

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA CLAUDIA KRONBAUER

**ESTUDO DO EFEITO DOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO
PORTLAND NACIONAIS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO
UHPC**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO - PR

2019

ANA CLAUDIA KRONBAUER

**ESTUDO DO EFEITO DOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO
PORTLAND NACIONAIS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO
UHPC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra

**TOLEDO - PR
2019**



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 184

Estudo do efeito dos diferentes tipos de cimento Portland nacionais na resistência à compressão do UHPC

por

Ana Claudia Kronbauer

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15:50h do dia **12 de Junho de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr Fulvio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Aos meus pais Ernesto e Teresinha Kronbauer e aos meus irmãos Elisandra e Rudinei, que são minha força e inspiração.

À Mauricio Kusbick da Rosa, que com muito amor esteve sempre presente.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha família, por todo apoio durante a graduação. Vocês foram fundamentais para a conclusão de mais uma etapa da minha vida.

À Mauricio Kusbick da Rosa, por todo amor, companheirismo e incentivo em todos os momentos.

Aos meus amigos, que foram essenciais no decorrer de toda a graduação tornando essa jornada mais leve e alegre.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná por dispor de toda estrutura, materiais e equipamentos que foram essenciais para a conclusão desta pesquisa.

Aos professores do curso de Engenharia Civil que com toda dedicação e paciência compartilharam seus conhecimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra por toda contribuição, orientação e incentivo ao longo deste trabalho, que foi fundamental para que pudesse ser concluído com êxito.

À banca, Prof. Dr. Gustavo Savaris e Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim pelas contribuições e por todo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos laboratoristas da UTFPR, Wilson e Marcos, por todo auxílio durante a realização dos ensaios em laboratório.

Aos professores Prof. Dr. Wagner Alessandro Pansera da UTFPR e Prof. Dr. Cleber Antônio Lindino da UNIOESTE pelo auxílio e contribuições durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À UNIPAR, UNIOESTE e UFPR por disponibilizar o espaço, equipamentos e profissionais que auxiliaram nos ensaios laboratoriais. Esse apoio foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

”Se uma pessoa fizesse apenas o que entende, jamais avançaria um passo.”(Clarice Lispector)

RESUMO

KRONBAUER, Ana Claudia. ESTUDO DO EFEITO DOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND NACIONAIS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO UHPC. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo - PR, 2019.

O UHPC é um concreto de ultra alto desempenho constituído basicamente de cimento, sílica ativa, areia de quartzo, água e aditivos, e que devido ao empacotamento das suas partículas pode atingir resistências superiores ao concreto convencional, além de ser mais durável devido a sua baixa permeabilidade. Pesquisas feitas sobre o comportamento do concreto de ultra alto desempenho revelam a importância de estudar a influência do cimento em suas propriedades mecânicas e de acordo com a literatura, a composição química e mineralógica tanto quanto a finura do cimento, são fatores que influenciam diretamente na resistência mecânica do concreto. Com o objetivo de analisar a influência dos principais tipos de cimento Portland nas propriedades mecânicas do concreto de ultra alto desempenho, diferentes tipos de cimentos nacionais foram analisados quanto a suas características físicas e químicas e na sequência, foram utilizados para moldagem de corpos de prova de UHPC a fim de analisar seus efeitos na resistência à compressão deste concreto. Analisou-se a influência da composição química do cimento no desempenho mecânico do concreto. Após uma análise estatística pelo teste da ANOVA Fator Único, concluiu-se que o tipo de cimento não influencia significativamente no desempenho mecânico do UHPC. Entretanto o CPV ARI apresentou a maior média de resistência à compressão comparado com os demais cimentos. Tal fato corrobora com a literatura que busca um cimento com maior superfície específica para a fabricação do UHPC.

Palavras-chave: UHPC. Cimento Portland. Resistência à Compressão.

ABSTRACT

KRONBAUER, Ana Claudia. STUDY OF THE EFFECT OF DIFFERENT NATIONAL PORTLAND CEMENT TYPES ON THE UHPC COMPRESSIVE STRENGTH. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso – COECI - Coordenação Do Curso De Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo - PR, 2019.

UHPC (Ultra high performance concrete) refers to a specific concrete composed by cement, silica fume, quartz sand, water and other additives that due to its particles being tightly packed, it achieves higher resistances than conventional concrete, in addition to being more durable due to its low permeability. Research on the behavior of high-performance concrete materials reveal the importance of studying the influence of their mechanical properties and according to the literature, the chemical composition as well as the thickness of the cement are factors that influence directly on the concrete mechanical strength. In order to analyze the influence of the main types of Portland cement on the mechanical properties of ultra-high performance concrete, different types of national cement were analyzed regarding their physical and chemical characteristics and afterwards, they were used for the molding of UHPC test specimens in order to analyze their effects on the compressive strength of this concrete. The influence of the cement chemical composition on the concrete mechanical performance was analyzed. After a statistical analysis by the single factor ANOVA test, it was concluded that the cement type does not influence significantly on the UHPC mechanical performance. However, the CPV ARI presented the highest average compressive strength compared to the other cements. This fact corroborates with the literature that looks for a cement with greater specific surface area for the manufacture of UHPC.

Keywords: UHPC. Portland Cement. Compressive Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Aplicação do UHPC em pavimentação	23
Figura 2	- Ponte de pedestres na República Tcheca	23
Figura 3	- Ponte em UHPC com formato de PI	24
Figura 4	- Corpos de prova de UHPC	25
Figura 5	- Corpos de prova após ensaio de compressão	26
Figura 6	- Corpos de prova após ensaio de flexão	27
Figura 7	- Corpos de prova após ensaio de tração	27
Figura 8	- Distribuição granulométrica da areia	32
Figura 9	- Distribuição granulométrica da areia em cada amostra	33
Figura 10	- Cobertura superficial de cimento e sílica por PCE/MPEG e PCE/APEG ...	38
Figura 11	- Adsorção de uma combinação de aditivos no cimento e na micro sílica	38
Figura 12	- Materiais utilizados para o UHPC	41
Figura 13	- Imagens de MEV com pontos das amostras focalizados para EDS	45
Figura 14	- Ensaio do Frasco de Le Chatelier	46
Figura 15	- Ensaio do Frasco de Le Chatelier	48
Figura 16	- Picnômetro utilizado no ensaio da massa específica	48
Figura 17	- Peneiras para ensaio de granulometria	50
Figura 18	- Misturador planetário	52
Figura 19	- Cura térmica - Amostras expostas ao vapor a 90°C	53
Figura 20	- Cura térmica - Amostras expostas em água a 90°C	53
Figura 21	- Procedimento de mistura do UHPC	54
Figura 22	- Moldagem dos corpos de prova	55
Figura 23	- Corpos de prova em cura térmica - UHPC com CPII E, CPII Z e CPV ARI	55
Figura 24	- Corpos de prova em cura térmica - UHPC com CPIV 32 RS, CPII F	56
Figura 25	- Corpos de prova após retificação	56
Figura 26	- Ensaio de resistência à compressão	57
Figura 27	- Curva granulométrica da areia de quartzo	61
Figura 28	- Compostos químicos - resultado qualitativo - Parte 1	63
Figura 29	- Compostos químicos - resultado qualitativo - Parte 2	64
Figura 30	- Compostos químicos do CPII E 32 - resultado qualitativo	65
Figura 31	- Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - Parte 1	67
Figura 32	- Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - Parte 2	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composição Química do Cimento Portland	18
Tabela 2	- Composição do Cimento Portland	20
Tabela 3	- Requisitos físicos dos cimentos Portland	21
Tabela 4	- Resistência à compressão dos cimentos Portland	21
Tabela 5	- Composição do Ductal®	25
Tabela 6	- Resultado do teste de resistência à compressão	28
Tabela 7	- Traços utilizados para o UHPC	29
Tabela 8	- Resultados dos testes com o UHPC	30
Tabela 9	- Traço base do UHPC	30
Tabela 10	- Composição química dos cimentos utilizados	30
Tabela 11	- Influência do vácuo na resistência à compressão do UHPC	31
Tabela 12	- Traços, em massa, utilizados por Yu, Spiesz e Brouwers (2015) - Parte 1 ..	35
Tabela 13	- Traços, em massa, utilizados por Yu, Spiesz e Brouwers (2015) - Parte 2 ..	35
Tabela 14	- Resultados da resistência à compressão do UHPC	37
Tabela 15	- Dosagem de traços de UHPC de referência em volume	39
Tabela 16	- Traços após os ajustes necessários	39
Tabela 17	- Traços 3 e 4 para o estudo de traço	51
Tabela 18	- Traços final - em massa	54
Tabela 19	- Resultado do estudo de traço - Resistência à compressão (MPa)	59
Tabela 20	- Massa específica da Areia de Quartzo	60
Tabela 21	- Composição granulométrica da Areia de Quartzo	60
Tabela 22	- Massa específica	61
Tabela 23	- Massa específica dos Cimentos Portland	62
Tabela 24	- Composição química dos Cimentos Portland - Resultado quantitativo	62
Tabela 25	- Cristalinidade dos Cimentos Portland	66
Tabela 26	- Resultado do ensaio de resistência à compressão	69
Tabela 27	- Verificação de <i>outliers</i> (MPa)	70
Tabela 28	- Teste da ANOVA Fator Único	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ANOVA	Análise de Variância
APEG	Éteres Alílicos de Polioxietileno
C	Cimento
CC	Concreto Convencional
CPI	Cimento Portland comum
CPII	Cimento Portland composto
CPII E	Cimento Portland composto com escória de alto-forno
CPII F	Cimento Portland composto com material carbonático
CPII Z	Cimento Portland composto com material pozolânico
CPIII	Cimento Portland de alto forno
CPIV	Cimento Portland pozolânico
CP-RS	Cimento Portland resistente à sulfatos
CPV ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
DMC	Dimensão máxima característica
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
F1 e F2	Pó de quartzo
F100	Areia com tamanho médio das partículas de $100\mu\text{m}$
F12	Areia com tamanho médio das partículas de $500\mu\text{m}$
GGBS	Escória de alto forno
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MF	Módulo de Finura
MPEG	Éster do ácido metacrílico
OPC	Cimento Portland Comum
PCE	Éter policarboxilato
S	Areia de quartzo
SC	Cimento Superfino
SF	Sílica Ativa
SP	Superplastificante

UHPC Concreto de Ultra Alto Desempenho
W Água

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Mega Pascal
°C	Graus Celsius
C ₃ S	Silicato Tricálcico
C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₄ AF	Ferro Aluminato Tetracálcico
SO ₃	Óxido Sulfúrico
kg/m ³	Quilo grama por metro cúbico
μm	Micro metros
kN/s	Quilo Newton por segundo
g/m ²	Grama por metro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	CIMENTO PORTLAND	18
2.1.1	Tipos de cimento Portland	19
2.1.2	Índices Físicos do cimento	20
2.2	<i>ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)</i>	21
2.2.1	Definições e características gerais	21
2.2.2	Aplicações do UHPC	22
2.2.3	Estudos da literatura com o UHPC	24
2.2.3.1	<i>Comparativo entre UHPC e Concreto Convencional</i>	24
2.2.3.2	<i>Tipos de cimento e teor de sílica</i>	28
2.2.3.3	<i>Influência do vácuo no UHPC</i>	30
2.2.3.4	<i>Influência da substituição parcial do cimento por adições minerais no UHPC</i>	31
2.2.3.5	<i>Influência de três tipos de cimento no UHPC sob altas temperaturas</i>	36
2.2.3.6	<i>Influência do superplastificante no UHPC</i>	37
2.2.3.7	<i>Estudo de traço</i>	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	MATERIAIS	41
3.1.1	Tipos de cimentos Portland	42
3.1.2	Pó de Quartzo	42
3.1.3	Areia de Quartzo	42
3.1.4	Sílica Ativa	42
3.1.5	Aditivo superplastificante	43
3.2	MÉTODOS	43
3.2.1	Caracterização do Cimento Portland	43
3.2.1.1	<i>Difração de Raios X - DRX</i>	43
3.2.1.2	<i>Espectroscopia de energia dispersiva - EDS</i>	44
3.2.1.3	<i>Microscopia eletrônica de varredura - MEV</i>	44
3.2.1.4	<i>Ensaio para determinação de massa específica</i>	45
3.2.2	Caracterização do aditivo superplastificante	46
3.2.3	Caracterização da areia de quartzo	47
3.2.3.1	<i>Massa específica</i>	47
3.2.3.2	<i>Granulometria</i>	49
3.2.4	Caracterização do pó de quartzo e da sílica ativa	50
3.2.5	Estudos de traço	51
3.2.6	Moldagem dos corpos de prova com variação do tipo de cimento	53
3.2.7	Tratamento de Dados	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	ESTUDO DE TRAÇO	59

4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	59
4.2.1	Areia de quartzo	59
4.2.1.1	<i>Massa específica</i>	59
4.2.1.2	<i>Granulometria</i>	59
4.2.2	Pó de quartzo e Sílica Ativa	60
4.2.2.1	<i>Massa específica</i>	60
4.2.3	Cimento Portland	61
4.2.3.1	<i>Massa específica</i>	61
4.2.3.2	<i>Composição química</i>	61
4.2.3.3	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV</i>	66
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	68
4.4	TRATAMENTO ESTATÍSTICO - TESTE DA ANOVA FATOR ÚNICO	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	72
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais importante da construção civil. Segundo Helene e Andrade (2010) sua descoberta foi no final do século XIX, mas foi no século XX que o uso deste material foi intensificado, e por isso é considerado um dos materiais mais consumidos no mundo.

Nos últimos anos, novos métodos construtivos e, principalmente novos materiais, têm sido pesquisados com o intuito de obter estruturas com maior durabilidade e melhor desempenho. Assim, uma alternativa ao concreto convencional feito com cimento Portland, areia, brita e água, são os concretos de alto e ultra alto desempenho, que apresentam maiores resistências mecânicas e maior vida útil. Para Bauer (2000) a utilização de outros elementos no concreto como adições minerais, aditivos químicos, pigmentos, fibras e novas técnicas de execução, como cura em alta temperatura e alta pressão, são responsáveis por um concreto que atenda diversas solicitações de projeto, permitindo estruturas mais duráveis, seguras e esbeltas.

Para alcançar tais características, de acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), há algumas ações necessárias que o concreto de ultra alto desempenho exige para ter melhor desempenho do que o concreto convencional, são eles: utilização de agregados com menor dimensão máxima característica, diminuição da relação água/cimento (a/c), através do uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes e incorporação de adições minerais para aumentar a compacidade do concreto. De maneira geral o concreto de ultra alto desempenho possui as propriedades mecânicas melhoradas porque sua estrutura possui uma distribuição granulométrica mais uniforme e grãos mais finos, proporcionando um material com menor quantidade de poros o que reduz a entrada de fluidos, aumentando sua resistência e durabilidade.

De acordo com Helene e Andrade (2010), entre os materiais constituintes do concreto, o principal é o cimento Portland, que age como um aglomerante hidráulico e é o elemento responsável por conferir resistência mecânica ao concreto.

Durante o processo de obtenção do cimento, através da moagem do clínquer, pode ser adicionado material pozolânico, escórias granuladas de alto forno e/ou material carbonático. Dependendo da composição mineralógica e da porcentagem de cada matéria prima utilizada na mistura, o cimento pode apresentar propriedades específicas e adequadas para diversas situações, resultando assim em vários tipos de cimentos.

De acordo com Silva (1994) os principais tipos de cimentos brasileiros são: cimento Portland comum (CPI), cimento Portland composto (CPII), cimento Portland de alto forno (CPIII), cimento Portland pozzolânico (CPIV), cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) e cimento Portland resistente a sulfatos (CP-RS). Cada tipo de cimento tem uma composição química e mineralógica diferente, bem como o tamanho das partículas que caracteriza a finura do material. Desta forma, as propriedades mecânicas de um concreto podem ser afetadas dependendo de qual cimento é utilizado.

Para o UHPC (*Ultra High Performance Concrete*), que é constituído basicamente de cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia de quartzo, água e aditivos, os materiais utilizados para sua execução são de extrema importância, pois é devido ao empacotamento das suas partículas que esse material pode atingir resistências acima de 150 MPa. Para Thomas e Sorensen (2017) o UHPC é definido como um material cimentício que, diferente do concreto convencional, não possui agregado graúdo (brita), mas é composto por materiais finos, como a sílica ativa, que devido a sua finura e o formato dos grãos, que são esféricos, promovem uma mistura bem graduada, intensificando as resistências mecânicas desse concreto. Além disso, o UHPC possui baixa relação a/c , sendo necessária a incorporação de aditivos químicos que mantêm a fluidez da mistura sem afetar seu desempenho mecânico.

Visando uma boa seleção de materiais para a obtenção do UHPC e por existir um número limitado de pesquisas relacionadas ao assunto no Brasil, surgiu a necessidade de realizar um estudo para determinar qual o tipo de cimento brasileiro mais indicado para esta aplicação, considerando o melhor desempenho mecânico deste tipo de concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por materiais de desempenho superior aos comumente utilizados têm sido a força motriz por trás de pesquisas na área da construção civil. Desta forma, os concretos de ultra alto desempenho são tratados como o compósito cimentício mais avançado na Engenharia Civil na atualidade (ZDEB, 2013). Com isso e devido a grande quantidade de tipos de cimentos comercializados nacionalmente, torna-se interessante determinar qual o tipo de aglomerante hidráulico mais adequado para a produção do UHPC. Além disso, a presença de diferentes tipos de adições na fabricação do cimento, como a cinza volante e a escória de alto forno, apresentam impactos diretos sobre a performance de concretos.

Estudos como os de Dils, Boel e Schutter (2013), Xiao, Deng e Shen (2014) e Alkaysi

et al. (2016) mostram que a resistência à compressão do UHPC sofre influência do tipo de cimento utilizado, e que além da finura, a composição química e mineralogia do cimento, devido as adições minerais, interferem no desempenho mecânico e na durabilidade deste concreto.

Desta forma, estudar as propriedades mecânicas do UHPC utilizando os diferentes tipos de cimentos comercializados no mercado brasileiro, é importante para determinar qual destes confere o melhor desempenho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos de diferentes tipos de cimento Portland nacionais na resistência à compressão do UHPC.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o desempenho de diferentes cimentos comerciais na resistência à compressão do UHPC utilizando ensaios de compressão uniaxial;
- Analisar os efeitos de diferentes tipos de adições dos cimentos na resistência à compressão do UHPC;
- Contribuir para a escolha do melhor tipo de cimento comercializado no Brasil para a produção do UHPC;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CIMENTO PORTLAND

Os constituintes fundamentais do cimento Portland, conforme Bauer (2000), são o cálcio, a sílica, a alumina e o óxido de ferro, que correspondem a 95% da composição do cimento. A magnésia tem uma proporção de até 3%. O sulfato de cálcio, é adicionado após a calcinação e tem a função de retardar o tempo de pega da mistura. O cimento contém também algumas impurezas, que são o óxido de sódio, o óxido de potássio e o óxido de titânio, esses óxidos correspondem a 2% no máximo, da composição do cimento.

Após misturadas e homogeneizadas, as matérias primas são submetidas à ação do calor em um forno, até a temperatura de fusão (1450 °C), resultando no clínquer. Conforme Silva (1994), no processo de clínquerização ocorrem combinações químicas que levam a formação do silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferro aluminato tetracálcico (C_4AF), formando o clínquer, que com o gesso e as adições irão compor o Cimento Portland. As proporções destes componentes podem ser alteradas de modo a otimizar as propriedades do cimento, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química do Cimento Portland

Tipo de cimento	C_3S (%)	C_2S (%)	C_3A (%)	C_4AF (%)
CPI	52,8	20,7	11,5	8,8
CPII	58	16,7	7,2	11,9
CPIII	63,3	12,7	2,8	14,9
CPIV	53,6	17,2	14,2	8,8
CPV ARI	42	28,8	14,2	8,8

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2006)

Dependendo da composição mineralógica e da porcentagem de cada matéria prima utilizada na mistura, o cimento pode apresentar propriedades específicas e adequadas para diversas situações.

Visando reduzir os custos de produção do cimento Portland, surgiram algumas alternativas baseadas na inclusão de adições minerais, que são materiais aglomerantes misturados ao clínquer durante a moagem. Para Silva (1994), além de reduzir os custos, a inclusão de adições também tem a vantagem do aproveitamento de subproduto de outros setores. Os cimentos provenientes de adições minerais possuem características distintas devido à composição química

de cada material, o que resulta em vários tipos de cimento.

2.1.1 Tipos de cimento Portland

Conforme NBR 16697 (2018) há seis tipos básicos de cimentos Portland, que são descritos a seguir e cuja composição é apresentada na Tabela 2.

- Cimento Portland Comum (CPI) e (CPI S): São cimentos basicamente compostos de clínquer e gesso. O CPI pode conter adições de escória de alto forno, material pozolânico ou material carbonático em até 5%. No caso do CPI S essa porcentagem é de 6% à 10% para material carbonático e 0% para outras adições.
- Cimento Portland Composto (CPII): Esse tipo de cimento possui menor calor de hidratação comparado com o CPI, e possui maior quantidade de adições. Desta forma ele pode ser nomeado como CPII E, quando possui adição de escória de alto forno, CPII Z para material pozolânico ou CPII F para material carbonático.
- Cimento Portland de Alto Forno (CPIII): Neste tipo de cimento o teor de clínquer e gesso está entre 25% e 65% e o teor de escória entre 35% e 75%. Pode ser adicionado calcário desde que a proporção seja menor que 10%, conforme recomenda NBR 16697 (2018). Pelo fato de ter um baixo teor de aluminato tricálcico, esse cimento apresenta baixo calor de hidratação e uma característica de resistência à sulfato.
- Cimento Portland Pozolânico (CPIV): Para o CPIV é feita uma mistura do clínquer com material pozolânico, que pode ser obtido pela britagem de certos tipos de rochas, pela calcinação de argilas especiais ou ainda pelo aproveitamento de cinzas provenientes da queima de materiais ricos em sílica, como o carvão mineral e a palha de arroz. Esse cimento apresenta baixo calor de hidratação e resistência aos meios agressivos, apesar de ter um inconveniente que é um endurecimento mais lento, porém em idades avançadas a resistência é superior ao cimento Portland comum.
- Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI): Esse cimento possui alto teor de silicato tricálcico e menor granulometria, sendo mais fino que o cimento Portland comum. Em contrapartida apresenta maior calor de hidratação e uma alta resistência nos primeiros dias após seu endurecimento.

- Cimento Portland resistente a sulfatos: Um cimento que tem essa característica, apresenta um teor de aluminato tricálcico no clínquer igual ou inferior a 8% e teor de escória igual ou superior a 60%.

Tabela 2 - Composição do Cimento Portland

Tipo de Cimento Portland	Clínquer + Sulfato de Cálcio	Escória de Alto-Forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CPI: Cimento Portland Comum	95-100	0-5	0-5	0-5
CPI S: Cimento Portland Comum	90-94	0	0	6-10
CPII E: Composto com Escória de Alto-Forno	51-94	6-34	0	0-15
CPII Z: Composto com Material Pozolânico	71-94	0	6-14	0-15
CPII F: Composto com Material Carbonático	75-89	0	0	11-25
CPIII: Escória de Alto-Forno	25-65	35-75	0	0-10
CPIV: Pozolânico	45-85	0	15-50	0-10
CPV ARI: De Alta Resistência Inicial	90-100	0	0	0-10

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2018)

2.1.2 Índices Físicos do cimento

Para classificar ou escolher o cimento mais adequado para determinada aplicação, é essencial conhecer as suas características. Para Silva (1994) os índices físicos do cimento podem ser analisados verificando a sua finura, o tempo de início e fim da pega, a expansibilidade a quente e a frio e a resistência à compressão, apresentados nas Tabelas 3 e 4. Os índices mais importantes para este estudo são: finura e resistência à compressão.

De acordo com Lamond e Klieger (2006) um cimento mais fino provoca o aumento da taxa de hidratação e diminui a permeabilidade, além de elevar a resistência à compressão do concreto.

De maneira geral para cada tipo de cimento e para cada idade é obtido um valor de resistência à compressão, conforme apresenta a Tabela 4.

Tabela 3 - Requisitos físicos dos cimentos Portland

Sigla	Classe	Finura - Peneira 75μm (%)	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)
CPI, CPI S,	25	≤ 12	≥ 60	≤ 5
CPII E, CPII F e	32	≤ 12	≥ 60	≤ 5
CPII Z	40	≤ 10	≥ 60	≤ 5
CPIII	25	≤ 8	≥ 60	≤ 5
	32	≤ 8	≥ 60	≤ 5
CPIV	40	≤ 8	≥ 60	≤ 5
CPV	ARI	≤ 6	≥ 60	≤ 5

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2018)

Tabela 4 - Resistência à compressão dos cimentos Portland

Sigla	Classe	Resist. Compressão (MPa)			
		1 d	3 d	7 d	28 d
CPI, CPI S,	25	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25
CPII E, CPII F e	32	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32
CPII Z	40	-	≥ 15	≥ 25	≥ 40
CPIII	25	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25
	32	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32
CPIV	40	-	≥ 12	≥ 23	≥ 40
CPV	ARI	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2018)

2.2 ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)

2.2.1 Definições e características gerais

O concreto de ultra alto desempenho, para Alkaysi et al. (2016), Schröfl, Gruber e Plank (2012) e Helene e Andrade (2010), é um material cimentício, constituído por cimento, sílica ativa, areia de quartzo, pó de quartzo, aditivo e água, com resistência à compressão que pode exceder 150MPa, sendo que esta característica se dá pela otimização da densidade de empacotamento de partículas da matriz cimentícia. De acordo com Zhou et al. (2018) a remoção do agregado graúdo (brita) do UHPC torna a mistura mais homogênea, e utilizando areia fina bem graduada, juntamente com a sílica ativa e outras adições minerais, é possível reduzir a porosidade do UHPC.

Para Helene e Andrade (2010) e Schröfl, Gruber e Plank (2012) o UHPC apresenta uma relação a/c na ordem de 0,20, bem inferior às relações utilizadas em concretos convencionais, e isso é possível com a utilização de aditivos superplastificantes que mantêm a trabalhabilidade do concreto fresco, sem afetar a resistência mecânica do material endurecido.

Dils, Boel e Schutter (2013) ressaltam que o bom desempenho do UHPC é resultado de um processo de mistura adequado, juntamente com a escolha do cimento e superplastificante. Para o concreto de ultra alto desempenho, Dils, Boel e Schutter (2013) e Schröfl, Gruber e Plank (2012) indicam uma combinação de aditivos à base de éter policarboxilato (PCE), um para a dispersão do cimento e outro para a dispersão do pó de sílica.

De acordo com Schröfl, Gruber e Plank (2012) para ocupar os espaços vazios entre as partículas e os agregados, são utilizados materiais finos como o pó de sílica, por exemplo, que é composta por partículas que têm 1/10 do tamanho do cimento normalmente utilizado. A adição do pó de sílica diminui a trabalhabilidade do concreto, justificando a utilização de superplastificantes.

Dils, Boel e Schutter (2013) citam que ao utilizar um cimento com baixo teor de álcalis (K_2O e Na_2O) consegue-se uma boa trabalhabilidade. No entanto um cimento com alto teor alcalino resulta em um *slump* maior, isso porque os álcalis são altamente solúveis e como consequência, os sulfatos competem com o superplastificante para o consumo das moléculas de aluminato tricálcico. Portanto para ter um concreto com alta durabilidade, Dils, Boel e Schutter (2013) recomendam um teor moderado de óxido sulfúrico SO_3 e álcali.

De acordo com Xiao, Deng e Shen (2014) e Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017), comparado com o concreto convencional, o UHPC possui maior resistência à compressão, maior resistência à tração e maior ductilidade, quando fibras metálicas ou poliméricas são adicionadas, ou seja, o material apresenta maior capacidade de deformação antes de ocorrer a ruptura. Essas vantagens ocorrem porque sua estrutura de partículas descontínuas reduz a entrada de líquidos o que aumenta significativamente sua resistência e durabilidade.

2.2.2 Aplicações do UHPC

Segundo Zhou et al. (2018), para obter um bom desempenho do UHPC é necessário determinar a melhor proporção dos materiais que o compõe, através de experimentos em várias regiões, pois a composição química e mineralógica, da matéria prima do cimento e das adições minerais, podem variar de uma região para outra. Segundo os autores, esse inconveniente é o que mais restringe a aplicação do UHPC em grande escala. Outro fator que dificulta a aplicação deste tipo de concreto, é o alto custo, devido ao alto consumo de cimento, na ordem de 700 kg/m^3 , praticamente duas vezes maior do que o concreto convencional. Os processos de cura térmica, que melhoram o desempenho desse concreto, também limitam a aplicação do UHPC

pois são métodos bem específicos e complexos para serem aplicados em grande escala.

Porém, além de todas as dificuldades citadas o concreto de ultra alto desempenho já está sendo utilizado em vários países, entre eles: Japão, Coréia do Sul, Malásia, China, França, Alemanha, Áustria, Estados Unidos e Canadá. As principais aplicações já realizadas com UHPC são: reforço de estruturas de concreto convencional, pavimentação, conforme a Figura 1, estruturas de pontes, conforme as Figuras 2 e 3, peças pré fabricadas, entre outros.

Figura 1 - Aplicação do UHPC em pavimentação



Fonte: Lafarge-Holcim (2018)

Figura 2 - Ponte de pedestres na República Tcheca



Fonte: Koukolík et al. (2015)

Figura 3 - Ponte em UHPC com formato de PI



Fonte: Lafarge-Holcim (2018)

2.2.3 Estudos da literatura com o UHPC

2.2.3.1 *Comparativo entre UHPC e Concreto Convencional*

Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017) determinaram as propriedades mecânicas do UHPC e a resistência à compressão de um concreto convencional para comparar e desenvolver um modelo numérico capaz de simular o comportamento do UHPC. O experimento engloba ensaios de resistência à compressão em amostras cúbicas e cilíndricas e também testes de resistência à flexão e à tração.

A pesquisa de Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017) teve como objetivo principal simular o material do UHPC através de um *software* que permite o estudo das estruturas e foi feita em duas fases, a primeira de forma experimental e a segunda de forma numérica. A fase experimental consistiu em determinar as propriedades do UHPC a partir de testes com 66 amostras (33 com UHPC e 33 com concreto convencional), com foco nas resistências à compressão e à tração. Para o concreto de ultra alto desempenho, os autores utilizaram uma mistura disponível comercialmente, cuja composição é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição do Ductal®

Material	kg/m³	% por peso	traço
Cimento Portland	712	28,5	1,000
Areia fina	1020	40,8	1,430
Sílica Ativa	231	9,3	0,326
Areia de quartzo	211	8,4	0,295
Aditivo acelerador	30	1,2	0,042
Superplastificante	30,7	1,2	0,042
Fibras de aço	156	6,2	0,218
Água	109	4,4	0,154

Fonte: Adaptado de Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017)

O concreto convencional foi adquirido de um fornecedor como uma mistura pronta com um *slump* de 100mm. As misturas do UHPC e do concreto convencional foram moldadas em corpos de prova cilíndricos e cúbicos. Após 24 horas, foram desmoldados e passaram por uma cura úmida de 27 dias, então foram submetidos aos testes. A Figura 4 mostra todos os corpos de prova utilizados.

Figura 4 - Corpos de prova de UHPC

Fonte: Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017)

No ensaio de resistência à compressão, Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017) aplicaram um carregamento contínuo com velocidade de 1,96kN/s. Nesse teste os autores observaram que as amostras do concreto convencional se comportaram de forma elástica até a força máxima ser aplicada, e após a primeira fissura os corpos de prova falharam repentinamente e de forma explosiva. Contudo as amostras de UHPC tiveram um comportamento elástico até metade da

sua resistência à compressão, em seguida apresentou um comportamento de endurecimento até a tensão de pico. Os corpos de prova rompidos à compressão são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Corpos de prova após ensaio de compressão



(a) Corpos de prova cilíndrico - UHPC



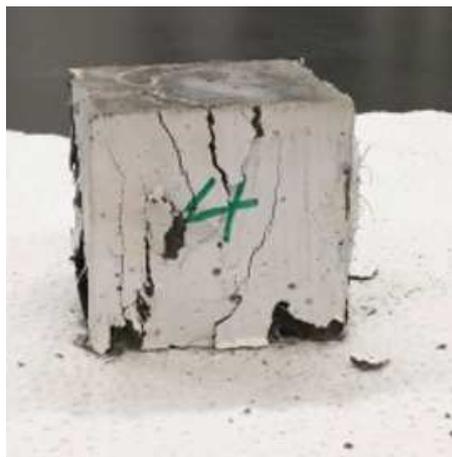
(b) Corpos de prova cilíndrico - Concreto convencional



(c) Amostra 75mm - UHPC



(d) Amostra 75mm - Concreto convencional



(e) Amostra 50mm - UHPC



(f) Amostra 50mm - Concreto convencional

Fonte: Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017)

Para o teste de flexão foram ensaiados moldes com dimensões de 150x150x500mm. As amostras após o rompimento estão apresentadas na Figura 6. De acordo com Shafieifar, Farzad

e Azizinamini (2017) aplicou-se carga com velocidade constante de 0,13kN/s no ensaio de flexão. Esse teste é baseado na teoria de flexão simples aplicados em vigas e no comportamento tensão-deformação até a falha. Observa-se que no caso do molde em UHPC a fissura é pequena devido a presença de fibras, já no concreto convencional a ruptura é frágil. O UHPC neste teste apresentou uma resistência à flexão de 21,9MPa, 4,5 vezes maior que o concreto convencional, que rompeu com 4,9MPa.

Figura 6 - Corpos de prova após ensaio de flexão



(a) Amostra de UHPC

(b) Amostra de Concreto convencional

Fonte: Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017)

Outro ensaio realizado por Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017) foi o de tração, através da compressão diametral das amostras. Para os corpos de prova cilíndricos, o carregamento foi aplicado axialmente até ocorrer a ruptura da amostra. Na Figura 7 pode ser observado os corpos de prova rompidos, do UHPC e do concreto convencional.

Figura 7 - Corpos de prova após ensaio de tração



(a) Amostra de UHPC

(b) Amostra de Concreto convencional

Fonte: Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017)

Os valores obtidos pelos autores, para os ensaios de compressão, tração e flexão estão

apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado do teste de resistência à compressão

Tipo da Amostra	Ensaio	UHPC	Concreto Convencional
Cilíndrica	Compressão	138MPa	40,4MPa
	Tração	20,7MPa	3,5MPa
Cúbica - 50mm	Compressão	171MPa	52,55MPa
Cúbica - 75mm	Compressão	133,8MPa	64,8MPa
Moldes 150x150x500mm	Flexão	21,9MPa	4,9MPa

Fonte: Adaptado de Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017)

Observa-se que a presença de fibras no UHPC tem boa influência na resistência à tração, visto que no resultado final a amostra de UHPC teve uma resistência a tração de 20,7MPa e o concreto convencional de 3,5MPa.

Nos resultados da primeira fase, que compõe os testes experimentais, Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017) verificaram que o UHPC teve consideravelmente um melhor desempenho do que o concreto convencional, tanto para resistência à tração quanto à compressão. Pelo comportamento das amostras notou-se que as fibras tiveram grande influência nos testes realizados.

2.2.3.2 *Tipos de cimento e teor de sílica*

Na pesquisa de Alkaysi et al. (2016) foi feita a avaliação da durabilidade do UHPC através de ensaios de ciclos gelo-degelo, ensaios de penetração de cloretos e também através da presença e distribuição dos vazios no material. Esses ensaios foram feitos a partir de um traço base com alterações na quantidade de sílica e no tipo de cimento, para então verificar a influência desses materiais na durabilidade e resistência mecânica do concreto. Os traços executados estão apresentados na Tabela 7.

Nota-se que foram utilizados três tipos de cimento, o cimento branco (comum), cimento tipo V, correspondente ao nacional CPIII, e o cimento tipo I com escória de alto forno, que corresponde ao CPII E nacional. Para esses três tipos de cimento, foi feita a variação da proporção de pó de sílica, entre 0% e 25% em relação ao cimento. Além disso foi utilizado o aditivo redutor de água Advacast 575, à base de policarboxilato, na proporção de 1,35% em relação a massa de cimento, para todas as misturas. Utilizou-se também 1,5% de fibras de aço e duas granulometrias diferentes de areia de sílica, a F100 que contém partículas com tamanho médio de 100 μm e F12 com tamanho médio dos grãos de 500 μm .

Tabela 7 - Traços utilizados para o UHPC

Nome	Cimento Branco	Sílica Ativa	Pó de Sílica	Fibras (%)	F100	F12
W - 25	1,00	0,25	0,25	1,50	0,26	1,06
W - 15	1,00	0,25	0,15	1,50	0,29	1,14
W - 00	1,00	0,25	0,00	1,50	0,31	1,26
Cimento Tipo V (CPIII)						
V - 25	1,00	0,25	0,25	1,50	0,26	1,05
V - 15	1,00	0,25	0,15	1,50	0,28	1,14
V - 00	1,00	0,25	0,00	1,50	0,31	1,26
Cimento Tipo I - GGBS (CPII E)						
IG - 25	1,00	0,25	0,25	1,50	0,26	1,06
IG - 15	1,00	0,25	0,15	1,50	0,28	1,14
IG - 00	1,00	0,25	0,00	1,50	0,31	1,26

Fonte: Adaptado de Alkaysi et al. (2016)

Para avaliar a resistência à compressão de cada mistura, foram moldados nove corpos de prova cúbicos com aresta de 50mm. Alkaysi et al. (2016) não utilizaram nenhum método de vibração. Cada amostra foi submetida a um carregamento com velocidade constante de 1,12 kN/s até seu rompimento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Ao final dos ensaios os autores observaram que todas as misturas apresentaram elevada resistência à penetração de íons de cloreto e boa resistência aos ciclos gelo-degelo. Em relação ao tipo de cimento, as misturas feitas com cimento Portland Tipo I / GGBS (CPII E) apresentaram menor permeabilidade, seguida pelas amostras feitas com cimento branco e por último com o cimento Portland tipo V (CPIII).

Por fim Alkaysi et al. (2016) concluíram que as variações no teor de sílica tiveram pouco efeito sobre o desempenho de durabilidade das misturas do UHPC, e embora tenha afetado levemente a densidade de empacotamento das partículas, a mesma ficou próximo da densidade ótima. Dessa forma, o pó de sílica é um material que poderia ser eliminado para diminuir os custos deste concreto, porém pesquisas mais avançadas devem ser feitas para confirmar a possibilidade de eliminação da sílica do UHPC de forma que não interfira nas propriedades mecânicas deste material.

Tabela 8 - Resultados dos testes com o UHPC

UHPC	Penetração de Cloreto ^a	Teor de vazios (%)	Resist. ao cong. e descon. (g/m^2) ^b	Resistência à compressão (MPa)
W - 25	89	5,8	98,8	195
W - 15	295	7,9	20,7	188,8
W - 00	637	6,6	17,7	173,6
V - 25	939,5	6,1	18,2	174,3
V - 15	488,5	6,5	18,0	187,4
V - 00	57	4,5	42,2	177,8
IG - 25	137,5	5,7	20,5	172,9
IG - 15	229	4,8	24,2	181,2
IG - 00	137,5	5,8	44,7	190,9

^a Resistência à penetração de cloreto - Carga total penetrada (Coulomb)

^b Resistência ao congelamento e descongelamento - Perda de massa total após 28 ciclos (g/m^2)

Fonte: Adaptado de Alkaysi et al. (2016)

2.2.3.3 Influência do vácuo no UHPC

Na pesquisa de Dils, Boel e Schutter (2013) foi feita a mistura do UHPC com 6 tipos de cimentos denominados C1, C2, C3, C4, C5 e C6. Os autores analisaram a resistência à compressão, a trabalhabilidade e o teor de ar incorporado. O traço base utilizado é apresentado na Tabela 9, em que C = cimento, SF = sílica ativa, S = areia de quartzo, F1 e F2 = pó de quartzo (com duas granulometrias diferente), SP = superplastificante e W = água.

Tabela 9 - Traço base do UHPC

C	SF	S	F1	F2	SP	W
1	0,23	1,1	0,273	0,117	0,0185	0,21

Fonte: Adaptado de Dils, Boel e Schutter (2013)

Os tipos de cimentos utilizados possuem a composição química conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Composição química dos cimentos utilizados

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C_3S	56,12	57,74	57,16	59,82	60,58	59,53
C_2S	19,10	17,74	18,55	14,88	14,68	16,07
C_3A	2,44	2,57	2,47	0,87	2,21	1,50
C_4AF	12,80	12,40	12,80	15,80	15,40	15,70

Fonte: Adaptado de Dils, Boel e Schutter (2013)

Para cada tipo de cimento foi utilizada uma quantidade específica de superplastificante, de forma que o *slump* fosse mantido próximo de 300mm. Essa diferença da quantidade de aditivo para cada tipo de cimento é explicada pela diferença da composição química e finura do

cimento.

Os autores aplicaram vácuo nas misturas para poder analisar a sua influência no concreto fresco. Com relação ao teor de ar incorporado, a situação de vácuo apresenta menor teor de ar comparado com a mistura feita sob pressão atmosférica.

O resultado do ensaio de compressão para cada mistura, nas condições de vácuo e pressão atmosférica, são apresentados na Tabela 11, com valores médios de resistência.

Tabela 11 - Influência do vácuo na resistência à compressão do UHPC

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
$f_{c,7d}$ - 1013 mbar (MPa)	104,9	104,3	107,1	110,8	76,8	92,6
$f_{c,7d}$ - 50 mbar (MPa)	105,5	112,4	115,4	125,4	78,2	86,5
$f_{c,28d}$ - 50 mbar (MPa)	137,9	122,3	146,0	158,5	115,9	-

Fonte: Adaptado de Dils, Boel e Schutter (2013)

Portanto os autores concluíram que para o UHPC é indicado utilizar um cimento com baixo teor de aluminato tricálcico, e uma proporção adequada de materiais alcalinos. Verificou-se que uma baixa trabalhabilidade está relacionada com a maior quantidade de ar incorporado na mistura. Essa quantidade de ar pode ser reduzida aplicando vácuo, durante o processo de mistura dos materiais. Observou-se também que a resistência à compressão foi maior nas misturas que apresentaram menor quantidade de ar incorporado, isso porque a aplicação de vácuo aumenta a densidade do concreto.

Por fim, Dils, Boel e Schutter (2013) concluíram que para obter um concreto de qualidade é fundamental reduzir a quantidade de ar incorporado, pois essa característica influencia diretamente na trabalhabilidade da mistura e na resistência final do material.

2.2.3.4 *Influência da substituição parcial do cimento por adições minerais no UHPC*

Xiao, Deng e Shen (2014) analisaram as propriedades mecânicas do UHPC ao substituir uma quantidade de cimento por misturas minerais de cinzas volantes e escória de alto forno sob diferentes condições de cura, e descobriram que as misturas minerais podem substituir uma parte da quantidade de cimento para manter as propriedades e reduzir custos.

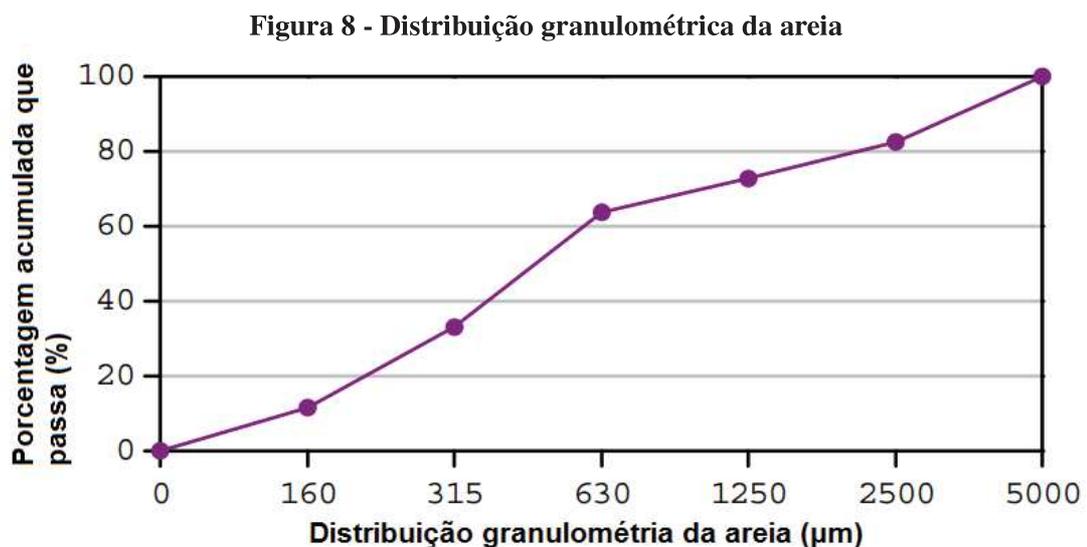
Segundo Xiao, Deng e Shen (2014) há quatro princípios que devem ser considerados para preparar o UHPC convencional, são eles: a eliminação dos agregados graúdos para melhorar a homogeneidade, utilização de sílica ativa visando otimizar o empacotamento das partículas, utilização de fibras para melhorar a ductilidade e por fim fazer a cura em altas temperaturas, para que seja possível atingir elevada resistência mecânica nas idades iniciais do

concreto.

A adição da sílica ativa aprimora a densidade de empacotamento das partículas do UHPC porque possui uma granulometria esférica e o tamanho dos grãos é menor do que o cimento. Porém há alguns problemas no uso da sílica ativa, entre eles está a dificuldade em controlar a qualidade da sílica e o preço elevado do produto final devido ao baixo rendimento para a indústria de concreto. Por esses motivos Xiao, Deng e Shen (2014) elaboraram uma mistura utilizando cimento superfino e eliminando a sílica ativa do UHPC. Para os autores o cimento superfino e os aditivos minerais desempenham a função básica da sílica ativa, que é preencher os vazios e reforçar a reologia do concreto, portanto a mesma pode ser substituída pelo cimento superfino.

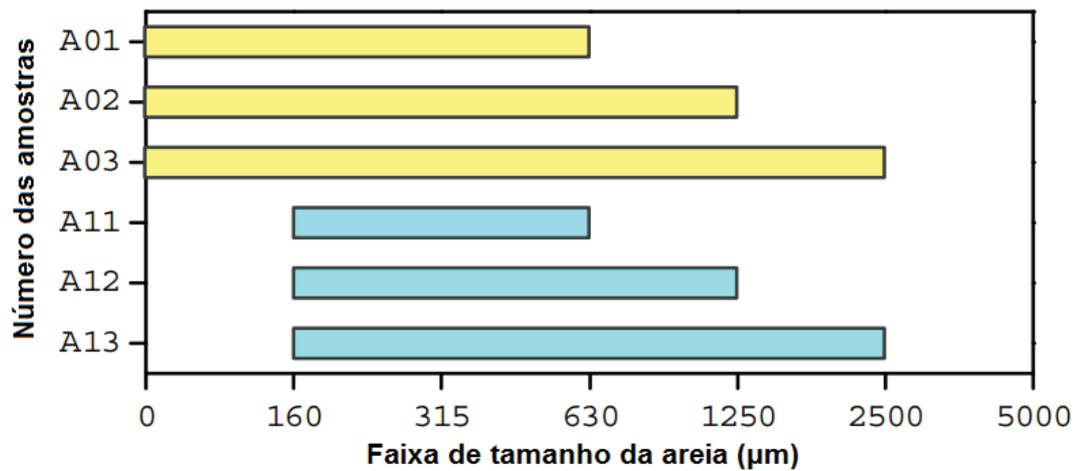
No pesquisa de Xiao, Deng e Shen (2014) foram usados quatro tipos de materiais cimentícios, o cimento superfino (SC), cimento Portland comum (OPC), semelhante ao CPV, cinzas volante e escória de alto forno, além disso utilizou-se superplastificante, para reduzir a quantidade de água, aditivo anti espumante, para reduzir o teor de ar incorporado na mistura e fibras de aço a fim de melhorar a resistência à tração.

A areia utilizada possui distribuição granulométrica conforme a Figura 8. Os autores executaram 6 amostras (A01, A02, A03, A11, A12 e A13) variando a quantidade e a granulometria da areia em cada uma, como é apresentado na Figura 9.



Fonte: Adaptado de Xiao, Deng e Shen (2014)

Figura 9 - Distribuição granulométrica da areia em cada amostra



Fonte: Adaptado de Xiao, Deng e Shen (2014)

Observa-se que a amostra A03 apresenta uma distribuição granulométrica contínua, pois é composta por uma variação maior de partículas. Enquanto que a amostra A11 possui partículas entre $160\mu\text{m}$ e $630\mu\text{m}$, ou seja, sua distribuição granulométrica é a mais uniforme.

Foram feitos 11 tipos de misturas que correspondem à 46 traços diferentes, e em cada uma dessas misturas foi feita a variação de um parâmetro de cada vez, sendo eles: água, areia, aditivo anti espumante, superplastificante, agregado, quantidade de cimento superfino por cimento comum, quantidade de cimento superfino por cinzas volante, quantidade de cimento superfino por escória de alto forno e quantidade de fibras.

Na execução das amostras, primeiro foram misturados os materiais secos, em uma argamassadeira, em baixa velocidade por aproximadamente 3 minutos. Então foram acrescentados a água e o superplastificante e misturados em alta velocidade por 3 minutos. Para acrescentar as fibras, a velocidade do equipamento foi diminuída. Com todos os materiais misturados, aumentou-se a velocidade novamente por 2 minutos, para incorporar totalmente as fibras ao concreto. Na sequência foram moldados os corpos de prova em moldes de aço, com dimensões $40 \times 40 \times 160\text{mm}$, e compactados em uma mesa de vibração. As amostras foram mantidas submersas à 20°C por 48 horas. Após isso foram desmoldadas e submetidas a cura a vapor à 90°C por 48 horas. Em seguida as amostras foram submetidas aos testes de resistência à compressão e à flexão

Nos resultados obtidos a relação a/c que teve o melhor desempenho foi em 0,17, pois reduziu o teor de ar incorporado e melhorou a densidade de empacotamento, consequentemente

a resistência à compressão foi maior. Já para a relação areia/cimento a melhor proporção foi de 1:1,1, considerando uma trabalhabilidade adequada e um baixo custo. Com relação ao superplastificante, os autores concluíram que 1,5% em relação ao cimento, é um teor ideal visto que apresentou uma boa eficiência e baixo custo.

Para Xiao, Deng e Shen (2014) quando se substitui o cimento superfino por 20% de cinzas volantes, a resistência à compressão é mantida, mas se aumentar a quantidade de cinzas volantes para 40% a resistência à compressão diminui. Por outro lado, quando o cimento superfino for substituído por 20% e 40% de escória de alto forno granulada, a resistência à compressão é maior do que sem adições, isso se deve ao fato de que mais poros capilares foram preenchidos pela escória de alto forno, portanto ela tem o mesmo efeito que o cimento superfino.

Nos resultados obtidos por Xiao, Deng e Shen (2014), a melhor e a segunda melhor resistência à compressão ocorre quando é feita uma substituição total de 40% de adições minerais, sendo 30% de escória de alto forno e 10% de cinzas volantes ou só com 40% de escória de alto forno. A resistência à compressão corresponde a 160MPa e 158MPa, respectivamente. Essas duas proporções são sugeridas considerando a resistência, trabalhabilidade e custo do UHPC com cimento superfino.

Em relação a quantidade de fibras de aço, Xiao, Deng e Shen (2014) relatam que aumentando a fração de volume de fibra de aço de 1% para 4% a resistência à compressão e à flexão aumenta de 172MPa para 206MPa, e 17,2MPa para 31,4MPa, respectivamente. A trabalhabilidade do concreto de ultra alto desempenho com cimento superfino e 4% de fibras de aço é considerada aceitável.

Outra pesquisa feita com cimento Portland e adições, é a de Yu, Spiesz e Brouwers (2015), que teve como objetivo principal desenvolver corpos de prova para avaliar a influência de diferentes adições minerais no comportamento fresco e endurecido do UHPC. Para isso os autores utilizaram cimento Portland Ordinário (OPC) CEM I 52,5 R, que corresponde ao CPV ARI, superplastificante a base de éter policarboxilato, cinzas volantes, escória de alto forno e pó de calcário, para substituir uma porcentagem do cimento. Além disso foram utilizadas duas granulometrias de areia e a micro sílica a fim de otimizar o empacotamento das partículas do concreto.

No estudo de Yu, Spiesz e Brouwers (2015), foram executados quatro traços diferentes, um como referência, usando apenas o cimento Portland sem as adições minerais, e os outros

três foram executados substituindo 30% do cimento por cinzas volantes, escória de alto forno e pó de calcário. Os corpos de prova foram moldados e submetidos aos ensaios de flexão e compressão. Os traços utilizados pelos autores são apresentados nas Tabelas 12 e 13, em que: C = Cimento, FA = Cinzas volantes, GGBS = Escória de alto forno, LP = Pó de calcário, S = Areia, MS = Areia fina, nS = Micro sílica, W = Água, SP = Superplastificante, W/B = Relação água/cimento e SP/C = Relação superplastificante/cimento.

Tabela 12 - Traços, em massa, utilizados por Yu, Spiesz e Brouwers (2015) - Parte 1

Traço	C (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	GGBS (kg/m ³)	LP (kg/m ³)	S (kg/m ³)	MS (kg/m ³)
1	582,1	259,9	0	0	1039,5	216,6
2	591,9	264,3	0	0	1057,0	220,2
3	600,0	267,9	0	0	1071,4	223,2
4	596,1	0	266,1	0	1064,5	221,8
5	606,4	0	270,1	0	1082,9	225,6
6	614,9	0	274,5	0	1098,0	228,8
7	592,6	0	0	264,6	1058,3	220,5
8	602,8	0	0	269,1	1076,5	224,3
9	611,2	0	0	272,9	1091,4	227,4
Ref. 1	868,8	0	0	0	1072,5	223,4
Ref. 2	883,9	0	0	0	1091,2	227,3
Ref. 3	896,3	0	0	0	1106,6	230,5

Fonte: Adaptado de Yu, Spiesz e Brouwers (2015)

Tabela 13 - Traços, em massa, utilizados por Yu, Spiesz e Brouwers (2015) - Parte 2

Traço	nS (kg/m ³)	W (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	W/B (kg/m ³)	SP/C (kg/m ³)
1	24,3	173,2	43,3	0,2	0,07
2	24,7	159,3	44,0	0,18	0,07
3	25,0	147,8	44,6	0,165	0,07
4	24,8	177,4	44,4	0,2	0,07
5	25,3	163,2	45,1	0,18	0,07
6	25,6	151,5	45,8	0,165	0,07
7	24,7	176,4	44,1	0,2	0,07
8	25,1	162,2	44,9	0,18	0,07
9	25,5	150,6	45,5	0,165	0,07
Ref. 1	25,0	178,8	44,7	0,2	0,05
Ref. 2	25,5	164,4	45,5	0,18	0,05
Ref. 3	25,8	152,7	46,1	0,165	0,05

Fonte: Adaptado de Yu, Spiesz e Brouwers (2015)

Além de variar as adições minerais, foram feitas amostras com três variações de relação a/c, sendo elas de 0,165, 0,18 e 0,20. Para os três casos de relação a/c a amostra com escória

de alto forno apresentou resistência à compressão semelhante à amostra de referência, ou seja, teve o melhor desempenho mecânico comparado com as amostras de cinzas volantes e pó de calcário.

Por outro lado, as amostras que tiveram 30% do cimento substituído por pó de calcário tiveram um desempenho menor comparado com o traço de referência.

As mesmas observações foram feitas para a resistência à flexão, em que amostras com escória de alto forno tiveram bom desempenho e as amostras com pó de calcário apresentaram os menores valores de resistência.

2.2.3.5 *Influência de três tipos de cimento no UHPC sob altas temperaturas*

Na pesquisa de Lee et al. (2017) foram utilizados três tipos de cimento, o cimento comum (ASTM C150 Tipo I), semelhante ao CPV ARI, e dois tipos de cimentos de aluminato de cálcio com dois teores de alumina diferentes, 50% e 70%.

O principal objetivo de Lee et al. (2017) foi analisar a resistência à compressão de três traços diferentes de UHPC, utilizando diferentes tipos de cimentos e micro sílica, a partir de amostras submetidas a altas temperaturas.

O traço base utilizado pelos autores corresponde a uma relação a/c (água/cimento + micro sílica) de 0,20, 2,3% de superplastificante a base de éter policarboxilato, 1% de aditivo redutor de retração e fibras.

Após feita a mistura do UHPC, foram moldados corpos de prova cúbicos de 50mm os quais passaram por uma cura em 20⁰C por 7 dias. Em seguida foram submetidos a uma temperatura de 100⁰C por duas horas e então houve um resfriamento lento até a temperatura ambiente. Só então as amostras foram levadas a um forno sob uma temperatura de 450⁰C e 800⁰C, e posteriormente submetidas ao teste de resistência à compressão.

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão das amostras com cimento comum, e cimentos com 50% e 70% de teor de alumina, sob quatro condições de cura. Os autores observaram que quando as amostras foram submetidas à temperatura de 450⁰C houve um aumento na resistência à compressão para as amostras com teor de alumina, por outro lado para amostras realizadas com cimento comum houve uma diminuição da resistência até a ruptura. O comportamento do UHPC com cimento com teor de alumina pode ser explicado pela hidratação adicional do aluminato de cálcio e ao enrijecimento do gel de silicato de cálcio hidratado.

Tabela 14 - Resultados da resistência à compressão do UHPC

Amostra	Tipo de Cura	Resistência à compressão (MPa)
U	Cura ambiente	114,5
UA50	Cura ambiente	125,3
UA70	Cura ambiente	59,7
U	Após exposição à 100 ^o C	95,3
UA50	Após exposição à 100 ^o C	145,8
UA70	Após exposição à 100 ^o C	107,3
U	Após exposição à 450 ^o C	0
UA50	Após exposição à 450 ^o C	236,9
UA70	Após exposição à 450 ^o C	140,6
U	Após exposição à 800 ^o C	-
UA50	Após exposição à 800 ^o C	129,1
UA70	Após exposição à 800 ^o C	86,1

U = Amostra utilizando cimento comum (ASTM C150 Tipo I)
 UA50 = Amostra utilizando cimento com 50% de alumina
 UA70 = Amostra utilizando cimento com 70% de alumina

Fonte: Adaptado de Lee et al. (2017)

A resistência à compressão reduziu quando as amostras foram expostas à temperaturas entre 450^oC e 800^oC pois formaram-se microfissuras na interface entre os materiais finos e o agregado (areia) do UHPC.

Por fim, Lee et al. (2017) concluíram que a hidratação do aluminato de cálcio provocou um aumento dos microporos do concreto permitindo a liberação da pressão de vapor induzida pela evaporação da água. Além disso a baixa relação a/c do UHPC minimizou a degradação da estrutura causada pela evaporação excessiva da água em altas temperaturas.

2.2.3.6 *Influência do superplastificante no UHPC*

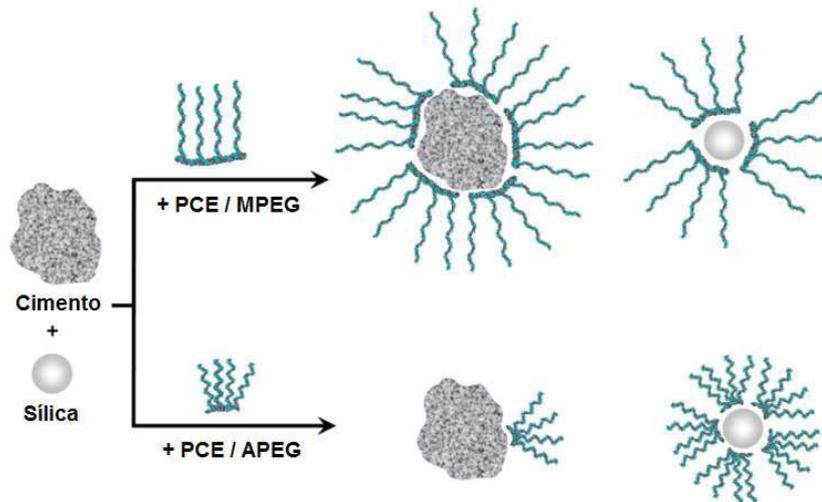
No estudo de Schröfl, Gruber e Plank (2012) foram feitos ensaios utilizando dois tipos de superplastificantes, Éter Policarboxilato (PCE) à base de Éteres Alílicos de Polioxietileno (APEG) e à base de Éster do ácido metacrílico (MPEG), misturados ao cimento e à sílica. O objetivo foi verificar a adsorção de cada aditivo com cada um dos materiais cimentícios, e posteriormente fazer a combinação dos superplastificantes e aplicá-lo na mistura do UHPC.

Na Figura 10, observa-se que há diferença na adsorção de cada um dos superplastificantes com a partícula de cimento e com a partícula de sílica. O APEG apresenta melhor interação com o grão de sílica, enquanto que o MPEG apresenta uma melhor interação com a partícula de cimento. Já na Figura 11, quando é feita a combinação dos dois aditivos, observa-se que tanto a partícula de cimento quanto a de sílica, ficam completamente envolvidas com

superplastificante.

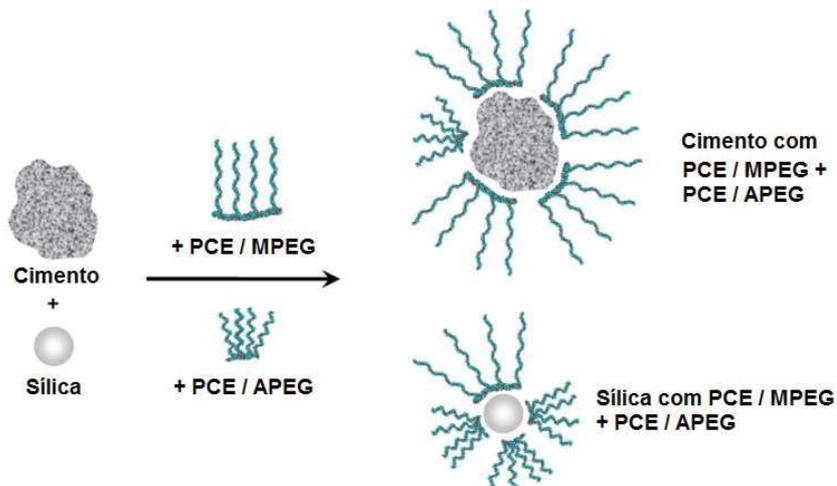
Os resultados obtidos por Schröfl, Gruber e Plank (2012), indicaram que quando é feita uma combinação de MPEG e APEG, ocorre a adsorção dos dois tipos de PCE tanto no cimento quanto na sílica, e esse efeito otimiza a hidratação dos materiais finos além de permitir que sejam utilizadas doses menores de superplastificante, mantendo a mesma fluidez que os PCEs individuais.

Figura 10 - Cobertura superficial de cimento e sílica por PCE/MPEG e PCE/APEG



Fonte: Adaptado de Schröfl, Gruber e Plank (2012)

Figura 11 - Adsorção de uma combinação de aditivos no cimento e na micro sílica



Fonte: Adaptado de Schröfl, Gruber e Plank (2012)

2.2.3.7 Estudo de traço

No estudo de traço feito por Ozelame (2017), a autora utilizou cinco traços baseados na literatura, conforme é apresentado na Tabela 15, sendo que os traços 1 e 2 foram baseados na pesquisa de Richard e Cheyrezy (1995) e para os traços 3, 4 e 5 utilizou-se como referência os estudos apresentados por Mostofinejad, Nikoo e Hossein (2016), Dils, Boel e Schutter (2013) e Alkaysi et al. (2016), respectivamente.

Alguns traços precisaram ser adaptados com relação a quantidade de superplastificante e o fator a/c, de forma que fosse possível a mistura dos materiais com os equipamentos disponíveis em laboratório.

Tabela 15 - Dosagem de traços de UHPC de referência em volume

Traço	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Quartzo	Pó de Quartzo	Superplastificante	Água
1	1	0,23	1,10	0,39	1,90%	0,170
2	1	0,23	0,50	0,39	1,90%	0,190
3	1	0,30	0,73	0,18	3,00%	0,165
4	1	0,23	1,10	0,28	1,90%	0,210
5	1	0,25	1,06	0,26	1,35%	0,220

Fonte: Adaptado de Ozelame (2017)

A Tabela 16 apresenta os traços finais para esta primeira etapa do estudo após os ajustes necessários. Para este estudo a autora utilizou o cimento CPV ARI.

Tabela 16 - Traços após os ajustes necessários

Traço	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Quartzo	Pó de Quartzo	Superplastificante	Água
1	1	0,23	1,10	0,39	3,00%	0,270
2	1	0,23	0,50	0,39	2,20%	0,290
3	1	0,30	0,73	0,18	3,00%	0,250
4	1	0,23	1,10	0,28	3,00%	0,265
5	1	0,25	1,06	0,26	3,00%	0,224

Fonte: Adaptado de Ozelame (2017)

O procedimento do estudo de traço inicia com a mistura dos materiais secos por aproximadamente 5 minutos em um misturador planetário. Na sequência adiciona-se o superplastificante e a água e então os materiais são misturados por aproximadamente 10 minutos até atingir uma boa trabalhabilidade permitindo a moldagem dos corpos de prova. Segundo a autora foram utilizados moldes de 50x100mm devido a capacidade de carga da prensa disponível no laboratório para o ensaio de compressão (OZELAME, 2017).

Após a mistura do concreto e com os moldes devidamente preparados com desmoldante, os mesmos foram preenchidos e mantidos à temperatura ambiente por 24 horas. Na sequência, segundo Ozelame (2017), os corpos de prova foram desmoldados e encaminhados a dois tipos de cura:

1. Cura submersa até idade de ruptura.
2. Cura em estufa à 90°C por 72 horas e posterior cura submersa até idade da ruptura.

Após o processo de cura e o ensaio de resistência à compressão, os traços que apresentaram os melhores resultados foram o 3 e o 4, atingindo aos 28 dias 110,16MPa e 113,36MPa, respectivamente. Esses resultados foram alcançados com os corpos de prova submetidos a cura submersa para o traço 4 e com cura térmica para o traço 3 (OZELAME, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para analisar os efeitos dos diferentes tipos de cimentos nacionais nas propriedades mecânicas do UHPC foram utilizados os materiais descritos na sequência e representados na Figura 12, conforme segue:

1. Pó de quartzo;
2. Sílica ativa;
3. Areia de quartzo;
4. Superplastificante Tecflow 8000 (À base de Éter Policarboxilato);
5. Água;
6. Cimentos Portland: CII (E, F e Z) 32, CIIV 32 RS e CPIV ARI 40.

Figura 12 - Materiais utilizados para o UHPC



Fonte: Autoria Própria (2019)

3.1.1 Tipos de cimentos Portland

De acordo com a literatura e tendo em vista a grande utilização do cimento ASTM Type III no UHPC (semelhante ao CPV ARI), optou-se por fazer o UHPC deste trabalho com o CPV ARI, sendo este portanto tomado como referência. Com o objetivo de realizar comparações dos efeitos de diferentes cimentos nacionais nas propriedades mecânicas do UHPC foram utilizados os seguintes cimentos: CII E 32, CII Z 32, CII F 32 e CIV 32 RS. O cimento CIII não foi utilizado já que o mesmo não é usualmente comercializado na região oeste do Paraná.

A composição química destes cimentos, segundo a NBR 16697 (2018), é apresentada na Tabela 2 da página 20. De acordo com esta tabela, o cimento CII F 32 apresenta teor de adições de filler calcário, enquanto que escória de alto forno e materiais pozolânicos são observados nos cimentos CII E, CII Z, respectivamente. Já o CIV apresenta tanto adições de filler de calcário quanto material pozolânico.

De acordo com a NBR 16697 (2018) há quatro classes de resistência do cimento Portland: 25, 32, 40 e ARI. Para esse estudo foram utilizados cimentos com classe 32 para o CII e CIV, pois são mais comuns do ponto de vista comercial. Além disso utilizou-se o CPV ARI, que apresenta uma resistência à compressão de referência de 40MPa.

3.1.2 Pó de Quartzo

O pó de quartzo utilizado neste trabalho foi adquirido junto a empresa Brasilminas e apresenta em termos de composição química 99,9% de sílica. Além disso, a dimensão máxima dos grãos é de $44\mu\text{m}$ e sua massa específica é de $2,64\text{g}/\text{cm}^3$.

3.1.3 Areia de Quartzo

A areia de quartzo é proveniente da mineradora Jundu e apresenta em sua composição química 99% de quartzo, DMC igual a 0,59mm, massa específica igual a $2,635\text{g}/\text{cm}^3$ e módulo de finura igual a 1,89.

3.1.4 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada nesta pesquisa foi adquirida na Tecnosil e tem em sua composição química um teor entre 85% e 99% de sílica, de 1% a 6% de carbono e em alguns casos pode apresentar óxido de ferro, alumínio e magnésio. Além disso apresenta uma massa específica de

$2,19g/cm^3$ e um diâmetro médio das partículas de $0,20\mu m$, segundo o fabricante.

3.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante tem a função de melhorar a trabalhabilidade do concreto, reduzir a quantidade de água e conseqüentemente aumentar a resistência do material. Para esta pesquisa utilizou-se o superplastificante Tecflow 8000 a base de Éter Policarboxilato da GCP Applied Technologies e segundo o fabricante apresenta uma massa específica entre $1,08g/cm^3$ a $1,12g/cm^3$.

3.2 MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os ensaios realizados para esta pesquisa, que compreende: a caracterização dos materiais constituintes do concreto, estudos de traço e ensaio de resistência à compressão.

3.2.1 Caracterização do Cimento Portland

Para caracterizar os cimentos, foram realizados ensaios e análises em laboratório a fim de determinar a massa específica e a composição química do aglomerante. O ensaio do Frasco de Le Chatelier foi utilizado para determinar a massa específica do cimento, como recomenda a NBR 16605 (2017). Já os ensaios por difração de raios X (DRX) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram feitos para determinar sua composição química, além disso foram obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os ensaios de DRX, EDS e MEV foram realizados com o apoio da Unioeste e da UFPR.

3.2.1.1 *Difração de Raios X - DRX*

A técnica da difração de raios X, segundo Gobbo (2009), consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados. Quando os feixes de raio X incidem sobre um cristal, o mesmo interage com os átomos da amostra originando o fenômeno da difração. Essa técnica da difração de raios X caracteriza as fases de um material, ou seja, reporta qualitativamente os elementos químicos presentes na amostra bem como a sua cristalinidade.

Para este ensaio foi necessário a homogeneização do material, ou seja, as amostras de cimentos foram passadas na peneira N200 ($\#0,075mm$) e em seguida foram encaminhadas ao

equipamento para análise. Neste ensaio foi utilizado um ânodo de cobre, uma tensão de 30KV e uma corrente de 10mA.

Após gerados os difratogramas de cada amostra, os mesmos foram comparados com difratogramas padrões apresentados nos trabalhos de Gobbo (2003), Costa et al. (2013), Oliveira et al. (2012) e Torres et al. (2017). Cada composto químico (C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF) apresenta picos padrões nos difratogramas e ao comparar os picos padrões com os picos obtidos no ensaio de DRX foi possível identificar a presença desses compostos nas amostras de cimento.

Esse ensaio foi realizado com apoio da Universidade Federal do Paraná - UFPR setor Palotina.

3.2.1.2 *Espectroscopia de energia dispersiva - EDS*

O ensaio de espectroscopia de energia dispersiva é uma técnica semelhante ao ensaio de difração de raios X, porém ela resulta em uma análise quantitativa da composição química do cimento. Este ensaio foi realizado na UNIOESTE campus Toledo.

A preparação das amostras de cimento para o ensaio de espectroscopia de energia dispersiva iniciou com a homogeneização do tamanho das partículas, em que as amostras foram passadas na peneira N200, após isso elas foram colocadas no porta amostras do equipamento para análise. Na sequência, três pontos da amostra foram focalizados e a análise de EDS foi processada nestes pontos, reportando as informações referentes à composição química.

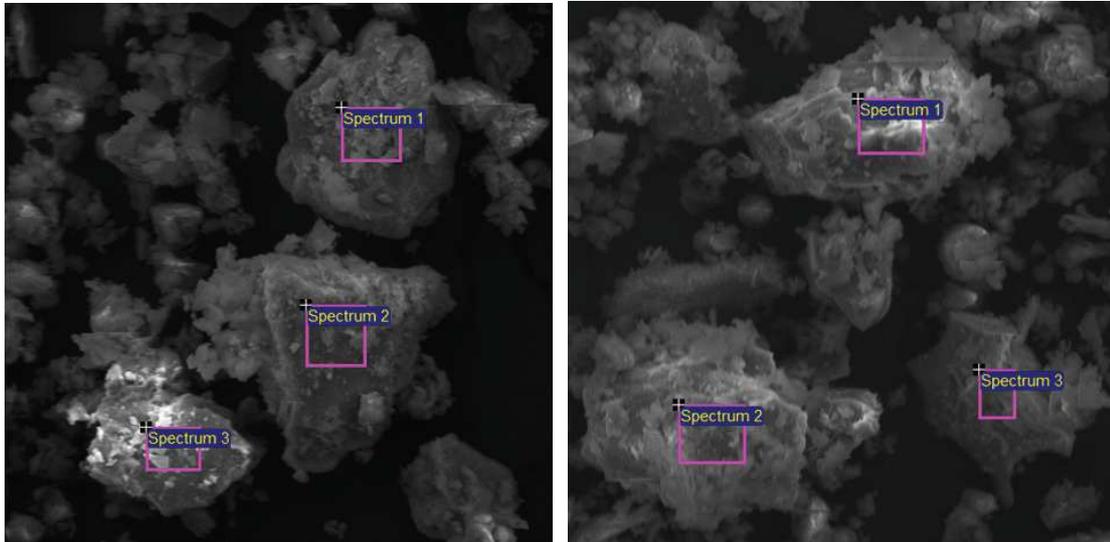
3.2.1.3 *Microscopia eletrônica de varredura - MEV*

Para que seja possível avaliar a estrutura superficial das amostras de cimento foram realizadas imagens em alta resolução através da técnica de microscopia eletrônica de varredura. Através das micrografias geradas, Figura 13, foi possível focalizar três pontos de cada amostra para o ensaio EDS, conforme comentado na seção 3.2.1.2. O MEV, segundo Dedavid, Gomes e Machado (2007), é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para observar e analisar as características microestruturais de objetos sólidos devido sua alta resolução. Além disso, o MEV proporciona uma aparência tridimensional da imagem das amostras.

Para o ensaio de MEV também foram utilizadas amostras que passaram pela peneira N200. Neste caso, as amostras são dispostas no porta amostras do equipamento e as micrografias são geradas. As imagens obtidas a partir do MEV foram feitas com as amostras de CII F, CII Z, CII RS e CPV ARI. Não foi possível obter o MEV da amostra de cimento CII E

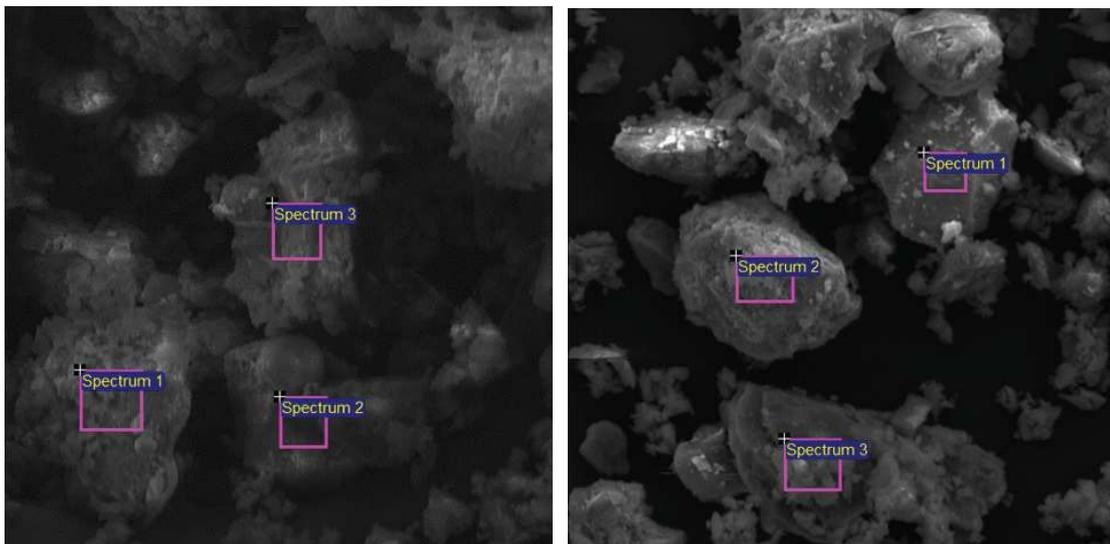
devido a um problema no equipamento. As imagens foram realizadas também com o apoio da UNIOESTE campus de Toledo.

Figura 13 - Imagens de MEV com pontos das amostras focalizados para EDS



(a) CII F 32 - 50 μ m

(b) CII Z 32 - 50 μ m



(c) CII V 32 RS - 50 μ m

(d) CPV ARI - 50 μ m

Fonte: Autoria Própria (2019)

3.2.1.4 Ensaio para determinação de massa específica

Através do ensaio do Frasco de Le Chatelier determina-se a massa específica do material a partir da razão entre a massa da amostra utilizada no ensaio pelo volume do líquido deslocado, que também representa o volume dos sólidos. Este procedimento foi feito para determinar a massa específica do cimento Portland (CII E, Z e F, CII V e CPV ARI), da sílica

ativa e do pó de quartzo.

Para determinar a massa específica dos compostos encheu-se um frasco com querosene entre as marcas de zero e 1cm^3 . Então foi registrado a primeira leitura, V_1 . Em seguida colocou-se 60g de material, em temperatura ambiente, de modo que o volume de líquido deslocado ficasse entre 18cm^3 a 24cm^3 . Colocou-se a tampa no frasco agitando o mesmo até eliminar as bolhas de ar do líquido. Foi feita então a leitura final, V_2 . Por fim calculou-se a massa específica através da Equação 1. As Figuras 14(a), 14(b) e 14(c) apresentam os materiais utilizados, a primeira leitura e a segunda leitura do ensaio, respectivamente.

Figura 14 - Ensaio do Frasco de Le Chatelier



(a) Materiais utilizados (b) Primeira leitura (V_1) (c) Segunda leitura (V_2)

Fonte: Autoria Própria (2019)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Em que:

m = Massa do material ensaiado (g).

V = Volume deslocado ($V_2 - V_1$) (cm^3).

ρ = massa específica do material (g/cm^3).

3.2.2 Caracterização do aditivo superplastificante

A quantidade de aditivo utilizada para fazer o UHPC foi baseada em dosagens utilizadas na literatura e também nos estudos de traço. Devido a limitação dos equipamentos disponíveis em laboratório a quantidade de aditivo precisou ser ajustada de forma experimental,

através de estudos de traço, chegando assim à quantidade ideal de 4%. O estudo de traço é descrito com maior rigor nos itens que seguem.

3.2.3 Caracterização da areia de quartzo

A caracterização da areia de quartzo foi feita através da determinação da massa específica e da granulometria.

3.2.3.1 *Massa específica*

A massa específica é a relação entre a massa do agregado e o seu volume, desconsiderando os vazios. Esse ensaio foi feito segundo o procedimento descrito na NBR NM 52 (2009). Optou-se por repetir esse ensaio duas vezes para então fazer uma média entre os valores finais da massa específica.

Para determinar a massa específica da areia foi obtida uma amostra do material de aproximadamente 1,1kg, quantidade suficiente para fazer dois testes. Colocou-se todo o material em um recipiente coberto por água, por 24 horas. Na sequência a amostra foi retirada da água e disposta sobre uma superfície plana, sob ação de uma leve corrente de ar, para garantir uma secagem uniforme, Figura 15(a).

De acordo com a norma a secagem deve ser feita até que os grãos do agregado não estejam mais aderidos entre si. Com a areia nesta condição, preencheu-se o molde e foi feita a compactação da superfície com 25 golpes utilizando uma haste de socamento. Em seguida o molde foi retirado, mas como ainda havia umidade superficial, os agregados se conservaram no formato do molde, conforme apresenta a Figura 15(b), neste caso o processo de secagem continuou e o teste com o molde foi refeito até que a areia se desmanchou ao retirá-lo, Figura 15(c). Quando isso ocorre significa que o agregado está na condição de saturado superfície seca, podendo então dar sequência ao ensaio.

O segundo passo foi pesar o picnômetro, Figura 16, e o frasco com água, além de verificar a temperatura da água no momento do ensaio para fazer a correção dos valores no final do teste. Em seguida pesou-se 500g de areia, na condição saturado superfície seca, que foi inserida no picnômetro a fim de registrar a massa do conjunto (m_1). Então encheu-se o frasco com água até a marca de 500ml, o mesmo foi agitado para eliminar as bolhas de ar e então determinou-se a massa total. A areia foi retirada do frasco e passou por secagem em uma estufa a 105°C, por aproximadamente 24 horas. Após isso o agregado foi resfriado à temperatura

ambiente e então pesou-se a amostra seca (m).

Figura 15 - Ensaio do Frasco de Le Chatelier



(a) Secagem da areia

(b) Areia com umidade superficial

(c) Areia saturada superfície seca

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Figura 16 - Picnômetro utilizado no ensaio da massa específica



Fonte: Aatoria Própria (2019)

Após o ensaio determinou-se a massa específica da areia utilizando as Equações 2, 3 e 4. A Equação 2 é um modo de corrigir o volume do picnômetro, visto que a marca de 500ml registrada no frasco pode apresentar uma imprecisão.

$$V = \frac{m_{fa} - m_f}{\rho_a} \quad (2)$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (3)$$

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (4)$$

Em que:

V = Volume do frasco (cm^3).

m_{fa} = Massa do frasco+água (g).

m_f = Massa do frasco (g).

ρ_a = massa específica da água (g/cm^3).

V_a = Volume de água adicionado ao frasco (cm^3).

m_2 = Massa total (frasco+agregado+água) (g).

m_1 = Massa do conjunto (frasco+agregado) (g).

d_3 = Massa específica do agregado (g/cm^3).

m = Massa da amostra seca em estufa (g).

m_s = Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g).

3.2.3.2 Granulometria

Outro ensaio de caracterização da areia foi o de granulometria. Esse ensaio foi feito com base nos procedimentos descritos na NBR NM 248 (2003). Este ensaio também foi realizado duas vezes a fim de obter um resultado final com a média dos dois ensaios.

O ensaio de granulometria iniciou com a coleta da amostra, em que a quantidade mínima da amostra para o ensaio depende da dimensão máxima característica do agregado, conforme recomenda a NBR NM 248 (2003). Neste caso, como a areia utilizada passa totalmente na peneira de 4,75mm a norma recomenda uma quantidade mínima de 300g de material. Desta forma separou-se aproximadamente 2,0kg de material para realizar os dois ensaios, atendendo a quantidade mínima recomendada pela norma.

Este ensaio iniciou com a secagem da amostra em estufa por 24 horas a 110°C. Então deixou-se o material esfriar até a temperatura ambiente. Na sequência foi separado 1kg de areia para cada ensaio. As peneiras foram encaixadas com abertura da malha crescente da base para o topo, Figura 17. A amostra foi colocada sobre a peneira superior e foi feita a agitação mecânica das peneiras por 10 minutos para que houvesse separação e classificação dos grãos da amostra.

Todo o material foi removido da peneira e colocado em uma bandeja identificada. O material removido pelo lado interno da peneira foi considerado como retido, já o material removido pelo lado externo foi considerado como passante. Por fim determinou-se a massa total de material retido em cada uma das peneiras. Esse processo foi feito duas vezes a fim de fazer a curva granulométrica com a média da porcentagem do material retido dos dois ensaios.

Figura 17 - Peneiras para ensaio de granulometria



Fonte: Autorial Própria (2019)

Após o peneiramento das amostras foi feito o cálculo das porcentagens retidas em cada peneira, para então construir a curva granulométrica. Com os dados da curva granulométrica calculou-se o módulo de finura das peneiras pertencentes a série normal, exceto da peneira #0,075 e o fundo. Além disso determinou-se a dimensão máxima característica do agregado através da verificação da porcentagem retida acumulada imediatamente igual ou inferior a 5%.

3.2.4 Caracterização do pó de quartzo e da sílica ativa

Para a caracterização da sílica ativa e do pó de quartzo foram determinadas a massa específica através do método do Frasco de Le Chatelier, segundo a NBR 16605 (2017), da mesma forma que foi descrito no item 3.2.1.4 para o cimento Portland.

Para o pó de quartzo e sílica ativa não foi feito o ensaio de granulometria, pois para isso é necessário peneiras com abertura inferior a 0,075mm e portanto essas informações foram obtidas junto ao fabricante destes materiais.

3.2.5 Estudos de traço

Para analisar a influência dos diferentes tipos de cimentos brasileiros nas propriedades mecânicas do UHPC foi necessário fazer um estudo de traço.

A dosagem do UHPC, diferente da dosagem do concreto convencional, é determinada através de experimentos pois ainda não há um método consagrado que permite calcular as proporções de seus materiais. Desta forma, a dosagem do concreto de ultra alto desempenho é feita através de ensaios, em que toma-se como base traços recomendados pela literatura e se necessário são feitos ajustes.

O estudo de traço feito nesta pesquisa foi baseado nos resultados de Ozelame (2017). Utilizou-se o traço 3 e o 4 sob a condição de cura térmica, a fim de avaliar o desempenho do concreto submerso em água a 90°C e também exposto ao vapor a 90°C, assim será possível definir o tipo de cura e o traço a ser utilizado para o UHPC neste trabalho.

Foram necessários alguns ajustes nas proporções dos materiais, que podem ser observados na Tabela 17. Nesta estudo foi utilizado o cimento CPV ARI.

Tabela 17 - Traços 3 e 4 para o estudo de traço

Traço	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Quartzo	Pó de Quartzo	Superplastificante	Água
3	1	0,30	0,73	0,18	4,00%	0,26
4	1	0,23	1,10	0,28	4,00%	0,24

Fonte: Autoria Própria (2019)

O procedimento do estudo de traço iniciou com a mistura dos materiais secos, por aproximadamente 5 minutos em um misturador planetário, Figura 18. Na sequência foram adicionados o superplastificante e a água, então os materiais foram misturados por aproximadamente 15 minutos até atingir uma boa trabalhabilidade que permitiu a moldagem dos corpos de prova. Foi necessário a utilização de moldes de 50x100mm, devido a capacidade de carga da prensa disponível no laboratório para o ensaio de compressão.

Figura 18 - Misturador planetário

Fonte: Autoria Própria (2019)

Aplicou-se o desmoldante para facilitar a retirada das amostras e em seguida preencheu-se os moldes com o concreto. Após a moldagem, as amostras foram submetidas ao processo de vibração, mantendo o vibrador mecânico encostado no molde por aproximadamente 2 minutos a fim de expulsar as bolhas de ar do concreto fresco. Após 24 horas as amostras foram desmoldadas, identificadas e encaminhadas ao processo de cura.

Os corpos de prova foram submetidos a cura térmica, em que metade deles ficaram expostos ao vapor a 90°C por 72 horas, como pode ser visto na Figura 19, e na sequência foram encaminhados para a cura submersa até a idade de ruptura. A outra metade das amostras ficaram submersas em água com temperatura aproximada de 90°C por 72 horas, conforme apresenta a Figura 20, e na sequência também foram encaminhadas a cura submersa até a idade de ruptura. O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 dias. Ao utilizar dois tipos de cura térmica foi possível analisar qual delas apresenta melhores resultados no UHPC.

Figura 19 - Cura térmica - Amostras expostas ao vapor a 90°C



Fonte: Aatoria Própria (2019)

Figura 20 - Cura térmica - Amostras expostas em água a 90°C



Fonte: Aatoria Própria (2019)

Como o objetivo principal desta pesquisa é analisar o efeito dos diferentes tipos de cimento nas propriedades mecânicas do UHPC, o único material que terá variação no traço é o tipo de cimento, portanto os demais materiais e proporções definidas neste estudo de traço serão mantidas.

3.2.6 Moldagem dos corpos de prova com variação do tipo de cimento

Definido o traço e o tipo de cura para o UHPC, conforme apresenta a Tabela 18, foram confeccionados 6 corpos de prova para cada tipo de cimento (CPII E, CPII F, CPII Z, CPIV 32

RS e CPV ARI), totalizando 30 amostras. A quantidade de amostras para cada tipo de cimento foi adotada baseada no volume máximo do misturador planetário.

Tabela 18 - Traços final - em massa

Traço	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Quartzo	Pó de Quartzo	Superplastificante	Água
4	1	0,23	1,10	0,28	4,00%	0,24

Fonte: Autoria Própria (2019)

O procedimento de mistura dos materiais é semelhante ao que foi feito no estudo de traço. Inicialmente misturou-se os materiais secos em um recipiente com o auxílio de uma espátula, Figura 21(a), e depois por mais 5 minutos em um misturador planetário, então adicionou-se o superplastificante e a água. Misturou-se os materiais por 15 minutos, Figura 21(b), e enquanto isso aplicou-se desmoldante nos moldes. Na sequência os moldes foram preenchidos com o concreto, Figura 22, e foi feito o processo de vibração, em que manteve-se o vibrador mecânico encostado no molde por 2 minutos.

Figura 21 - Procedimento de mistura do UHPC



(a) Mistura manual dos materiais secos

(b) Mistura do concreto fresco

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 22 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria Própria (2019)

Os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente por 24 horas. Em seguida foram desmoldados, identificados e encaminhados a cura térmica submersos em água a 90°C por 72 horas, conforme apresenta as Figuras 23 e 24. Após esse período foram encaminhados a cura submersa com a água em temperatura ambiente até a idade da ruptura.

Figura 23 - Corpos de prova em cura térmica - UHPC com CII E, CII Z e CPV ARI



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 24 - Corpos de prova em cura térmica - UHPC com CPIV 32 RS, CPIX F



Fonte: Autoria Própria (2019)

Aos 28 dias, os corpos de prova foram retificados, Figura 25, e submetidos ao ensaio de compressão em uma máquina universal Modelo WAW-1000D de 100ton, conforme observado na Figura 26.

Figura 25 - Corpos de prova após retificação



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autoria Própria (2019)

3.2.7 Tratamento de Dados

O tratamento dos dados foi feito através da análise de variância (ANOVA), a qual é um método estatístico utilizado para verificar se há diferença significativa entre a distribuição de uma média entre três ou mais grupos e se os fatores considerados influenciam na variável dependente. Neste trabalho foi utilizado o fator único, que é uma condição que pode ser aplicada quando há apenas uma variável dependente, que neste caso é a resistência à compressão.

De acordo com Navidi (2012), ao utilizar o método da ANOVA é necessário fazer algumas suposições, como:

- As populações do tratamento devem ser normais;
- As populações do tratamento devem ter todas a mesma variância, que indicamos por σ^2 ;

A partir disso são testadas duas hipóteses principais, H_0 e H_1 , em que: $H_0 = \mu_1 = \mu_2 \dots = \mu_i$ e $H_1 =$ Nem todos os μ_i são iguais, sendo μ a média de tratamentos. A hipótese nula (H_0), representa o caso em que as médias obtidas para cada tipo de cimento são iguais. Caso

a probabilidade de significância (valor-p) encontrada para a amostra seja maior que o nível de significância estabelecido (α), aceita-se a hipótese nula, ou seja, os parâmetros analisados não influenciam no resultado final, neste caso o tipo de cimento não influencia a resistência mecânica do UHPC.

Por outro lado se a hipótese nula for rejeitada tem-se que uma ou mais médias são diferentes entre si, constatando que o tipo de cimento é um fator significativo e influencia na resistência à compressão do UHPC. Se este for o caso é necessário indicar quais deles são os responsáveis por esse efeito através do Teste de Tukey.

Em alguns casos, antes de aplicar a ANOVA, é necessário verificar a distribuição e a homogeneidade dos dados identificando a presença ou não de *outliers*. Os *outliers* são dados discrepantes que distorcem o valor da média e por isso é importante identificá-los e tratá-los antes de aplicar o tratamento estatístico.

Portanto foi feita uma análise pelo método dos quartis calculando o valor do quartil 1, do quartil 3 e o intervalo interquartil pela Equação 5. Com isso foi determinado o limite inferior e superior dos dados pelas Equações 6 e 7, respectivamente. Para cada tipo de cimento foram comparados o valor de resistência à compressão de cada amostra com os limites inferior e superior, se algum valor da resistência estivesse fora desses limites, considera-se um *outlier* e portanto deve ser excluído da amostra. Por fim recalcula-se a média e aplica o teste da ANOVA.

$$IIQ = Q3 - Q1 \quad (5)$$

$$Linf = \bar{x} - (1,5 \times IIQ) \quad (6)$$

$$Lsup = \bar{x} + (1,5 \times IIQ) \quad (7)$$

Em que:

IIQ = Intervalo interquartil.

Q1 = Quartil 1 (25% menores valores).

Q3 = Quartil 3 (25% maiores valores).

Linf = Limite inferior.

Lsup = Limite superior.

\bar{x} = Média do conjunto de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDO DE TRAÇO

Após o ensaio de resistência à compressão os resultados do estudo de traço são apresentados na Tabela 19. Devido a limitação na quantidade de material disponível para fazer o estudo de traço, foi possível moldar apenas quatro corpos de prova para cada traço.

Tabela 19 - Resultado do estudo de traço - Resistência à compressão (MPa)

Traço	Cura em Água a 90°C	Cura em Vapor a 90°C
Traço 3	119,81	119,51
	100,19	74,69
Traço 4	134,30	106,60
	100,70	83,79

Fonte: Autoria Própria (2019)

Baseado nos resultados da Tabela 19 observa-se que o traço 4 submetido a cura térmica em água a 90°C apresentou maior valor de resistência (134,30MPa), sendo este utilizado neste trabalho.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.1 Areia de quartzo

4.2.1.1 *Massa específica*

Seguindo o procedimento descrito na Seção 3.2.3.1 para obtenção da massa específica da areia, obteve-se os resultados para os dois ensaios, conforme a Tabela 20. Portanto a massa específica adotada neste trabalho é a média dos dois ensaios: $2,635g/cm^3$.

4.2.1.2 *Granulometria*

Com relação ao ensaio de granulometria da areia de quartzo, o mesmo foi realizado duas vezes a fim de fazer a média dos valores finais. A Tabela 21 apresenta as peneiras utilizadas no ensaio, bem como a porcentagem de peso retido em cada uma. A partir disso calculou-se o módulo de finura da areia e seu diâmetro máximo característico (DMC).

A partir dos resultados da Tabela 21 foi possível ilustrar a curva granulométrica da

Tabela 20 - Massa específica da Areia de Quartzo

Dados iniciais	Ensaio 1	Ensaio 2
Temperatura da água ($^{\circ}C$)	24	23,5
ρ água (g/ml)	0,9973	0,9975
Massa do frasco (g)	302,51	272,04
Massa frasco + água (g)	802,17	765,37
Massa do agregado ¹ (g)	500,20	500,10
Massa do agregado + frasco (g)	802,69	773,51
Massa do agregado + frasco + água (g)	1110,92	1076,79
Massa do agregado seco em estufa (g)	496,40	499,66
Resultados	Ensaio 1	Ensaio 2
Volume do frasco (cm^3)	501,01	494,62
Volume de água (cm^3)	309,06	304,07
Massa específica do agregado (g/cm^3)	2,64	2,63

¹ = Agregado na condição saturado superfície seca

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 21 - Composição granulométrica da Areia de Quartzo

Peneiras (mm)	Ensaio 1 % retida	Ensaio 2 % retida	% retida média acumulada
2,38	0	0	0
1,19	0,0075	0,0102	0,009
0,59	1,1302	1,2031	1,18
0,297	88,5343	86,2563	88,57
0,149	9,7423	12,0790	99,48
0,074	0,5332	0,4201	99,96
Fundo	0,0525	0,0314	100,00
Total	100	100	389,19
DMC = 0,59		Módulo de finura = 1,89	

Fonte: Autoria Própria (2019)

areia de quartzo, apresentada na Figura 27. Analisando a curva granulométrica, nota-se que a areia utilizada possui partículas finas e uma granulometria bem uniforme.

4.2.2 Pó de quartzo e Sílica Ativa

4.2.2.1 Massa específica

Com o ensaio do Frasco de Le Chatelier determinou-se a massa específica do pó de quartzo e da sílica ativa, conforme apresenta a Tabela 22.

Figura 27 - Curva granulométrica da areia de quartzo

Fonte: Autorial Própria (2019)

Tabela 22 - Massa específica

Material	Massa específica (g/cm^3)
Pó de quartzo	2,64
Sílica ativa	2,19

Fonte: Autorial Própria (2019)

4.2.3 Cimento Portland

4.2.3.1 *Massa específica*

Com o ensaio do Frasco de Le Chatelier determinou-se a massa específica dos cimentos CPII E, F e Z, CPIV RS e CPV ARI, conforme apresentado na Tabela 23. Observa-se que o cimento CPV ARI apresenta o maior valor de massa específica em relação aos demais tipos de cimento.

4.2.3.2 *Composição química*

Com relação a composição química dos cimentos obtida por EDS, a Tabela 24 apresenta os principais compostos químicos presentes em cada tipo de cimento, em porcentagem

Tabela 23 - Massa específica dos Cimentos Portland
Cimento Portland **Massa específica (g/cm^3)**

CPV ARI	3,07
CPII F	3,01
CPII E	2,96
CPII Z	2,84
CPIV 32 RS	2,83

Fonte: Aatoria Própria (2019)

de peso da amostra. Não foi possível obter a composição química do CPII E 32 devido a um problema no equipamento.

Tabela 24 - Composição química dos Cimentos Portland - Resultado quantitativo

Cimento Portland	O	Ca	C	Si	Mg	Al	Fe	S
CPV ARI	44,14	33,28	5,94	7,82	5,85	1,29	1,14	0,54
CPII F 32	45,12	32,93	10,25	6,67	0,93	1,68	1,55	0,85
CP IV 32 RS	46,43	25,83	15,30	7,58	0,57	2,67	0,81	0,82
CPII Z 32	49,58	30,04	8,59	4,09	4,54	0,93	0,55	1,68

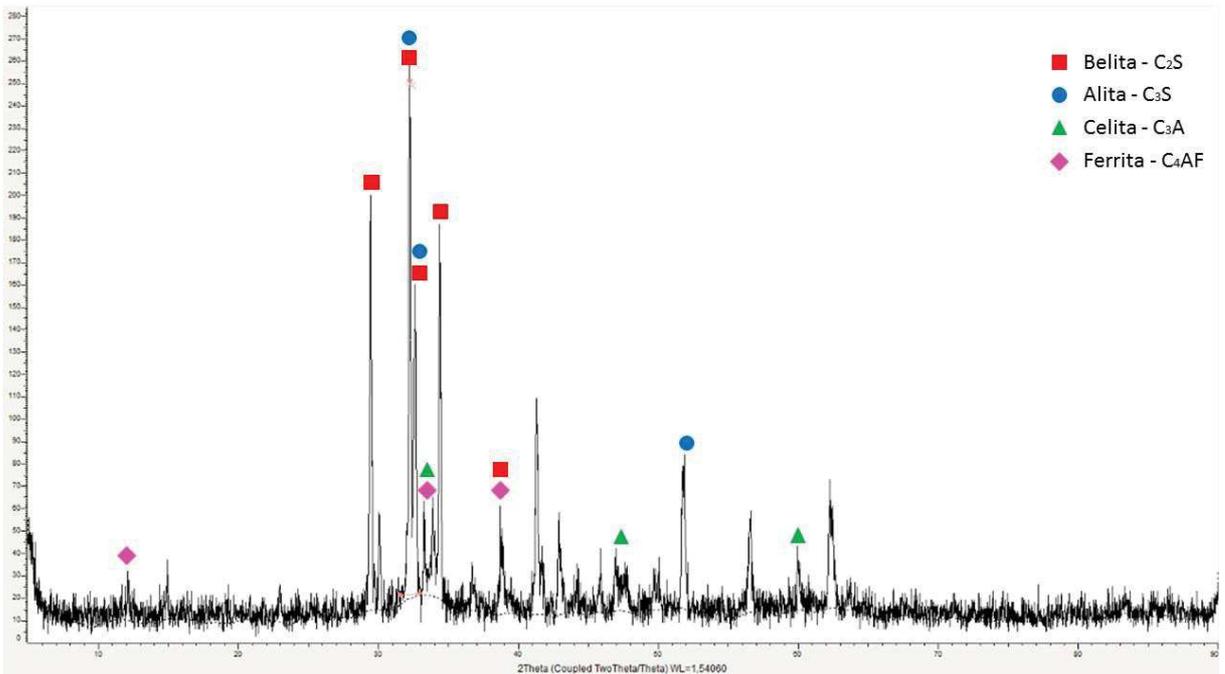
Fonte: Aatoria Própria (2019)

Relacionando as Tabelas 23 e 24 observa-se que o CPV ARI possui uma massa específica maior comparado com os demais cimentos e isso se justifica pois este cimento apresenta a maior quantidade de cálcio, sílica, magnésio e ferro, que são elementos químicos mais densos.

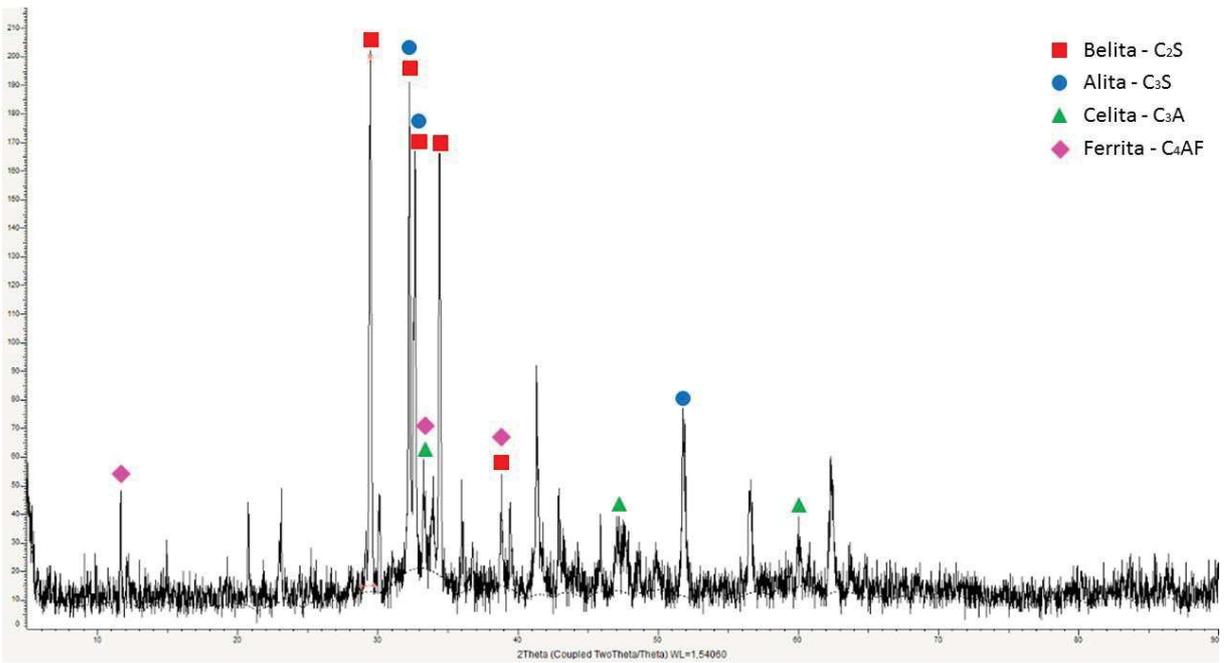
Do ponto de vista qualitativo foi possível identificar as principais combinações químicas formadas na obtenção do clínquer, que são: silicato bicálcico - Belita (C_2S), silicato tricálcico - Alita (C_3S), aluminato tricálcico - Celita (C_3A) e ferro aluminato tetracálcico - Ferrita (C_4AF), através dos ensaios de Difração de raios X.

Ao comparar os difratogramas padrões dos trabalhos de Costa et al. (2013), Oliveira et al. (2012), Torres et al. (2017) e Gobbo (2003) com o difratograma das amostras de cimentos verificou-se que os quatro compostos estão presentes em todas as amostras de cimentos, conforme apresenta as Figuras 28, 29 e 30. O eixo y dos difratogramas representam as contagens dos picos detectados nas amostras de cimento e o eixo x representa o ângulo de difração.

Figura 28 - Compostos químicos - resultado qualitativo - Parte 1



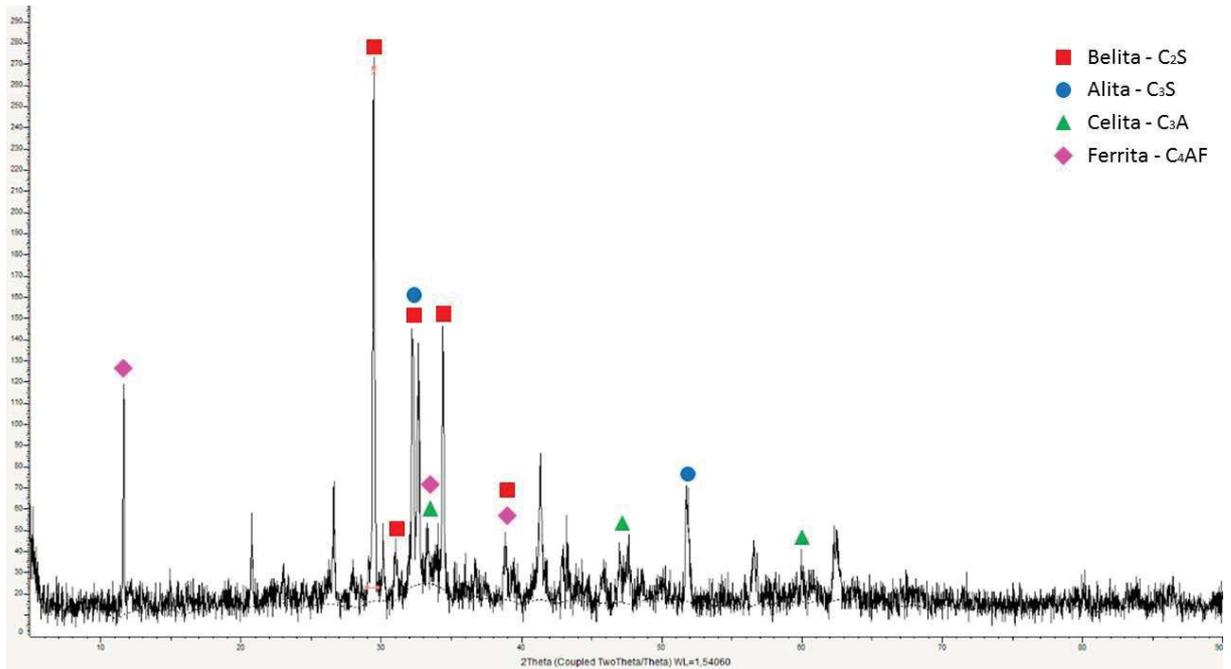
(a) CPV ARI



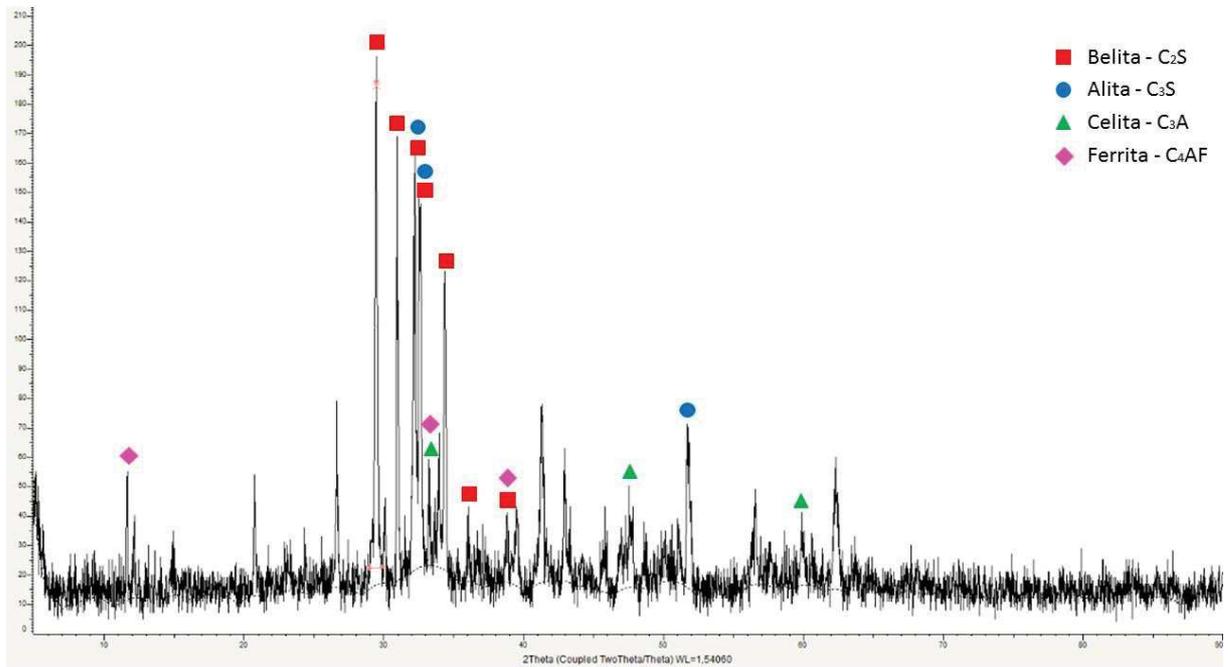
(b) CPII F 32

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 29 - Compostos químicos - resultado qualitativo - Parte 2



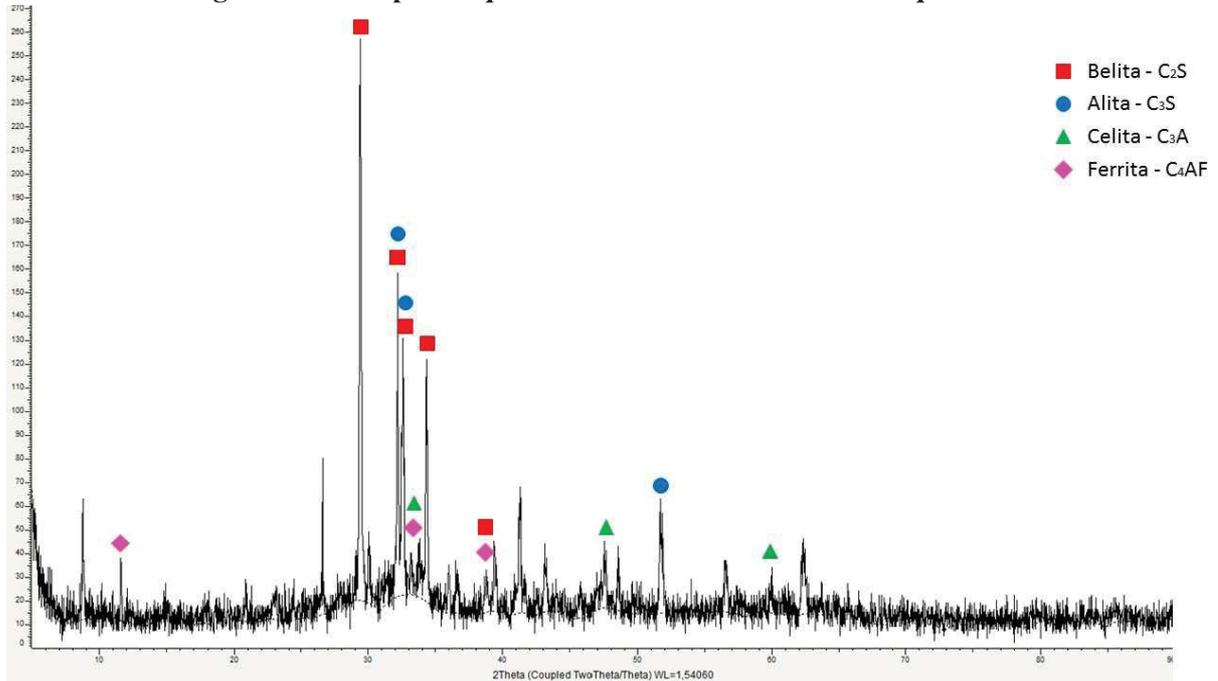
(a) CPIV 32 RS



(b) CPII Z 32

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 30 - Compostos químicos do CPII E 32 - resultado qualitativo



Fonte: Autoria Própria (2019)

Ao analisar a Tabela 24 nota-se que o CPV ARI tem uma quantidade maior de cálcio, sílica e magnésio e apresenta menos carbono e enxofre, comparado com os demais cimentos. O cálcio e a sílica propiciam a formação da Alita (C₃S) e Belita (C₂S), em que verifica-se picos mais intensos desses compostos na Figura 28(a). Durante a hidratação do cimento, a Alita e a Belita promovem a formação da fase C-S-H, responsável pela resistência mecânica do concreto.

Pela Tabela 24 nota-se que o CII F apresenta maior quantidade de carbono, alumínio e ferro, comparado ao CPV ARI. Por outro lado apresenta menos sílica e magnésio. Um cimento com maior quantidade de ferro propicia a formação da Ferrita (C₄AF), esse composto pode ser observado através dos picos mais intensos no difratograma da Figura 28(b), ou seja, a Ferrita está mais nítida na amostra de CII F do que na amostra do CPV ARI.

Com relação ao CIIV 32 RS, observa-se na Tabela 24 que ele é um cimento com maior quantidade de carbono e alumínio, em contrapartida apresenta menos cálcio e magnésio comparado aos demais cimentos. A maior quantidade de carbono e alumínio no CIIV, juntamente com o ferro resultam na Ferrita, observada também nos picos da Figura 29(a). A baixa quantidade de cálcio prejudica a formação de Celita (C₃A) e por isso a pasta de cimento apresenta um endurecimento mais lento. Observa-se também pelo difratograma da Figura 29(a), que os picos são mais intensos para a Belita do que Alita, isso significa que o CIIV apresenta uma

resistência mecânica maior em idades mais avançadas.

Analisando o CII Z pela Tabela 24 nota-se quantidades menores de sílica, alumínio e ferro e uma quantidade significativa de enxofre. Observa-se no difratograma da Figura 29(b) e Figura 28(a) que os picos que representam a Alita e a Belita são menos nítidos para o CII Z e por isso este cimento tende a apresentar resistência mecânica menor do que o CPV ARI.

Embora não tenha sido possível quantificar os compostos químicos do cimento CII E 32, observa-se em seu difratograma, na Figura 30, picos de Belita e Alita semelhantes ao CPV ARI, o que caracteriza um cimento com alta resistência mecânica em idades iniciais e avançadas. Além disso os picos de Ferrita são menos nítidos no CII E do que o CII Z.

Além da composição química, foi verificado a cristalinidade para cada tipo de cimento, exceto para o CII E. Na Tabela 25 observa-se a porcentagem da cristalinidade dos cimentos, que representa o material cristalino presente nas amostras ensaiadas. Caracteriza-se como um material cristalino aquele que apresenta uma estrutura atômica mais definida. Nota-se que no geral, os cimentos apresentam aproximadamente 70% de material cristalino e 30% de material amorfo em sua composição. Essa característica também pode ser verificada nos difratogramas das Figuras 30, 28 e 29 em que o primeiro pico, entre 0 e 2θ , representa o material amorfo que compõe o cimento.

Tabela 25 - Cristalinidade dos Cimentos Portland

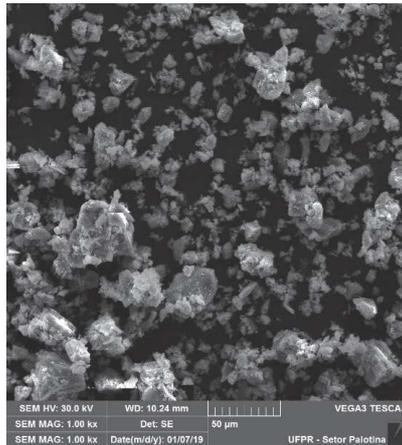
Cimento Portland	Cristalinidade (%)
CPV ARI	71,20
CII F	69,70
CII Z	72,90
CIV 32 RS	71,50

Fonte: Autoria Própria (2019)

4.2.3.3 *Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV*

As Figuras 31 e 32 apresentam as imagens de MEV dos cimentos utilizados, exceto para o CII E 32. Na Figura 32(a) é possível observar sem grande rigor, que o CPV ARI possui uma granulometria mais uniforme comparado aos demais cimentos.

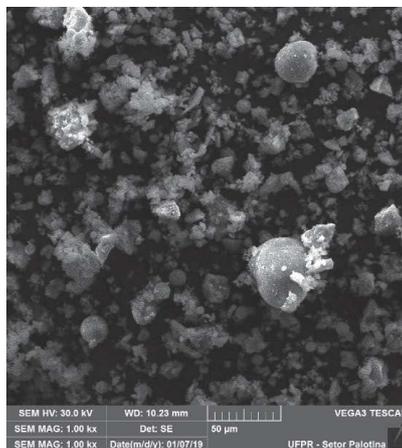
Figura 31 - Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - Parte 1



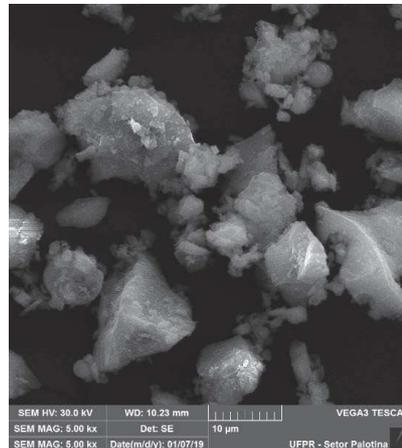
(a) CII F 32 - 50µm



(b) CII F 32 - 10µm



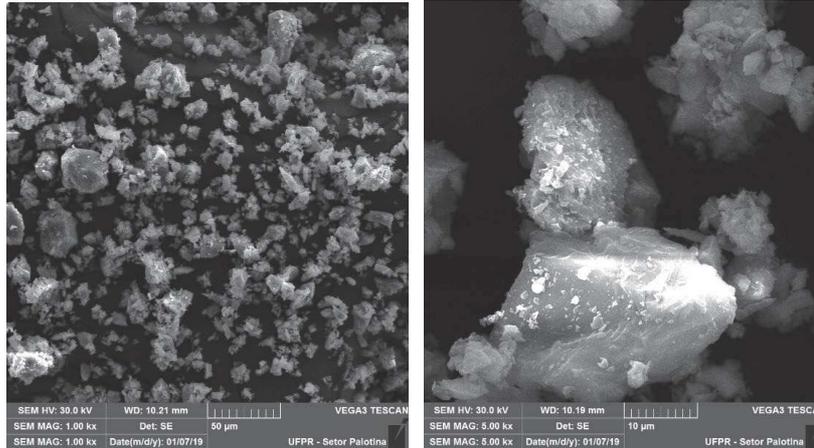
(c) CII Z 32 - 50µm



(d) CII Z 32 - 10µm

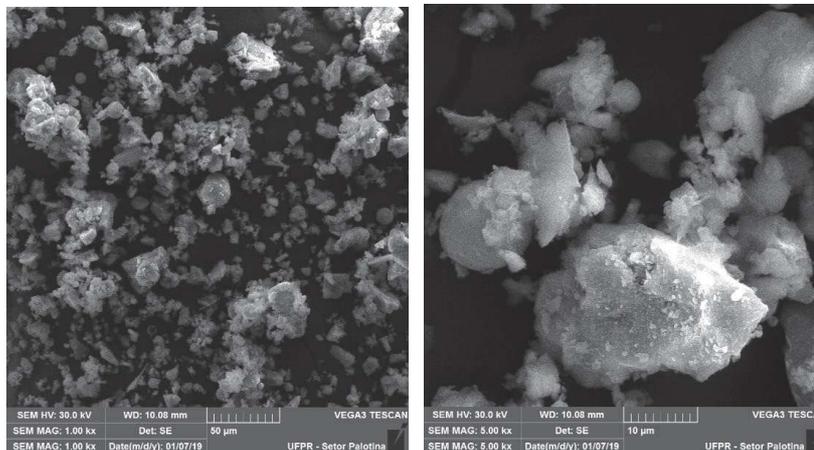
Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 32 - Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - Parte 2



(a) CPV ARI - 50µm

(b) CPV ARI - 10µm



(c) CPIV 32 RS - 50µm

(d) CPIV 32 RS - 10µm

Fonte: Autoria Própria (2019)

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 dias com as 6 amostras de cada tipo de cimento, as quais apresentaram os resultados conforme a Tabela 26. Além disso é possível verificar a média da resistência à compressão para cada tipo de cimento.

Observa-se que o cimento que apresenta a maior média de resistência à compressão é o CPV ARI seguido do CII F, CII E, CPIV 32 RS e por fim o cimento com menor resistência é o CII Z 32, ou seja, cimentos com adições de material pozzolânico apresentaram desempenho inferior com relação a outros cimentos. Além disso, cimentos com partículas menores, como é o caso do CPV ARI, teve melhor desempenho justificando seu uso na literatura.

Tabela 26 - Resultado do ensaio de resistência à compressão

Cimento	Amostra	Resistência à Compressão (MPa)	Média da Resistência à Compressão (MPa)
CP V ARI	1	120,77	126,90
	2	128,61	
	3	107,03	
	4	148,69	
	5	128,47	
	6	127,83	
CPII F 32	1	120,12	113,98
	2	134,07	
	3	71,67	
	4	152,33	
	5	92,29	
	6	113,37	
CPII E 32	1	104,51	107,93
	2	124,65	
	3	87,70	
	4	134,08	
	5	94,67	
	6	101,99	
CPIV 32 RS	1	60,34	106,50
	2	120,67	
	3	136,72	
	4	109,34	
	5	103,89	
	6	108,02	
CPII Z 32	1	78,46	99,86
	2	153,47	
	3	63,89	
	4	69,67	
	5	124,63	
	6	109,01	

Fonte: Autoria Própria (2019)

Através de uma análise relacionando a média da resistência à compressão de cada tipo de cimento com os resultados da caracterização dos cimentos, observa-se que há uma relação diretamente proporcional entre a massa específica e a resistência à compressão, visto que o CPV ARI é o cimento que tem a maior massa específica e também o que apresentou maior resistência à compressão. O mesmo ocorre para o CPII Z e CPIV 32 RS que apresentam a menor massa específica e também as menores médias de resistência à compressão.

Comparando os resultados do ponto de vista percentual observa-se que a resistência média do CPV ARI é 16% maior que o CPIV e 21% maior do que o CPII Z. Já com relação ao

cimento CII F e CII E, houve uma redução da resistência de aproximadamente 10% e 15%, respectivamente, em relação ao CPV ARI.

Nota-se ainda que entre o CPV ARI e o cimento CII Z houve uma redução de aproximadamente 52% de ferro, 48% de sílica e 9,7% de cálcio e em contrapartida houve um aumento de 211% de enxofre. Isso ressalta que elementos como a sílica, o ferro e o cálcio são fundamentais para o bom desempenho do concreto. Por outro lado, a baixa quantidade de alumínio e impurezas como o enxofre, influenciam negativamente na resistência mecânica.

4.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO - TESTE DA ANOVA FATOR ÚNICO

De acordo com os resultados de resistência à compressão apresentados na Tabela 26 observou-se que há alguns valores discrepantes e por isso foi feita a verificação dos *outliers* antes de aplicar a ANOVA. O resultado desta verificação é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Verificação de *outliers* (MPa)

Cimento	Média	Quartil 3	Quartil 1	IIQ	Lsup	Linf	Nova média
CPV ARI	126,90	128,57	122,54	6,04	135,95	117,85	126,42
CII F 32	113,98	130,58	97,56	33,02	163,51	64,45	113,98
CII E 32	107,93	119,62	96,50	23,12	142,61	73,26	107,93
CPIV 32 RS	106,50	117,84	104,93	12,92	125,87	87,12	110,48
CII Z 32	99,86	120,72	71,87	48,85	173,14	26,58	99,86

Fonte: Autoria Própria (2019)

Observa-se que para o cimento CPIV a amostra 1 (60,34MPa) apresentou uma resistência menor do que o limite inferior (87,12MPa) e a amostra 3 (136,72MPa) apresentou uma resistência maior do que o limite superior (125,87MPa). Portanto, essas amostras são caracterizadas como *outliers* e devem ser excluídas do conjunto de dados, sendo assim calculou-se uma nova média para o CPIV, resultando em 110,48MPa.

O mesmo ocorre com o cimento CPV em que a amostra 3 (107,03MPa) é menor do que o limite inferior (117,85MPa) e a amostra 4 (148,69MPa) é maior do que o limite superior (135,95MPa), sendo assim essas amostras também são *outliers* e, portanto, a nova média do CPV é de 126,42MPa.

Feita a correção dos dados através da verificação dos *outliers* foi possível aplicar o teste da ANOVA Fator Único. Este tratamento estatístico dos dados foi feito a fim de obter um resultado mais preciso sobre qual o melhor tipo de cimento para utilizar no UHPC. Para isso utilizou-se os valores de resistência à compressão de cada amostra após a correção dos *outliers*.

O resultado do tratamento estatístico é apresentado na Tabela 28, considerando uma tolerância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Tabela 28 - Teste da ANOVA Fator Único

Fonte da Variação	GL	SQ	MQ	F Calculado	P-valor	F Crítico
Entre Grupos	4	1804,76	451,19	0,78	0,55	2,84
Dentro dos Grupos	21	12200,47	580,97			
Total	25	14005,23				

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Comparando o valor de F calculado com o valor do F crítico, tem-se que F crítico é maior que F calculado então não rejeita-se a hipótese nula, ou seja, as médias analisadas são iguais e portanto o tipo de cimento não influencia na resistência à compressão do concreto. Em resumo, qualquer tipo de cimento pode ser utilizado no UHPC sem que o seu desempenho seja significativamente alterado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram analisados os efeitos de diferentes tipos de cimentos nacionais na resistência à compressão de concretos de ultra alto desempenho, sendo as principais conclusões:

1. Como visto na literatura, cimentos com partículas menores apresentaram maior resistência mecânica, justificando assim o uso do cimento CPV ARI (similar ao ASTM Type III). Além disso verificou-se que a resistência é diretamente proporcional a massa específica do cimento, ou seja, quanto maior a massa específica do cimento maior o desempenho mecânico do concreto. O alto desempenho do UHPC utilizando o CPV ARI se justifica por ser um cimento com menor teor de adições, por outro lado, cimentos com adições de pozolana, como é o caso do CII Z e do CII V, apresentaram as menores médias de resistência à compressão.
2. Elementos químicos como o ferro, a sílica e o cálcio contribuem significativamente para o desempenho mecânico do concreto, visto que um aumento de 52% de ferro, 48% de sílica e 9,7% de cálcio resultaram em um aumento de 21% da resistência mecânica dos concretos de ultra alto desempenho.
3. A presença de impurezas interfere negativamente no desempenho mecânico do UHPC, como é o caso do cimento CII Z que contém 1,68% de seu peso em enxofre e apresentou a menor média de resistência à compressão.
4. Do ponto de vista estatístico, o tipo de cimento não influencia de maneira significativa na resistência à compressão do UHPC. Entretanto, o CPV ARI apresentou a maior média de resistência à compressão comparado com os demais cimentos, resultado este que justifica seu amplo uso na literatura e sendo portanto, o cimento mais indicado para concretos de ultra alto desempenho.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se utilizar diferentes tipos de agregados e também outras variações de superplastificantes visando estudar sua influência no UHPC. Além disso pode-

se fazer uma análise comparativa de outras propriedades do concreto de ultra alto desempenho com o concreto convencional, como por exemplo a sua resistência à corrosão, permeabilidade e outras propriedades mecânicas como flexão e tração. Além disso, são sugeridos estudos com uso de fibras.

Como nesta pesquisa, pela análise estatística, o tipo de cimento não influenciou significativamente a resistência à compressão do UHPC, sugere-se um estudo que identifique qual tipo de cimento torna o UHPC um concreto mais vantajoso do ponto de vista econômico.

REFERÊNCIAS

- ALKAYSI, M. et al. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (uhpc). **Cement and Concrete Composites**, v. 66, p. 47–56, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento portland - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2000.
- COSTA, E. B. d. et al. Clínquer portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 75–86, 2013.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e preparação de amostras - Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.
- DILS, J.; BOEL, V.; SCHUTTER, G. de. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of uhpc. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 455–463, 2013.
- GOBBO, L. de A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, São Paulo, 2003.
- GOBBO, L. de A. **Aplicação da difração de raios X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, São Paulo, 2009.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais - Capítulo 29: Concreto de Cimento Portland**. Rio de Janeiro: IBRACON, 2010.
- KOUKOLÍK, P. et al. Construction of the first footbridge made of uhpc in the czech republic. **Advanced Materials Research**, v. 1106, p. 8–13, 2015.

LAFARGE-HOLCIM. **Innovative UHPC Solutin**. 2018. Disponível em: <<https://www.ductal.com>>. Acesso em: 08 de agosto de 2018.

LAMOND, J. F.; KLIEGER, P. **Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials, 169C**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2006.

LEE, N. et al. Microstructural investigation of calcium aluminate cement-based ultra-high performance concrete (uhpc) exposed to high temperatures. v. 102, p. 109–118, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. Berkeley: McGraw-hill, 2006.

MOSTOFINEJAD, D.; NIKOO, M. R.; HOSSEIN, A. S. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (rpc). **Construction and Building Materials**, v. 123, n. 1, p. 754–767, 2016.

NAVIDI, W. **Probabilidade e Estatística para Ciências Exatas**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.

OLIVEIRA, D. N. S. et al. Cimento para poço de petróleo desenvolvido a partir de cimento comum: Caracterização física, química e mineralógica. **56º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, p. 1039–1049, 2012.

OZELAME, J. S. **Análise experimental da resistência à compressão de concretos de pós reativos com e sem adição de fibras**. 60 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo-PR, 2017.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 07, p. 1501–1511, 1995.

SCHRÖFL, C.; GRUBER, M.; PLANK, J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (uhpc). **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 11, p. 1401–1408, 2012.

SHAFIEIFAR, M.; FARZAD, M.; AZIZINAMINI, A. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (uhpc). **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 402–411, 2017.

SILVA, R. J. d. **Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 1994.

THOMAS, R. J.; SORENSEN, A. D. Review of strain rate effects for uhpc in tension. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 846–856, 2017.

TORRES, C. M. M. E. et al. Cement portland production with dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to clinker. **6th International Workshop Advances in Cleaner Production – Academic Work**, p. 1–12, 2017.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho - Capítulo 36**. Rio de Janeiro: IBRACON, 2011.

XIAO, R.; DENG, Z. cai; SHEN, C. Properties of ultra high performance concrete containing superfine cement and without silica fume. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 12, n. 2, p. 73–81, 2014.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (uhpc) with efficient cement and mineral admixtures uses. v. 55, p. 383–394, 2015.

ZDEB, T. Ultra-high performance concrete – properties and technology. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, v. 61, n. 1, p. 183–193, 2013.

ZHOU, M. et al. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 1256–1267, 2018.