necessária a aplicação de uma tensão mínima no material, que não é constante.

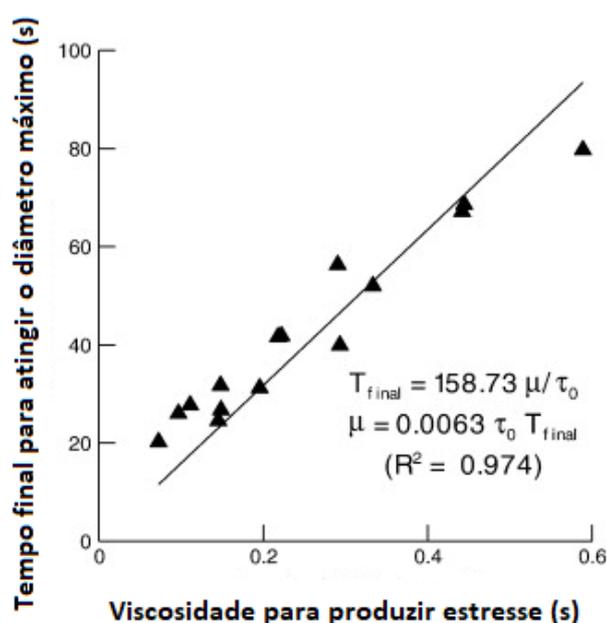
Ainda, segundo Castro, Liborio e Pandolfeg (2011), no vasto campo experimental sobre as propriedades reológicas do concreto em seu estado fresco, concluiu-se que esse material possui um comportamento plástico ou binghamiano. Por definição, um fluido binghamiano deve ser regido por uma reação linear entre a tensão e a deformação a partir de um determinado valor de cedência, ou seja, materiais que não fluem caso a tensão de cisalhamento seja inferior a tensão de escoamento, mas que acima dessa apresenta-se por comportamento linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, determinado por uma viscosidade plástica (μ) (PAIVA et al., 2005).

Ensaio de fluidez e espalhamento têm avaliado os materiais cimentícios em comparação às propriedades do estado fresco dos mesmos, como exemplo, a trabalhabilidade. De mesma maneira, tais parâmetros estão sendo utilizados para explicar o comportamento reológicos de compósitos cimentícios por meio de um parâmetro ou constante determinadas pelos ensaios (MENDES, 2016). Mas segundo Tattersall e Banfill (1983), ensaios em que apenas um dos parâmetros são determinados não são capazes de aferir a trabalhabilidade de um compósito cimentício, uma vez que se pode classificar dois concretos como iguais, sendo que os mesmos apresentem comportamentos distintos. Por isso, Wallevik (2006) recomenda ensaios que determinem dois parâmetros que podem ser expressados em forma de grandezas quantitativas, como a viscosidade plástica e a tensão de escoamento.

Para se avaliar as propriedades reológicas de uma mistura, equipamentos específicos e onerosos são necessários, o que, segundo Ferrara et al. (2012), inviabiliza sua avaliação em empresas. Mas estudos como de Ferrara et al. (2012) e Choi et al. (2016) relatam que é possível relacionar parâmetros reológicos, como viscosidade plástica, obtida em reômetros de alta precisão, com ensaios de trabalhabilidade, como o abatimento do mini-slump.

No estudo de Ferrara et al. (2012), é apresentada uma relação entre o ensaio de mini-slump com a viscosidade plástica, obtida por um reômetro. Conforme a Figura 9, percebe-se que ao se aumentar a viscosidade plástica o tempo necessário para se ter o espalhamento máximo também aumenta.

Figura 9 – Relação entre viscosidade plástica e tempo final de abertura de mini-slump



Fonte: Adaptado de Ferrara et al (2012).

Segundo Christ (2019), as propriedades do estado fresco do compósito cimentício que são importantes são: trabalhabilidade, consistência, capacidade de bombeamento e escoamento. Além dessas, outra propriedade importante no estudo da reologia do UHPC é a tixotropia. Roussel (2011) define esse fenômeno como a variação da viscosidade da mistura ao longo do tempo devido a aplicação de algum movimento externo, como por exemplo, uma tensão de cisalhamento, uma vibração ou qualquer outra intervenção no material.

Christ (2019) afirma que compósitos cimentícios que apresentam elevada fluidez são tixotrópicos, pois seus estados de fluidez são governados pelo modelo de Bingham e a suspensão das partículas com o tempo.

2.1.4 Materiais Constituintes

Geralmente, os traços de UHPC são definidos pela mistura de cimento, materiais cimentícios suplementares (MCS), fílers, agregado miúdo, superplastificante e fibras. Sendo o cimento o principal aglutinante da mistura, enquanto os MCS melhoram o empacotamento da mistura, o que resulta em uma estrutura mais densa e com aumento da resistência mecânica, devido às reações pozolânicas. Os fílers também são usados para melhorar o empacotamento (MENDONÇA, 2019). Hasnat e Ghafoori (2021) relatam que a escolha dos materiais na produção de UHPC ainda é uma área limitada de estudos, principalmente quanto à otimização dos constituintes das misturas desse compósito cimentício. Dessa maneira, entender os materiais a serem selecionados e posteriormente empregados nos projetos de UHPC é importante. A seguir se traz os principais pontos dos materiais mais empregados em traços de UHPC.

2.1.4.1 Cimento

O cimento utilizado no UHPC deve possuir algumas características físicas e químicas para que o compósito atinja suas propriedades físico-mecânicas desejadas. Aïtcin et al. (1998) recomendam que o cimento a ser utilizado no UHPC não seja rico em silicato tricálcico (C3S) e aluminato tricálcico (C3A). Cimentos com baixo teor de retração são recomendados, segundo Soliman (2016), uma vez que devido ao alto teor de cimento presente do UHPC tende a torná-lo mais suscetível a alta retração.

Segundo Sakai et al. (2008), o C3A sofre processo de hidratação rápido, devido a sua grande área superficial, o que acarreta uma alta demanda de água, afetando a viscosidade do compósito no estado fresco. Por isso, Shi et al. (2015) afirmam que um baixo teor de C3A pode reduzir a demanda de água, a formação de etringita e o calor de hidratação. Assim, cimentos com teores abaixo de 8% de C3A são desejáveis nas misturas de UHPC (MENDONÇA, 2019). Wille, Naaman e Parra-Montesinos (2011) concluíram que um cimento com baixo teor de C3A e alto teores

de C3S e C2S, mas com finura moderada, fornecem bom desempenho para o UHPC.

Segundo Soliman (2016) e Meng, Valipour e Khayat (2017), nem todo cimento da matriz é hidratado, devido ao baixo teor de água da mistura de UHPC, fazendo com que o cimento não hidratado aja como fíler na mistura. Vernet (2004) afirma que enquanto o cimento hidratado age como agente aglomerante, o cimento anidro atua como um reforço na matriz para obter módulo de elasticidade maior ao comparado com CC. Yin et al. (2022), por outro lado, explicam que, devido à estrutura densa e à relação ultra baixa de água/aglutinante (a/ag), existe uma falta de espaço e de água para hidratação adicional do cimento da matriz, o que gera uma cobertura das partículas de cimento não hidratadas por cascas de produtos de hidratação, alternando a estrutura de empacotamento denso das partículas, uma vez que altera a curva inicial do empacotamento e o que poderá gerar uma perda de resistência.

Em pesquisas mais atuais, como a de Tahwia, Elgendy e Amin (2022), são empregados cimentos não usuais para confecção do UHPC, como o cimento CP III, composto por mais de 50% de escória granular de alto forno. Os autores relatam que a utilização de um blend entre o CP III e o CP I, juntamente com cinza volante, se mostrou eficiente tanto na questão mecânica quanto na durabilidade das misturas.

No Brasil, pesquisa com UHPC tem empregados CP-V-ARI como o tipo mais adequado para misturas, devido a menor teor de adição de materiais pozolânicos e carbonáticos. Destacam-se as pesquisas de Christ (2019) e de Maia (2021) que utilizaram o CP-V na proposição de métodos de dosagem. Sokolovicz (2020) utilizou o cimento Portland branco para avaliar as propriedades mecânicas de adições minerais em misturas de UHPC.

2.1.4.2 Sílica Ativa

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a sílica ativa é definida como sílica não cristalina com partículas muito finas, sendo um subproduto da indução de fornos a arco da indústria de silício metálico e ligas ferro-silício. A sílica ativa é um material comum na mistura do UHPC, devido sua forma arredondada e partículas muito finas, o que melhora a trabalhabilidade do compósito. Segundo Mendonça (2019), a reação pozolânica entre a sílica ativa e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da hidratação do cimento formam

o C-S-H, sendo o principal produto hidratado responsável pela resistência do concreto. Para Scrivener, Crumbie e Laugesen (2004), a zona de transição da interface do compósito pode ser melhorada com a incorporação da sílica ativa, atuando como redutor da porosidade nas idades iniciais.

Segundo Soliman (2016), a sílica ativa diminui a trabalhabilidade do UHPC, devido a alta finura, mas por outro lado, devido ao formato esférico da partícula, essa perda é parcialmente compensada. O formato da sílica ativa pode melhorar a trabalhabilidade, uma vez que as partículas esféricas deslocam as moléculas de água dos grãos de cimento, essas moléculas ficam aprisionadas entre as partículas de cimento, sendo liberadas na mistura (AÏTCIN, 1998). Segundo Park, Noh e Park (2005), devido à alta reatividade das partículas de sílica ativa, existe a possibilidade de aumento da adsorção do aditivo superplastificante, reduzindo a quantidade disponível do aditivo na mistura, o que pode ocasionar na perda de trabalhabilidade.

Matte e Moranville (1999) relatam que a quantidade ideal de sílica ativa no UHPC é cerca de 25% do material ligante. O teor de 18% de sílica ativa é a quantidade teórica para realizar as reações com os produtos hidratados de cimento, sendo esse volume podendo ser aumentado para 25% para a obtenção de misturas mais densas (SOLIMAN, 2016). Segundo Chan e Chu (2004), os percentuais de 20 a 30% de sílica ativa melhoram a aderência entre as fibras e a matriz cimentícia do UHPC.

2.1.4.3 Fibras

A adição de fibras ao UHPC melhoram as propriedades no estado endurecido do compósito, principalmente quando utilizadas na confecção de peças estruturais, pois pode aumentar sua resistência à tração e sua ductibilidade, além de reduzir a propagação de fissuras (GRAYBEAL, 2014). Segundo Mendonça (2019), os materiais, dimensões e as formas das fibras são variadas, dependendo da disponibilidade dos materiais de origem das mesmas.

Mendonça (2019) afirma que as fibras mais utilizadas na confecção de UHPC são as de aço, podendo ser retas, com ganchos nas pontas ou torcidas, com seus diâmetros variando entre 0,15mm e 0,38mm e comprimento de 6 a 30mm. Autores como Sbia et al. (2014) e Meng e Khayat (2018) utilizaram fibras de PVA e polietileno em UHPC. Segundo Sbia et al. (2014), a combinação entre fibras para

confeccionar UHPC é benéfica com o intuito de alcançar as propriedades desejadas. Meng (2017) buscou misturar macro fibras e microfibras em matriz de UHPC, afim de aumentar a resistência pós fissuração (resistência à tração) e a capacidade de deformação (ductibilidade) com adição em pequena quantidade dessas fibras para manter a trabalhabilidade da mistura.

Para Alsalman (2018), ao se adicionar fibras ao UHPC, a maior preocupação está relacionada ao comprimento da fibra, uma vez que esse comprimento pode influenciar na não propagação das fissuras, como também na trabalhabilidade do UHPC, por isso, em geral, ao se adicionar fibras mais curtas, a mistura de UHPC se torna mais trabalhável.

Segundo Kazemi e Lubell (2012), porcentagens (em volume) variando entre 0 e 5% de fibras de aço, em relação ao volume de concreto, são utilizadas no UHPC. Mas, segundo os autores, o percentual de 3% é um valor recomendado para UHPC.

Hegger, Zell e Horstmann (2008) relataram que a adição das fibras metálicas tem um efeito mínimo quanto à resistência a compressão do UHPC, mas que as mesmas aumentam significativamente a rigidez do concreto, representado nesse caso pelo módulo de elasticidade. Tal fato é demonstrado quando se compara os gráficos de tensão e deformação entre o UHPC e o CC. Enquanto o UHPC mantém um comportamento elástico linear de até 90% da sua resistência máxima, o CC apresenta perda de rigidez quanto a carga é superior aos 45% da resistência máxima (ALSALMAN, 2018).

2.1.4.4 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante (SP) utilizado no UHPC é um redutor de água de alto alcance, segundo a NBR 11768-1(2019) os aditivos redutores de água tipo 2 (RA2), com composição química baseado em poderosos polímeros orgânicos utilizado para dispersão das partículas de cimento e melhoramento da fluidez das misturas (AÏTCIN et al., 1998).

Soliman (2016) afirma que, ao se misturar as partículas secas com pequenas quantidades de água, as cargas elétricas atuantes nas partículas sólidas tendem a aglutiná-las, impedindo uma boa distribuição da água entre as mesmas, o que acarreta na má formação de produtos hidratados entre as partículas. A adição do SP com a água é importante para permitir a penetração da pasta fluida entre as

partículas sólidas e dar permeabilidade adequada a água nessa mistura densa. Com pequenas quantidades de SP é possível manter um alto nível de fluidez mesmo com baixos teores de água.

O efeito do superplastificante em relação ao cimento utilizado tem muita influência na fluidez da mistura, uma vez que o cimento com quantidade reduzidas de C3A e baixa área específica tem adsorção menor de SP. Portanto, maiores quantidades de SP devem estar disponíveis na fase aquosa para desenvolver maior dispersão das partículas de cimento, bem como o retardamento do C3S e C2S (COLLEPARDI et al., 1999).

Segundo Soliman (2016), superplastificantes a base de polinaftaleno, polimelanina, lignossulfonatos, policarboxilato, poliacrilatos, polifosfonato e diferentes copolímeros são os tipos mais comuns usados para confecção de UHPC. Schroefl, Gruber e Plank (2008) afirmam que, SP a base de étercaboxilato é o mais eficaz para produção do UHPC, sendo relatado também uma boa qualidade no compósito utilizando SP a base de fosfonato. Wille, Naaman e Parra-Montesinos (2011) relatam que os SP podem ter diferentes cadeias de correntes poliméricas, o que pode causar um retardo no tempo de cura do UHPC. Por esse motivo, Graybeal (2014) explica que a utilização de aceleradores de pega é introduzida nas misturas de UHPC, a fim de garantir a resistência necessária em idades iniciais. O acelerador de pega dispersa as partículas de cimento na água, acelerando a reação de hidratação e diminuindo o tempo de pega do compósito (ALSALMAN, 2018).

Para Alsalman (2018), o uso de SP é fundamental para que o UHPC atinja a trabalhabilidade desejada, mas as dosagens e os efeitos provocados por ele podem variar. Gerlicher, Urbonas e Heinz (2008) afirmam que o uso de 35 kg/m³ de SP é adequado para produzir um UHPC com uma espalhamento de 360 mm, valor um pouco superior ao apresentado na mistura de Ductal®, que é de 30,7 kg/m³.

2.1.4.5 Agregado miúdo

Para traços padrões de UHPC o agregado graúdo não é utilizado, pois, segundo Larrard e Sedran (1994), é desejável apenas a areia fina como agregado, devido à influência da espessura máxima da pasta (MTP), que representa a distância média entre dois grãos de agregados quando envoltos por pasta de

cimento, com espessura proporcional ao diâmetro dos grãos. Segundo os autores, verificou-se que o aumento do MTP causa a diminuição da resistência.

Normalmente, em misturas de UHPC, é utilizada areia de quartzo, uma vez que, em condições de cura a vapor, é quimicamente ativa e melhora as propriedades do compósito (MENG, 2017). Segundo Ma e Schneider (2002), os materiais cimentícios do UHPC podem ser substituídos em até 30% pela areia de quartzo sem que haja perda de resistência do compósito, além de melhorar a fluidez da mistura. Mas sob cura ambiente, a areia de quartzo passa a não ser vantajosa, uma vez que, a essa temperatura, a química da areia não é ativada, e seu custo começa a inviabilizar economicamente o UHPC.

Na busca por um material mais econômico para misturas de UHPC, a areia usada no concreto convencional tem sido utilizada (YANG et al., 2019). Segundo Meng (2017), a areia de origem silicosa é exemplo de agregado miúdo forte e quimicamente estável. Ainda segundo a autora, o agregado quimicamente estável apresenta chance reduzida de apresentação de reação deletéria aos UHPC como a reação álcali sílica.

Quanto à granulometria apresentada para misturas de UHPC, normalmente, o agregado miúdo não apresenta partículas superiores a 2 mm. Autores diversos já testaram outros tamanhos máximo para o agregado do UHPC. A Tabela 1 apresenta os diâmetros máximos de agregado utilizados por alguns autores.

Tabela 1 – Tamanho máximo de agregado em UHPC

Tamanho máximo do Agregado	Wille et al, 2011	Naaman et al, 2012	Ambily et al, 2014	Yu et al, 2014	Alkasy et al, 2015	Meng et al, 2016	Wu et al, 2016	Meng et al, 2017
0.106 mm					X			
0.150 mm		X	X					
0.500 mm					X			
0.800 mm		X						
1.00 mm				X				
2.00 mm	X					X		X
2.36 mm			X	X			X	
4.75 mm						X		X

Fonte: Adaptado de Mendonça (2019)

Para Meng (2017), é importante descobrir o teor ideal de agregado miúdo do concreto para cada tipo de aplicação. Segundo Wille e Boisvert-Cotulio (2015) e Li e Rangaraju (2016), a relação entre areia/material cimentício variando entre 1 a 1,4 é

considerado ideal para misturas de UHPC. Hasnat e Ghafoori (2021) avaliaram a relação areia/MCS entre 0,80 e 1,20 e observaram que, para idades superiores a 28 dias, as propriedades mecânicas, principalmente a resistência à compressão, não sofreram diferenças significativas. Assim, demonstra-se que as faixas de proporção entre 0,8 a 1,4 são adequadas para misturas de UHPC.

2.1.4.6 Materiais cimentícios suplementares em UHPC

As primeiras misturas de UHPC, propostas por Richard e Cheyrezy (1995), apresentavam grandes quantidades de cimento, entre 800 a 1000 kg/m³, o que hoje se apresenta inviável, tanto na questão financeira como ambiental. A questão ambiental na produção de UHPC é cada vez mais considerada, na busca por misturas mais sustentáveis, com um consumo menor de cimento.

Autores têm chamado atenção para um alto consumo de cimento em misturas de UHPC, o que, em princípio, elevaria o custo geral desse compósito, mas também trazer problemas de durabilidade como o alto calor de hidratação e retrações autógenas (YALÇINKAYA; ÇOPUROĞLU, 2021; ALSALMAN, 2018). Essas questões abrem caminho para utilização dos MCS em substituição parcial do cimento nas misturas de UHPC.

A utilização de materiais inertes (filers), como o pó de calcário, tem se tornado cada vez mais recorrentes no desenvolvimento de misturas de UHPC, com na pesquisa de Ding et al. (2021), que propuseram misturas de UHPC com redução maiores de 50% de clínquer, e obtiveram propriedades de mecânicas e de durabilidade semelhantes à mistura referência.

Ibrahim et al. (2017) verificaram que a substituição de até 20% de cimento Portland por cinza volante foi responsável pela melhoria da resistência à compressão em idades mais avançadas (superiores a 28 dias). Chen, Gao e Ren (2018) relatam que obtiveram UHPC com melhorias nas propriedades mecânicas e na microestrutura, resistências à compressão com mínimo de 150 MPa, substituindo até 30% do cimento por cinza volante.

A pesquisa Soliman (2016), acerca da utilização de resíduo de vidro moído em substituição de até 30% de cimento, demonstrou que a utilização de menores quantidades de cimento por materiais cimentícios suplementares de origem industrial é uma vertente ampla a ser empregada nas misturas de UHPC.

Ha et al. (2022) investigaram a substituição de até 30% do cimento Portland por um mix de cinza de casca de arroz e escoria granular de alto forno, e observaram que a mistura com 15% de cada uma desses MCS's obteve propriedades mecânicas próximas da mistura referência. Os autores destacam que além das propriedades mecânicas, as misturas de UHPC com MCS possuem um aspecto ambiental relevante, devido a uma menor incorporação de CO₂ em relação a mistura referência.

Esses entre outros trabalhos destacam o atual panorama para confecção de misturas de UHPC com o menor consumo de cimento, o que demonstra também a importância de um projeto de mistura que busque uma densificação do esqueleto granular das partículas. Esses projetos de mistura têm se baseado no modelo de Andreasen e Andersen modificado em busca de uma otimização entre os materiais, com o menor consumo de cimento.

2.1.5 Propriedades Mecânicas do UHPC

2.1.5.1 Resistência à compressão

Uma das propriedades mecânicas mais importantes do UHPC é a resistência à compressão, tal propriedade excede em muito quando comparado com o CC, o que faz que o UHPC entre em mercados que normalmente são dominados pela indústria do aço (MENG, 2017). Richard e Cheyrezy (1995) apresentam que o UHPC pode atingir resistências variando entre 200 a 800 MPa. Esse aumento de resistência, em comparação ao CC e ao CAD, se deve à seleção dos materiais a serem empregados, estudo quanto ao empacotamento das partículas e o processo de cura térmica empregada ao UHPC (SOLIMAN, 2016).

Ainda segundo Soliman (2016), o baixo teor água/aglomerante (a/ag) é outra característica que confere ao UHPC um valor elevado para a resistência à compressão. Para Christ (2019), além do fator a/ag , a quantidade de cimento nas misturas de UHPC bem como a quantidade e tipo de fibra são aspectos importantes para a resistência à compressão.

Shin (2016) relata que o valor típico da resistência à compressão do UHPC está entre 150 e 220 MPa, com um comportamento elástico linear variando entre 70

e 80% da resistência à compressão, com valores de módulo de elasticidade variando entre 45 e 55 GPa.

A cura térmica realizada no UHPC aumenta significativamente sua resistência à compressão. Segundo Soliman (2016), ao realizar cura térmica até 150°C, é possível acelerar a reação de hidratação do cimento. Já o aumento da temperatura entre 200 e 300°C acarreta alteração das propriedades do pó de quartzo, ativando as reações pozolânicas, o que confere ao UHPC um aumento de resistência à compressão. A Tabela 2 apresenta alguns trabalhos que apresentaram tratamento térmicos para UHPC.

Tabela 2 – Resistência à compressão com cura térmica

Resistência à compressão com diversos tipos de cura			
Autores	Resistência à compressão (MPa)		
	20 °C	90 °C	150 °C
Richard e Cheyrezy (1994)	170	230	630
Colleparadi et al. (1997)	155	160	195
Ma e Scheneider (2002)	150	200	-
Schmidt et al. (2003)	150	162	-
Heinz et al (2004)	178	222	273
Soutsos et al. (2005)	135	185	-
Graybeal (2005)	160	205	230
Lee e Chisholm (2005)	153	200	-
Tam e Tam (2012)	-	144	200

Fonte: Adaptado de Soliman (2016, p44)

Conforme relatado por Christ (2019), boa parte dos traços de UHPC não atingem o valor de 150 MPa em temperaturas ambientes (20°C), isso porque a cura térmica potencializa a resistência do UHPC, mas que tal técnica torna muitas vezes dispendiosa e inviável a aplicação em grande escala nos compósitos cimentícios.

A densificação granular da mistura é outro fator relevante na obtenção de altas resistências à compressão. Para Yunsheng et al. (2008), o empacotamento das partículas deve visar o menor índice de vazios, para garantir o aumento da densidade do compósito, em consequência o aumento da resistência e durabilidade. Segundo Shi et al. (2015a), uma matriz densa e compacta é garantida pelo adequado empacotamento das partículas.

A resistência à compressão do UHPC também é afetada pela seleção dos materiais constituintes. Assim como nos concretos mais usuais, a seleção de agregados de elevada resistência é desejada para as misturas, e no UHPC não é diferente. Deve-se selecionar agregados com boas propriedades mecânicas, como

os de origem quartzosa, visando a equivalência de resistência da matriz (CHRIST, 2019).

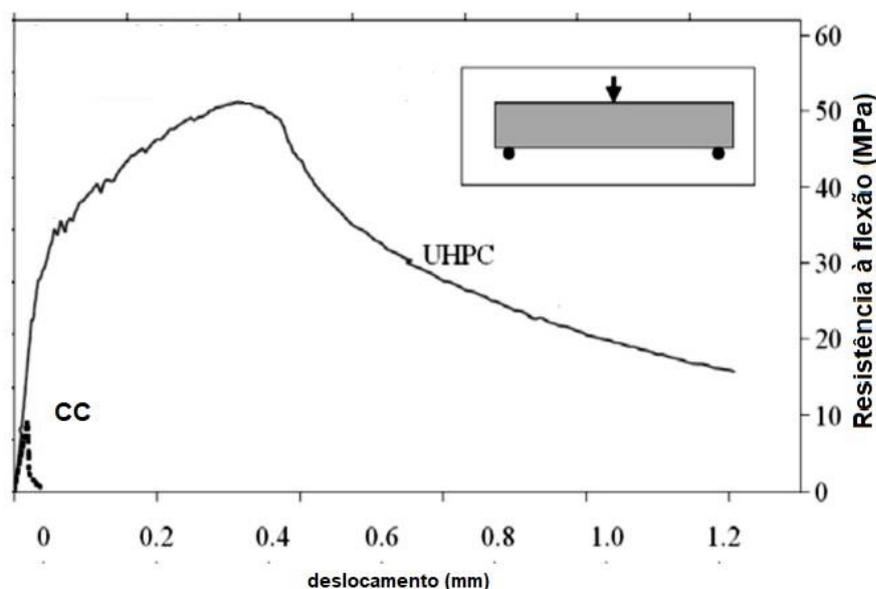
2.1.5.2 Resistência à flexão e tração direta

Segundo Meng (2017), o UHPC além de possuir resistência à compressão elevada apresenta outras propriedades que supera outros concretos, como o CAR, que é a resistência à tração. Essa qualidade permite que o material resista cargas pré e pós fissuração sem que haja uma falha frágil.

O UHPC desenvolve resistência à tração direta que varia entre 5 e 15 MPa, e quanto à tração na flexão, esses valores estão entre 25 e 40 MPa. Essas resistências à tração são obtidas graças a interação a nível microscópico das fibras de aço com a matriz cimentícia, bem como sua capacidade de sustentar as cargas aplicadas mesmo após ao início da fissuração (SPASOJEVIC, 2008). Essa combinação entre as resistências à tração e flexão confere ao UHPC uma natureza dúctil, o que faz o mesmo suportar cargas significativas pós fissuração (MENG, 2017).

Graybeal e Hartmann (2003) atribuem o aumento da resistência à flexão do UHPC ao aprimoramento do empacotamento das partículas e à adição de fibras que mantem a matriz cimentícia unida mesmo após a fissuração do compósito. Soliman (2016) explica que o UHPC apresenta característica dúctil porque uma vez que o compósito começa a fissurar, as fibras de pequena escala começam a reforçar a matriz, o que provoca fissuras menos danosas. Ainda segundo a autora, o comportamento típico do UHPC sob flexão se caracteriza sendo elástico linear até a resistência de fissura do material, uma fase de ganho de resistência até a carga máxima e uma fase de decaimento da resistência gradual após a carga máxima. A Figura 10 apresenta um comportamento típico do UHPC submetido a flexão.

Figura 10 – Comportamento quanto à flexão UHPC Ductal®



Fonte: adaptado Acker e Behloul (2004, p. 13)

Voort, Suleiman e Sritharan (2008) afirmam que, ao incorporar fibras de aço no UHPC, esse apresenta significativo ganho de resistência à tração, mesmo com surgimento das primeiras fissuras, conferindo ao material maior ductibilidade e aumento da tenacidade em comparação ao concreto com ou sem adição de fibras.

Segundo Christ (2019), a incorporação de fibras no UHPC é fundamental quando se busca elevadas propriedades de ductilidade e resistência à tração. Fehling, Leutbecher e Bunge (2004, p. 329) descrevem os principais aspectos a serem considerados para que as fibras apresentem os benefícios esperados:

- Teor de fibras a ser incorporado;
- Geometria das fibras, comprimento e diâmetro;
- Relação entre o comprimento das fibras e o tamanho máximo do agregado;
- Aglomeração das fibras, quando utilizadas fibras compostas por diversos filamentos, se são facilmente desprendidos ou se há um acúmulo dos filamentos em um ponto;
- Orientação das fibras na mistura.

Christ (2019) informa que além desses aspectos, as propriedades mecânicas apresentadas pelas fibras exercem influência para sua incorporação na mistura. Quinino (2015) explica que fibras com módulo de elasticidade menor do que o da

matriz terão sua ruptura antes das primeiras fissuras surgirem, e não contribuirão para o aumento da resistência à tração do UHPC.

A resistência à flexão pode ser melhorada também com uma otimização de materiais cimentícios suplementares nas misturas de UHPC. Meng e Khayat (2016) relataram um aumento na resistência à flexão de 46% ao adicionar 0,3% (relação em massa de ligante) de nanotubos de carbono na mistura de UHPC em comparação a uma mistura referência.

Reddy e Ramadoss (2020) avaliaram a substituição total da sílica ativa por uma escória com alto teor vítreo (alccofine) na propriedade de resistência à flexão, e obtiveram valores superiores às misturas referências. Para os autores essa melhora na flexão se deve a maior formação de produtos hidratados secundários que garantiram uma maior aderência entre a matriz e as fibras.

2.1.5.3 Tenacidade

A tenacidade, segundo Zhang et al. (2018), é uma propriedade que está relacionada à relação entre a resistência à flexão e à compressão. Com a adição das fibras nas misturas de UHPC, é esperado que exista uma alta taxa de tenacidade nesses compósitos. Ainda segundo os autores, os materiais constituintes estão relacionados a essa propriedade, sendo que a resistência e forma das partículas são preponderantes para o aumento ou não da tenacidade.

O UHPC sem introdução de fibras é um material com características frágeis, o que significa que o mesmo não tem capacidade de suportar grandes deformações. Com a incorporação das fibras, o UHPC tende a apresentar um comportamento dúctil. Segundo Christ (2019), as fibras incorporadas no UHPC aumentam a capacidade do compósito cimentício em suportar cargas e se deformar, caracterizando o aumento da tenacidade. Hasnat e Ghafoori (2021) afirmam que um constituinte essencial para o UHPC é o reforço descontínuo da fibra, que melhora a ductilidade necessária para a segurança estrutural.

Segundo Fehling et al. (2014), as fibras do UHPC proporcionam uma maior conservação das tensões, onde após a formação das primeiras fissuras, as fibras são acionadas de forma a transferir entre si as tensões, mas sua capacidade de resistir a esses esforços depende da resistência do material das fibras bem como a resistência de ancoragem das fibras com a Matriz.

Banyhussan et al. (2016) afirmam que a incorporação de mais de um tipo de fibra, volumétrica ou da natureza da fibra, mostra-se eficiente quanto a prevenção da formação e na propagação das fissuras na região tracionada do compósito. A hibridização pode ser importante na detenção da propagação de fissuras e gerar assim um alto desempenho em compósitos cimentícios.

2.1.5.4 Durabilidade

Mehta e Monteiro (2014) definem a durabilidade do concreto de cimento Portland como a capacidade de resistir a intempéries, ataques químicos, abrasão, e outras condições de serviço. Para que um concreto seja considerado durável, o mesmo deve preservar a forma, qualidade e capacidade de resistir aos esforços, bem como respeitar as condições ambientais ao qual foi projetado.

Dal Molin et al. (2016) explicam que as estruturas de concreto armado, quando projetadas com todos os parâmetros adequados e executada com o mesmo rigor, possuem excelente durabilidade. A especificação deficitária na fase de projeto e/ou de execução das estruturas de concreto armado tende a diminuir consideravelmente a vida útil das mesmas. Soliman (2016) avalia que a resistência do concreto a agentes agressivos está relacionada a natureza e agressividade do ambiente. Segundo a autora os mecanismos de deterioração que ocorrem no concreto estão relacionados aos ataques de carbonatação e cloretos, causadas por impermeabilidade insuficiente e alta porosidade do concreto.

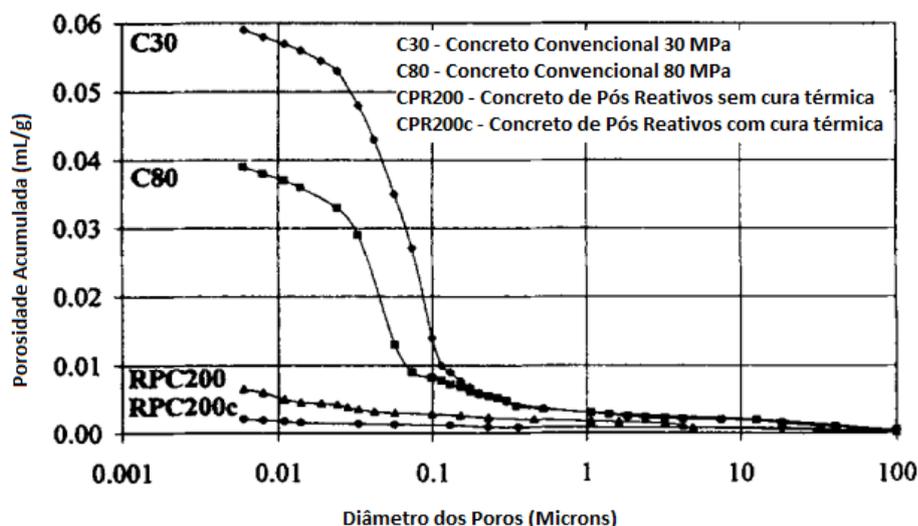
Segundo Day, Aldred e Hudson (2013), a diminuição da porosidade traz para o concreto uma maior durabilidade. A água presente no concreto fresco, que representa 15 a 20% do volume, proporciona alteração significativa na porosidade do compósito. Quanto à relação a/c, quando excede o fator a 0,38 em massa, há possibilidade de nem toda água ser consumida na hidratação do cimento, o que gera nesse, alteração expressiva na permeabilidade da mistura.

A redução do fator água/cimento e a adição de partículas ultrafinas são ações que contribuem para melhorar a vida útil do concreto. A microestrutura muito densa do UHPC não gera apenas aumento da resistência à compressão, mas também eleva as propriedades de durabilidade do compósito (SOLIMAN, 2016). Segundo Voort, Suleiman e Sritharan (2008), a durabilidade elevada do UHPC gera custos

menores para manutenção bem como uma redução do cobrimento da armadura em comparação ao concreto convencional.

Para Perry (2001), as características superiores de durabilidade do UHPC se devem a estrutura de poros pequenos e descontínuos devido ao uso de materiais muito finos. Soliman (2016) afirma que não só os tamanhos dos poros influenciam a durabilidade do compósito cimentícios, mas também o volume total deles na matriz. Roux, Andrade e Sanjuan (1996) relatam que em todos os tipos de concreto o sistema de poros e sua distribuição interna são parâmetros que influenciam sua permeabilidade. A Figura 11 apresenta a variação da quantidade de poros e respectivos diâmetros para cada tipo de concreto.

Figura 11 – Quantidade de tamanho de poros de diferentes concretos



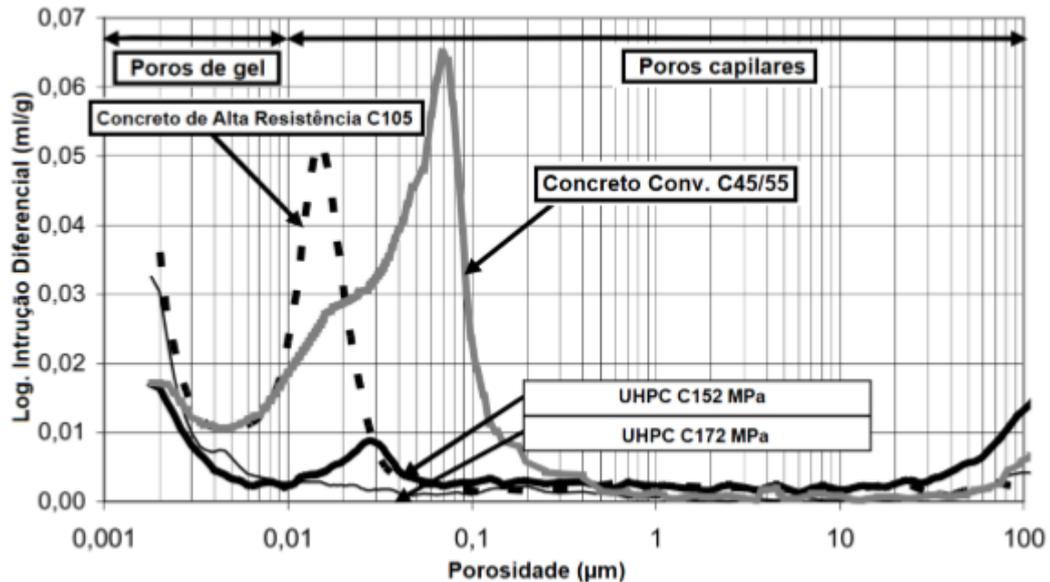
Fonte: Adaptado de Roux, Andrade e Sanjuan (1996, p.02).

A aplicação da cura térmica no UHPC melhora suas propriedades de durabilidade. Com a cura térmica há um aumento nas propriedades mecânicas e nas reações de hidratação nos silicatos e aluminatos das misturas, assim como a formação de silicatos hidratados oriundos da reação secundária do hidróxido de cálcio e dos materiais pozolânicos ricos em silício (CHRIST, 2019).

A baixa porosidade do UHPC, principalmente a capilar, traz grandes vantagens para a durabilidade do UHPC, principalmente no que tange a ambientes agressivos, como meios marinhos, ambientes que sofrem com ações de gelo/degelo e até para estruturas que tenham dificuldade com manutenção, grande problema hoje de obras públicas de grande porte (pontes, viadutos, etc). A Figura 12

apresenta a comparação entre concreto convencional, CAR e UHPC, quanto à distribuição do tamanho e do volume de poros.

Figura 12 – Distribuição do tamanho e volume de poros em CC, CAR e UHPC



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

Segundo Christ (2019), os poros em gel são tão pequenos na mistura dos compósitos cimentícios que agentes agressivos não conseguem migrar por eles, o mesmo não ocorre com os poros capilares.

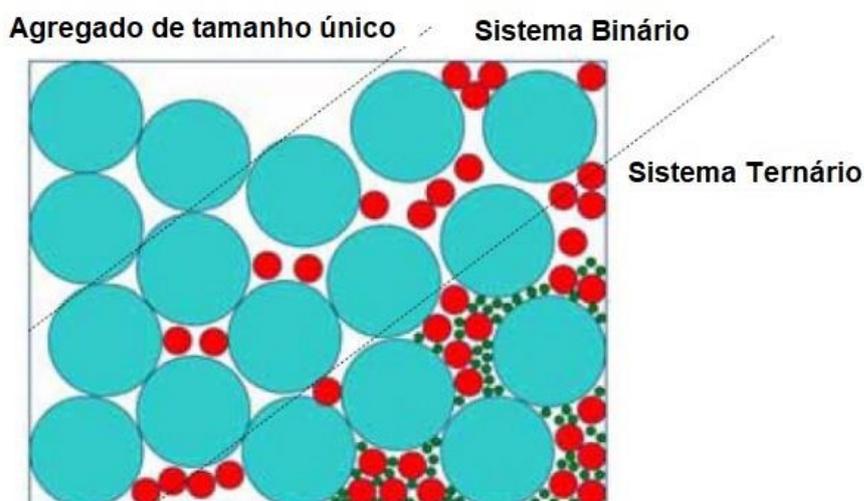
2.1.6 Métodos de Dosagem UHPC

De maneira geral, a dosagem de um concreto envolve a mistura entre ligantes quimicamente reativos, agregados inertes e água, a fim de se obter uma resistência especificada em projeto. Segundo Collepardi et al. (1997), essa dosagem tem por finalidade encontrar proporção ideal entre seus componentes para que possam garantir alguns princípios e propriedades tais como: viabilidade econômica, resistência mecânica, durabilidade, trabalhabilidade, homogeneidade, retração por secagem, fluência, entre outros aspectos inerentes ao concreto. No desenvolvimento de um traço de concreto, todas as propriedades citadas anteriormente são influentes quanto ao custo do concreto, e o aumento desse custo deve ser levado em consideração no momento da dosagem (CHRIST, 2019).

Atualmente, as misturas de concreto não visam apenas a resistência mecânica à compressão, mas também alto desempenho em termos de estabilidade dimensional, trabalhabilidade e durabilidade. Os requisitos exigidos para o alto desempenho não são fáceis de serem obtidos com a mistura de componentes comumente utilizado em dosagens convencionais, sendo necessário o emprego de aditivos químicos e adições minerais (SOLIMAN, 2016). Os métodos de dosagem usados para concretos convencionais são baseados na gradação dos materiais, ou seja, o tamanho das partículas, mas tal característica não é capaz de gerenciar os aspectos exigidos para um desempenho superior. Assim, os estudos para misturas de alto desempenho partem de modelos de densidade de empacotamento e de distribuição do tamanho das partículas nas misturas (SOHAIL et al., 2018).

A densidade de empacotamento de uma mistura de pós pode ser definida como o volume dos sólidos pelo volume total, como também esse volume total menos a porosidade. Em uma mistura de concreto típico são misturadas partículas que variam entre 37 mm a 0,1 μm , e as partículas devem ser dispostas de forma que as partículas menores preencham os vazios deixados pelas maiores, com a finalidade de alcançar uma alta densidade de empacotamento (SOHAIL et al., 2018). A Figura 13 demonstra como o conceito de densidade de empacotamento é aplicado a sistemas granulares, sendo ilustrado sistemas simples, binário e ternário.

Figura 13 – Típico arranjo de empacotamento de misturas simples, binárias e ternárias



Fonte: Adaptado de Stovall, de Larrarde Buil (1986).

Para Mehta e Monteiro (2014), é evidente para misturas de compósito de elevado desempenho, a durabilidade e resistência aprimoradas são apenas possíveis minimizando a porosidade, falta de homogeneidade, microfissuras na pasta de cimento hidratada e na Zona de Transição da Interface (ITZ) entre a matriz cimentícia e os agregados. Para Fennis (2011), a densidade máxima das partículas nas misturas de concreto é alcançada por otimização, métodos analíticos e modelos de elementos discreto.

A seguir, são apresentados os principais métodos utilizados para a confecção de misturas de UHPC.

2.1.6.1 Otimização das curvas de distribuição de tamanho de partículas

Sohail et al. (2018) relatam que os primeiros estudos quanto ao melhoramento do concreto com otimização da granulometria das partículas foram de Feret, em 1987. Na otimização da distribuição dos tamanhos das partículas, as mesmas são otimizadas em comparação a curvas predefinidas. A primeira dessas curvas de classificação foi apresentada por Fuller e Thompson (1907), com a relação expressa na equação 1.

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{m\acute{a}x}}\right)^q \quad \text{Equação 1}$$

Sendo que $P(D)$ é a fração das partículas passantes pela peneira com abertura “D” e o módulo distribuição q variando entre os valores de 0 a 1; a curva proposta por Fuller e Thompson (1907) tem q igual a 0,50.

Andreasen e Andersen (1930) (A&A) realizaram estudo adicional ao modelo de Fuller e Thompson (1907) e apresentaram um modelo de empacotamento semiempírico de distribuições contínuas de tamanho de partículas (*particle size distributions* – PSD), para a mesma equação 1, mas propuseram a variação do valor de q entre 0,33 e 0,50, e puderam observar que a curva idealizada é obtida com o valor de q em 0,37. Sohail et al (2018) lembram que esse valor de q do modelo de A&A foi determinado experimentalmente e depende das características das partículas, mas que para misturas granulares com grande quantidade de finos (partículas menores que 250 μm) o modelo o valor de q não se mostra adequado.

Com partículas menores, os valores de q devem ser menores, uma vez mais partículas finas estarão presentes na mistura para preencher os vazios (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

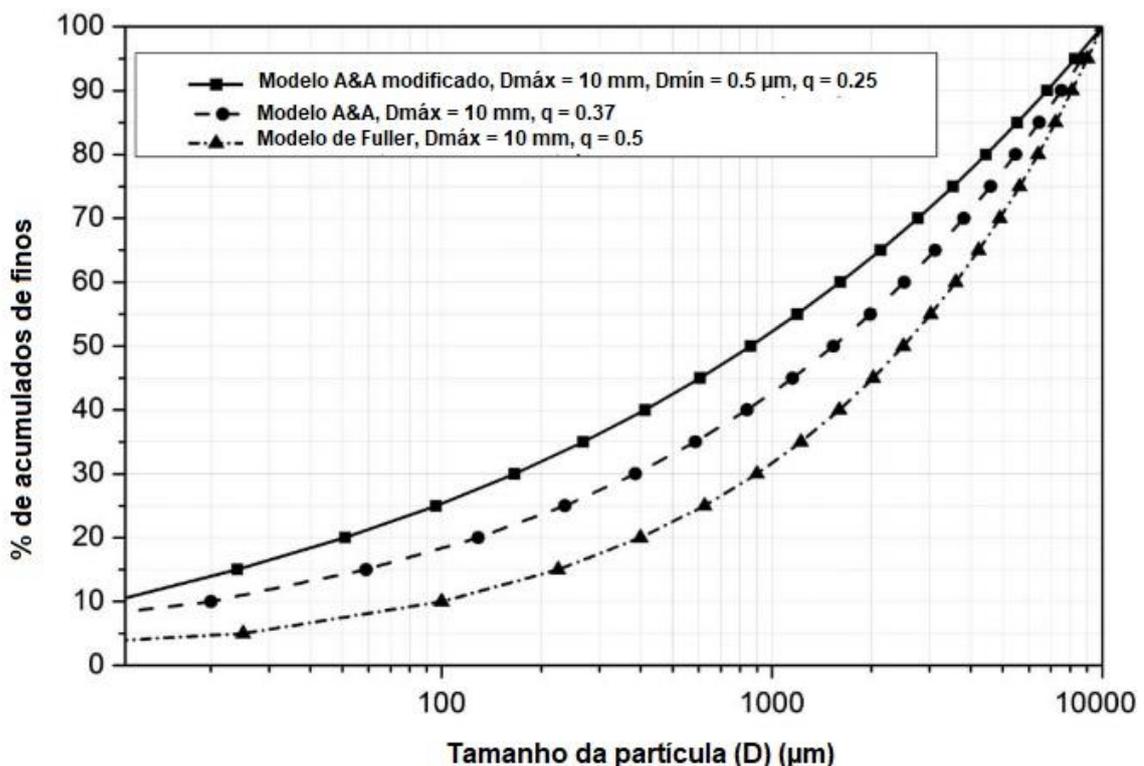
Funk e Dinger (1994) propuseram um método baseado nas curvas de A&A, mas que poderia ser utilizada para qualquer tamanho de partícula e com limite finito de partículas, que foi chamado de A&A modificado. A equação 2 apresenta a versão que incorporou o tamanho mínimo de partícula da mistura.

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad \text{Equação 2}$$

O D_{\min} é o menor tamanho de partícula da mistura, e os outros parâmetros são os mesmos do método de A&A.

A Figura 14 apresenta a comparação das curvas obtidas pelas equações dos métodos de A&A modificado, A&A e Fuller e Thompson.

Figura 14 – Modelos de distribuição de partículas, Funk e Dinger, Andreasen e Andersen, Fuller e Thompson.



Fonte: Sohail et al. (2018).

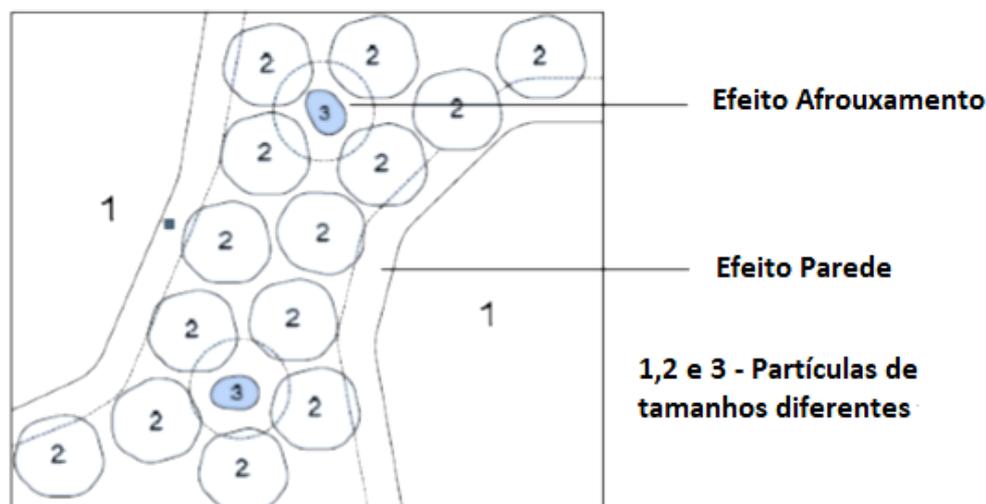
A Figura 14 mostra como o valor de q influencia na otimização das curvas de distribuição das partículas. O modelo de A&A modificado obteve um empacotamento mais denso para uma mistura com alta proporção de partículas finas.

Para Soliman (2016), uma faixa mais ampla de distribuição das partículas, nas curvas de otimização, resulta em uma densidade de empacotamento mais alta. Além disso, o método se mostra de fácil utilização, uma vez que o ajuste da composição da mistura para otimizar a curva é relativamente fácil. O parâmetro de entrada do modelo são apenas os tamanhos das partículas da mistura, o que já é necessário para otimização de uma mistura de concreto. A saída do modelo é a distribuição otimizada da curva, levando a uma mistura com maior densidade de empacotamento. Segundo Walker (2003), o método tem desvantagem pelo fato de não levar em consideração o formato das partículas, e isso influencia a densidade do empacotamento, especialmente quando se tem partículas de várias classes de tamanho.

2.1.6.2 Modelos analíticos de densidade de empacotamento

Os modelos analíticos de densidade de empacotamento são utilizados para determinar os constituintes de compósitos cimentícios, a fim de minimizar a proporção dos vazios. O primeiro modelo analítico apresentado na literatura foi de Furnas (1931), no qual foi prevista a razão entre uma mistura com duas partículas. Sohail et al. (2018) explicam que, no modelo de Furnas, dois aspectos foram avaliados: o primeiro onde as partículas maiores eram dominantes, e seus vazios preenchidos pelas menores; o segundo, as partículas menores tinham maior proporção com as partículas maiores sendo adicionadas na mistura. Nesse modelo proposto, as interações entre as partículas não foram levadas em consideração. A interação entre partículas tem dois efeitos quanto a densidade de empacotamento, os efeitos de parede e afrouxamento. A Figura 15 apresenta tais efeitos.

Figura 15 – Efeito parede e afrouxamento em sistema ternário de mistura granular



Fonte: Soliman (2016) adaptado de Sedran et al. (1999).

O efeito parede se define quando uma partícula grande está isolada em meio a matriz de partículas menores, o que provoca uma perturbação na densidade de empacotamento das partículas finas, enquanto o efeito de afrouxamento acontece quando uma partícula fina está na matriz de partículas grossas, e a partícula fina ainda é muito grande para caber nos interstícios das partículas maiores, o que acarreta deficiência na densidade do empacotamento das partículas maiores (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

Jones, Zheng e Newlands (2002) relatam que os modelos que sucederam o modelo de Furnas, como de Aim e Goff (1968), que implementaram a interação das grandes partículas na densidade de empacotamento de pequenas partículas, não são adequados para concreto, uma vez que se tem um número de constituintes maior nas misturas. Mas esses métodos foram precursores para os modelos multicomponentes mais atuais. A pesquisa de Powers (1968) fez contribuições relevantes para o que se conhece do empacotamento de partículas, sendo que o estudo retrata a interação entre diferentes componentes na mistura de concreto.

Stovall, de Larrard e Buil (1986) apresentaram um modelo linear de densidade de empacotamento (LPDM) para grãos multicomponentes, no qual a densidade de empacotamento para uma mistura é definida em função do volume de sólido fracionado de cada tamanho de grão presente. O LPDM é expresso pela equação 3 e 4.

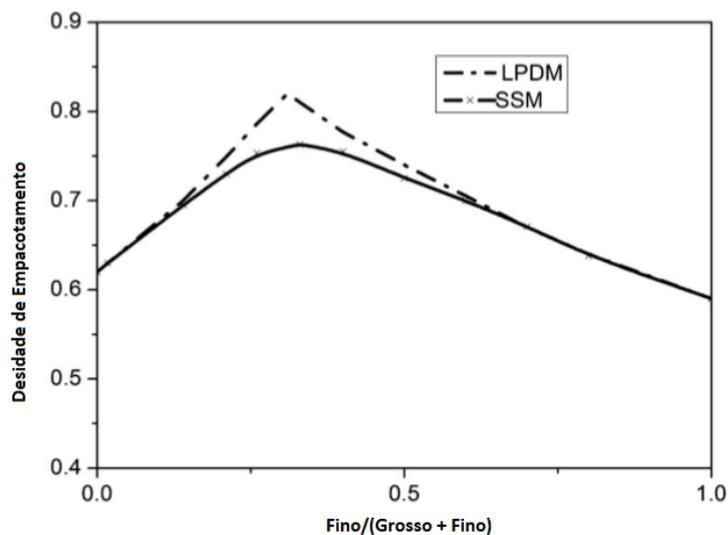
$$c(t) = \frac{\alpha(t)}{1 - \int_d^t y(x) \cdot f(x/t) dx - (1 - \alpha(t)) \int_t^D y(x) \cdot g(t/x) dx} \quad \text{Equação 3}$$

$$c = \min(c(t)) \text{ para } y(t) > 0 \quad \text{Equação 4}$$

Sendo que c é definido com a densidade de empacotamento; t – tamanho dos grãos; e $y(t)$ – distribuição do volume dos grãos da mistura (com integral unitária $\int_d^D y(x) dx = 1$, onde d e D são os tamanhos mínimos e máximos respectivamente). Os termos $f(x/t)$ e $g(t/x)$ representam os efeitos de parede e de afrouxamento respectivamente. As duas funções descrevem a interação entre as classes de tamanho das partículas, e são universais. Já os termos $y(t)$ e $c(t)$ dependem da mistura granular analisada, podendo ser medidas por PSD e medições de densidade, respectivamente (LARRARD, 1999).

O LPDM é um modelo de natureza linear, por isso as curvas que relacionam a densidade de empacotamento entre as proporções de dois materiais apresentam dobras nos valores considerados ótimos, conforme Figura 16 (DE LARRARD; SEDRAN, 1994; JONES; ZHENG; NEWLANDS, 2002).

Figura 16 – Densidade de empacotamento x razões de finos na mistura segundo modelos LPDM e SSM.



Fonte: Sohail et al (2018)

Na realidade tal efeito não ocorre, logo Larrard e Sedran (1994) desenvolveram um modelo de suspensão sólida (SSM) (mostrado na figura anterior), apresentado na equação 5.

$$c(t) = \frac{\beta(t)}{1 - \int_a^t y(x).f(x/t)dx - [1 - \beta(t)].\int_t^D y(x).g(t/x)dx} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo que $\beta(t)$ é definido como a densidade de empacotamento virtual específico de grão de tamanho t , enquanto as outras variáveis são as mesmas da formulação de Stovall et al. (1986).

Tal modelo apresentado na Equação 5 é a extensão dos modelos multicomponentes que incluem a interação entre diferentes partículas da mistura. O método de SSM foi empregado por Richard e Cheyrezy (1995) para o desenvolvimento do concreto de pós reativos (RPC). Cada classe de tamanho t consiste em N diferentes partículas, cada uma delas com seu próprio volume parcial $y_i(t)$ e $\beta_i(t)$. Assim a densidade geral de empacotamento virtual $\beta(t)$ é definida.

$$\frac{1}{\beta(t)} = \sum_{i=1}^N \frac{y_i(t)}{\beta_i(t)} \quad \text{Equação 6}$$

De Larrard (1999) também apresentou outro modelo, definido como modelo compressível de empacotamento (CPM), sendo definido pela equação 7, sendo que K é o esforço de compactação e ϕ é a quantidade total de sólidos.

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad \text{Equação 7}$$

Moutassem e Chidiac (2016) analisaram nove modelos analíticos encontrados na literatura afim de calcular a densidade de empacotamento dos agregados, que são normalmente utilizados em concreto. Foi observado que os modelos de Aïm e Goff (1968), Furnas (1931), LPDM, entre outros que consideravam esféricas as partículas da mistura superestimam a densidade de empacotamento em casos que a relação areia/agregado total (A/AT) é inferior a 0,5, enquanto subestimam tal densidade quando o valor de A/AT se aproxima de 1. Dessa forma, observa-se, ainda pela Figura 16, que os melhores valores para a densidade de empacotamento são obtidos quando a relação A/AT se encontra entre 0,40 e 0,60, fornecida pelo método CPM.

2.1.6.3 Modelo de Elementos Discretos para empacotamento

Os modelos de elementos discretos (DEM) geram uma estrutura de partículas virtuais por meio de distribuição determinada pelo tamanho destas. Os primeiros DEM eram estáticos, ou seja, cada partícula era adicionada em um volume previamente especificado e não mudava sua posição, sendo adicionadas da maior para menor. Durante o processo, a superposição das partículas era comum, o que resultava na rejeição da solução e o processo de geração da distribuição continuava para próxima solução. O resultado do modelo é um espaço tridimensional preenchido com partículas de diversos tamanhos, que geralmente não tinham contato entre si (SOLIMAN, 2016; SOHAIL et al, 2018).

Segundo Soliman (2016), com o avanço computacional os modelos estáticos foram evoluindo para modelos dinâmicos, nos quais as partículas poderiam mover-se livremente. Sohail et al (2018) explicam que nos modelos dinâmicos as partículas podem mudar de posição em cada etapa do processo de mistura, sob influência de vetores de velocidade linear rotacional e atribuídos a cada elemento. Esses modelos dinâmicos formam estruturas de empacotamento mais realistas de misturas multicomponentes. Essas partículas são orientadas e a localização dessas são alteradas e regida por modelo de movimento newtoniano e as interações entre as partículas também são levadas em consideração nesses modelos. Stroeven e Stroeven (1999) desenvolveram um modelo computacional dinâmico chamado de SPACE (*Software Package for the Assessment of Compositional Evolution*), e tal software avalia as características de empacotamento de partículas esféricas com maior densificação possível. Para desenvolvimento de misturas de concreto, o modelo proposto pelos autores possui um complemento, chamado de HADES, que simula as partículas angulares da mistura cimentícia. Outros modelos dinâmicos foram desenvolvidos por Fu e Dekelbab (2003) e Kolonko, Raschdorf e Wäsch (2010).

O processo para encontrar a mistura com maior densidade de empacotamento possível é dispendioso, pois deve-se simular várias composições da mistura. Especialmente para distribuições mais amplas de tamanho de partícula, no qual o tempo computacional para solução é aumentado, devido a quantidade maior de partículas pequenas. O modelo de Kolonko, Raschdorf e Wäsch (2010) tentou solucionar esse problema com uma abordagem gradual em que pequenas partículas

são compactadas e posteriormente servindo como matriz para partículas maiores. Mas essa solução tem alguns problemas, conforme relata Soliman (2016), os parâmetros de entrada normais para esses modelos normalmente são: distribuição do tamanho das partículas, volume da mistura ou quantidade total de partículas, que já geram tempo de solução computacional elevado. Com mais parâmetros de entrada no modelo, como a gravidade, densidade, amortecimento, elasticidade, cisalhamento, atrito e o contato entre as partículas, esse tempo de análise fica ainda maior. Dessa maneira, tais modelos não são interessantes para misturas de concreto.

2.1.7 Aspectos relevantes no estudo de dosagem para UHPC

Como em dosagens de concreto convencional, os estudos de dosagem de UHPC visam a busca de uma mistura ideal entre os constituintes, com objetivo de se garantir propriedades específicas. Boa parte dos estudos de dosagem desse compósito é baseada em grande consumo de cimento, e outros pós reativos, que possuem um valor oneroso tanto econômico como ambiental. Também as dosagens que se apresentam na literatura são predominantemente empíricas, como nos trabalhos de Formagini (2005), Toutlemonde e Resplendino (2013), Torregrosa (2013), Pereira de Oliveira et al. (2013), Christ (2014) e Wille e Boisvert-Cotulio (2015). Em tais pesquisas, a proporção dos constituintes foram baseadas em alguns princípios, sendo eles:

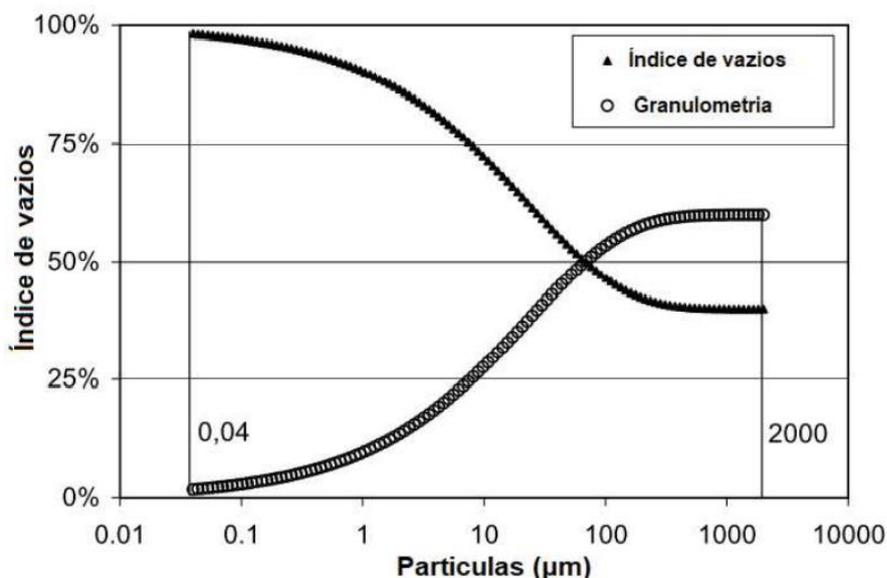
- Busca pela compactação máxima granular;
- Redução significativa da água utilizada nos traços;
- Adição de aditivos superplastificantes afim de melhorar a trabalhabilidade da mistura;
- Incorporação de fibras para aumento da resistência a tração.

Christ (2019) descreve que no caminho desses princípios a máxima compacidade é buscada a fim de se obter menor número de vazios. Assim, é necessário que os materiais empregados dentro da mistura tenham as mais variadas composições granulométricas.

Em uma mistura de UHPC, materiais finos são empregados em grande volume, mas a faixa granulométrica desses materiais devem ser bem avaliadas, para evitar superposições de tamanhos de partículas e aumento da porosidade da

mistura. A Figura 17 apresenta a proporção entre a quantidade de vazios de uma mistura que apresenta grãos de mesma faixa granulométrica e o percentual de vazios.

Figura 17 – Relação entre vazios de uma mistura e tamanho de partícula



Fonte: Geisenhanslüke (2008, pág. 34).

Fehling et al. (2014) relatam que no estudo de dosagem de UHPC é importante a avaliação da qualidade dos materiais empregados (origem, dureza, material orgânico), como a análise de distribuição granulométrica. O UHPC é regido pelas mesmas leis fundamentais do concreto convencional, o que denota o fator água/cimento como influência direta na resistência mecânica do compósito.

Para se obter as resistências mecânicas elevadas do UHPC a redução da relação a/c é fundamental, mas tal redução só é possível com os avanços tecnológicos dos aditivos superplastificantes, sem essa evolução, não seria possível se adquirir as resistências obtidas atualmente (CHRIST,2019). Segundo o autor, a quantidade de SP é de suma importância para se garantir as propriedades reológicas da pasta, como também a sua interação com os tipos de cimento. Por isso a seleção do cimento também é ponto fundamental para a obtenção de propriedades superiores do UHPC.

Para concretos convencionais, a relação água/cimento necessária para haver a hidratação completa do cimento varia entre 0,38 a 0,42 (NEVILLE, 2016; HABEL et al., 2008). Já para UHPC, que se apresentam com valores baixos de a/c , cerca de

apenas 26% do cimento é hidratado (BONNEAU et al., 2000), o que leva o restante do mesmo ter um papel de fíler. Assim, justifica-se a procura de materiais que possam atuar como fíler para substituição desse cimento anidro, bem como a busca pela otimização granular das partículas nos projetos de mistura.

2.1.8 Método de dosagem para UHPC UNISINOS (2019)

Muito autores buscaram em suas pesquisas a obtenção de UHPC por meio de métodos de dosagem de CAA e CAR, com a finalidade de se ter proporções ideais de constituintes (KHOKHAR et al., 2010; ALRIFAI et al., 2013; LIN; KARADELIS; XU, 2013; MANGULKAR E LAMKAR, 2013; NATARAJA; SANJAY, 2013). Também foram desenvolvidos métodos de dosagem por meio de determinação do empacotamento granular, de modo a se obter a mistura com maior compacidade possível, como nos estudos de Torregrosa (2013) e Yu, Spiesz e Brouwers (2014).

Mas boa parte desses estudos se mostram ineficientes, principalmente no que tange a aplicação prática do UHPC, bem como uma forma eficaz e rápida de dosagem baseado em materiais disponíveis localmente. O que torna tais estudos empíricos ou demasiadamente complexos para aplicação prática.

Com base nessas dificuldades, Christ (2019) desenvolveu um estudo de dosagem de UHPC para otimização dos materiais constituintes disponíveis localmente a fim de se obter o melhor empacotamento granular entre as partículas. Segundo Tutikian (2007), os procedimentos necessários para obtenção proporção de materiais que constituem um composto, é chamado de dosagem.

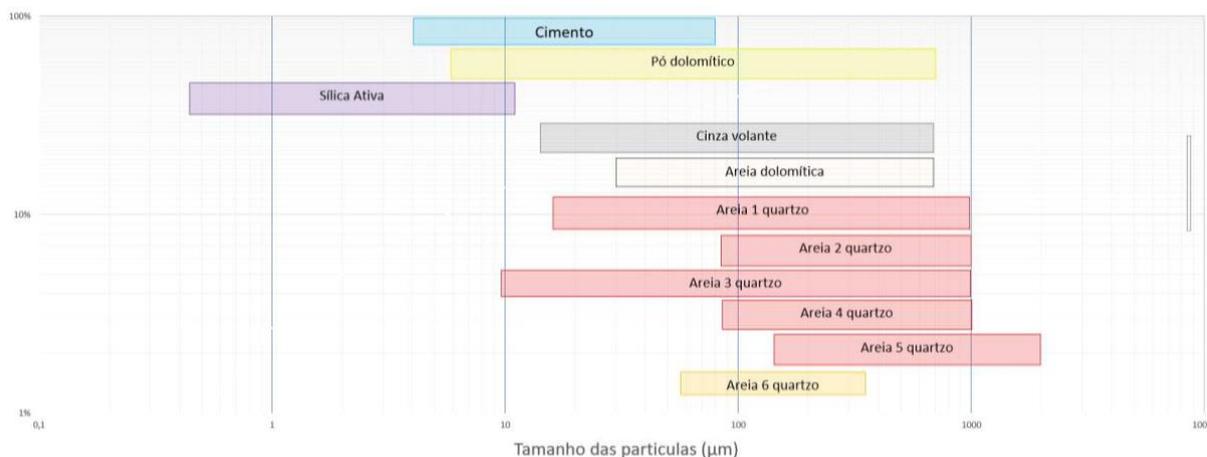
O método de dosagem de UHPC proposto por Christ (2019), denominado método de dosagem UNISINOS (2019), é baseado em algumas etapas, que foram expressas a seguir de forma mais detalhada.

2.1.8.1 Etapa de seleção dos materiais

Como já definido, a seleção dos materiais e a distribuição granulométrica são pontos fundamentais para uma dosagem otimizada de UHPC. Então, a primeira etapa do método é a busca por todos os materiais disponíveis localmente com o intuito de se analisar alguns aspectos dos mesmos (origem do material e tamanho

das partículas, bem como a composição química dos mesmos). Segundo Christ (2019), essa etapa é muito relevante, pois precisa-se buscar materiais com faixas granulométricas distintas, fazendo que não haja sobreposição granulométrica. A Figura 18 apresenta a faixa granulométrica de vários materiais que foram analisados pelo autor.

Figura 18 – Faixas granulométricas de materiais diversos



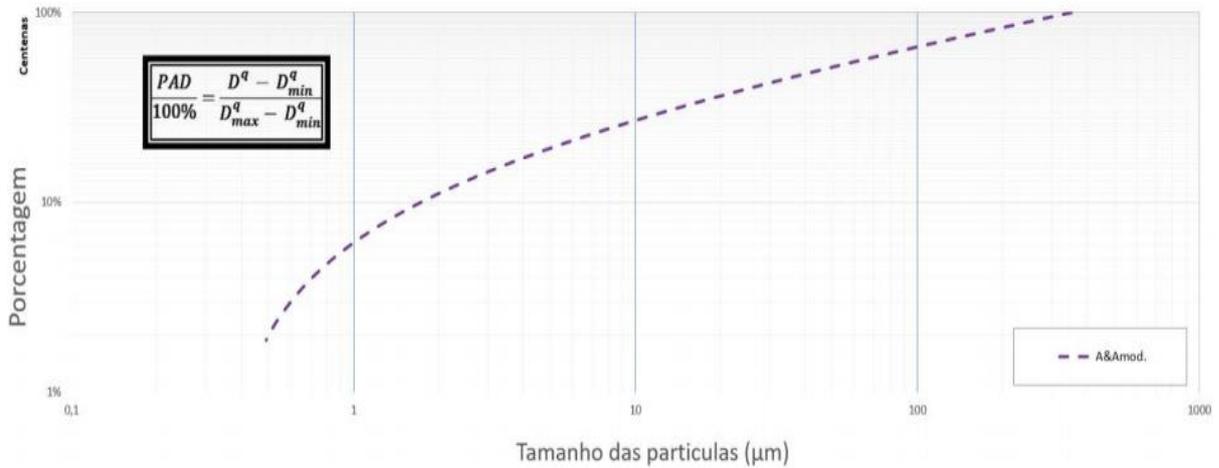
Fonte: Christ (2019, pág. 80)

Nessa etapa é primordial não conhecer apenas a granulometria do material, ou seja, o percentual retido em cada uma das peneiras, mas sim a faixa granulométrica dos materiais, pois é possível perceber que alguns materiais analisados não teriam serventia para o projeto de mistura, devido à sobreposição de granulometria. Assim, para cada material, deve ser feita avaliação granulométrica, objetivando-se selecionar os mais propensos para utilização na dosagem do UHPC.

2.1.8.2 Etapa de determinação do índice de desvio de empacotamento (IDE)

Christ (2019) introduz o índice de desvio de empacotamento (IDE), que consiste em se obter o melhor empacotamento de partículas possível com os materiais disponíveis para mistura. O método é baseado no modelo de empacotamento de partículas de Funk e Dinger (1994), também conhecido como Andreassen e Andersen modificado, no qual se tem a curva de empacotamento perfeita da mistura. A Figura 19 apresenta a curva de empacotamento perfeita.

Figura 19 – Curva teórica de mistura com base no modelo de Funk e Dinger



Fonte: Christ (2019, pág. 82)

Com a curva idealizada definida, passa-se a estabelecer, de forma empírica, a quantidade de cada material a ser empregado na mistura, e conseqüentemente, pode-se somar todas as porcentagens retidas em cada diâmetro analisado. Para se chegar a essa porcentagem, segundo Christ (2019), deve-se empregar a equação 8.

$$\frac{PAM}{100} = \sum (Q * D_{Retido}) \quad \text{Equação 8}$$

Sendo que:

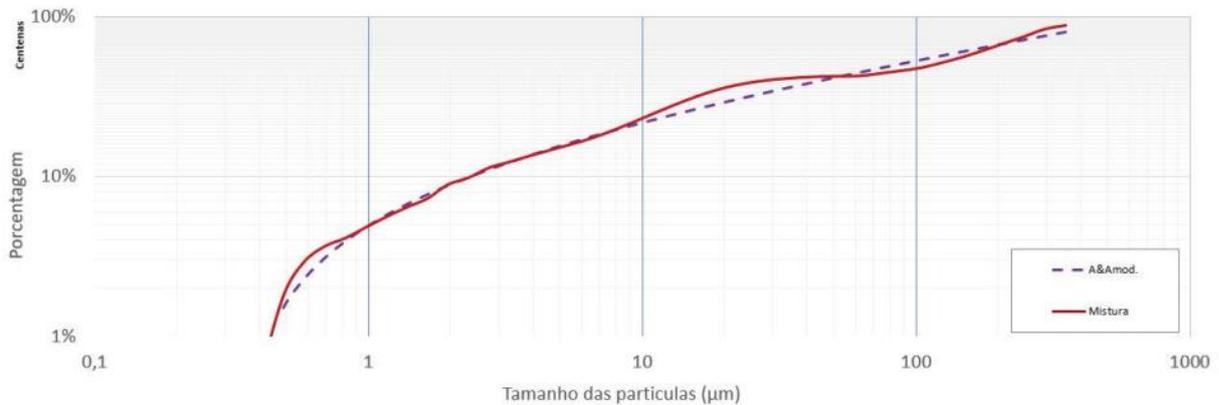
PAM – Porcentagem acumulada da mistura;

Q – Porcentagem de cada material da mistura;

D_{Retido} – Porcentagem retida de determinado diâmetro.

Com a equação 8, é obtida a curva de empacotamento da mistura. Nessa etapa a escolha dos materiais é fundamental. A Figura 20 apresenta uma curva idealizada juntamente com a curva proposta pelo método de uma mistura de UHPC.

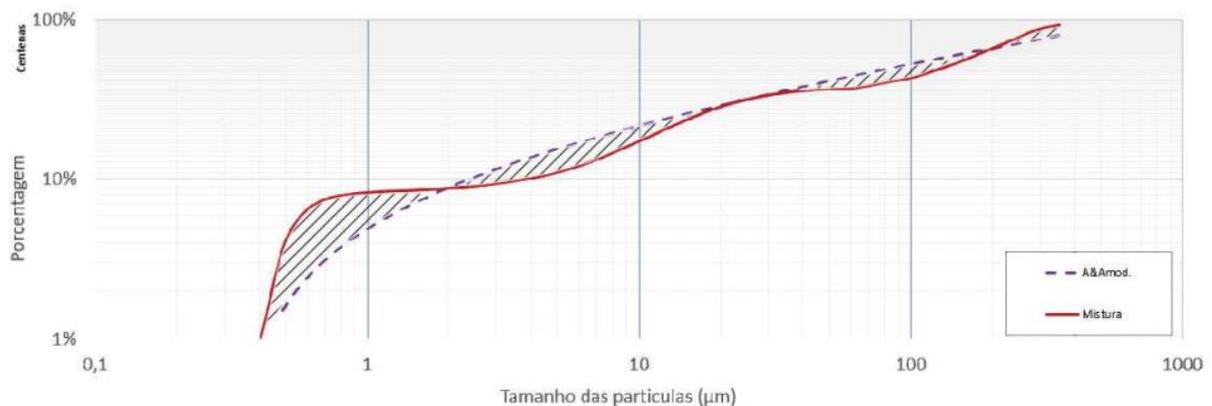
Figura 20 – Curvas de empacotamento ótima e da mistura.



Fonte: Christ (2019, pág. 84)

Conforme relatado por Christ (2019), não há uma maneira de se determinar a quantidade exata de cada material para se garantir o empacotamento perfeito. A forma de se garantir o melhor empacotamento é de forma empírica, que o autor define como o IDE. Esse índice é definido pela diferença da integral da área do gráfico entre a curva ótima e a curva da mistura. A Figura 21 mostra a proposição para determinação do IDE da mistura.

Figura 21 – Área entre o empacotamento perfeito e o empacotamento a mistura.



Fonte: Christ (2019, pág. 84)

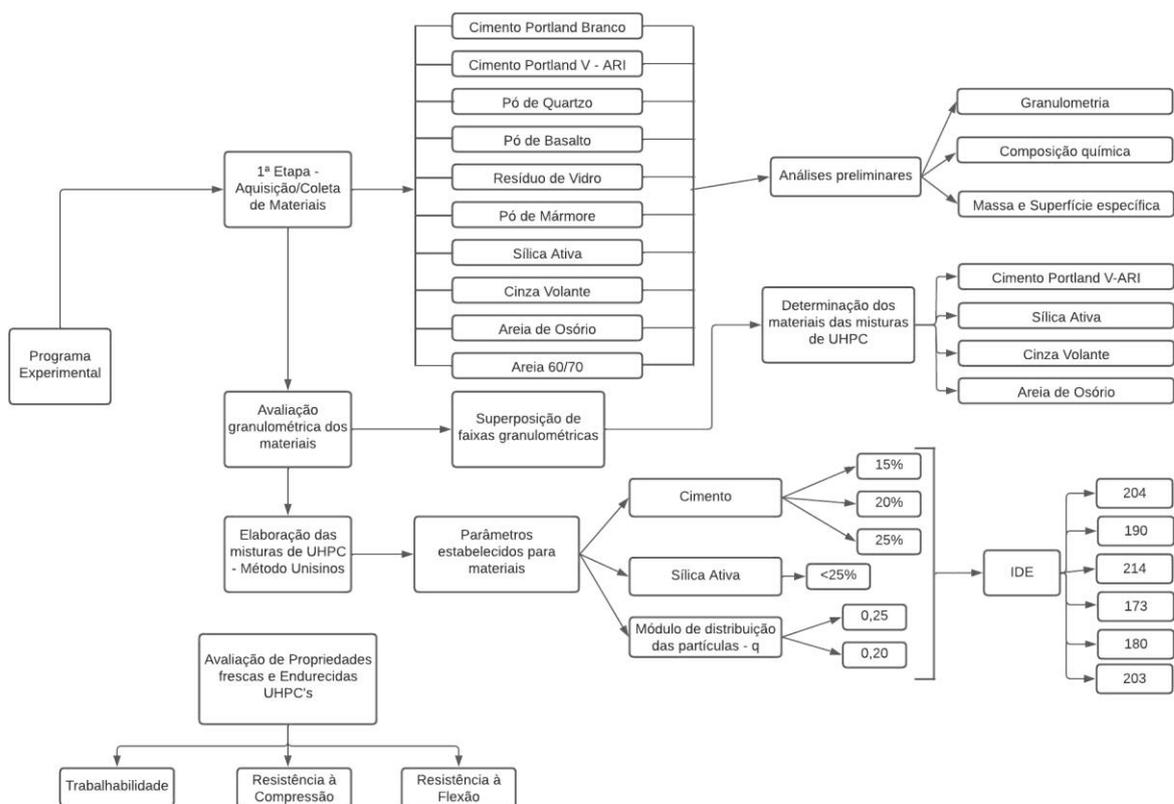
Quanto menor a área entre a linha de empacotamento perfeito e linha de empacotamento da mistura, menor será o IDE. Christ (2019) destaca que buscar um empacotamento perfeito é complexo, pois sempre existe a interação entre as faixas granulométricas de cada material da mistura. Dessa maneira, o IDE é um parâmetro importante na determinação de quais materiais podem ser empregados na mistura

na busca do valor mais próximo de zero e assim se busca o melhor empacotamento possível das partículas.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Esse capítulo apresenta os materiais utilizados nessa pesquisa, bem como o programa experimental proposto para atingir os objetivos específicos desse trabalho. Para facilitar o entendimento dos procedimentos adotados no trabalho, a Figura 22 ilustra o fluxograma com todas as etapas seguidas, assim como os ensaios e análises realizados.

Figura 22 – Fluxograma programa experimental.



Fonte: Próprio autor.

Nesse capítulo, são apresentadas as características físicas e químicas dos materiais disponíveis, sendo posteriormente selecionados os mais adequados para confecção das misturas de UHPC. Também é mostrado o procedimento do método de dosagem, com os preceitos adotados, e os ensaios do estado fresco e endurecido.

3.1 MATERIAIS

Para desenvolvimento inicial da pesquisa, uma gama de materiais disponíveis foi selecionada para as misturas de UHPC. Para selecionar os adequados, foram necessários ensaios de caracterização físicas e químicas desses materiais que são apresentados a seguir.

3.1.1 Cimentos

3.1.1.1 Cimento Branco Estrutural

Um dos cimentos utilizados nessa pesquisa foi o cimento branco estrutural. Como já exposto na revisão bibliográfica, os cimentos mais adequados para confecção de UHPC são os cimentos que possuem baixo teor de C3A, como também uma moderada área superficial específica, propriedade que resulta na diminuição da demanda de água para uma dada trabalhabilidade. O cimento branco empregado é da marca Supremo Secil Cimentos, produzido em Pataiais (Portugal). De acordo com o laudo apresentado pela fabricante, o cimento está de acordo com o preconizado na NBR 16697 (2018) para a classificação de cimentos brancos estruturais. As tabelas Tabela 3 e Tabela 4 apresentam a composição química e as propriedades físicas desse cimento, respectivamente.

Tabela 3 – composição química cimento Portland Branco Supremo.

Óxidos (%)	Cimento Branco	Limites NBR 16697:2018
Óxido de Silício - SiO ₂	17,47	-
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	2,06	-
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	0,19	-
Óxido de Cálcio - CaO	64,96	-
Óxido de Magnésio - MgO	0,39	≤ 6,50%
Sulfatos - SO ₃	2,95	≤ 4,50%
Óxido de Potássio - K ₂ O	0,21	-
Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,04	-
Resíduo Insolúveis	0,35	≤ 3,50%
Perda ao Fogo	9,37	≤ 12,00%

Fonte: adaptado do laudo da empresa.

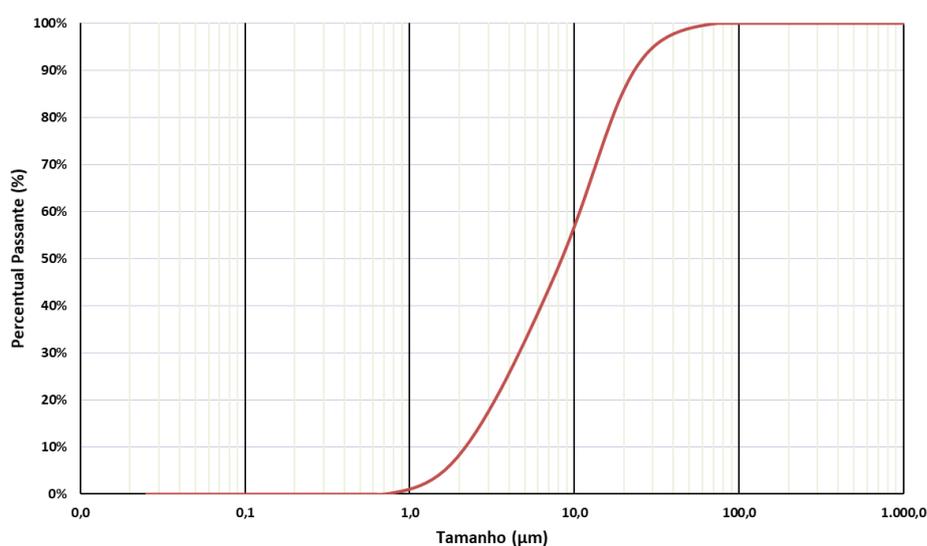
Tabela 4 – propriedades físicas do cimento Portland branco Supremo.

Propriedades		Valores obtidos
Massa específica - g/cm ³		3,00
Diâmetro a 10% (µm)		2,59
Diâmetro a 50% (µm)		9,97
Diâmetro a 90% (µm)		27,50
Resíduo de peneiramento - %	45 µm	0,80
	32 µm	2,40
Superfície Específica de Blaine – cm ² /g		5275
		125
Tempo de pega (min)		175
Índice de Refletância (0 a 100)		86,20
Início de pega (min)		110
Fim de pega (min)		160
Resistência à compressão (MPa)	2 dias	33,0
	7 dias	50,5
	28 dias	61,7

Fonte: adaptado do laudo da empresa e caracterização LCVMAT/UNISINOS.

Quanto a composição granulométrica do cimento branco, foi realizado ensaio de granulometria à laser no laboratório de caracterização e valoração dos materiais – LCVMAT/UNISINOS. O Gráfico 1 apresenta a granulometria obtida pelo ensaio.

Gráfico 1 – Composição granulométrica do cimento Portland branco estrutural



Fonte: Próprio autor.

3.1.1.1 Cimento Portland V – ARI

Dentro dos cimentos comercializados no mercado brasileiro, o cimento que possui o menor teor de adições minerais é o CP V-ARI, por esse motivo foi selecionado. O CP V-ARI usado é da marca Itambé. As Tabela 5 e Tabela 6 apresentam as propriedades físicas e químicas desse cimento.

Tabela 5 – Caracterização química do CP V-ARI.

Óxidos (%)	CP V-ARI	Limites NBR 16697:2018
Óxido de Silício - SiO ₂	18,54	-
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	4,51	-
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	2,75	-
Óxido de Cálcio - CaO	62,09	-
Óxido de Magnésio - MgO	3,62	≤ 6,50%
Sulfatos - SO ₃	2,85	≤ 4,50%
CaO livre	1,55	-
Equivalência Alcalina	0,67	-
Resíduo Insolúveis	0,64	≤ 3,50%
Perda ao Fogo	3,40	≤ 6,50%

Fonte: adaptado do laudo da empresa.

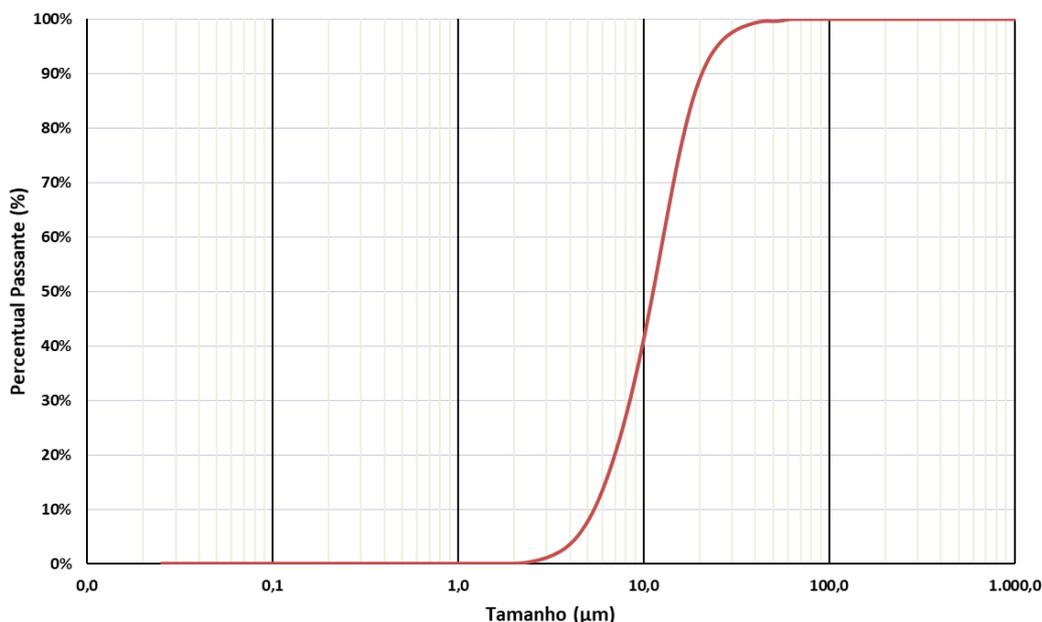
Tabela 6 – propriedades físicas do CP V-ARI.

Propriedades	Valores obtidos	
Massa específica - g/cm ³	3,09	
Diâmetro a 10% (µm)	6,43	
Diâmetro a 50% (µm)	13,36	
Diâmetro a 90% (µm)	24,46	
Resíduo de peneiramento - %	75 µm	0,07
	45 µm	0,56
Superfície Específica de Blaine – cm ² /g	4400	
Área superficial específica (Langmuir) – m ² /g	1,4554	
Início de pega (min)	184	
Fim de pega (min)	243	
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	37,70
	7 dias	43,30
	28 dias	52,60

Fonte: adaptado do laudo da empresa e caracterização LCVMAT/UNISINOS.

O Gráfico 2 ilustra o ensaio de granulometria a laser realizado no CP V-ARI.

Gráfico 2 – Granulometria CP V-ARI



Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada na pesquisa foi adquirida da empresa Elkem Materials South American Ltda, sendo selecionada a microsílica Elkem 920U. A escolha desse tipo se deve ao grau de finura e pelo produto não ser densificado, característica essa que auxilia na dispersão das partículas na mistura de UHPC. Esse material se faz presente em vários trabalhos da literatura, sendo a principal referência Richard e Cheyrezy (1995), que desenvolveram UHPC (ou CPR) com resistências à compressão de 200 e 800 MPa, com teores de 23% a 25% de sílica ativa. Korpa e Trettin (2004) também conseguiram resistências similares com níveis de 25% de sílica.

A sílica ativa apresenta características físicas e químicas dentro dos limites estabelecidos pela NBR13956-1 (2012) (sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – requisitos). A sílica ativa utilizada nessa pesquisa tem por característica física preencher os espaços granulares inferiores a 1 µm, o que ajuda a melhorar o empacotamento das partículas da mistura granular.

A Tabela 7 apresenta as caracterizações químicas do produto. Também foi fornecido os parâmetros físicos da sílica, que são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Parâmetros químicos sílica ativa

Exigências Químicas			
Parâmetro	Unidade	Limites – NBR 13956-1:2012	Análises
SiO ₂	%	mín. 85,00	95,09
Umidade	%	máx. 3,00	0,21
Perda ao fogo	%	máx. 6,00	2,03
Eq. Alcalino de Na ₂ O	%	Informar	0,45

Fonte: Elkem Materials.

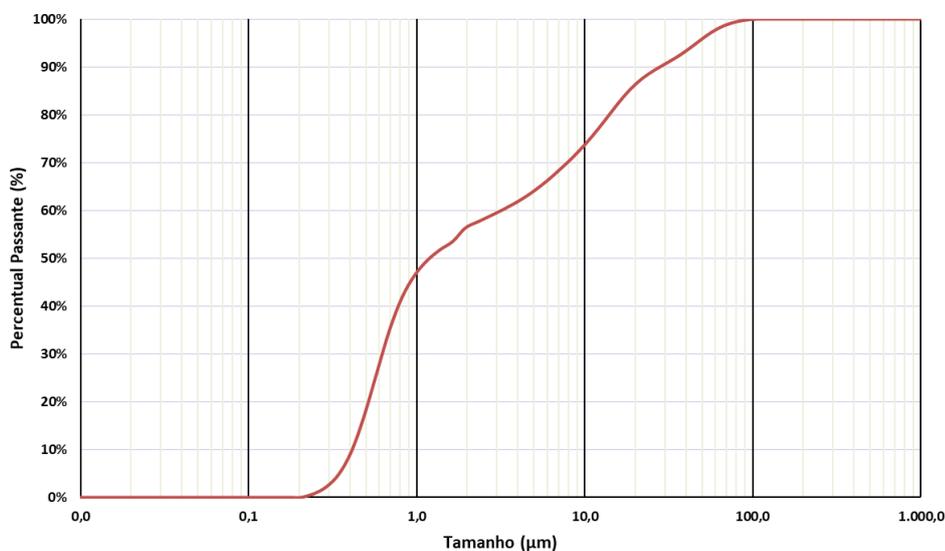
Tabela 8 – Parâmetros físicos sílica ativa.

Exigências Físicas			
Parâmetro	Unidade	Limites	Análises
Resíduo na peneira 45 µm	%	máx. 10,00	0,05
Densidade aparente	kg/m ³	máx. 350	240
Índice de atividade pozolânica	%	min. 105	115,93
Massa específica	g/cm ³	-	2,08
Área superficial específica (BET)	m ² /g	-	3,079
Diâmetro a 10%	µm	-	0,347
Diâmetro a 50%	µm	-	1,000
Diâmetro a 90%	µm	-	27,92

Fonte: Adaptado de Elkem Materials e LCVMAT/UNISINOS.

Foi realizado ensaio de granulometria a laser no material, para se verificar as faixas granulométricas. O Gráfico 3 apresenta a distribuição granulométrica.

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da sílica ativa



Fonte: Próprio autor.

É possível observar que a sílica ativa não apresentou uma distribuição normal, com faixas mais horizontais.

3.1.3 Pó de Quartzo

O pó de quartzo é um material inorgânico e inerte, amplamente utilizado na confecção de UHPC, utilizado como filer, com função de preenchimento das faixas granulométricas entre o cimento e a sílica ativa. Esse material é composto basicamente por dióxido de silício (SiO_2). Esse material foi doado pela empresa Brasilminas, com duas malhas a serem analisadas (#200 e #325). A Tabela 9 apresenta as principais características físicas do pó de quartzo avaliado nessa pesquisa.

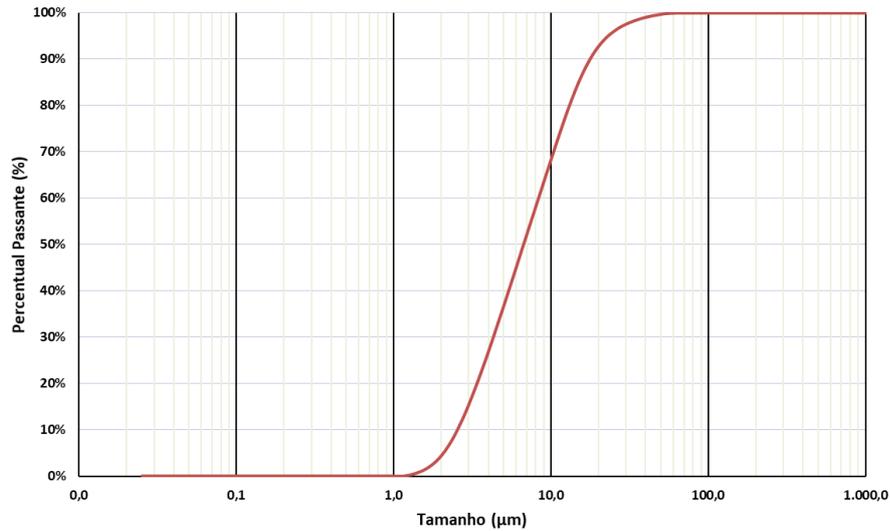
Tabela 9 – Características físicas e químicas do pó de quartzo.

Características	Teores	
Composição química	SiO_2	99,00%
	Al_2O_3	0,25%
	Fe_2O_3	0,05%
	TiO_2	0,03%
Absorção DOP (%)	18% a 28%	
Massa específica (g/cm^3)	2,50 a 2,80	
Densidade Aparente (g/cm^3)	1,00 a 1,35	
pH	11,00	
Estado Físico	Sólido	
Perda ao fogo (%)	0,60	

Fonte: Adaptado Brasilminas.

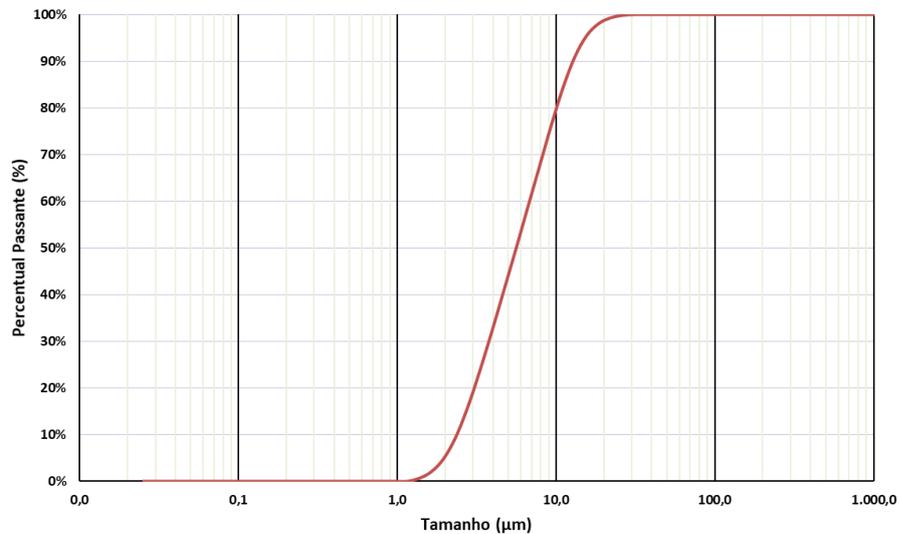
Os gráficos 4 e 5 apresentam os resultados da granulometria a laser dos pós de quartzo das malhas #200 e #325, respectivamente.

Gráfico 4 – Distribuição granulométrica pó de quartzo #200.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 5 - Distribuição granulométrica pó de quartzo #325.



Fonte: Próprio autor.

3.1.4 Fíler Basáltico

O fíler de basalto avaliado nessa pesquisa foi doado pela empresa Fabrita mineração Ltda. Esse material é considerado um resíduo do processo de britagem da indústria. Sua principal utilização, segundo a empresa, é para a agricultura, para correção de solo. Por meio de análise petrográfica realizado no ITT Fossil (Instituto Tecnológico de Micropaleontologia) esse basalto é classificado como uma rocha

dacito de classe ígnea vulcânica. A Tabela 10 apresenta a composição química do material.

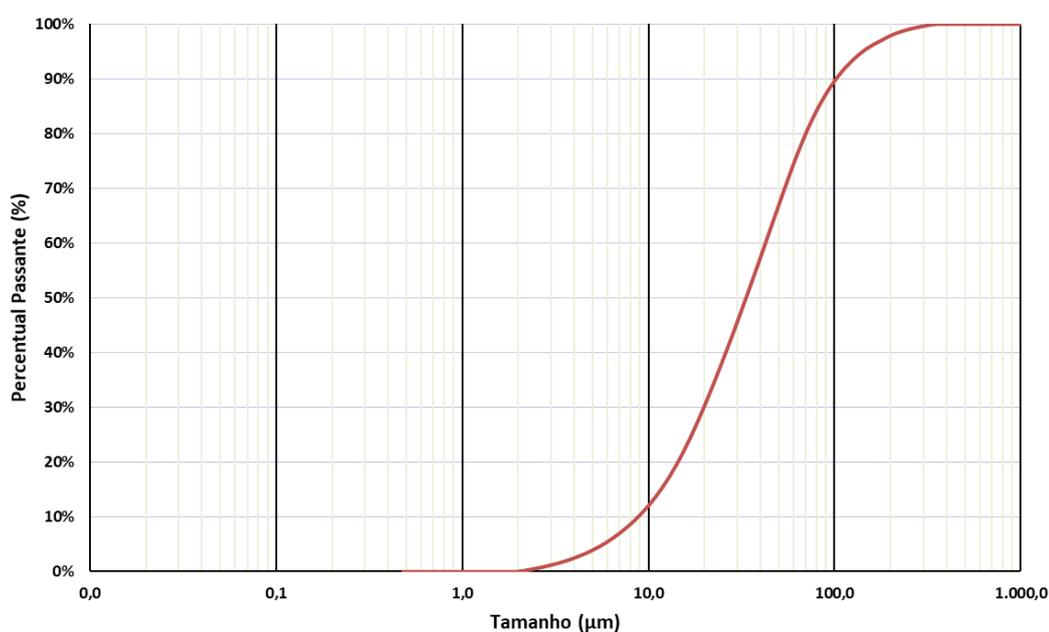
Tabela 10 – Composição química do fíler de basalto

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P.F.
Quant (%)	66,60	14,00	6,16	3,67	1,42	0,83	0,269	2,87	3,70	0,11	0,74

Fonte: adaptado Fabrita.

O Gráfico 6 apresenta a distribuição granulométrica do material. O ensaio foi realizado no LCVMAT-UNISINOS.

Gráfico 6 – Granulometria Fíler de Basalto.



Fonte: Próprio autor.

3.1.5 Cinza Volante

A cinza volante empregada nesse trabalho é oriunda de uma empresa que utiliza o carvão mineral como combustível, sendo obtida por precipitação eletrostática. Esse material é com frequência utilizado por concreteiras da região metropolitana de Porto Alegre/RS e da serra gaúcha. A massa específica e a área superficial específica da cinza volante foram de 2,10 g/cm³ e 0,48 m²/g, respectivamente. Na Tabela 11 é apresentada a composição química da cinza volante obtida pelo ensaio de FRX, realizado no LCVMAT/UNISINOS.

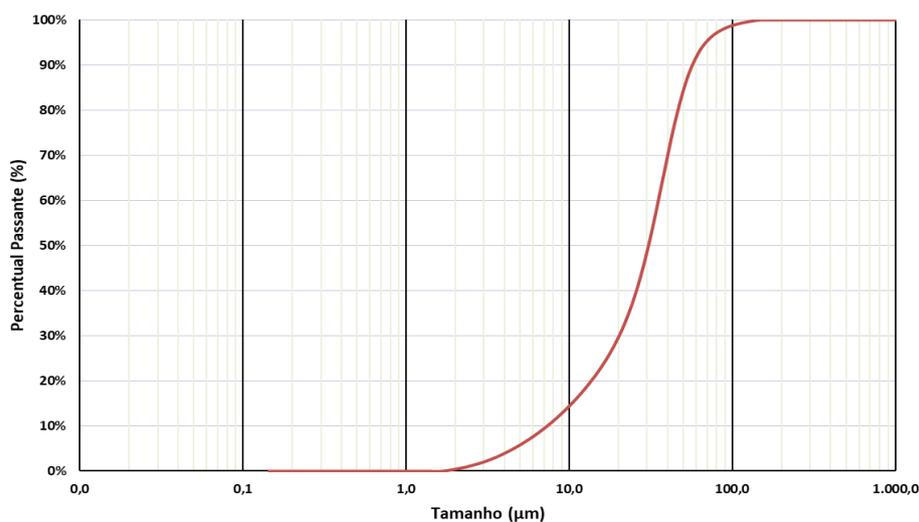
Tabela 11 – Composição química da cinza volante

Óxidos	Teores (%)
Óxido de Silício - SiO ₂	60,23
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	20,71
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	10,56
Óxido de Cálcio - CaO	2,32
Óxido de Magnésio - MgO	1,57
Sulfatos - SO ₃	0,86
Óxido de fósforo - P ₂ O ₅	0,19
Óxido de Potássio - K ₂ O	1,97
Óxido de Titânio- TiO ₂	1,17
Perda ao fogo	0,37

Fonte: Próprio autor.

No Gráfico 7 está ilustrada a granulometria da cinza volante analisada nesse trabalho.

Gráfico 7 – Composição granulométrica Cinza Volante.



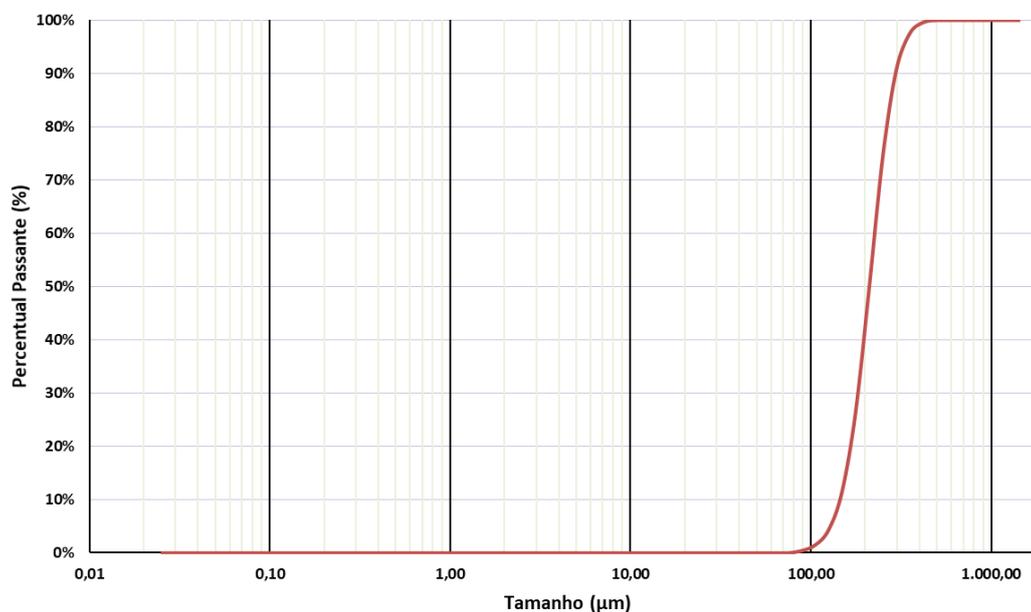
Fonte: Próprio autor.

3.1.6 Areia de Osório

O agregado miúdo é o maior material em uma mistura de UHPC, sendo considerado a “agregado graúdo” desses traços. A seleção desse agregado deve ser baseada em sua finura, de forma a se evitar problemas com a zona de transição, bem como deve apresentar grãos com elevada resistência mecânica. Dessa maneira, foi selecionada a areia proveniente do município de Osório/RS. A massas específicas e unitária foram determinadas por meio das normas NBR 16.916 (ABNT, 2021) e NBR 16.972 (ABNT, 2021), nas quais obteve-se, respectivamente, os

valores de 2700 kg/m³ e 1520 kg/m³. Já a distribuição granulométrica da areia é apresentada no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Granulometria areia de Osório.



Fonte: Próprio autor.

3.1.7 Resíduo de vidro industrial

O resíduo de vidro utilizado nessa pesquisa foi obtido da Cristalglass, localizada na cidade de Portão/RS, empresa especializada na distribuição de vidros e espelhos planos para construção civil. O resíduo é oriundo do processo de desbastamento das peças a fim de tornar suas bordas não cortantes. Nessa etapa, é utilizada água objetivando diminuir a temperatura do processo, para, posteriormente, a água e o resíduo gerado serem coletados pela tubulação das máquinas desbastadoras (Figura 23a). A água volta para o processo, enquanto o resíduo de vidro é coletado em bags (Figura 23b) e posteriormente destinados ao descarte. O resíduo foi recolhido na fábrica e acondicionado em toneis para posterior processamento, a ser explicado no processo de beneficiamento.

Figura 23 – Máquina de desbastamento (a) e coleta do resíduo de vidro (b)



Fonte: Próprio autor.

Para caracterização físico-química do material foram realizados ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), granulometria a laser e ensaios complementares no LCVMAT/UNISINOS. Os resultados dos ensaios são apresentados na

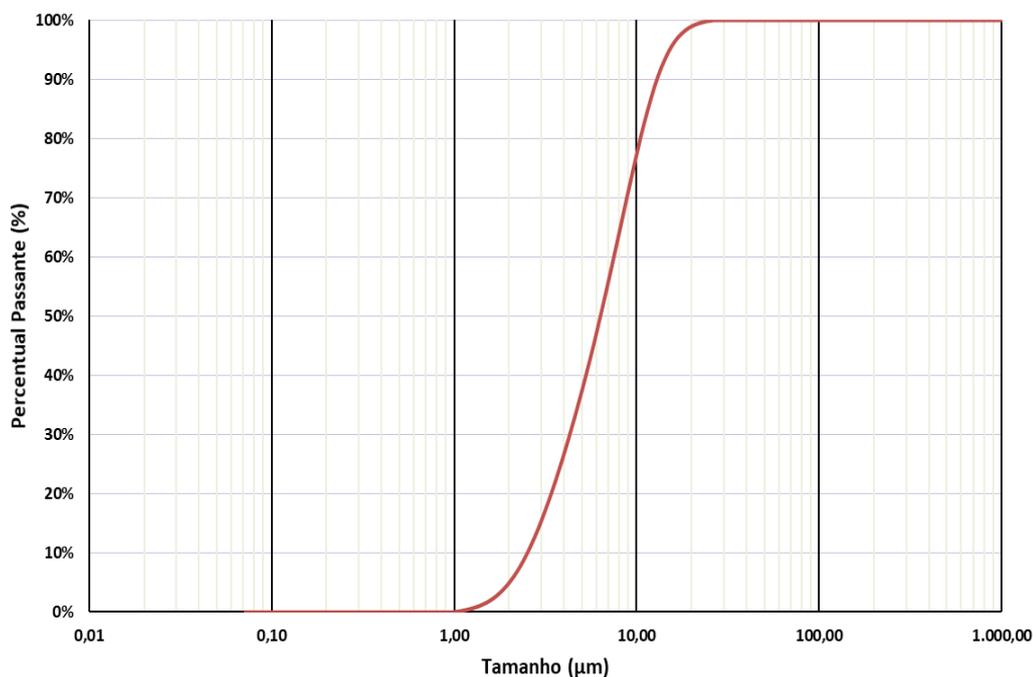
Tabela 12 e no Gráfico 9.

Tabela 12 – Características físicas e químicas do resíduo de vidro industrial.

Características		Teores
Composição química	SiO ₂	74,07%
	CaO	13,27%
	MgO	1,93%
	Al ₂ O ₃	1,00%
	Fe ₂ O ₃	0,66%
	P ₂ O ₅	0,49%
Perda ao fogo		7,42%
Massa específica – g/cm ³		2,34
Faixas granulométricas	Diâmetros à 10% - µm	2,579
	Diâmetros à 50% - µm	7,83
	Diâmetros à 90% - µm	19,31

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 9 – Granulometria resíduo de vidro industrial



Fonte: Próprio autor.

3.1.8 Aditivo superplastificante

Devido à baixa relação água/cimento, as misturas de UHPC exigem a utilização de aditivo superplastificante. Para esse trabalho foi utilizado o SP MC-PowerFlow 4001, fabricado e fornecido pela empresa MC-Bauchemie. Esse aditivo é caracterizado por ser de alto desempenho baseado em tecnologia de polímeros. Segundo o fabricante possui uma densidade de 1,12 kg/l, estando de acordo com a NBR 11768-1:2019, sendo classificado com um aditivo redutor de água tipo 2 – RA2. Seu estado de utilização é líquido de coloração marrom. Quanto à dosagem, o fabricante recomenda um valor mínimo de 0,2% até 5% equivalente à massa de cimento.

3.1.9 Fibras metálicas

As fibras a serem empregadas nessa pesquisa são as mesmas utilizadas na pesquisa de Christ (2019) (Figura 24), sendo fibras de aço com formato reto, com dimensões de 0,21 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento. Tais fibras apresentam propriedades mecânicas de 2.750 N/mm² de resistência à tração e

modulo de elasticidade de 200GPa, segundo dados fornecidos pelo fabricante, e são comercializadas pela nomenclatura de Dramix® OL 13/20.

Figura 24 – Fibra de aço aplicada nas misturas da pesquisa.



Fonte: Christ (2019).

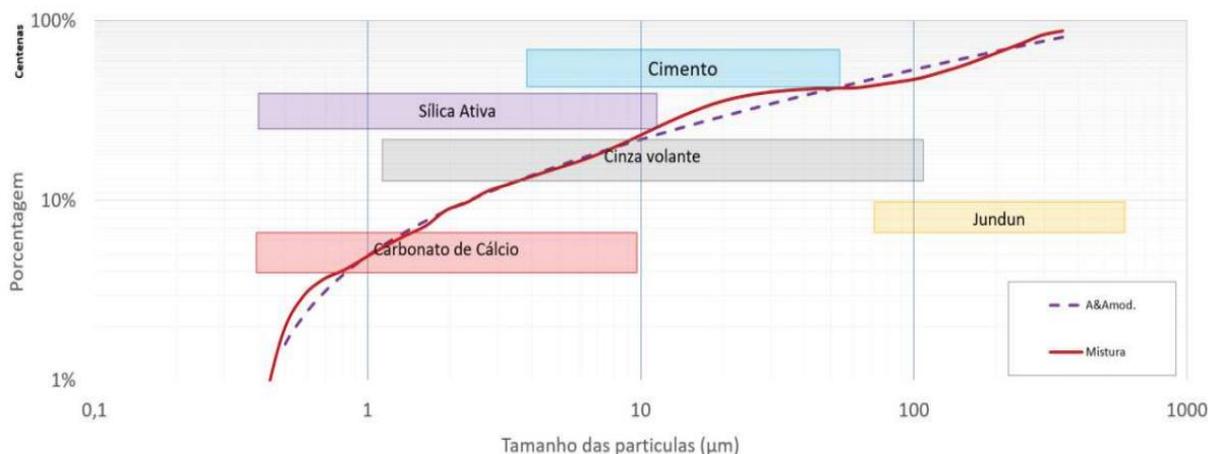
3.2 MÉTODO

Nesse tópico, foi apresentado o método adotado nessa pesquisa, com o processo de escolha dos materiais para elaboração das misturas, as premissas para utilização do método de dosagem e os respectivos ensaios de avaliação do estado fresco e das propriedades mecânicas.

3.2.1 Avaliação dos materiais para determinação dos traços

Para se empregar o método de dosagem de UHPC, desenvolvido por Christ (2019), necessita-se avaliar os materiais inicialmente disponíveis, bem como atentar-se para sua granulometria, principalmente ao que tange as faixas granulométricas, a fim de evitar superposição de tamanho de partículas entre os materiais, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Curva de empacotamento ideal e da mistura de IDE 87.



Fonte: Christ (2019).

Observa-se que o método de dosagem tem por finalidade aproximar a curva granulométrica da mistura elaborada o mais próximo possível da curva idealizada do empacotamento das partículas de A&A modificado. Essa característica inicial só é adquirida ao fazer uma seleção minuciosa dos materiais a serem empregados em cada mistura. Além de verificar a superposição das partículas de mesma dimensão, deve-se analisar se as porcentagens de cada faixa granulométrica não estão similares entre os materiais avaliados. Dessa maneira, se busca uma distribuição

granulométrica mais homogênea da mistura real. A Figura 26 apresenta uma das avaliações prévias feita nessa pesquisa.

Figura 26 – Verificação das superposições de faixas granulométricas.

Sizes (µm)	A&A	% ACUMULADA (Sizes µm)									
		Cim. Bran.	Sílica At. 9]	Pó Márm.	Cinza Vol.	Pó de V.	Pó de Basal.	Areia Osó	Areia 60/70	Quartzo 325	Quarzo 200
1000,00	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
704,00	90,27957	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,89	100,00	100,00
592,00	85,78623	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,32	100,00	100,00
497,80	81,48249	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,79	93,77	100,00	100,00
418,60	77,36183	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,87	85,52	100,00	100,00
352,00	73,41582	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	95,73	68,78	100,00	100,00
296,00	69,63739	100,00	100,00	100,00	99,64	100,00	100,00	87,28	44,93	100,00	100,00
248,90	66,01838	100,00	100,00	100,00	99,05	100,00	100,00	70,37	23,16	100,00	100,00
209,30	62,55334	100,00	100,00	99,93	98,07	100,00	100,00	47,01	10,13	100,00	100,00
176,00	59,23515	100,00	100,00	99,83	96,40	100,00	100,00	25,06	4,22	100,00	100,00
148,00	56,05788	100,00	100,00	99,62	93,63	100,00	100,00	10,80	1,76	100,00	100,00
124,50	53,02158	100,00	100,00	99,25	89,17	100,00	100,00	3,99	0,67	100,00	100,00
104,70	50,10879	100,00	100,00	98,63	82,34	100,00	100,00	1,35	0,14	100,00	100,00
88,00	47,31068	100,00	99,76	97,48	72,45	100,00	99,95	0,39	0,00	100,00	100,00
74,00	44,63892	100,00	99,15	95,34	59,34	100,00	99,67	0,00	0,00	100,00	100,00
62,20	42,0741	100,00	98,08	91,55	44,47	100,00	98,43	0,00	0,00	100,00	100,00
52,30	39,62313	99,55	96,43	85,68	30,63	100,00	95,91	0,00	0,00	100,00	99,91
44,00	37,28344	98,78	94,43	78,18	20,38	100,00	90,81	0,00	0,00	100,00	99,69
37,00	35,03677	97,46	92,54	70,25	13,83	100,00	86,91	0,00	0,00	100,00	99,39
31,10	32,88001	95,21	90,94	62,64	9,72	99,87	80,55	0,00	0,00	99,92	98,94
26,20	30,84123	91,50	89,42	55,55	6,93	99,64	70,55	0,00	0,00	99,66	98,18
22,00	28,85156	85,82	87,63	48,67	4,84	99,23	65,44	0,00	0,00	99,10	96,86
18,50	26,96234	78,16	85,23	41,76	3,20	98,52	57,89	0,00	0,00	97,79	94,58
15,60	25,18155	69,35	82,15	34,73	1,95	97,33	53,77	0,00	0,00	95,17	90,81
13,10	23,43433	60,53	78,73	28,03	1,05	95,29	47,09	0,00	0,00	90,58	85,24
11,00	21,76123	52,48	75,44	22,11	0,43	91,77	42,20	0,00	0,00	83,87	78,13
9,25	20,17259	45,28	72,49	17,12	0,00	85,52	36,80	0,00	0,00	75,61	70,15
7,78	18,65306	38,56	69,85	13,00	0,00	75,18	32,30	0,00	0,00	66,68	61,83
6,54	17,19333	31,95	67,43	9,60	0,00	61,61	29,00	0,00	0,00	57,69	53,41
5,50	15,79899	25,45	65,23	6,86	0,00	48,08	25,76	0,00	0,00	48,76	44,94
4,62	14,45495	19,35	63,29	4,73	0,00	36,68	21,78	0,00	0,00	40,34	36,58
3,89	13,18534	14,02	61,64	3,11	0,00	27,41	18,22	0,00	0,00	31,46	28,48
3,27	11,95786	9,66	60,20	1,92	0,00	19,63	15,17	0,00	0,00	23,21	20,84
2,75	10,78537	6,29	58,90	1,05	0,00	13,01	13,16	0,00	0,00	15,63	13,98
2,31	9,655173	3,85	57,64	0,43	0,00	7,76	10,94	0,00	0,00	9,35	8,40
1,94	8,57193	2,19	56,35	0,00	0,00	4,14	8,69	0,00	0,00	4,87	4,45
1,64	7,573146	1,12	55,00	0,00	0,00	1,99	6,57	0,00	0,00	2,17	2,05
1,38	6,589661	0,44	53,52	0,00	0,00	0,85	5,62	0,00	0,00	0,77	0,78
1,16	5,642103	0,00	51,80	0,00	0,00	0,28	4,77	0,00	0,00	0,12	0,16
0,97	4,708159	0,00	49,60	0,00	0,00	0,11	3,95	0,00	0,00	0,00	0,00
0,82	3,868285	0,00	46,51	0,00	0,00	0,00	3,05	0,00	0,00	0,00	0,00
0,69	3,041276	0,00	41,86	0,00	0,00	0,00	2,58	0,00	0,00	0,00	0,00
0,58	2,244478	0,00	34,99	0,00	0,00	0,00	2,16	0,00	0,00	0,00	0,00
0,49	1,503215	0,00	26,11	0,00	0,00	0,00	1,77	0,00	0,00	0,00	0,00
0,41	0,752881	0,00	17,09	0,00	0,00	0,00	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00
0,34	0	0,00	9,71	0,00	0,00	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00
0,29	-0,61257	0,00	4,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,24	-1,31033	0,00	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,20	-1,95206	0,00	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,17	-2,49995	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	-15,7127	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Próprio autor.

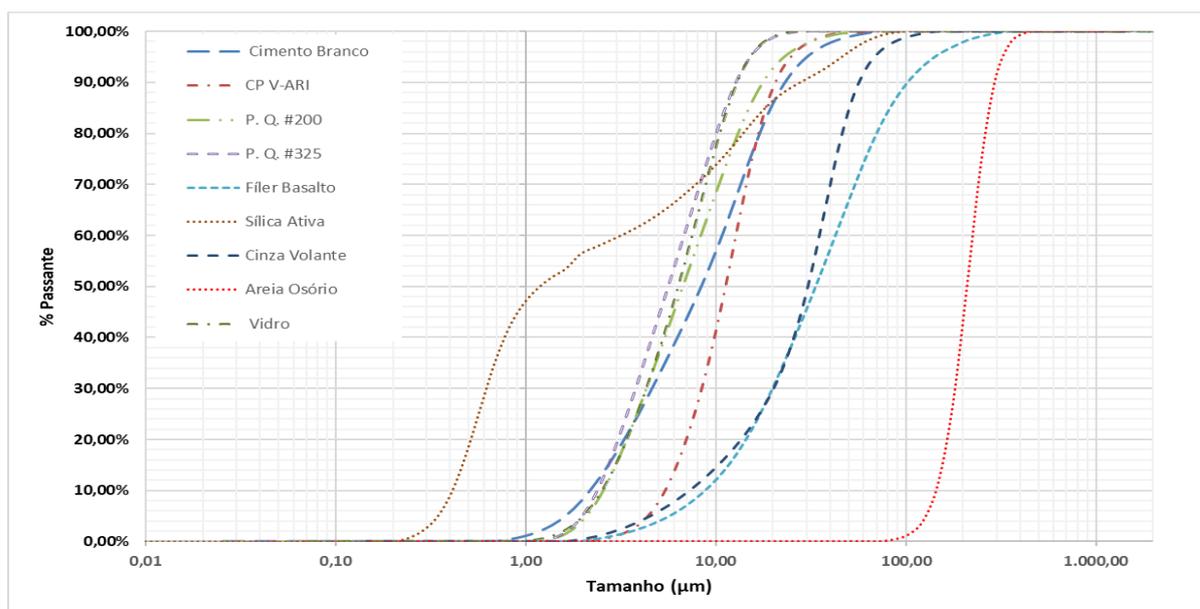
Como pode-se verificar na Figura 26, o cimento Portland branco estrutural apresenta faixas granulométricas sobrepostas com outros materiais, como pó de mármore, o resíduo de vidro, fíler de basalto, os pós de quartzo, assim como a sílica ativa e a cinza volante, mas esses dois últimos com menos faixas sobrepostas. Dessa maneira, os materiais selecionados inicialmente para confecção das misturas

desse trabalho foram o cimento Portland branco estrutural, sílica ativa, cinza volante e a areia de Osório.

A areia de Osório apresenta diâmetro máximo de 497,8 μm e tem uma boa distribuição granulométrica nas faixas de maiores diâmetros das misturas. A cinza volante completa de forma satisfatória a faixa deixada entre a areia e as partículas maiores do cimento Portland branco estrutural, mesmo apresentando superposição de partículas de outros materiais da mistura. A sílica ativa, pelo tamanho muito pequeno de sua partícula, completa a fase final da mistura, e se observa que 51% das partículas desse material estão abaixo da menor partícula do cimento, tornando a sílica fundamental para um melhor empacotamento e densificação da mistura.

O Gráfico 10 apresenta as curvas granulométricas de todos os materiais pré-avaliados para confecção das misturas de UHPC dessa pesquisa.

Gráfico 10 – Distribuição granulométrica dos materiais disponíveis.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.1 Definição das premissas para elaboração das misturas da pesquisa

Com os materiais previamente selecionados (cimento, sílica ativa, cinza volante e agregado miúdo), partiu-se para definição das porcentagens dos quantitativos desses materiais para as misturas.

A primeira premissa a ser avaliada foi o consumo cimento Portland branco. Autores como Richard e Cheyrezy (1995) e Graybeal (2006) relatam que em

misturas de UHPC o consumo de cimento varia entre 900 e 1100 kg/m³, tendo dois papéis importantes nesses traços. O primeiro é o efeito químico da hidratação do cimento; e o segundo o efeito físico que se refere as partículas do cimento não hidratadas, que acabam atuando como fíler na mistura.

Com base nesse alto consumo de cimento nas misturas de UHPC, mas avaliando que uma faixa de 40% a 50% do cimento disponível é hidratado, segundo Korpa, Kowald e Trettin (2009) e Yin et al. (2022), foi definido percentuais de consumo de cimento para elaboração dos traços. Tais percentuais foram de 15%, 20% e 25%, e tiveram a finalidade de verificar um possível percentual ótimo para as misturas. Os demais materiais foram determinados com base no método de dosagem buscando o melhor IDE possível.

A segunda premissa analisada foi o “q” de distribuição das partículas. Valores altos de “q” (>0,40) são utilizados para traços convencionais de concreto, enquanto traços de concretos de alta e ultra alta resistência necessitam de valores de “q” inferiores a 0,37. Nota-se também, que quanto mais baixo esse índice, maior a quantidade de partículas finas introduzidas na mistura. A fim de avaliar essa influência nas propriedades fresca e mecânicas, foram adotados dois valores para “q” – 0,20 e 0,25.

Dessa maneira, foram desenvolvidas seis misturas de UHPC, que são resumidas na Figura 27, na qual se mostra os percentuais dos materiais, consumo de materiais por m³ e traços unitários.

Figura 27 – Resumo das misturas de UHPC.

TRAÇO IDE 174 - Q = 0,25, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	15,00%	2990	448,50	1,000
Sílica Ativa	17,57%	2180	383,05	0,854
Cinza Volante	20,26%	2210	447,75	0,998
Areia Osório	47,17%	2700	1273,55	2,840
Total	100,00%		2552,86	5,692

TRAÇO IDE 152 - Q = 0,2, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	15,00%	2990	448,50	1,000
Sílica Ativa	25,09%	2180	546,92	1,219
Cinza Volante	17,65%	2210	390,09	0,870
Areia Osório	42,26%	2700	1141,04	2,544
Total	100,00%		2526,55	5,63

TRAÇO IDE 158 - Q = 0,25, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	20,00%	2990	598,00	1,000
Sílica Ativa	16,05%	2180	349,83	0,585
Cinza Volante	16,74%	2210	369,94	0,619
Areia Osório	47,21%	2700	1274,76	2,132
Total	100,00%		2592,53	4,335

TRAÇO IDE 149 - Q = 0,2, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	20,00%	2990	598,00	1,000
Sílica Ativa	21,39%	2180	466,38	0,780
Cinza Volante	15,77%	2210	348,51	0,583
Areia Osório	42,84%	2700	1156,60	1,934
Total	100,00%		2569,48	4,30

TRAÇO IDE 177 - Q = 0,25, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	25,00%	2990	747,50	1,000
Sílica Ativa	13,17%	2180	287,13	0,384
Cinza Volante	12,87%	2210	284,52	0,381
Areia Osório	48,95%	2700	1321,77	1,768
Total	100,00%		2640,93	3,533

TRAÇO IDE 163 - Q = 0,2, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	25,00%	2990	747,50	1,000
Sílica Ativa	17,58%	2180	383,34	0,513
Cinza Volante	13,38%	2210	295,65	0,396
Areia Osório	44,04%	2700	1189,02	1,591
Total	100,00%		2615,51	3,50

Fonte: Próprio autor.

Com essas misturas foram realizadas análises prévias de trabalhabilidade e resistência à compressão, que mostraram valores satisfatórios. Mas devido ao alto custo do cimento Portland branco, e a dificuldade de aquisição do mesmo durante a execução da pesquisa, optou-se por realizar a troca do cimento dessa pesquisa. Assim, o cimento Portland branco foi substituído pelo CP V-ARI.

Dessa maneira as misturas foram novamente processadas pelo método de dosagem, provocando apenas o aumento do IDE, mas não houve mudanças nas porcentagens dos materiais, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Traços com cimento CP V-ARI.

TRAÇO IDE 204 - Q = 0,25, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	15,00%	2990	448,50	1,000
Sílica Ativa	17,57%	2180	383,05	0,854
Cinza Volante	20,26%	2210	447,75	0,998
Areia Osório	47,17%	2700	1273,55	2,840
Total	100,00%		2552,86	5,692

TRAÇO IDE 173 - Q = 0,2, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	15,00%	2990	448,50	1,000
Sílica Ativa	25,09%	2180	546,92	1,219
Cinza Volante	17,65%	2210	390,09	0,870
Areia Osório	42,26%	2700	1141,04	2,544
Total	100,00%		2526,55	5,63

TRAÇO IDE 190 - Q = 0,25, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	20,00%	2990	598,00	1,000
Sílica Ativa	16,05%	2180	349,83	0,585
Cinza Volante	16,74%	2210	369,94	0,619
Areia Osório	47,21%	2700	1274,76	2,132
Total	100,00%		2592,53	4,335

TRAÇO IDE 180 - Q = 0,2, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	20,00%	2990	598,00	1,000
Sílica Ativa	21,39%	2180	466,38	0,780
Cinza Volante	15,77%	2210	348,51	0,583
Areia Osório	42,84%	2700	1156,60	1,934
Total	100,00%		2569,48	4,30

TRAÇO IDE 214 - Q = 0,25, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	25,00%	2990	747,50	1,000
Sílica Ativa	13,17%	2180	287,13	0,384
Cinza Volante	12,87%	2210	284,52	0,381
Areia Osório	48,95%	2700	1321,77	1,768
Total	100,00%		2640,93	3,533

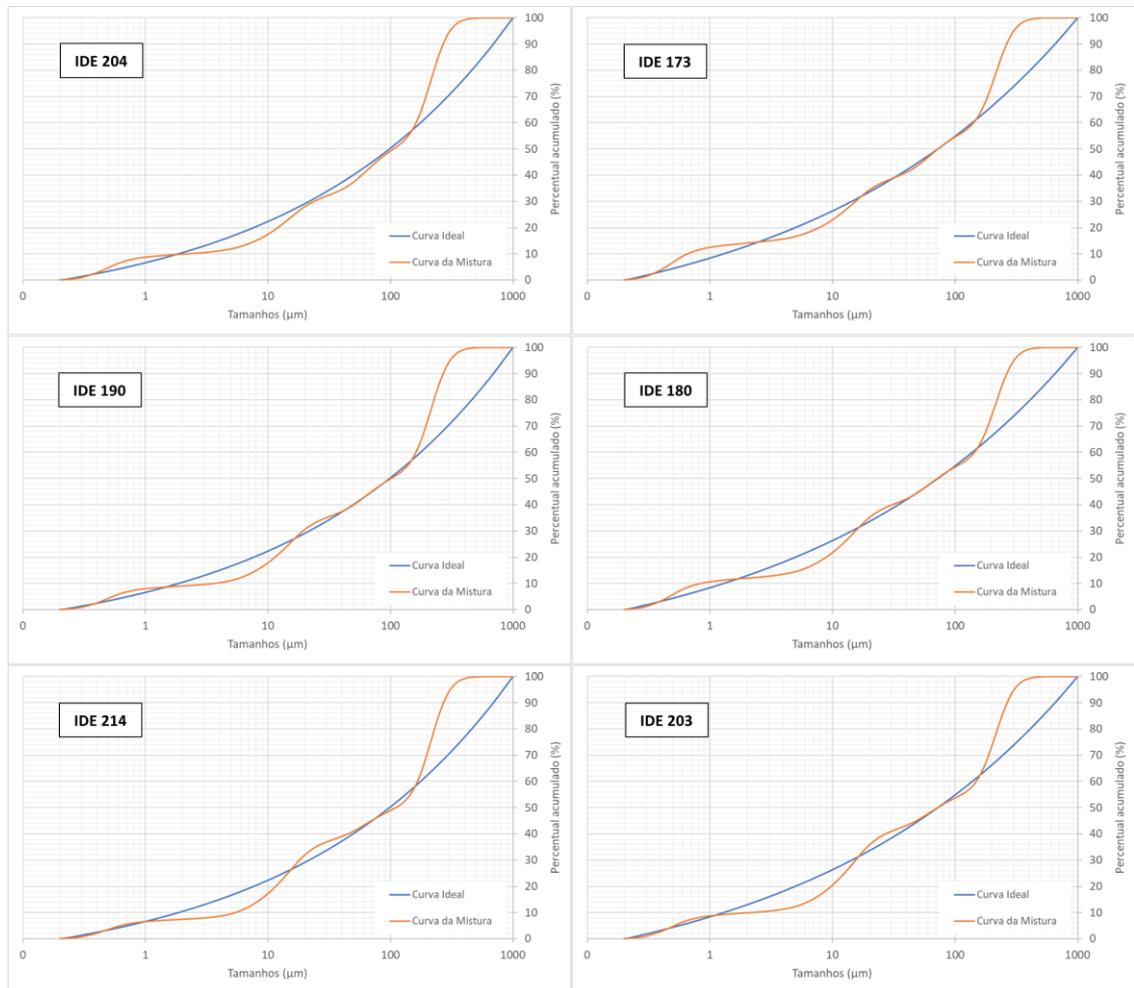
TRAÇO IDE 203 - Q = 0,2, DMAX = 497,8 µm, DMIN = 0,20 µm				
Materiais	%	Y (kg/m ³)	Consumo/ m ³	Traço Unitário
Cimento	25,00%	2990	747,50	1,000
Sílica Ativa	17,58%	2180	383,34	0,513
Cinza Volante	13,38%	2210	295,65	0,396
Areia Osório	44,04%	2700	1189,02	1,591
Total	100,00%		2615,51	3,50

Fonte: Próprio autor.

A Figura 29 apresenta as curvas granulométricas das seis misturas elaboradas conforme o módulo de distribuição da partícula (q) e o consumo percentual de cimento e graficamente mostra o IDE, que se define como a soma da área entre a curva ideal e a curva da mistura real. Ainda na mesma figura, tem-se as misturas com a mudança do “q”, sendo a esquerda a mistura com 0,25 e a direita 0,20. Os percentuais de cimento estão apresentados a cada linha da figura, iniciando por 15%, depois 20% e finalmente 25%.

Ainda é possível verificar com maior exatidão na Figura 29 o índice de desvio de empacotamento (IDE), que é a diferença entre a área entre a curva real e a curva idealizada das misturas.

Figura 29 – Curvas granulométricas mistura ideal A&A_{mod} x misturas propostas pelo método UNISINOS.



Fonte: próprio autor.

Na Tabela 13 são apresentados os diâmetros D_{90} , D_{50} e D_{10} das misturas elaboradas nesse trabalho, a fim de mostrar os nuances da variação do IDE e do módulo de distribuição das partículas “q”.

Tabela 13 – D_{90} , D_{50} e D_{10} das misturas de UHPC da pesquisa.

Traço	D_{90} (µm)	D_{50} (µm)	D_{10} (µm)
IDE 204	273,15	105,53	2,10
IDE 190	273,06	101,05	3,57
IDE 214	275,04	109,90	5,42
IDE 173	266,38	72,57	0,66
IDE 180	267,12	71,39	0,83
IDE 203	268,79	71,99	2,09

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que, como esperado, com a mudança do módulo de distribuição das partículas, há uma diminuição do D_{50} das misturas com “q” de 0,20 bem como a presença de partículas menores no D_{10} , isso se deve ao alongamento da curva de distribuição, ou seja, a incorporação de partículas mais finas nas misturas. Enquanto nas misturas de “q” 0,25, tem-se partículas granulares maiores tanto para D_{50} como D_{10} .

3.2.2 Determinação do teor máximo de fibras

Para determinação do teor máximo de fibras metálicas nos traços de UHPC, foi utilizado o método que leva em consideração a massa específica da mistura granular, sendo considerado o método mais eficiente para um UHPC, segundo relata Christ (2019). Para o método proposto, necessita-se de uma adaptação, uma vez que se retira o agregado graúdo da mistura. A equação para o teor máximo é proposta por Martinie, Rossi e Roussel (2010), mas sendo alterada a fração do volume de areia da dosagem e a fração de embalagem densa da mistura pela massa unitária da areia e a massa específica da areia, respectivamente. Dessa maneira o teor máximo de fibra é obtido pela equação (Equação 8) adaptada dos autores citados anteriormente.

$$T_{fibras} = \frac{400}{r} \times \left(1 - \frac{M_{unitária}}{M_{específica}} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Sendo que:

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 base nas massas específica e unitária da areia selecionada (2700 kg/m^3 e 1520 kg/m^3 , respectivamente) para as misturas, e aplicando o fator de forma da fibra metálica $r = 62$, tem-se o seguinte teor máximo de fibras.

$$T_{\text{fibras}} = \frac{400}{62} \times \left(1 - \frac{1520}{2700} \right) = 2,82\%$$

Apesar do percentual de 2,82% ser o máximo, foi utilizado no trabalho o percentual de 2,50%, devido a uma limitação quantitativa das fibras metálicas.

3.2.3 Processo de misturas

Para todos os traços foram adotados o mesmo procedimento de mistura, sendo realizado em um misturador planetário com capacidade de 300 litros, instalado dentro do Laboratório de Segurança Estrutural e de Durabilidade do Instituto it Performance/UNISINOS. O misturador possui controle de velocidade de giro das pás, variando de 0 a 100 rpm. A Figura 30 apresenta o equipamento.

Figura 30 – misturador planetário utilizado na pesquisa.



Fonte: Christ (2019).

A Tabela 14 apresenta as etapas de inserção dos materiais no misturador, bem como as velocidades de giro das pás adotados e o tempo estimado para cada etapa da mistura.

Tabela 14 – Procedimentos de etapas de misturas para todos os traços.

Descrição da etapa	Tempo (min)	RPM
Introdução dos materiais secos do traço	0 - 1	0
Pré-mistura dos materiais secos	1 - 2	5
Inserção de 100% da água de mistura para homogeneização com os materiais secos	2 - 3	10
Introdução de 100% do superplastificante	3 - 4	10
Mistura de todos os materiais em velocidade lenta	4 - 5	10
Mistura de todos os materiais em velocidade rápida	5 - 10	60
Inserção das Fibras metálicas	10 - 12	10
Final de mistura para homogeneização dos materiais com as fibras	12 - 15	60

Fonte: Próprio autor.

Após a finalização das misturas, todos os traços passaram pelo ensaio de espalhamento, de acordo com as prescrições da NBR 15823-2 (ABNT, 2017). Para todas as misturas foi definido um espalhamento mínimo de 600 mm. A Figura 31 ilustra o procedimento do ensaio.

Figura 31 – Espalhamento de mistura de UHPC



Fonte: Próprio autor.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos em camada única. Passados 24 horas de moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e

aconicionados em sala de cura úmida (temperatura $25\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ e 95% UR) até a idade de rompimento.

3.2.4 Ensaio no estado fresco

Para avaliação do estado fresco das misturas foi realizado por meio da NBR 15823-2 (2017), que preconiza o ensaio de espalhamento, determinação de estabilidade visual e o tempo de escoamento. A adoção dessa metodologia para avaliar o estado fresco das misturas se dá pelo fato das misturas de UHPC apresentarem trabalhabilidade similares a dos concretos autoadensáveis.

Para obtenção do espalhamento, foi realizada a leitura de duas medidas perpendiculares da circunferência formado pelo UHPC ao final de seu escoamento. O tempo de escoamento da mistura foi iniciado ao se retirar o tronco de cone, e finalizado quando a mistura atingiu a marcação dos 600 mm de diâmetro na placa base. Já o índice de estabilidade visual, procurou verificar a ocorrência de segregação ou exsudação, onde foram observados se as misturas apresentavam pilhas centrais na mistura e auréola de finos na extremidade das mesmas.

3.2.5 Ensaio no estado endurecido

Para avaliar as propriedades do estado endurecido dos traços de UHPC, foram realizados ensaio de resistência à compressão axial, fator de tenacidade e a resistência à flexão equivalente.

3.2.5.1 Resistência à compressão axial

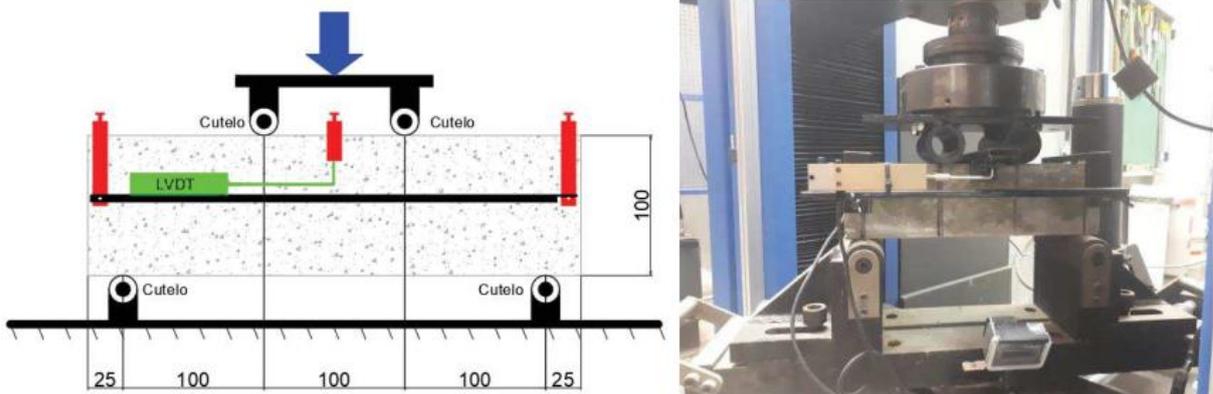
Ensaio da resistência à compressão axial das misturas é preconizado pela NBR 5739 (2018) para execução nos corpos cilíndricos de 10 cm x 20 cm, sendo confeccionados 10 corpos de prova, para avaliação da resistência aos 7 e 28 dias. Esses espécimes foram ensaiados no Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt Performance/UNISINOS, com uma prensa servo hidráulica da marca EMIC/Instron, com capacidade de carga de 2000 kN. Para cada tempo de avaliação foram rompidos cinco exemplares.

3.2.5.2 Resistência à flexão e fator de tenacidade

Para realização dos ensaios de resistência à flexão e o fator de tenacidade foi utilizada as prescrições da ASTM C1906-19 (ASTM, 2019). O método exposto pela norma 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 ($R^D_{R,150}$).

Para realização dos ensaios foram confeccionados 4 corpos de prova prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500mm, sendo aplicado um carregamento com deslocamento de 0,2 mm por minuto conforme prescrição normativa. O carregamento foi realizado por meio de quatro pontos, sendo dois apoios inferiores e 2 de aplicação de carga superior, conforme pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 – Esquema de ensaio normativo e ensaio sendo realizado.



Fonte: Christ (2019).

A resistência à tração na flexão dos corpos de prova na primeira fissura e após primeira fissura foi determinada por meio da Equação 9 – resistência à tração na flexão.

Equação 9 – resistência à tração na flexão

$$f = \frac{P \times L}{b \times d^2} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo que:

f – resistência (MPa);

P – carga (N);

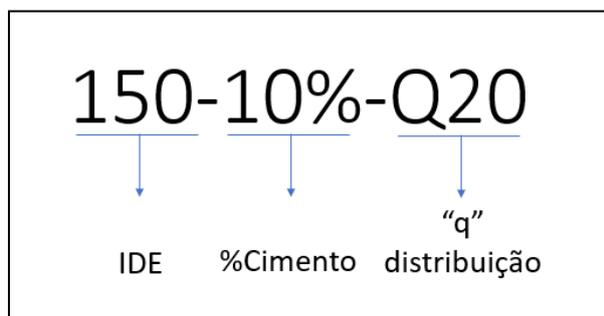
- L – comprimento do vão entre os apoios inferiores (mm);
- b – largura (mm);
- d – altura (mm).

Para determinação da tenacidade dos traços de UHPC, que corresponde à capacidade de absorção de energia, foi calculada a área da curva do gráfico carga versus deslocamento.

3.2.6 Identificação e apresentação dos resultados dos ensaios

Como já exposto, os traços desenvolvidos nessa pesquisa estão baseados em três percentuais de consumo de cimento (15%, 20% e 25%) e da variação do “q” de distribuição das partículas do modelo de A&A modificado. Com base nessas premissas, foram desenvolvidos seis traços de UHPC, identificados pelo IDE – Índice de Desvio de Empacotamento. Para um melhor entendimento e identificação das variáveis em relação aos resultados dos ensaios, os traços são apresentados da seguinte maneira (Figura 33):

Figura 33 – Identificação dos traços



Fonte: Próprio autor.

O primeiro item corresponde ao IDE obtido pelo método de dosagem; o segundo corresponde ao percentual de cimento para a mistura e; o terceiro relaciona-se ao “q” de distribuição.

3.2.7 Avaliação e tratamento estatístico dos dados

Com base nos resultados obtidos nos ensaios no estado endurecido, foi utilizada uma análise estatística por meio de uma Análise de Variância (ANOVA) e

posteriormente realizado o teste Tukey, de forma a verificar quais foram os fatores a exercerem efeito significativo sobre as variáveis de resposta. Tal método consiste na comparação entre as médias entre as amostras e a verificação das hipóteses.

Para realização das análises foi utilizado software estatístico (Action stat 3.7), com um nível de confiabilidade de 95% entre os efeitos dos fatores controle sobre as propriedades das misturas de UHPC.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises obtidos pelos ensaios no estado fresco e endurecido das misturas de UHPC propostos nessa pesquisa.

4.1 RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DAS MISTURAS

Para os traços de UHPC nessa pesquisa, o processo de mistura seguiu as mesmas etapas, tanto para ordem de colocação dos materiais no misturador, tempo de mistura e velocidade de rotação das pás. Observa-se que as misturas propostas apresentaram os valores de espalhamento superiores a 600 mm (diâmetros dos espalhamentos B1 e B2), conforme esperado, já que a reologia desse compósito é similar ao apresentado para um concreto autoadensável. Os valores obtidos no ensaio de espalhamento são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados do espalhamento das misturas

Misturas	Relação a/aglomerante	Espalhamento mm		Classificação espalhamento (prática recomendada Ibracon (2022))
		B1	B2	
204-15%-Q25	0,20	625	620	SF1
190-20%-Q25	0,20	810	800	SF3
214-25%-Q25	0,20	650	635	SF1
173-15%-Q20	0,20	780	800	SF3
180-20%-Q20	0,20	660	640	SF1
203-25%-Q20	0,20	660	650	SF1

Fonte: autor

Quanto ao primeiro parâmetro de análise, o coeficiente de distribuição de partículas “q”, nota-se que não se pode correlacionar o aumento ou decréscimo das aberturas com a variação do “q”. Ao se avaliar os pares de misturas com a variação do “q”, com os respectivos consumos de cimento (15%, 20% e 25%), não se verifica mudanças críticas no espalhamento. Nos pares 204 e 173 (15%), a diminuição do “q” gerou um leve aumento de espalhamento, enquanto que para os pares 190 e 180 (20%), a redução do coeficiente resultou em um decréscimo da abertura da mistura; e, por fim, os pares 214 e 203 (20%) não apresentaram mudanças significativas nos

espalhamentos. Avaliando os consumos de materiais pozolânicos das misturas (sílica ativa e cinza volante), a diminuição do coeficiente de distribuição gerou um aumento desses materiais, mas também não se mostraram relevantes para as mudanças de espalhamento de algumas misturas.

Vale lembrar que a pesquisa não buscou a mesma trabalhabilidade para todas as misturas, apenas se manteve a relação água/aglomerante constante, esperando que se pudesse fazer algum ajuste nessa relação caso os traços não apresentassem aberturas mínimas de 600mm. Vale salientar que o percentual de fibra adicionado às misturas (2,50%) não provocou perda de trabalhabilidade.

No trabalho de Christ (2019) também não se apresentou perda de trabalhabilidade devido à adição das fibras. Tal diagnóstico se deve ao método para o percentual máximo de incorporação dos filamentos, que leva em consideração o fator de forma das fibras e a densidade da mistura. Outros pesquisadores como Soroushian e Bayasi (1991), Banfill et al. (2006) e Martinie, Rossi e Roussel (2010) evidenciaram que o uso de percentual máximo de fibra pelo método proposto não acarretou perda de trabalhabilidade.

Torregrossa (2013) afirma que se tratando de UHPC, a variação de trabalhabilidade é comum, podendo variar de 650 a 800 mm, devido a fatores como relação água/aglomerante, teores de finos e o tipo de fibra. Assim, as misturas dessa pesquisa encontram-se em conformidade, ressaltando-se que, visualmente, também não foi possível verificar segregação de componentes ou das fibras.

A variação do “q” dessa pesquisa está dentro da faixa considerada por Ragalwar et al (2020), pois se obteve variações pouco significantes no espalhamento. Outros trabalhos relacionam que a abertura entre 600mm e 800mm são abertura comuns para misturas de concreto com boas relações de resistência à compressão. (BROUWERS; RADIX, 2005; FERRARA; PARK; SHAH, 2007; FELEKOĞLU; TÜRKEL; BARADAN, 2007).

For fim, quanto à classificação apresentada, segundo a prática recomendada IBRACON (2022), a maior parte das misturas está classificada como SF1 (espalhamento menor de 660 mm conforme tabela 2 da prática recomendada) e apenas duas misturas como SF3 (espalhamento maior que 760 mm). Ainda segundo a prática recomendada, as misturas devem permanecer fluidas sem que haja a segregação das fibras ou qualquer componente sólido da mistura, o que todas as misturas dessa pesquisa apresentaram. Portanto, segundo o espalhamento todas as

misturas desse trabalho são considerados UHPC's com boas propriedades quanto à consistência.

4.2 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MISTURAS

As resistências à compressão dos corpos de prova cilíndricos foram avaliadas para todas as misturas nas idades de 7, 28 e 91 dias. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – resultados das resistências à compressão MPa

Traço	Idades Avaliadas (dias)								
	7			28			91		
	Individual	Média	Potencial	Individual	Média	Potencial	Individual	Média	Potencial
IDE 204	58,30			88,30			107,50		
	55,80			92,30			118,20		
	59,20	57,68	59,20	100,05	96,20	100,30	103,90	110,68	118,20
	56,90			100,30			114,20		
	58,20			100,05			109,60		
IDE 190	73,70			143,30			156,63*		
	75,30			138,20			151,05*		
	80,20	78,75	80,20	134,10	138,30	143,30	146,57*	151,16	156,63
	73,80			138,00			150,83*		
	80,20			137,90			150,72*		
IDE 214	96,20			106,80			136,40		
	91,50			123,00			139,00		
	96,30	94,64	96,30	108,90	114,06	126,80	135,50	134,54	139,00
	93,50			126,80			131,00		
	95,70			104,80			130,80		
IDE 173	65,50			103,40			124,40		
	66,10			104,00			121,70		
	64,20	64,60	67,40	100,70	101,58	104,00	122,30	122,38	124,40
	67,40			100,00			120,80		
	59,80			99,80			122,70		
IDE 180	81,40			145,80			159,36*		
	83,20			141,30			154,44*		
	78,40	80,02	83,20	129,80	134,52	145,80	141,87*	147,03	159,36
	76,90			131,40			143,62*		
	80,20			124,30			135,86*		
IDE 203	102,40			115,10			132,30		
	100,40			122,20			138,40		
	95,60	98,94	102,40	123,40	123,20	127,70	135,80	136,54	141,40
	96,50			127,70			134,80		
	99,80			127,60			141,40		

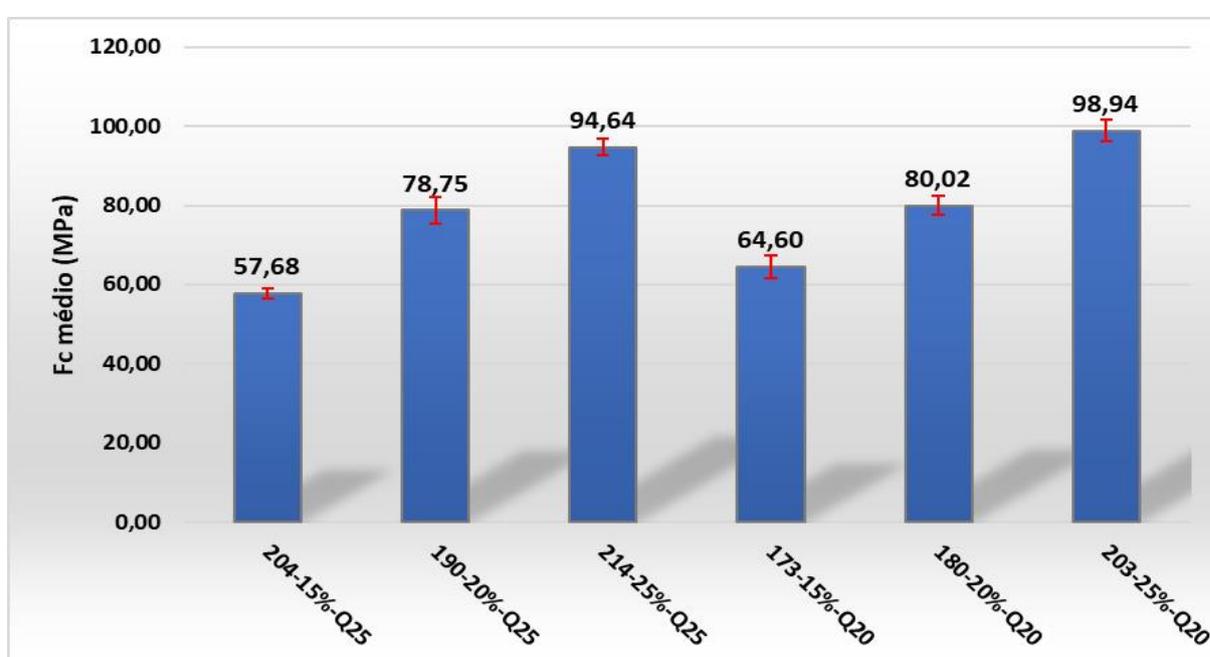
* Os resultados a compressão sofreram alguma interferência no ensaio, sendo assim utilizado a extrapolação de resistência segundo a NBR 6118:2014 - item 13.3.3

Fonte: próprio autor.

A nota de rodapé da Tabela 16 refere-se ao ensaio de compressão realizado nos corpos de prova das misturas com 20% de consumo de cimento. Houve uma falha durante a execução do ensaio (calibração da prensa ou retificação dos corpos de prova). Dessa maneira, conforme item 13.3.3 da NBR 6118 (2014), foi determinado o valor a ser atingido pela mistura, sendo ponderado o valor $\beta_1 = 1,09$ e multiplicado pelos valores dos corpos de prova de 28 dias para determinação dos valores de 91 dias.

O Gráfico 11 apresenta os resultados das médias de resistência à compressão das misturas da pesquisa aos 7 dias de cura padrão.

Gráfico 11 – Média das resistências aos 7 dias (MPa)



Fonte: próprio autor.

Pode-se evidenciar que o aumento do percentual de cimento de 15% de cimento para 25% elevou a resistência à compressão. Essa tendência também é apresentada na pesquisa de Ahmad et al. (2019), na qual as misturas com maior consumo de cimento resultaram em resistência maiores nas primeiras idades. Lv et al. (2022) também apresetaram essa tendência em seu trabalho, já que os traços com maiores quantidades de cimento obtiveram os melhores resistências à compressão aos 7 dias de análise. Ainda, Wu, Shi e He (2017) relatam que a cinza volante, em regime de cura padrão, tendencia a diminuição da resistência à compressão nas primeiras idades até os 7 dias, logo os traços com IDE 204, 190,

173 e 180 que apresentam maiores quantidade de cinza volante, obtiveram os menores valores de resistência à compressão, corroborando com os trabalhos da literatura.

Ao se avaliar a variação do “q” para as misturas com os mesmos percentuais de cimento, nota-se que a diminuição do parâmetro e conseqüentemente aumento de partículas finas nas misturas não acarretou mudanças para as resistências à compressão.

Quanto ao Índice de Desvio de Empacotamento (IDE), ao se avaliar todas as misturas, nota-se que os valores com maiores resistências não são as misturas com os menores IDE's. Esse padrão é notado também na pesquisa de Christ (2019) nas primeiras idades de verificação da resistência das misturas analisadas. É importante salientar que o método de dosagem UNISINOS tem como princípio o IDE, mas que a interação das reações químicas de hidratação do cimento e dos materiais cimentícios suplementares é fundamental para que o menor IDE resulte nas maiores resistências à compressão.

Para avaliar se houve diferenças estatísticas significativas entre os traços aos 7 dias de cura, foi realizado uma ANOVA (Tabela 17) e posteriormente as médias foram confrontadas por meio do teste Tukey ($P < 0,05$), para verificação de quais misturas diferiam entre si.

Tabela 17 – ANOVA resistência à compressão 7 dias

<i>Tabela da Anova – 7 dias</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma.de.Quadrados</i>	<i>Quadrado.Médio</i>	<i>Estat..F</i>	<i>P.valor</i>
Fator	5	6551,802667	1310,360533	197,9247086	1,08921E-18
Resíduos	24	158,892	6,6205		

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 18 são apresentadas a comparação da resistência à compressão entre as misturas de UHPC e na Tabela 19 o resumo dessa comparação. Demonstra-se que as misturas com os mesmos consumos de cimento não apresentaram diferenças estatísticas em relação às suas médias. Assim, os pares de IDE 203/214 e 180/190 possuem estatisticamente resistências iguais, o que evidencia, conforme já discutido anteriormente, que o parâmetro do modulo de distribuição de partículas não foi preponderante para mudanças na resistência à compressão.

Tabela 18 – Comparações das médias entre as misturas para resistência à compressão 7 dias.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
180-173	15,42	10,38841061	20,45158939	1,97053E-08
190-173	12,04	7,008410613	17,07158939	1,69333E-06
203-173	34,34	29,30841061	39,37158939	2,16493E-14
204-173	-6,92	-11,95158939	-1,888410613	0,003361147
214-173	30,04	25,00841061	35,07158939	3,76366E-14
190-180	-3,38	-8,411589387	1,651589387	0,331758325
203-180	18,92	13,88841061	23,95158939	3,43701E-10
204-180	-22,34	-27,37158939	-17,30841061	1,05029E-11
214-180	14,62	9,588410613	19,65158939	5,3799E-08
203-190	22,3	17,26841061	27,33158939	1,09153E-11
204-190	-18,96	-23,99158939	-13,92841061	3,29164E-10
214-190	18	12,96841061	23,03158939	9,45608E-10
204-203	-41,26	-46,29158939	-36,22841061	2,10942E-14
214-203	-4,3	-9,331589387	0,731589387	0,125330052
214-204	36,96	31,92841061	41,99158939	2,10942E-14

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19 – Agrupamento das misturas por IDE para 7 dias de resistência à compressão.

Agrupamento		
Fator	Médias	Grupos
203	98,94	a
214	94,64	a
180	80,02	b
190	76,64	b
173	64,6	c
204	57,68	d

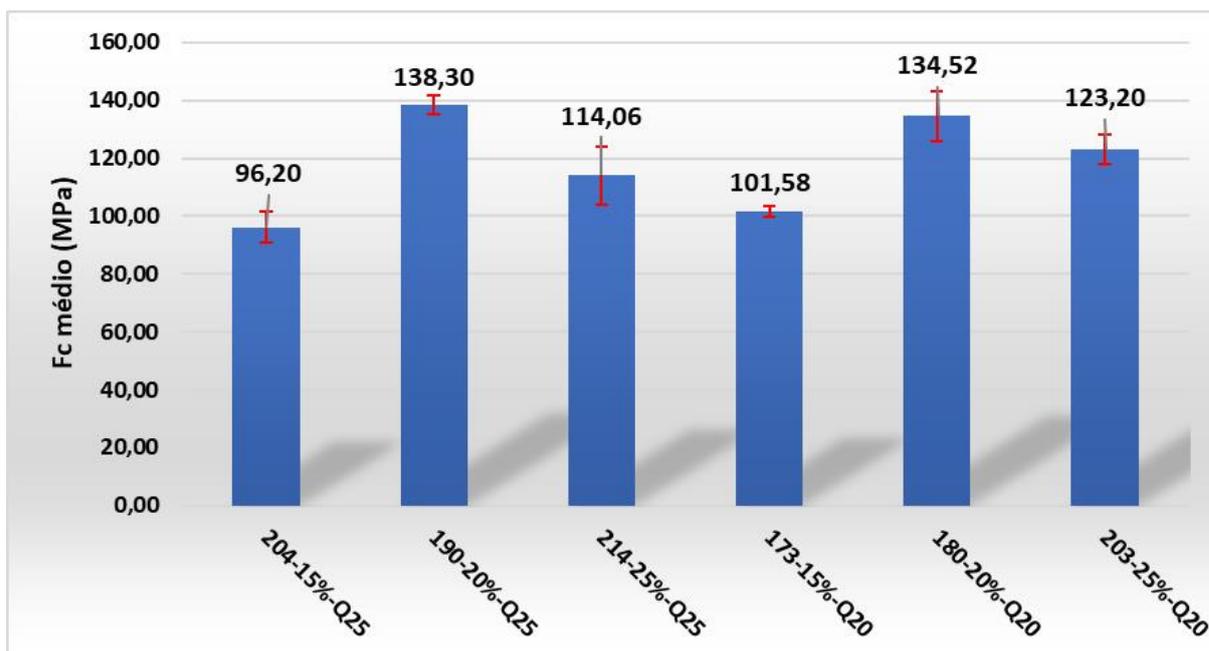
Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado, nota-se que a ANOVA mostrou que há diferenças significativas entre as resistências aos 7 dias de cura.

Já os traços 173 e 204, que possuem o consumo de cimento de 15%, mostraram ser diferentes estatisticamente, sendo o primeiro com o maior valor de resistência, o que pode ser explicado por uma maior relação cimento/agregado, o que daria uma quantidade maior de cimento inicialmente para hidratação. Essa tendência também é apresentada por Hasnat e Ghafoori (2021), ao avaliarem a relação entre materiais cimentantes e volume de agregado miúdo na resistência à compressão nas idades iniciais.

No Gráfico 12 são apresentados os valores médios das resistências à compressão aos 28 dias das misturas dessa pesquisa.

Gráfico 12 – Resistência à compressão 28 dias



Fonte: Próprio autor.

Com o avançar da idade de cura, as misturas com os menores IDE's começaram a apresentar as maiores resistências à compressão, como pode-se observar no Gráfico 12, sendo esses os traços com IDE 190 e 180 com valores de 138,30 e 134,52 MPa respectivamente. Já o traço 173 exibiu uma das menores resistências à compressão aos 28 dias, apesar de ser o menor IDE de todos. Essa perda de resistência pode estar atrelada ao menor percentual de cimento disponível para as reações de hidratação e menor formação de produtos secundários de hidratação com os materiais cimentícios suplementares (sílica ativa e cinza volante).

Ao se avaliar a variação do coeficiente de distribuição de partículas "q" de 0,25 para 0,20 para as misturas com o mesmo percentual de cimento, não houve mudanças relevantes nas resistências à compressão aos 28 dias, esse mesmo panorama é apresentado aos 7 dias. Esse resultado dá a tendência que variações pequenas do coeficiente de distribuição de partículas "q" não demonstram influência na resistência à compressão das misturas de UHPC.

Ao se verificar o parâmetro consumo de cimento, uma tendência de aumento de resistência foi observada entre as misturas de 15% e 20% com um ganho de resistência de, aproximadamente 30%. Já com o aumento do percentual de consumo de cimento de 20% para 25%, notou-se uma inversão da observação anterior, pois se obteve uma queda na resistência à compressão em média de 11%.

Duas situações são de destaque nessas observações: a primeira que há uma tendência de percentual ótimo de consumo de cimento nas misturas analisadas, em torno dos 20% e; a segunda está quanto a queda da resistência à compressão com o aumento do consumo de cimento de 20% para 25%, e esse fator pode estar atrelado a uma quantidade menor de materiais cimentícios suplementares (sílica ativa e cinza volante). Outro ponto que pode justificar a diminuição da resistência dessas misturas é o empacotamento da mistura, conforme avaliam Soliman e Tagnit-Hamou (2017), que em misturas com menor quantidade de cimento e melhor empacotamento, obtiveram as melhores resistências à compressão. Ding et al. (2021) também observaram a mesma tendência, onde as misturas com menor consumo de cimento, mas com uma curva de empacotamento mais próxima da curva idealizada apresentaram resistências à compressão superiores a outras misturas. Shi et al. (2021) também obtiveram resultados semelhantes, onde as misturas com refino no empacotamento (devido a adição de nano partículas de fíler) obtiveram as melhores resistências à compressão em comparação a mistura padrão com maior consumo de cimento.

Assim como para os 7 dias de cura, para os 28 dias foi realizado uma análise de variância (ANOVA) (Tabela 20) para verificação das mudanças significativas nas resistências à compressão, e realizado um teste Tukey para avaliar as misturas que foram diferentes.

Tabela 20 – ANOVA das resistências à compressão aos 28 dias.

Tabela da Anova – 28 dias					
	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	5746,858417	1149,371683	42,17728117	4,04771E-11
Resíduos	24	654,0232	27,25096667		

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 21 apresenta as comparações das misturas, e a Tabela 22 resume essas interações.

Tabela 21 – Comparações das médias entre as misturas para resistência à compressão 28 dias.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
180-173	32,94	20,2805465	45,5994535	3,98987E-07
190-173	36,72	24,0605465	49,3794535	5,55684E-08
203-173	21,62	8,960546503	34,2794535	0,000266404
204-173	-5,38	-18,0394535	7,279453497	0,774644642

214-173	12,48	-0,179453497	25,1394535	0,054924863
190-180	3,78	-8,879453497	16,4394535	0,936587114
203-180	-11,32	-23,9794535	1,339453497	0,098624292
204-180	-38,32	-50,9794535	-25,6605465	2,49276E-08
214-180	-20,46	-33,1194535	-7,800546503	0,000536698
203-190	-15,1	-27,7594535	-2,440546503	0,013010318
204-190	-42,1	-54,7594535	-29,4405465	4,04574E-09
214-190	-24,24	-36,8994535	-11,5805465	5,54317E-05
204-203	-27	-39,6594535	-14,3405465	1,0974E-05
214-203	-9,14	-21,7994535	3,519453497	0,26023211
214-204	17,86	5,200546503	30,5194535	0,002570284

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22 - Agrupamento das misturas por IDE para 28 dias de resistência à compressão.

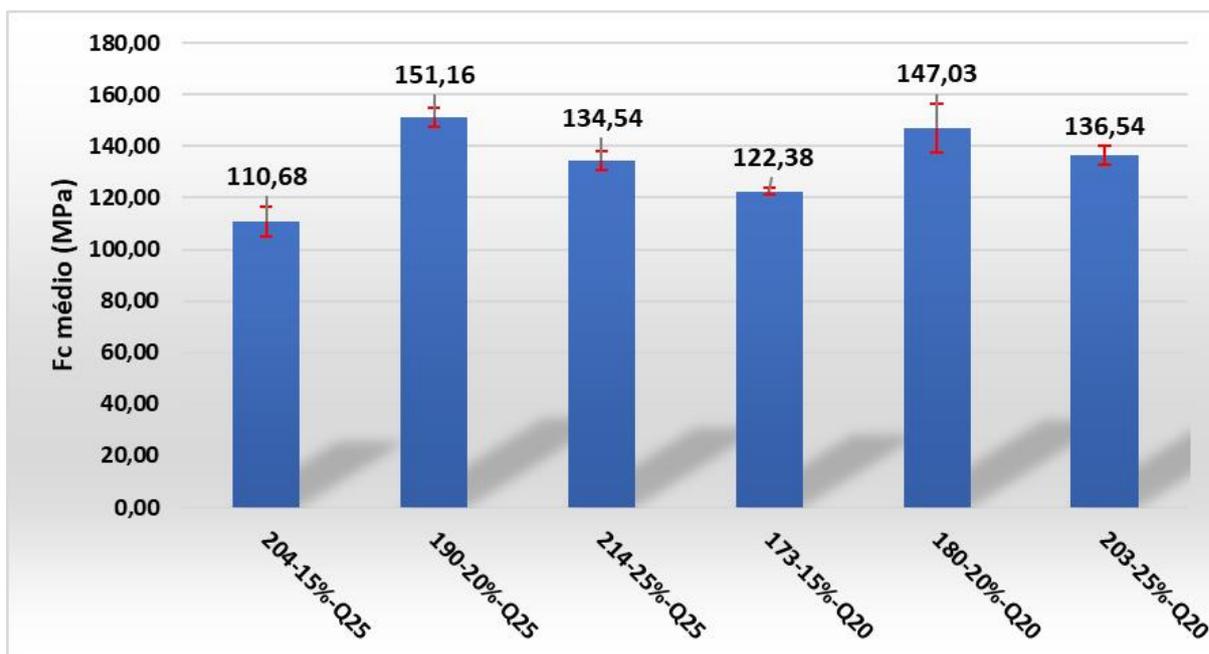
<i>Fator</i>	<i>Agrupamento</i>	
	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
190	138,3	a
180	134,52	ab
203	123,2	bc
214	114,06	cd
173	101,58	de
204	96,2	e

Fonte: Próprio autor.

Conforme a Tabela 20, a ANOVA mostrou que houve diferenças quando comparados as seis misturas entre si. Notou-se que, novamente, os traços com os mesmos percentuais de cimento apresentam estatisticamente as mesmas resistências à compressão, indicando novamente que a variação do módulo de distribuição das partículas não foi influente nas resistências à compressão. É possível também notar a influência do IDE no aspecto da resistência, sendo os traços IDE 190 e 180 com os maiores valores de resistência à compressão no agrupamento das médias estatísticas. Conforme já salientado, o traço de IDE 173, devido ao baixo consumo de cimento, não conseguiu atingir resistências maiores.

O Gráfico 13 apresenta os resultados dos valores das médias das resistências à compressão das misturas de UHPC com 91 dias de cura.

Gráfico 13 – Resistência à compressão 91 dias.



Fonte: Próprio autor.

O resultados obtidos aos 91 dias ilustram as mesmas tendências obtidas pelas misturas aos 28 dias, nas quais as com menor IDE (190 e 180) obtiveram as maiores resistências à compressão. Quanto a mudança do coeficiente “q” 0,25 para 0,20 não houve diferenças significativas de resistência à compressão entre os traços com o mesmo consumo de cimento.

Essa tendência de efeito não relevante para “q” também foi apresentada por Liu et al. (2022), que avaliaram o efeito do “q” e do $D_{m\acute{a}x}$ para misturas de UHPC e descobriram que para valores fixos de $D_{m\acute{a}x}$, as alterações de “q” entre 0,21 e 0,27 não produziram diferenças expressivas na resistência à compressão das misturas de UHPC. Wang et al. (2022) também avaliaram o “q” de distribuição quanto a análise da resistência à compressão no UHPC. Os autores testaram a redução do “q” entre 0,23 (considerada ótima pela literatura para UHPC) até 0,16, e chegaram a conclusão que os valores entre 0,23 e 0,19 teriam as melhores resistências à compressão, mas com valores bem semelhantes. Já abaixo dessa faixa, se mostraram prejudiciais, devido ao aumento de partículas finas nas misturas.

Já para o consumo de cimento, observou-se que a tendência de teor ótimo apresentado aos 28 dias se repetiu aos 91 dias, pois os traços com 20% de cimento mostraram as maiores resistências à compressão entre as misturas analisadas.

Houve um aumento de resistência do consumo de cimento de 15% para 20% e uma queda dessa propriedade do aumento de cimento de 20% para 25%.

Notou-se que, aos 28 e 91 dias, os traços com as melhores resistências à compressão foram os com valores mais baixos de IDE (180 e 190). Um dos pressupostos para as propriedades elevadas do UHPC está quanto a sua densificação das partículas. Lv et al. (2022) apresentam a avaliação da densificação de UHPC com cinza volante e sílica ativa, mostrando que as misturas com melhor densificação obtiveram a maior resistência à compressão, resultado semelhante aos obtidos nessa pesquisa.

As misturas de IDE 204 e 173 apresentam tanto aos 28 como 91 dias as menores resistências à compressão desse estudo. Em comparação ao empacotamento das partículas, percebeu-se que, aos 91 dias, a resistência da mistura 173 foi ligeiramente maior que a de IDE 204, o que mostra que para parâmetros de consumo de cimento iguais, mas IDE's diferentes, o empacotamento e o menor IDE conseguem produzir misturas mais densas e resistentes.

Por outro lado, as duas misturas possuem o menor consumo de cimento dessa pesquisa (15%), o que leva a analisar que o menor consumo de cimento e alto teor de materiais pozzolânicos não reativos foram responsáveis pela queda da resistência dessas misturas em comparação às demais. Hasnat e Ghafoori (2021) relatam a mesma observação, e afirmam que a presença de muitas pozolanas primariamente não reativas, a falta de CH produzidos a partir do ligantes para originar as reações secundárias e a disponibilidade de água livre para hidratação secundária formam os pontos primordiais para queda da resistência à compressão. Yazici, Deniz e Baradan (2013) relatam que um grande número de partículas cimentícias permanecem desidratadas, mesmo após 28 dias de cura, pela falta de água para reação de hidratação.

Mehta e Monteiro (2008) descrevem que materiais pozzolânicos maiores que 45 μm não têm capacidade de participar da reação pozzolânica secundária para produzir produtos de hidratação. Notou-se que, nas duas misturas com IDE de 204 e 173, o percentual de cinza volante foi de 20,3% e 17,6%; e que 25% das partículas de cinza volante estão acima dos 45 μm . Dessa maneira, é um dos fatores também para redução da resistência à compressão.

Outro ponto que pode estar atribuído a menor resistência das misturas com 15% de cimento está relacionado ao alto consumo de sílica ativa, como afirmam

Ragalwar et al. (2020), pois a grande quantidade de sílica ativa pode reduzir a resistência à compressão, devido a falta de hidróxido de cálcio para hidratação secundária, como também levar a uma maior retenção de ar e consequentemente propriedades de endurecimento ruins.

Por fim, a ANOVA e o teste Tukey foram empregados para verificar os resultados da resistência à compressão aos 91 dias de cura.

Tabela 23 - ANOVA das resistências à compressão aos 91 dias.

Tabela da Anova					
	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	5746,858417	1149,371683	42,17728117	4,04771E-11
Resíduos	24	654,0232	27,25096667		

Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado na Tabela 24, nas interações entre as misturas e resumido na Tabela 25, os pares de misturas com mesmo percentual de cimento, mostraram não possuir diferenças estatística significativa.

Tabela 24 - Comparações das médias entre as misturas para resistência à compressão 91 dias.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
180-173	24,65	14,44176278	34,85823722	1,45255E-06
190-173	28,78	18,57176278	38,98823722	9,40265E-08
203-173	14,16	3,951762778	24,36823722	0,003074653
204-173	-11,7	-21,90823722	-1,491762778	0,018201248
214-173	12,16	1,951762778	22,36823722	0,013161128
190-180	4,13	-6,078237222	14,33823722	0,807592858
203-180	-10,49	-20,69823722	-0,281762778	0,04154574
204-180	-36,35	-46,55823722	-26,14176278	1,03814E-09
214-180	-12,49	-22,69823722	-2,281762778	0,010400185
203-190	-14,62	-24,82823722	-4,411762778	0,002185732
204-190	-40,48	-50,68823722	-30,27176278	1,14879E-10
214-190	-16,62	-26,82823722	-6,411762778	0,00048995
204-203	-25,86	-36,06823722	-15,65176278	6,38022E-07
214-203	-2	-12,20823722	8,208237222	0,989583491
214-204	23,86	13,65176278	34,06823722	2,50796E-06

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25 - Agrupamento das misturas por IDE para 91 dias de resistência à compressão.

Agrupamento		
Fator	Médias	Grupos
190	151,16	a
180	147,03	a
203	136,54	b
214	134,54	b
173	122,38	c
204	110,68	d

Fonte: Próprio autor.

A análise de variância mostra que houve diferenças estatísticas nas resistências à compressão nas misturas da pesquisa (Tabela 23).

Assim, destaca-se a relevância do método de dosagem UNISINOS (2019), bem como a importância de buscar IDE's menores para as melhores resistências à compressão.

4.3 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E TENACIDADE

As resistências dos ensaios de tração na flexão máxima (f_p), a resistência à tração na primeira fissura (f_1), bem como a tenacidade e a resistência à flexão equivalente ($R^D_{R,150}$) são apresentados na Tabela 26 para todos os traços dessa pesquisa.

Tabela 26 – Resultados ensaio a flexão 28 e 91 dias das misturas de UHPC da pesquisa.

Traço	Idades Avaliadas (dias)							
	28							
	f_p		F_1		T_{150}		$R^D_{R,150}$	
IDE 204	13,38	14,45	6,44	6,44	221,91	297,92	0,1532	0,2071
	14,45		6,39		297,92		0,2071	
IDE 190	5,81	6,32	4,68	4,68	99,55	115,33	0,0946	0,1120
	6,32		4,58		115,33		0,1120	
IDE 214	13,27	16,52	10,52	10,52	229,49	309,88	0,0970	0,1418
	16,52		9,71		309,88		0,1418	
IDE 173	13,45	14,43	6,51	7,00	223,11	266,47	0,1523	0,1692
	14,43		7,00		266,47		0,1692	
IDE 180	9,65	11,38	5,66	6,33	154,04	205,72	0,1210	0,1444
	11,38		6,33		205,72		0,1444	
IDE 203	13,45	13,45	9,54	9,54	246,60	246,60	0,1149	0,1149
	12,40		9,38		205,52		0,0974	

Traço	91							
	F_p		F_1		T_{150}		$R^D_{R,150}$	
IDE 204	13,07	14,37	6,02	6,25	246,24	246,24	0,1819	0,1819
	14,37		6,25		227,15		0,1616	
IDE 190	7,69	7,69	5,75	5,75	130,39	130,39	0,1008	0,1110
	6,52		3,80		94,86		0,1110	
IDE 214	14,30	16,39	9,89	11,19	248,08	297,73	0,1115	0,1183
	16,39		11,19		297,73		0,1183	
IDE 173	15,98	15,98	6,40	6,97	282,79	282,79	0,1964	0,1964
	15,93		6,97		278,33		0,1776	
IDE 180	10,53	10,53	7,25	7,25	164,28	164,28	0,1007	0,1186
	9,05		6,05		161,54		0,1186	
IDE 203	17,68	17,68	7,52	9,15	304,77	304,77	0,1802	0,1802
	17,51		9,15		303,78		0,1476	

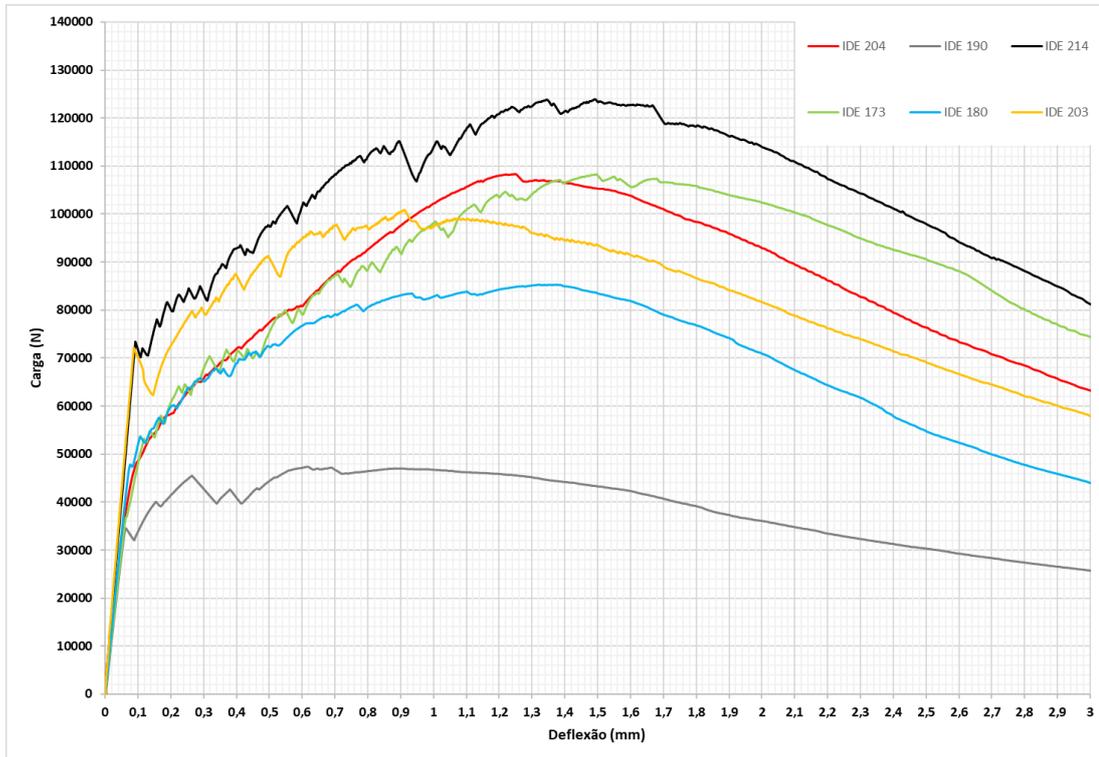
Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 26, é possível realizar uma análise geral sobre o ensaio de flexão das misturas aos 28 e 91 dias. Ressalta-se que todas as misturas possuíam adição de 2,50% de fibra de aço com pontas em forma de gancho.

É possível notar o comportamento dúctil, conforme relatam Hasnat e Ghafoori (2021), pois a adição das fibras aumentou a capacidade de deformação de flexão, em todas as misturas de UHPC desse trabalho, de modo que a resistência à tração na flexão máxima (F_p) foi maior que a resistência à primeira fissura (F_1). Outro ponto importante a se notar é que entre os 28 dias e os 91 dias de cura não houve ganhos relevantes de resistência. Christ (2019) também obteve a mesma tendência de não aumento significativo de resistência em sua mistura ao avaliar o percentual de fibra.

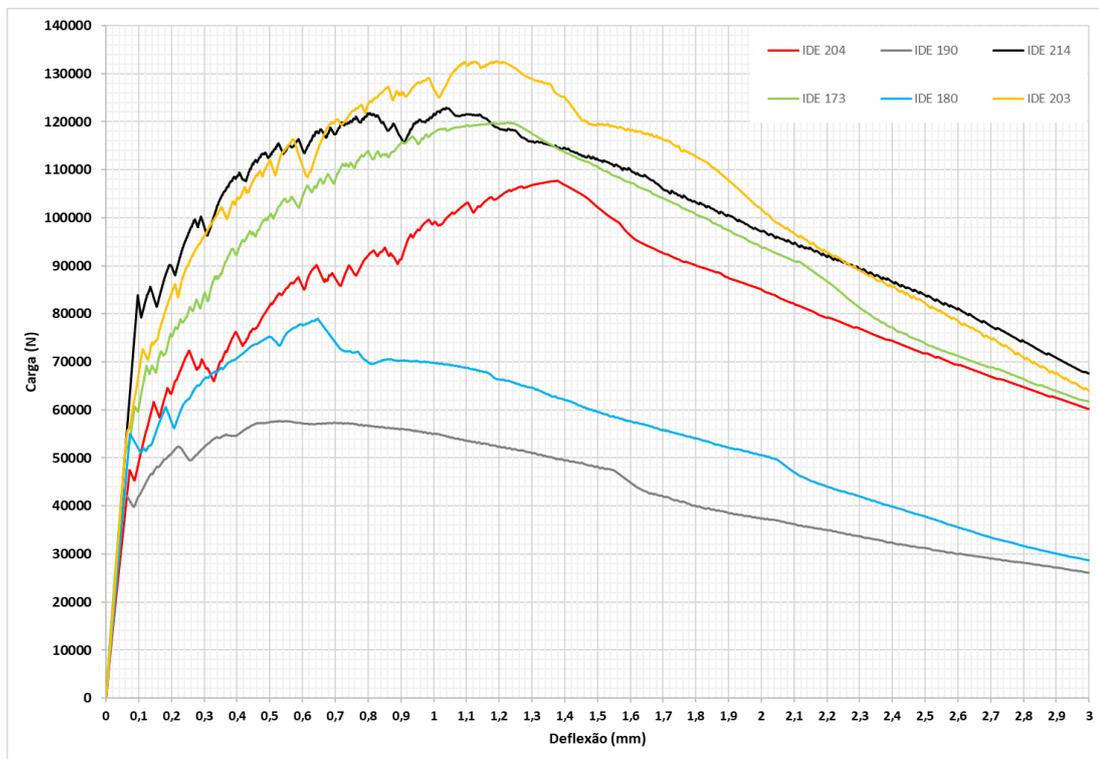
Os Gráfico 14 e Gráfico 15 apresentam as curvas carga deflexão das misturas de UHPC aos 28 e 91 dias de cura.

Gráfico 14 – Carga x deflexão misturas 28 dias.



Fonte: próprio autor.

Gráfico 15 – Carga x deflexão misturas 91 dias.



Fonte: Próprio autor.

Conforme observado nos gráficos anteriores, a deformação plástica do UHPC ocorreu após o surgimento da primeira fissura, e antes disso apresentou um comportamento elástico linear. É importante notar que a adição das fibras desempenha um papel de ancoragem quando as primeiras trincas surgem no UHPC, dessa forma o módulo de elasticidade da matriz não se anula quando a deformação linear limite é atingida. Assim as fibras suportam todo estresse quando a rachaduras aparecem e, em seguida, o transfere gradualmente para a matriz (RUI et al., 2022).

Ainda, quanto aos resultados apresentados na Tabela 26, observa-se que entre 28 e 91 dias não houve uma pequena mudança de resistência tanto na primeira fissura, como na resistência máxima, mostrando que o ganho de resistência mostrado na compressão não teve relação direta com a resistência à flexão das misturas de UHPC. Comportamento semelhante foi observado por Medicis et al. (2022), que, ao avaliarem a relação entre resistência à compressão e flexão em UHPC, havia uma tendência de redução da resistência à flexão na mistura com maior resistência à compressão. Hasnat e Ghafoori (2021) mostram que a resistência à flexão, para um mesmo teor de fibra, não tem uma relação direta com a resistência à compressão e não se pode atrelar necessariamente que as maiores resistências à compressão terão necessariamente as maiores resistências à flexão.

Nota-se que as resistências a flexão das misturas não sofreram mudanças consideráveis tanto na resistência a primeira fissura, na resistência máxima e também na tenacidade quando se valia os traços com mesmo consumo de cimento e mudança apenas do parâmetro de distribuição das partículas “q”.

Foi realizado a ANOVA para as resistências máximas nos resultados a flexão apresentados na Tabela 26, a fim de verificar estatisticamente os valores apresentados no ensaio. As Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29 trazem os resultados da estatística da resistência máxima (F_p) a flexão aos 28 dias.

Tabela 27 – ANOVA resistência máxima (F_p) a flexão aos 28 dias.

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma.de.Quadrados</i>	<i>Quadrado.Médio</i>	<i>Estat..F</i>	<i>P.valor</i>
Fator	5	108,172175	21,634435	15,25046378	0,00234133
Resíduos	6	8,51165	1,418608333		

Fonte: Próprio autor.

Tabela 28 – Comparações das resistências máximas (F_p) entre IDE's 28 dias.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
180-173	-3,425	-8,165210223	1,315210223	0,168501765
190-173	-7,875	-12,61521022	-3,134789777	0,004428687
203-173	-1,015	-5,755210223	3,725210223	0,945517189
204-173	-0,025	-4,765210223	4,715210223	0,999999999
214-173	0,955	-3,785210223	5,695210223	0,956951329
190-180	-4,45	-9,190210223	0,290210223	0,064895376
203-180	2,41	-2,330210223	7,150210223	0,424271089
204-180	3,4	-1,340210223	8,140210223	0,172517073
214-180	4,38	-0,360210223	9,120210223	0,069163473
203-190	6,86	2,119789777	11,60021022	0,008982497
204-190	7,85	3,109789777	12,59021022	0,004502875
214-190	8,83	4,089789777	13,57021022	0,002414079
204-203	0,99	-3,750210223	5,730210223	0,950483411
214-203	1,97	-2,770210223	6,710210223	0,598538364
214-204	0,98	-3,760210223	5,720210223	0,952388922

Fonte: próprio autor.

Tabela 29 – Resumo comparações das resistências máximas (F_p) entre IDE's 28 dias.

Fator	Agrupamento	
	Médias	Grupos
214	14,895	a
173	13,94	a
204	13,915	a
203	12,925	a
180	10,515	ab
190	6,065	b

Fonte: próprio autor.

Com resultado da ANOVA, nota-se que ao analisar todas as misturas há diferenças estatísticas entre as resistências máximas. Realizando o teste Tukey, é possível verificar quais das misturas se mostrou diferentes. Assim, nota-se que todas as misturas, exceto a com IDE 190, estatisticamente podem ser considerados iguais, o que se leva ao entendimento que a variação do fator “q” e o consumo de cimento, aos níveis utilizados nessa pesquisa, não se foram relevantes para alterações significativas na resistência máxima a flexão.

Como apresentado, os traços com as menores resistências à flexão, são as misturas de IDE 180 e 190, sendo essas as com maiores resistências à compressão, o que mostra uma tendência de relação inversamente proporcional entre as propriedades.

Nas Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32 apresentam a ANOVA e o teste Tukey realizados com as médias das resistências máximas à flexão aos 91 dias. A análise estatística é apresentada a seguir.

Tabela 30 – ANOVA resistência máxima (F_p) a flexão 91 dias.

Tabela da Anova					
	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	5	161,0771667	32,21543333	40,06562474	0,000156131
Resíduos	6	4,8244	0,804066667		

Fonte: próprio autor.

Tabela 31 – interação entre os IDE's resistência à flexão máxima (F_p) 91 dias.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
180-173	-6,165	-9,733719208	-2,596280792	0,003606934
190-173	-8,85	-12,41871921	-5,281280792	0,000498794
203-173	1,64	-1,928719208	5,208719208	0,512211752
204-173	-2,235	-5,803719208	1,333719208	0,258196811
214-173	-0,61	-4,178719208	2,958719208	0,977904197
190-180	-2,685	-6,253719208	0,883719208	0,147480297
203-180	7,805	4,236280792	11,37371921	0,00100582
204-180	3,93	0,361280792	7,498719208	0,032909302
214-180	5,555	1,986280792	9,123719208	0,006205681
203-190	10,49	6,921280792	14,05871921	0,000190474
204-190	6,615	3,046280792	10,18371921	0,002478961
214-190	8,24	4,671280792	11,80871921	0,000744177
204-203	-3,875	-7,443719208	-0,306280792	0,035034701
214-203	-2,25	-5,818719208	1,318719208	0,253488077
214-204	1,625	-1,943719208	5,193719208	0,520218429

Fonte: próprio autor.

Tabela 32 – Resumo das interações resistências máximas (F_p) à flexão 91 dias.

Fator	Agrupamento	
	Médias	Grupos
203	17,595	a
173	15,955	ab
214	15,345	ab
204	13,72	b
180	9,79	c
190	7,105	c

Fonte: próprio autor.

Aos 91 dias de cura, a tendência da relação inversamente proporcional entre a resistência à flexão e à compressão, ficam ainda mais evidentes conforme apresentado na Tabela 32. Novamente a ANOVA (Tabela 30) entre as misturas mostraram diferenças estatísticas, sendo os traços de IDE 180 e 190 com as resistências à flexão mais distantes dos demais traços.

Essa tendência de perda de resistência a flexão em misturas com valores maiores de resistência à compressão é apresentada por Wu, Shi e He (2017) e resultados semelhantes também são encontrados na pesquisa de Wang e Gao (2016). Zhang et al. (2022) apresentam em sua pesquisa ao avaliar a substituição do cimento por metacaulim, os resultados de resistência à compressão e à flexão, e pode-se observar que as misturas com maiores resistências a compressão não apresentavam as maiores resistências à flexão. Segundo os autores, esse aumento da resistência à flexão está atrelado a melhora da ITZ, e que, portanto, está ligado a melhor ligação entre a matriz e a fibra de aço. Destacam ainda que apesar da mistura com melhor resistência à flexão, possuir maior porosidade, o que acarreta numa perda de resistência á compressão, o efeito inicial da ligação matriz/fibra é mais preponderante.

De maneira geral ao se analisar o ensaio de resistência à flexão pelo método de dosagem UNISINOS (2019), é notório que o índice de desvio de empacotamento (IDE) não é um fator preponderante para a busca da melhor resistência dessa propriedade. Também é importante ressaltar que o módulo de distribuição das partículas “q” variando de 0,25 a 0,20 também não provocou mudanças significativas ao se avaliar os pares de misturas bem com também não se pode afirmar que a mudança do segundo parâmetro analisado, o consumo de cimento, é outro fator inerente ao melhoramento da propriedade à flexão.

5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo é apresentado as principais conclusões obtidas nessa pesquisa a fim de responder os objetivos propostos, além de trazer as sugestões de trabalhos futuros que são objetos de constatações encontradas durante esse trabalho.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve por objetivo geral avaliar o método de dosagem UNISINOS, desenvolvido por Christ (2019), a fim de verificar parâmetros que poderiam influenciar nas propriedades do estado fresco e endurecido desse compósito cimentício.

Quanto a eficácia do método de dosagem, o primeiro ponto importante está relacionado a seleção dos materiais. Apesar de ser um método que tem por finalidade a praticidade de execução para obtenção de concretos de ultra alto desempenho, a escolha dos materiais dentre os disponíveis afim de se verificar as superposições das faixas granulométricas deve ser o marco inicial para qualquer projeto de mistura pretendido.

O módulo de distribuição das partículas “q” e o percentual de consumo de cimento foram os fatores variáveis que geraram os índices de desvio de empacotamento (IDE) responsável por gerar a quantidade de cada material pré selecionado para a elaboração das seis misturas de UHPC propostas nessa pesquisa. Essas foram submetidas a ensaios de trabalhabilidade e de resistências à compressão axial e à flexão afim de verificar a influência desses fatores nas propriedades do estado fresco e endurecido.

A variação do percentual do consumo de cimento (15%, 20% e 25%) bem como a do módulo de distribuição das partículas “q” (0,25 e 0,20) não tiveram influência na trabalhabilidade das misturas dessa pesquisa. A variação dos espalhamentos entre 660 e 800 mm estavam dentro dos limites de trabalhos da literatura e também descreve uma classificação de UHPC que se auto adensa.

Na resistência à compressão, a mudança do fator “q” não mostrou influência em nenhuma das idades de cura (7, 28 e 91 dias) o que demonstra que variações pequenas desse módulo não altera a resistência à compressão. Quanto ao

percentual de consumo de cimento, que gerou misturas com IDE diferentes para um mesmo fator “q” esse mostrou ser significativo nas propriedades de resistência à compressão.

Aos 7 dias os traços com maiores consumos de cimento foram o que obtiveram as maiores resistências, devido a uma quantidade alta de cimento de a hidratação rápida desse material. Ainda nessa idade o IDE não se mostrou relevante nessa propriedade. Já aos 28 e 91 dias, o IDE se demonstrou eficaz, onde os traços com menores IDE's (180 e 190) foram os traços que obtiveram as maiores resistências à compressão, evidenciando o efeito do melhor empacotamento granular das misturas.

Quanto à resistência à flexão, destaca-se que a variação do “q” não foi significativa para variações dessa propriedade. Já a variação do IDE mostrou a tendência de uma relação inversa, onde os traços com as maiores resistência à flexão, demonstraram ser as misturas de UHPC com valores menores de resistência a compressão nessa pesquisa. Ressalta-se, entretanto, que para classificação de UHPC quanto resistência mínima a flexão (>6 MPa), a maioria das misturas dessa pesquisa obtiveram valores iguais ou superiores a esse limite mínimo.

Assim evidencia-se com essa pesquisa que o método de dosagem UNISINOS para UHPC é promissor, principalmente quanto à resistência à compressão, onde a busca pelo menor índice de desvio de empacotamento (IDE) após a seleção inicial dos materiais demonstra apresentar maiores valores dessa propriedade em comparação a misturas com IDE's maiores.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados dessa pesquisa, e com as verificações de trabalhos da literatura acerca do UHPC, sugere-se para trabalhos futuros os seguintes temas:

- Avaliar uma variação mais ampla do módulo de distribuição das partículas “q” na propriedade de resistência à compressão utilizando o método de dosagem UNISINOS, afim de se propor um “q” limite inferior e superior desse módulo;
- Analisar a cinética química entre o cimento e os materiais cimentícios suplementares empregados nas misturas de UHPC desenvolvidas pelo método de dosagem UNISINOS;

- Analisar a influência do IDE na resistência à flexão, de forma a apresentar os parâmetros que influenciam nos maiores valores dessa propriedade.
- Avaliar a influência do diâmetro máximo e mínimo das partículas na obtenção do IDE, afim de buscar as melhores propriedades mecânicas;
- Avaliar a relação cimento/materiais cimentícios suplementares e materiais aglutinantes/agregado miúdo na proposição do método na definição de parâmetros mais assertivos para o método de dosagem.

REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas técnicas, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: Concreto auto adensável - parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas técnicas, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697 - Cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas técnicas, 2018.

239R-18, ACI. Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report. "ACI 239R-18." Cover title. **American Concrete Institute ACI 239**, Estados Unidos, 2018. p. 5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas técnicas. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas técnicas. 2014.

ACKER, P.; BEHLOUL, M. Ductal technology: a large spectrum of properties, a wide range of applications. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETES*, 2004, Kassel. **Anais [...]**. Kassel

AHMAD, Shamsad; MOHAISEN, Khaled Own; ADEKUNLE, Saheed Kolawole; AL-DULAIJAN, Salah U.; MASLEHUDDIN, Mohammed. Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 198, p. 437–444, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.260.

AÏM, R. Ben; GOFF, P. Le. Effet de paroi dans les empilements désordonnés de sphères et application à la porosité de mélanges binaires. **Powder Technology**, [S. l.], v. 1, n. 5, p. 281–290, 1968. DOI: 10.1016/0032-5910(68)80006-3.

AÏTCIN, Pierre-Claude. **High-Performance Concrete**. [s.l: s.n.].

AÏTCIN, Pierre Claude; LACHEMI, Mohamed; ADELIN, Régis; RICHARD, Pierre. 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, 1998. DOI: 10.2749/101686698780489243.

AKHNOUKH, Amin K.; BUCKHALTER, Chelsea. Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 15, p. e00559, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00559.

ALRIFAI, Amjad; AGGOUN, Salima; KADRI, Abdelkader; KENAI, Said; KADRI, El Hadj. Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 47, p. 969–976, 2013. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.05.024.

ALSALMAN, Ali. Developing Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with Locally Available Materials. [S. l.], 2018.

ANDREASEN, A. H. M. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, [S. l.], v. 50, n. 3, p. 217–228, 1930. DOI: 10.1007/BF01422986.

ASTM C1856. Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete. This standard is issued under the fixed designation C1856/C1856M. **ASTM International**, Estados Unidos, 2017. p. 4. DOI: 10.1520/C1856.

BANYHUSSAN, Qais Sahib; YILDIRIM, Gürkan; BAYRAKTAR, Ender; DEMIRHAN, Serhat; ŞAHMARAN, Mustafa. Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v.

125, p. 41–52, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.020.

BONNEAU, Olivier; VERNET, Christian; MORANVILLE, Micheline; AÏTCIN, Pierre Claude. Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 30, n. 12, 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00300-8.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 35, n. 11, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.06.002.

CHAN, Yin Wen; CHU, Shu Hsien. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], 2004. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.023.

CHEN, Tiefeng; GAO, Xiaojian; REN, Miao. Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 158, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.074.

CHOI, Myoung Sung; LEE, Jung Soo; RYU, Keum Seong; KOH, Kyung Taek; KWON, Seung Hee. Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 106, 2016. DOI: 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**. 2014. [S. l.], 2014.

CHRIST, Roberto. **PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (UHPC)**. 2019. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISISNOS, [S. l.], 2019.

CHRIST, Roberto; PACHECO, Fernanda; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. Aplicação de concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) em sistema construtivo habitacional no Brasil. **Concreto & Construções**, [S. l.], v. 1, n. 96, p. 67–71, 2019. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao96/index.html#

p=4.

COLLEPARDI, Silvia; COPPOLA, Luigi; TROLI, Roberto; COLLEPARDI, Mario. Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *In: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI SPECIAL PUBLICATION 1997, Anais [...].* [s.l: s.n.] DOI: 10.14359/6175.

COLLEPARDI, Silvia; COPPOLA, Luigi; TROLI, Roberto; ZAFFARONI, Pasquale. Influence of the Superplasticizer Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete for Precast Structures. **16° Congresso Internazionale BIBM'99**, [S. l.], v. 1, n. September, p. 25–30, 1999. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265379639_SColleparidi_L_Coppola_R_Troli_P_Zaffaroni_Influence_of_the_Superplasticizer_Type_on_the_Compressive_Strength_of_Reactive_Powder_Concrete_for_Precast_Structures.

CWIRZEN, Andrzej; PENTTALA, Vesa. RPC mix optimization by determination of the minimum water requirement of binary and polydisperse mixtures. *In: CONFERENCE: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION & SUSTAINABILITY OF STRUCTURES IN CIVIL ENGINEERING - INCLUDING SEISMIC ENGINEERING 2005, Anais [...].* [s.l: s.n.] p. 1–11.

DAY, Ken W.; ALDRED, James; HUDSON, Barry. **Concrete mix design, quality control and specification, fourth edition.** [s.l: s.n.]. DOI: 10.1201/b15624.

DE CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFEG, V. C. Review article: Rheology of high performance concretes applied in building site. **Ceramica**, [S. l.], v. 57, n. 341, p. 63–75, 2011. DOI: 10.1590/s0366-69132011000100009.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], 1994. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90022-1.

DING, Mengxi; YU, Rui; FENG, Yuan; WANG, Siyu; ZHOU, Fengjiao; SHUI, Zhonghe; GAO, Xu; HE, Yongjia; CHEN, Luyi. Possibility and advantages of producing an ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-low cement content. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 273, p. 122023, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122023.

EL-TAWIL, Sherif; ALKAYSI, Mouhamed; NAAMAN, Antoine E.; HANSEN, Will; LIU, Zhichao. **Development, Characterization and Applications of a Non Proprietary Ultra High Performance Concrete for Highway Bridges**. [s.l: s.n.].

FEHLING, E.; LEUTBECHER, T.; BUNGE, K. Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete. *In*: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE 2004, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 327–338.

FEHLING, Ekkehard; SCHMIDT, Michael; WALRAVEN, Joost; LEUTBECHER, Torsten;; FRÖHLICH, Susanne. **Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Exemples**. Berlim. DOI: 10.1002/9783433604076.

FELEKOĞLU, Burak; TÜRKEK, Selçuk; BARADAN, Bülent. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and Environment**, [S. l.], v. 42, n. 4, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.01.012.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. 2011. Delft University of Technology, [S. l.], 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265283119>.

FERRARA, Liberato; CREMONESI, Massimiliano; TREGGER, Nathan; FRANGI, Attilio; SHAH, Surendra P. 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. DOI: <https://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, 2007. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.03.014.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2005.

FU, G.; DEKELBAB, W. 3-D random packing of polydisperse particles and concrete aggregate grading. **Powder Technology**, [S. l.], v. 133, n. 1–3, 2003. DOI: 10.1016/S0032-5910(03)00082-2.

FULLER, William B.; THOMPSON, Sanford E. The Laws of Proportioning Concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, [S. l.], v. 59, n. 2, 1907. DOI: 10.1061/taceat.0001979.

FUNK, James E. J. E.; DINGER, Dennis R. Predictive process control of crowded particulate suspensions: Applied to ceramic manufacturing. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**, [S. l.], 1994.

FURNAS, C. C. Grading Aggregates: I—Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial and Engineering Chemistry**, [S. l.], v. 23, n. 9, 1931. DOI: 10.1021/ie50261a017.

GERLICHER, Tobias; URBONAS, Liudvikas; HEINZ, Detlef. Effect of finely ground blast furnace slag on the properties of fresh and hardened UHPC. *In*: **Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete**. Kassel. p. 367–374.

GRAYBEAL, Benjamin A. Ultra-High Performance Concrete. **FHWA-HRT-11-038**, [S. l.], p. 1–8, 2011.

GRAYBEAL, Benjamin A. **Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections: TECHNOTE**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/14084/14084.pdf>.

GRAYBEAL, Benjamin; HARTMANN, Joseph I. Strength and Durability of Ultra-High Performance Concrete Materials and Structures. **2003 Concrete Bridge Conference**, [S. l.], n. December, p. 1–20, 2003.

HA, Ngoc San; MARUNDRURY, Siga S.; PHAM, Thong M.; POURNASIRI, Emad; SHI, Feng; HAO, Hong. Effect of grounded blast furnace slag and rice husk ash on performance of ultra-high-performance concrete (UHPC) subjected to impact loading. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 329, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127213.

HABEL, Katrin; CHARRON, Jean-Philippe; BRAIKE, Shadi; HOOTON, R. Douglas; GAUVREAU, Paul; MASSICOTTE, Bruno. Ultra-high performance fibre reinforced

concrete mix design in central Canada. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 217–224, 2008. DOI: 10.1139/L07-114.

HASNAT, Ariful; GHAFORI, Nader. Properties of ultra-high performance concrete using optimization of traditional aggregates and pozzolans. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 299, p. 123907, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123907. Disponível em:

HEGGER, J.; ZELL, M.; HORSTMANN, M. Textile reinforced concrete — Realization in applications. **Proceedings of the International FIB Symposium 2008 - Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for our Society**, [S. l.], p. 98, 2008. DOI: 10.1201/9781439828410.ch61.

IBRAHIM, Mustapha A.; FARHAT, Maen; ISSA, Mohsen A.; HASSE, Jessica Amanda. Effect of material constituents on mechanical & fracture mechanics properties of ultra-high-performance concrete. **ACI Structural Journal**, [S. l.], v. 114, n. 3, 2017. DOI: 10.14359/51689717.

JONES, M. R.; ZHENG, L.; NEULANDS, M. D. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio. **Materials and Structures**, [S. l.], v. 35, n. 5, p. 301–309, 2002. DOI: 10.1007/BF02482136.

KANG, Su Tae; CHOI, Jeong Il; KOH, Kyung Taek; LEE, Kang Seok; LEE, Bang Yeon. 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. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.02.075.

KANG, Sung Hoon; LEE, Ji Hyung; HONG, Sung Gul; MOON, Juhyuk. Microstructural investigation of heat-treated ultra-high performance concrete for optimum production. **Materials**, [S. l.], v. 10, n. 9, 2017. DOI: 10.3390/ma10091106.

KAZEMI, Sadegh; LUBELL, Adam S. Q1-Influence of Specimen Size and Fiber Content on Mechanical Properties of UHPFRC. **ACI Materials Journal**, [S. l.], v. 109, n. 6, p. 675–684, 2012.

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. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.03.006.

KHOKHAR, M. I. A.; ROZIERE, E.; TURCRY, P.; GRONDIN, F.; LOUKILI, A. 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. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2010.01.006.

KOLONKO, Michael; RASCHDORF, Steffen; WÄSCH, Dominic. A hierarchical approach to simulate the packing density of particle mixtures on a computer. **Granular Matter**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 629–643, 2010. DOI: 10.1007/s10035-010-0216-5.

KUMAR, Senthil V.; SANTHANAM, Manu. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. **Indian Concrete Journal**, [S. l.], v. 77, n. 9, 2003.

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

LI, Zhengqi; RANGARAJU, Rao. Development of UHPC Using Ternary Blends of Ultra-Fine Class F Fly Ash, Meta-kaolin and Portland Cement. *In*: FIRST INTERNATIONAL INTERACTIVE SYMPOSIUM ON UHPC – 2016 2016, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–12. DOI: 10.21838/uhpc.2016.64.

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. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.06.020.

LIU, Kangning; YIN, Tianyi; FAN, Dingqiang; WANG, Jinnan; YU, Rui. Multiple effects of particle size distribution modulus (q) and maximum aggregate size (D_{max}) on the characteristics of Ultra-High Performance concrete (UHPC): Experiments and modeling. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 133, n. July, p. 104709, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104709.

LV, Yajun; YANG, Longbin; WANG, Julian; ZHAN, Baojian; XI, Zhuangmin; QIN,

Yiming; LIAO, Dang. Performance of ultra-high-performance concrete incorporating municipal solid waste incineration fly ash. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 17, n. March, p. e01155, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01155.

MA, Jianxin; SCHNEIDER, Holger. **Properties of ultra-high-performance concrete**. [s.l: s.n.].

MAIA, Alessandra Tourinho. **Proposição De Um Método De Dosagem Racional De Concretos De Ultra-Alto Desempenho**. 2021. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, [S. l.], 2021.

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, 2013.

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. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.08.032.

MATTE, V.; MORANVILLE, M. Durability of Reactive Powder Composites: Influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 1–9, 1999. DOI: 10.1016/S0958-9465(98)00025-0.

MEDICIS, Carolina; GONZALEZ, Sergio; ALVARADO, Yezid A.; VACCA, Hermes A.; MONDRAGON, Ivan F.; GARCÍA, Rodolfo; HERNANDEZ, Giovanni. Mechanical Performance of Commercially Available Premix UHPC-Based 3D Printable Concrete. **Materials**, [S. l.], v. 15, n. 18, p. 6326, 2022. DOI: 10.3390/ma15186326.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo j. M. **Concrete - microstruture, proprieties, and materials** . [s.l: s.n.].

MENDONÇA, Flávia Ribeiro Furtado De. **Proportion and Evaluation of Ultra-High Performance Concrete Using Local Materials**. 2019. Universidade de Nebraska, Estados Unidos, [S. l.], 2019.

MENG, Weina. Design and Performance of Cost-Effective Ultra-High Performance Concrete for Prefabricated Elements. *[S. l.]*, p. 249, 2017.

MENG, Weina; KHAYAT, Kamal H. Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers. **Composites Part B: Engineering**, *[S. l.]*, v. 107, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.069.

MENG, Weina; KHAYAT, Kamal H. Effect of Hybrid Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous Shrinkage of Cost-Effective UHPC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, *[S. l.]*, v. 30, n. 4, 2018. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002212.

MENG, Weina; VALIPOUR, Mahdi; KHAYAT, Kamal Henri. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, *[S. l.]*, v. 50, n. 1, p. 1–16, 2017. DOI: 10.1617/s11527-016-0896-3.

MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal; MASUERO, Angela Borges; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; POSSAN, Edna; MASUERO, João Ricardo; MENNUCCI, Marina Martins. **Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.5935/978-85-5953-005-6.2016c008.

MOUTASSEM, Fayez; CHIDIAC, Samir E. Assessment of concrete compressive strength prediction models. **KSCE Journal of Civil Engineering**, *[S. l.]*, v. 20, n. 1, p. 343–358, 2016. DOI: 10.1007/s12205-015-0722-4.

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.

NBR 11768-1. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: RequisitosBrasil, 2019. p. 33.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5^o Edition ed. [s.l.] : Bookman, 2016.

NORHASRI, M. S. Muhd; HAMIDAH, M. S.; FADZIL, A. Mohd. Inclusion of nano metaclayed as additive in ultra high performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, *[S. l.]*, v. 201, p. 590–598, 2019. DOI:

10.1016/j.conbuildmat.2019.01.006.

PAIVA, H.; SILVA, L. M.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Efeito de Adjuvantes Sobre a Reologia de uma Argamassa. *In: 1º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO 2005, Anais [...].* [s.l: s.n.]

PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK, T. H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 35, n. 5, p. 842–849, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.11.002.

PEREIRA DE OLIVEIRA, L. A.; CASTRO GOMES, J. P.; BERNARDO, L. F. A.; RAMOS, M. M. M. Evaluation of dry mortar ratio as mix design parameter for steel fibre reinforced self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 40, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.030.

PERRY, V. Reactive Powder Concrete. **PCI Journal**, [S. l.], v. 46, n. 4, p. 118, 2001.

PERRY, V. **Ductal® - A Revolutionary New Material for New Solutions**. 2006. Disponível em: file:///D:/GG Driver/NCKH/ductal.pdf.

POWERS, C. T. **The Properties Of Fresh Concrete**. 1º edition ed. New York: John Wiley & Sons, 1968.

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, [S. l.], 2015. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/118825>.

RAGALWAR, Ketan; HEARD, William F.; WILLIAMS, Brett A.; RANADE, Ravi. Significance of the particle size distribution modulus for strain-hardening-ultra-high performance concrete (SH-UHPC) matrix design. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 234, p. 117423, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117423.

RAHEEM, Ahmed H. Abde.; MAHDY, M.; MASHALY, Asmaa A. Mechanical and fracture mechanics properties of ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 213, p. 561–566, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.298. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.298>.

RANDL, N.; STEINER, T.; OFNER, S.; BAUMGARTNER, E.; MÉSZÖLY, T. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 67, n. PART C, p. 373–378, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.102.

REDDY, G. K.; RAMADOSS, P. Influence of alccofine incorporation on the mechanical behavior of ultrahigh performance concrete (UHPC). **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 33, p. 789–797, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.180.

RESPLENDINO, Jacques; TOUTLEMONDE, François. The UHPFRC revolution in structural design and construction. **Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 791–804, 2013.

RICHARD, Pierre; CHEYREZY, Marcel. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00144-2.

ROUSSEL, Nicolas. **Understanding the Rheology of Concrete**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1533/9780857095282.

ROUX, N.; ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A. Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 1, 1996. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(1996)8:1(1).

RUI, Yu; KANGNING, Liu; TIANYI, Yin; LIWEN, Tang; MENGXI, Ding; ZHONGHE, Shui. Comparative study on the effect of steel and polyoxymethylene fibers on the characteristics of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 127, n. August 2021, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104418.

SAKAI, E.; AKINORI, N.; DAIMON, M.; AIZAWA, K.; KATO, H. Influence of superplasticizer on the fluidity of cements with different amount of aluminat phase. *In*: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE 2008, Kassel. **Anais [...]**. Kassel p. 11–11.

SBIA, Libya Ahmed; PEYVANDI, Amirpasha; SOROUSHIAN, Parviz; BALACHANDRA, Anagi M. Optimization of ultra-high-performance concrete with nano-and micro-scale reinforcement. **Cogent Engineering**, [S. l.], v. 1, n. 1, 2014. DOI: 10.1080/23311916.2014.990673.

SCHROEFL, C.; GRUBER, M.; PLANK, J. Structure Performance Relationship of Polycarboxylate Superplasticizers Based on Methacrylic Acid Ester in Ultra High Performance Concrete. *In*: **Second International Symposium on Ultra High Performace Concrete**. Kassel. p. 383–390.

SCRIVENER, Karen L.; CRUMBIE, Alison K.; LAUGESSEN, Peter. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 411–421, 2004. DOI: 10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c.

SEDRAN, T.; SYMP, F. De Larrard-1st SCC; SWEDEN, CBI; RILEM, Undefined; 1999, Undefined. Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. **books.google.com**, [S. l.], 1999.

SHI, Caijun; WU, Zemei; XIAO, Jianfan; WANG, Dehui; HUANG, Zhengyu; FANG, Zhi. 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. a. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.

SHI, Caijun; XIAO, Jianfan; WU, Zemei; WANG, Dehui; FANG, Zhi; HUANG, Zhengyu. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, [S. l.], 2015. b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095.

SHI, Ye; LONG, Guangcheng; ZENG, Xiaohui; XIE, Youjun; WANG, Huihui. Green ultra-high performance concrete with very low cement content. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 303, p. 124482, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124482.

SHIN, Jaewoo. **Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Precast Segmental Bridges: Flexural Behaviour and Joint Design**. 2016. Universidade Técnica de Hamburgo, [S. l.], 2016.

SOHAIL, Muazzam Ghaus; WANG, Ben; JAIN, Amit; KAHRAMAN, Ramazan; OZERKAN, Nesibe Gozde; GENCTURK, Bora; DAWOOD, Mina; BELARBI, Abdeldjelil. Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 04017310, 2018. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002144.

SOKOLOVICZ, Bóris Casanova. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÕES MINERAIS E RESÍDUOS INDUSTRIAIS**. 2020. Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2020.

SOLIMAN, N. A. **DEVELOPMENT OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE (UHPC) USING WASTE GLASS MATERIALS – TOWARDS INNOVATIVE ECO-FRIENDLY CONCRETE**. 2016. Universidade de Sherbrooke, [S. l.], 2016.

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. a. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073.

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. b. DOI: 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.084.

SPASOJEVIC, Ana. **Structural Implications od Ultra-High Performance Fibre-reinforced Concrete in Bridge Design**. 2008. Escola Politécnica Federal de Lausana, [S. l.], 2008. Disponível em: http://infoscience.epfl.ch/record/116412%0Ahttp://files/494/EPFL_TH4051.pdf.

STOVALL, T.; DE LARRARD, F.; BUIL, M. Linear packing density model of grain mixtures. **Powder Technology**, [S. l.], v. 48, n. 1, p. 1–12, 1986. DOI: 10.1016/0032-

5910(86)80058-4.

STROEVEN, Piet; STROEVEN, Martijn. Assessment of packing characteristics by computer simulation. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 29, n. 8, 1999. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00020-4.

TAHWIA, Ahmed M.; ELGENDY, Gamal M.; AMIN, Mohamed. Mechanical properties of affordable and sustainable ultra-high-performance concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 16, n. March, p. e01069, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01069.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh concrete**. [s.l.] : Pitman Advanced Publishing Program, 1983.

TORREGROSA, Esteban Camacho. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties - [Thesis]**. 2013. [S. l.], 2013. DOI: 10.1029/JD093iD02p01377.

TOUTLEMONDE, François; RESPLENDINO, Jacques. **Designing and Building with UHPFRC**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1002/9781118557839.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; ISAIA, Geraldo Cechella;; HELENE, Paulo. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 2. [S. l.], v. 2, n. 1990, p. 1283–1325, 2011.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2007.

VERNET, Christian P. Ultra-durable concretes: Structure at the micro- and nanoscale. **MRS Bulletin**, [S. l.], v. 29, n. 5, 2004. DOI: 10.1557/mrs2004.98.

VOORT, Thomas Vande; SULEIMAN, Muhannad T.; SRITHARAN, Sri. Design and Performance Verification of Uhpcc Piles for Deep Foundations. **A report from Center for Transportation Research and Education Iowa State University**, [S. l.], p. 221, 2008.

WALKER, William J. Persistence of granular structure during compaction processes. **KONA Powder and Particle Journal**, [S. l.], v. 21, n. March, 2003. DOI:

10.14356/kona.2003016.

WALLEVIK, Jon Elvar. Relationship between the Bingham parameters and slump. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 36, n. 7, p. 1214–1221, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.001>.

WANG, J. N.; YU, R.; JI, D. D.; TANG, L. W.; YANG, S. C.; FAN, D. Q.; SHUI, Z. H.; LENG, Y.; LIU, K. N. Effect of distribution modulus (q) on the properties and microstructure development of a sustainable Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 125, n. October 2021, 2022. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2021.104335](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104335).

WANG, Rui; GAO, Xiaojian. Relationship between flowability, entrapped air content and strength of UHPC mixtures containing different dosage of steel fiber. **Applied Sciences (Switzerland)**, [S. l.], v. 6, n. 8, 2016. DOI: [10.3390/app6080216](https://doi.org/10.3390/app6080216).

WARNOCK, ROBYN. **Short-term and time-dependent flexural behaviour of steel fibre-reinforced reactive powder concrete**. 2005. University of New South Wales, [S. l.], 2005. DOI: <https://doi.org/10.26190/unswworks/23013> License:

WILLE, Kay; BOISVERT-COTULIO, Christopher. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], 2015. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.03.087](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.087).

WILLE, Kay; NAAMAN, Antoine E.; PARRA-MONTESINOS, Gustavo J. Ultra-high performance Concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. **ACI Materials Journal**, [S. l.], v. 108, n. 1, 2011. DOI: [10.14359/51664215](https://doi.org/10.14359/51664215).

WU, Zemei; SHI, Caijun; HE, Wen. Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 136, p. 307–313, 2017. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.01.052](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.052).

YALÇINKAYA, Çağlar; ÇOPUROĞLU, Oğuzhan. Hydration heat, strength and microstructure characteristics of UHPC containing blast furnace slag. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 34, p. 101915, 2021. DOI:

10.1016/J.JOBE.2020.101915.

YANG, Rui; YU, Rui; SHUI, Zhonghe; GUO, Cheng; WU, Shuo; GAO, Xu; PENG, Shu. The physical and chemical impact of manufactured sand as a partial replacement material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 99, p. 203–213, 2019. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.03.020.

YAZICI, Halit; DENIZ, Engin; BARADAN, Bülent. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 42, p. 53–63, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.003.

YAZICI, Halit; YARDIMCI, Mert Y.; YIĞİTER, Hüseyin; AYDIN, Serdar; TÜRKEK, Selçuk. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005.

YIGİTER, Hüseyin; AYDIN, Serdar; YAZICI, Halit; YARDIMCI, Mert Yücel. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC). **Composites Part B: Engineering**, [S. l.], 2012. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.042.

YIN, Tianyi; YU, Rui; LIU, Kangning; WANG, Zhiyu; FAN, Dingqiang; WANG, Siyu; FENG, Yuan; SHUI, Zhonghe. Precise mix-design of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on physicochemical packing method: From the perspective of cement hydration. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 352, n. July, p. 128944, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128944.

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.], 2014. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.002.

YUNSHENG, Zhang; WEI, Sun; SIFENG, Liu; CHUJIE, Jiao; JIANZHONG, Lai. Cement & Concrete Composites Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static – dynamic behaviors. **Cement & Concrete Composites**, [S. l.], v. 30, p. 831–838, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.008.

ZHANG, Binbin; JI, Tao; MA, Yu; ZHANG, Qilin. Effect of metakaolin and magnesium oxide on flexural strength of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 131, n. March, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104582.

ZHANG, Hongru; JI, Tao; HE, Bingjian; HE, Lingwei. Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions. **CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS**, [S. l.], v. 213, p. 469–482, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.058.

ZHANG, Hongru; JI, Tao; ZENG, Xuepeng; YANG, Zhengxian; LIN, Xujian; LIANG, Yongning. Mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) using recycled fine aggregate cured under different conditions and the mechanism based on integrated microstructural parameters. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 192, p. 489–507, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.117.

ZHOU, Mi; LU, Wei; SONG, Jianwei; LEE, George C. Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 186, p. 1256–1267, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036.