

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO FATOR ÁGUA/AGLOMERANTE EM CONCRETO
DE ALTO DESEMPENHO**

Autora: Karla Ulisses Lima
Orientador: Prof. Dr. Roberto Braga Figueiredo

Belo Horizonte
Julho/2019

Karla Ulisses Lima

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO FATOR ÁGUA/AGLOMERANTE EM CONCRETO
DE ALTO DESEMPENHO**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Braga Figueiredo

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2019

L732a Lima, Karla Ulisses.
Avaliação do efeito do fator água/aglomerante em concreto de alto desempenho [recurso eletrônico] / Karla Ulisses Lima. – 2019.
1 recurso online (xv, 46 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Roberto Braga Figueiredo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 42-46.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.
3. Concreto - Teses. 4. Concreto - Durabilidade - Teses.
5. Microestrutura - Teses. I. Figueiredo, Roberto Braga. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

KARLA ULISSES LIMA

**" AVALIAÇÃO DO EFEITO DO FATOR ÁGUA/AGLOMERANTE EM CONCRETO
DE ALTO DESEMPENHO "**

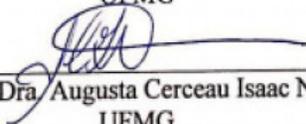
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 10 de julho de 2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Roberto Braga Figueiredo
Orientador
UFMG



Profa. Dra. Augusta Cerceau Isaac Neta
UFMG



Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali
CEFET/MG

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido o dom da vida, por sempre estar comigo, cuidando de mim e por me conceder saúde.

Ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Braga Figueiredo pela orientação, dedicação, paciência e competência em ajudar.

Ao meu amado esposo José Aparecido, pelo apoio, compreensão, paciência e por fazer dos meus sonhos os seus. Não tenho dúvidas que você tornou esta caminhada mais agradável assim como a minha vida em sua totalidade.

Aos meus pais, Carlos e Flosceli, que sempre me apoiaram e se sacrificaram para que eu tivesse uma vida melhor.

Ao IFNMG pelo apoio institucional e por possibilitar que eu cursasse esse mestrado.

A UFMG por disponibilizar sua estrutura para que este trabalho fosse executado.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG.

A todos os professores e demais funcionários do Departamento de Materiais de Construção da Escola de Engenharia.

A Jéssica Paiva pela ajuda nas pesquisas e aos demais colegas do Laboratório 3235 (Igor, Amanda, Jorgimara e Gustavo) pela boa convivência e por tornar essa caminhada mais alegre. Em especial à Dayana Garcia pelo apoio constante durante todo o período do mestrado.

As minhas queridas amigas Nara Linhares e Bruna Andrade pelo companheirismo durante esta caminhada e por cada palavra de incentivo, me ajudando a enfrentar as angústias presentes no dia-a-dia da pesquisa.

Aos meus amigos Juliana Antunes, Paulo Vítor Batista e Ana Carolina Antunes que me acolheram e me apoiaram desde o primeiro dia desta jornada.

Aos meus amigos e colegas de trabalho do IFNMG campus Januária, em especial a Lara Dourado, Jussara Cruz, Tatiane Oliveira e Áureo Santos que sempre me deram suporte.

Enfim, agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para que este projeto se concretizasse.

Gratidão!

RESUMO

Concretos com resistências superiores ao concreto convencional tem sido alvo de pesquisas devido, principalmente, às propriedades associadas à durabilidade e desempenho mecânico. Para este tipo de concreto, alguns fatores devem ser minuciosamente analisados e empregados com eficiência, como por exemplo, a qualidade dos materiais utilizados, o método de mistura, o grau de adensamento, a porosidade, a quantidade de água utilizada, ou seja, fatores que podem afetar a resistência e a microestrutura do concreto. Este trabalho teve como objetivo verificar os efeitos da variação da relação água/aglomerante na resistência à compressão, porosidade e microestrutura de amostras de concreto desenvolvidas com traço de concreto de ultra-alto desempenho. O concreto foi desenvolvido com cimento Portland CP V, areia, pó de quartzo, sílica ativa, aditivo superplastificante e diferentes teores de água/aglomerante. As amostras foram caracterizadas por difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura e o volume de poros foi determinado pelo princípio de Arquimedes. A resistência mecânica foi verificada por meio do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. O concreto moldado com traço de concreto de ultra-alto desempenho foi considerado como concreto de alto desempenho devido à faixa de resistência apresentada que foi de 60 - 100 MPa.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho. Concreto de ultra-alto desempenho. Microestrutura do concreto.

ABSTRACT

Concretes with higher strengths than conventional concrete have been the subject of research mainly due to properties associated with durability and mechanical performance. For these types of concrete, some factors must be thoroughly analyzed and used efficiently, such as the quality of the materials, the mixing method, the degree of density and porosity, the amount of water, that is, factors which may affect the concrete strength and microstructure. This work aims to verify the effects of the water/binder ratio variation on the compressive strength, porosity and microstructure of concrete samples developed with the same composition as an ultra high performance concrete mix. The concrete was developed with Portland cement, sand, quartz powder, silica powder, superplasticizer and different water/binder ratios. The samples were characterized by X-ray diffraction, by scanning electron microscopy and pore volume. The mechanical strength was verified by compressive strength test at 7 and 28 days. The concrete produced as an ultra high performance concrete mix was considered as high performance concrete due to the presented resistance range, 60 - 100 MPa.

Key words: High performance concrete. Ultra high performance concrete. Microstructure of concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Relação água/cimento em função da quantidade de superplastificante à base de policarboxilato em massa.	7
Figura 3.2 – Efeito da sílica ativa na resistência à compressão.	9
Figura 3.3 – Efeito da sílica ativa na resistência à compressão em diferentes idades.	10
Figura 3.4 – Representação da matriz cimentícia e da zona de transição no concreto.	11
Figura 3.5 - Influência do fator água/cimento na resistência à compressão do HPC em função da idade.	14
Figura 3.6 - Influência do fator água/aglomerante na resistência à compressão do UHPC.	15
Figura 3.7- Influência da porosidade na resistência à compressão do UHPC.	17
Figura 3.8 – Relação entre os valores do <i>spread</i> e porosidade do UHPC.	18
Figura 4.1 - Representação das etapas do trabalho.	21
Figura 4.2 - Difratoograma do quartzo, sílica ativa e CP V.	22
Figura 4.3 - Curvas granulométricas da areia, quartzo moído, sílica ativa e CP V....	23
Figura 4.4 - Etapas do processo de mistura.	26
Figura 4.5 – Aparato utilizado para auxiliar na melhora da densidade do concreto. (1) Moldes dos corpos de prova, (2) matriz e (3) punção.	26
Figura 4.6 - Dispositivo utilizado na execução do teste <i>Flow Table</i>	27
Figura 4.7 - Consistência do concreto em função da quantidade de aditivo e do fator água/aglomerante.	28
Figura 5.1 – Porosidade dos corpos de provas aos 7 e 28 dias.	31
Figura 5.2 – Resistências à compressão das amostras aos 07 e 28 dias.	33
Figura 5.3 - Relação da porosidade e resistência à compressão do concreto	34
Figura 5.4 – Difração de raios-X para amostras de concreto de alto desempenho...	35
Figura 5.5 – Imagens de MEV-SE da microestrutura das amostras de concreto de HPC.	36
Figura 5.6 – Imagens de Microscópio Eletrônico de Varredura - Elétrons Secundários - de sílica ativa (a) ampliação de 2500x (b) ampliação de 1000x.	37
Figura 5.7 – Imagens de Eletrônico de Varredura - Elétrons Secundários (a) etringita e (b) hidróxido de cálcio.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Redução do fator água/cimento e resistências iniciais elevadas devido a utilização de aditivos superplastificantes.....	6
Tabela 3.2 - Resistência à compressão de corpos de provas cúbicos em diferentes idades.....	13
Tabela 3.3 - Proporções de mistura em relação a água, fator água/aglomerante e média de resistência à compressão.	16
Tabela 4.1 – Composição química dos materiais utilizados	20
Tabela 4.2 - Massa específica dos materiais utilizados	22
Tabela 4.3 – Traços utilizados para confecção dos corpos de prova.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl – relação água/aglomerante

a/c – relação água/cimento

CP I – Cimento *Portland* Tipo I

CP V - Cimento *Portland* Tipo V

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

E.M.M.A. - *Elkem Materials Mixture Analyzer*

HP - hiperplastificante

HPC - *High Performance Concrete*

ICDD - *International Centre for Diffraction Data*

M.A.U.D. - *Material Analysis Using Diffraction*

MEV – microscopia eletrônica de varredura

MMQ – método dos mínimos quadrados

NBR – Norma Brasileira

RPC – *Reactive Powder Concrete*

SA – sílica ativa

SE – elétrons secundários

SP - superplastificante

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UHPC – *Ultra High Performance Concrete*

UHPCRF - *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*

ZT – zona de transição

LISTA DE SÍMBOLOS

D – tamanho da partícula (μm)

D_{max} – maior tamanho da partícula

D_{min} – menor tamanho da partícula

m_s – massa seca

m_{sub} – massa submersa

$P(D)$ – fração total dos sólidos menores do que o tamanho D

P_{mix} – mistura composta

P_A – porosidade aberta

P_{tar} – mistura calculada

P_T – porosidade total

q – módulo de distribuição

λ - comprimento de onda

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Concreto de ultra-alto desempenho	3
3.1.1 <i>Materiais constituintes</i>	3
3.1.2 <i>Cimento</i>	3
3.1.3 <i>Aditivo redutor de água</i>	4
3.1.4 <i>Adição mineral</i>	7
3.1.5 <i>Agregado</i>	11
3.1.6 <i>Composição, dosagem e cura</i>	12
3.2 Influência da relação água/aglomerante no concreto	13
3.2.1 <i>Resistência à compressão e durabilidade</i>	13
3.3 Empacotamento de Partículas	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Materiais	20
4.2 Métodos	20
4.2.1 <i>Caracterização dos materiais</i>	21
4.2.2 <i>Estudo de dosagem</i>	23
4.2.3 <i>Corpos de prova</i>	25
4.2.4 <i>Ensaio</i>	27
5 RESULTADOS	31
5.1 Porosidade	31
5.2 Resistência Mecânica	32
5.3 Difração de raios-X	34
5.4 Microscopia eletrônica de varredura	35
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38

7 CONCLUSÕES	40
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Um número significativo de pesquisas tem sido realizado visando o melhoramento do desempenho dos concretos, principalmente no que tange às propriedades relacionadas ao desempenho mecânico e durabilidade. Em vista disso, outros tipos de concreto foram desenvolvidos a partir do concreto convencional, dentre esses outros tipos, destacam-se o concreto de alto desempenho (*High Performance Concrete – HPC*) e o concreto de ultra-alto desempenho (*Ultra High Performance Concrete – UHPC*). As definições desses concretos relacionam-se também com a sua resistência à compressão, sendo o UHPC, por exemplo, definido como um concreto com resistência à compressão superior a 120 MPa aos 28 dias (HUANG *et al.*, 2017; TUAN *et al.*, 2011).

No que se referem às aplicações desses tipos de concreto, esses são utilizados em pontes e vigas industriais, são muito utilizados em peças estruturais, dentre outras aplicações em várias partes do mundo. Outra aplicação relatada na literatura quanto ao uso do UHPC, é sua utilização na execução de elementos de proteção contra riscos de explosões (RESPLENDINO, 2004; YI *et al.*, 2012).

Os avanços alcançados nas pesquisas dos vários tipos de concretos, principalmente em concretos com maiores resistências mecânicas e maior durabilidade se devem, especialmente, à compreensão mais minuciosa da microestrutura do concreto adquirida a partir das pesquisas desenvolvidas nos últimos tempos. Fatores como método de mistura, propriedades dos materiais, dosagem - fator água/aglomerante, adensamento e cura interferem em algumas propriedades do concreto endurecido (CHEYREZY *et al.*, 1995; RICHARD; CHEYREZY, 1995).

O fator água/aglomerante pode determinar o volume de poros presentes no concreto endurecido, por isso a quantidade de água utilizada no concreto influencia diretamente a resistência à compressão e microestrutura do concreto (SHI *et al.* 2015) Logo, faz-se necessário investigar as implicações da variação do fator água/aglomerante na porosidade, resistência à compressão e microestrutura do concreto com traço de concreto de ultra-alto desempenho.

2 OBJETIVOS

O objetivo dessa pesquisa foi verificar as implicações da variação do fator água/aglomerante na resistência mecânica e na microestrutura em amostras de concreto de alto desempenho. Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- a) Avaliar a influência da variação do fator água/aglomerante sob a porosidade do concreto de alto desempenho;
- b) Avaliar a relação entre a variação do fator água/aglomerante e a resistência à compressão do concreto de alto desempenho;
- c) Analisar por meio de técnicas de análises de imagens a microestrutura do concreto de alto desempenho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Concreto de ultra-alto desempenho

O concreto de ultra-alto desempenho é descrito como um concreto de alta resistência mecânica e de microestrutura densa, o que confere a este tipo de concreto, além da alta resistência mencionada, também maior durabilidade quando comparado ao concreto convencional, devido à considerável redução da permeabilidade do UHPC (CHEYREZY *et al.*, 1995; MATTE; MORANVILLE, 1999).

No que se refere à faixa de resistência à compressão, enquanto o concreto convencional varia em torno de 40 MPa e 60 MPa, o concreto de alto desempenho varia entre 60 MPa e 120 MPa e o concreto de ultra-alto desempenho apresenta resistência a partir de 120 MPa, podendo chegar a 800 MPa, sendo os maiores valores de resistência alcançados no concreto de pós reativo (*Reactive Powder Concrete* - RPC) que também é considerado um tipo de UHPC e no concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (*Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete* - UHPCRF). Essa grande variação de resistência está ligada à composição do traço do concreto, os tipos de materiais utilizados na sua confecção e nos métodos utilizados na sua produção (HUANG *et al.*, 2017; RICHARD; CHEYREZY, 1994).

3.1.1 Materiais constituintes

Os materiais utilizados em um concreto interferem nas propriedades da mistura, e, principalmente tratando-se de um concreto de ultra-alto desempenho, a escolha dos materiais a serem empregados é de suma importância (TUTIKIAN *et al.*, 2011). Em seguida serão abordados os principais materiais utilizados no UHPC, bem como algumas de suas propriedades.

3.1.2 Cimento

Os tipos de cimentos mais indicados para confecção de concreto de ultra-alto desempenho são os cimentos com maiores teores de clínquer, como os tipos CP I e

CP V e com alto teor de silicatos (C_2S e C_3S), compostos que contribuem diretamente para a resistência final dos concretos. Porém cimentos com partículas muito finas possuem maior área superficial, aumentando assim a quantidade de água a ser utilizada na mistura, afetando negativamente a resistência final do concreto. Estudos relatam ainda que o cimento a ser utilizado no concreto de ultra-alto desempenho deve apresentar baixo teor de C_3A , pois este influencia no aumento do calor de hidratação do cimento e na formação de etringita (ISAIA, 2011; SHI *et al.*, 2015).

Algumas pesquisas com outros tipos de cimento incorporados à mistura de UHPC já foram realizadas. Algumas dessas pesquisas relataram resultados satisfatórios com cimentos especiais com partículas intermediárias às partículas de cimento Portland e às partículas de sílica ativa, uma vez que o UHPC possui compostos cimentícios que não hidratam completamente devido à baixa relação água/aglomerante (a/agl), estes cimentos atuam como enchimento na matriz do concreto de ultra-alto desempenho, contribuindo para a formação de uma matriz mais densa (ARORA *et al.*, 2017; SHI *et al.*, 2015).

3.1.3 Aditivo redutor de água

A alta durabilidade de um concreto relaciona-se com a sua baixa porosidade e conseqüentemente, com baixa relação água/aglomerante, uma vez que concretos com maiores fatores a/agl tendem a ser mais porosos. No entanto para atingir uma baixa relação água/aglomerante sem que a fluidez da mistura seja comprometida a ponto de comprometer sua trabalhabilidade, faz-se necessário o uso de aditivos que possibilitem a redução de água utilizada no concreto, pois reduzindo a relação água/aglomerante, a porosidade também diminui e o concreto se torna mais durável (CASTRO; PANDOLFELLI; 2009; FLATT; BOWEN, 2003).

Além disso, o cimento, quando entra em contato com água, tende a formar aglomerados. Isso ocorre devido à alta polaridade da água e as forças de atração entre as moléculas desse elemento (dentre outras, força de *Van der Waals*). Esses aglomerados por sua vez, formam uma rede de ductos, onde fica retida parte da água da mistura, impedindo que esta água fique disponível para hidratação do

cimento, comprometendo assim a trabalhabilidade da mistura. Para que este efeito seja evitado, as forças de atração entre essas partículas devem ser menores que as forças de repulsão. Por isso faz-se necessário o uso de agentes dispersantes, capazes de atuar na reversão da aglomeração das partículas de cimento (CASTRO; PANDOLFELLI; 2009).

O uso de aditivos redutores de água, além de melhorar a durabilidade do concreto, por meio da redução da demanda de água na mistura, reduzindo a porosidade, também permite a incorporação de outros materiais ao concreto, como por exemplo, escória, cinzas volantes e resíduos industriais. O aditivo possibilita que esses materiais sejam adicionados ao concreto sem que a trabalhabilidade da mistura no seu estado fresco seja comprometida, mesmo quando é utilizado um baixo fator água/aglomerante (KJELDSEN *et al.*, 2009).

De acordo com a NBR 11768:2011, os aditivos redutores de água são classificados em três grupos: sendo os 'Redutores de água ou Plastificantes', o primeiro grupo, onde estão os aditivos compostos por lignosulfonatos, polissacarídeos ou sais de ácidos carboxílicos. O segundo grupo, denominado 'Alta redução de água/Superplastificantes Tipo I' é composto por aditivos com sais condensados de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonato, produtos gerados a partir de reações químicas - polimerização. E por fim, os aditivos à base de policarboxilato – poliéteres constituem o terceiro e último grupo, 'Alta redução de água/Superplastificante Tipo II'. Na literatura, os aditivos superplastificantes à base de policarboxilato, também são referidos em alguns estudos como superplastificantes de terceira geração ou hiperplastificantes (GOMES *et al.* 2016; MELO *et al.*, 2009).

3.1.3.1 Aditivos superplastificantes

O aditivo superplastificante influencia na reologia do concreto disseminando as partículas de cimento, aumentando sua fluidez e conseqüentemente reduzindo a quantidade de água que seria necessária para alcançar determinada trabalhabilidade. A Tabela 3.1 mostra a redução do fator água/cimento e aumento da resistência inicial possibilitada pelo uso do aditivo superplastificante, mantendo ainda

o mesmo abatimento de uma amostra de referência sem o uso do aditivo e com maior relação água/cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Tabela 3.1 - Redução do fator água/cimento e resistências iniciais elevadas devido a utilização de aditivos superplastificantes.

Ensaio	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Relação Água/Cimento	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)			
				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
(A) Concreto de referência (sem aditivo)	360	0,60	225	10	21	32	45
(B) Concreto com a mesma consistência de (A), mas contendo menos água e 2% de superplastificante, em massa de cimento	360	0,45	225	20	35	43	55
(C) Concreto com a mesma relação água/cimento de (B), mas sem superplastificante e com menor abatimento.	360	0,45	30	16	28	37	52

Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Por isso os aditivos superplastificantes são muito utilizados para melhorar a trabalhabilidade de concretos para fins práticos, pois atuam na disseminação de elementos cimentantes presentes na mistura de concreto. Para viabilizar o trabalho com concreto bombeável em lugares de temperaturas mais elevadas, por exemplo, o uso dos aditivos superplastificantes é imprescindível, uma vez que por meio da incorporação deste produto na mistura de concreto, há a redução da taxa de hidratação do cimento, resultando em um prazo maior para trabalhar com o concreto produzido (ZHANG *et al.*, 2010).

No entanto, a quantidade do aditivo a ser utilizado em uma mistura de concreto, deve ser bem dosada. Um estudo realizado por Khudhair e colaboradores (2018) demonstrou que a adição de até 3,5% de superplastificante à base de policarboxilato (SP Tipo II) em peso de cimento possibilitou a redução da relação água/cimento (a/c) em até 36% em concretos e argamassa, quando comparado a uma amostra

controle. A Figura 3.1 demonstra que a quantidade de água utilizada na mistura é reduzida à medida que se adiciona o aditivo superplastificante.

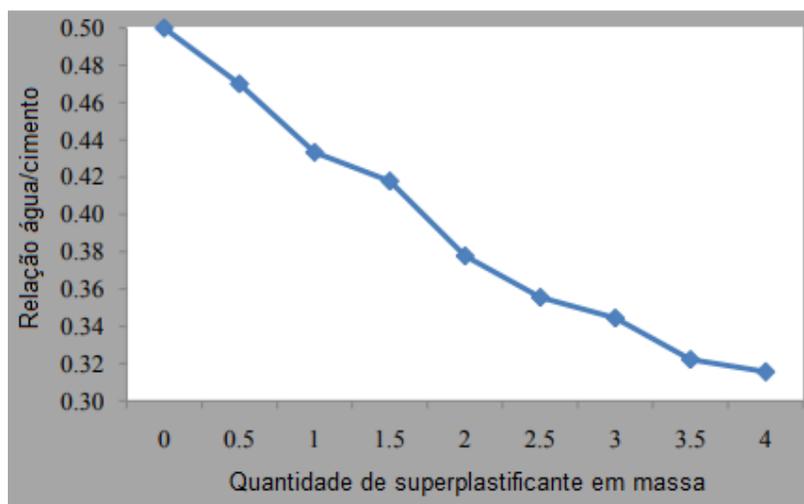


Figura 3.1 - Relação água/cimento em função da quantidade de superplastificante à base de policarboxilato em massa.

Fonte: Adaptado de Khudhair *et al.* (2018).

Este mesmo estudo ainda demonstrou que a redução da porosidade e melhoramento das propriedades mecânicas do concreto era diretamente proporcional ao aumento da quantidade de aditivo superplastificante adicionado ao concreto, até 3,5%. No entanto, ao adicionar 4,0% do mesmo aditivo superplastificante, verificaram-se efeitos negativos nas propriedades do concreto, reduzindo sua resistência à compressão, o que demonstra que o ponto de saturação para o aditivo utilizado no estudo é 3,5%, corroborando com outros estudos já realizados (KHUDHAIR *et al.*, 2018a; KHUDHAIR *et al.*, 2018b). No entanto, a quantidade e o tipo de aditivo a ser utilizado dependem do tipo de concreto que se deseja produzir, observando ainda os tipos de materiais utilizados e a relação a/agl com a qual se pretende trabalhar.

3.1.4 Adição mineral

É comum substituir parte do cimento por adições minerais para melhorar algumas das propriedades do concreto, como resistência mecânica e durabilidade (SABET *et al.*, 2013). Neste contexto, Libre e colaboradores (2010), ainda ressaltam que a incorporação de adições minerais no concreto em substituição à parte do cimento

diminui problemas relacionados à hidratação, por conseguinte, reduz fissuras térmicas e falhas associadas ao encolhimento autógeno, que é um encolhimento interno do concreto, depois que o concreto endurece, sua capacidade de contração diminui, logo, se algo compromete a hidratação interna do concreto, é provável que ocorra um encolhimento autógeno ou interno enquanto toda a estrutura do concreto não acompanhará esse encolhimento, podendo desenvolver deste modo, fissuras no concreto.

Quanto às adições minerais utilizadas em concreto de elevadas resistências, como é o caso do UHPC, as mais utilizadas são o metacaulim, as cinzas de casca de arroz e a sílica ativa. A utilização desses três materiais é devido, principalmente, ao alto potencial pozolânico que apresentam (ISAIA, 2011). Mas além do grau de pozolanicidade dos materiais, há outras propriedades que devem ser analisadas ao utilizar um material como adição mineral em concretos de desempenho superior ao concreto convencional.

Um estudo realizado por Pedro e outros (2017) concluiu que ao incorporar 10% de sílica ativa em um concreto de alto desempenho, foi necessária uma maior relação água/aglomerante, sugerindo que isso se deve ao fato da sílica ativa apresentar uma grande área superficial específica. Corroborando esta compreensão, Mehta e Monteiro (2014) já ressaltaram que a ampla área superficial deste material pode influenciar na mistura de concreto, de forma que esta consuma mais água para hidratação. No entanto, afirmaram também que devido a sua estrutura microesférica, quando a sílica ativa é adicionada ao concreto, suas partículas podem agir como 'rolamentos', resultando no melhoramento do abatimento da mistura.

A sílica ativa é utilizada geralmente no concreto de ultra-alto desempenho com três objetivos: preenchimento de vazios, melhoria da trabalhabilidade da mistura devido a sua morfologia esférica e favorecimento da produção de C-S-H ao reagir com o hidróxido de cálcio presente na mistura, contribuindo para que os vazios na matriz da pasta sejam preenchidos (KRONLOF, 1994; LONG; WANG, 2002; MAGUREANU *et al.*, 2012). Em suma, a sílica ativa afeta diretamente as propriedades do concreto, melhorando tais propriedades devido ao seu efeito pozolânico, de preenchimento e lubrificante (JUENGER; SIDDIQUE, 2015; SHI *et al.*, 2015).

Um estudo realizado por Sabet e outros (2013) comparou os efeitos da sílica ativa, zeólito natural e cinzas como adições em concretos. Este estudo concluiu que das três adições que foram incorporadas ao concreto, a sílica ativa foi a que mais reduziu a porosidade e a difusão de cloreto, fatores associados à resistência mecânica e durabilidade.

Já no que se refere à quantidade de sílica ativa empregada nesses concretos, Wang e colaboradores (2012) substituíram 10% do ligante por sílica ativa e atingiram uma resistência à compressão de 150 MPa aos 56 dias. Outro estudo, realizado por Kadri *et al.* (2009), demonstrou que ao substituir mais de 10% do ligante por sílica ativa, não há grandes ganhos de resistência à compressão. Conforme demonstrado na Figura 3.2, as misturas de concreto utilizando 20% e 30% de sílica ativa em substituição ao ligante apresentaram menor resistência ao compará-las com a mistura contendo 10% de sílica ativa.

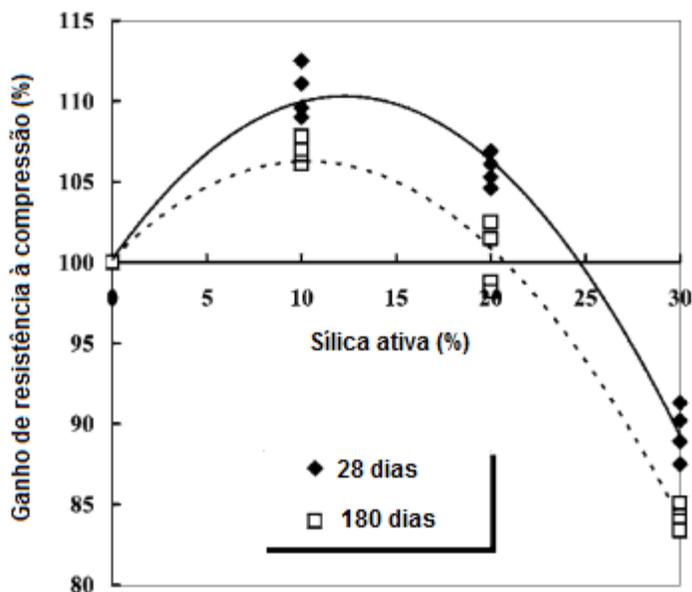


Figura 3.2 – Efeito da sílica ativa na resistência à compressão.
Fonte: Adaptado de Kadri *et al.* (2009).

No entanto, esses mesmos autores afirmaram que a quantidade e efeito da sílica ativa dependem ainda das condições de cura que serão empregadas no concreto (KADRI *et al.*, 2009).

Corroborando esta mesma ideia, Alsalman e colaboradores (2017) também estudaram o efeito da sílica ativa no concreto de ultra-alto desempenho e concluíram que a incorporação desse material no concreto aumentou a resistência à compressão do UHPC em todas as idades. A Figura 3.3 ilustra que a mistura sem incorporação de sílica ativa apresentou menor resistência à compressão que as outras misturas com sílica ativa, e demonstra ainda que a mistura contendo 10% de sílica ativa foi a que apresentou melhor resistência à compressão.

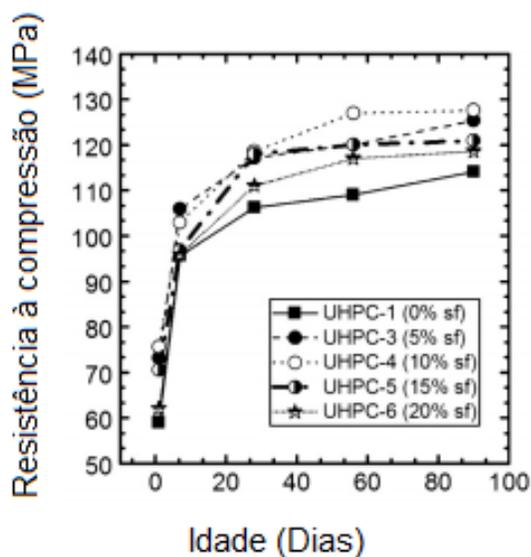


Figura 3.3 – Efeito da sílica ativa na resistência à compressão em diferentes idades.
Fonte: Adaptado de Alsalman *et al.* (2017).

Em contrapartida, outro estudo referente a concretos de resistências superiores ao concreto convencional realizado por Wille e outros (2011), investigou dentre outras variações, a quantidade de adição de sílica incorporada ao concreto com pó de vidro sem tratamento térmico. Com base nos resultados obtidos neste estudo, foi possível concluir que a resistência à compressão do concreto melhorava à medida que se diminuía a quantidade de pó de vidro e se aumentava a quantidade de sílica ativa que era utilizada, sendo que os quatro valores mais altos de resistência à compressão atingidos neste estudo foram com a incorporação de 25% de sílica ativa. Outros estudos apontam que a quantidade ideal de SF é entre 20% a 35% do peso de cimento para concretos que se pretendem atingir altas resistências, mas ressaltam ainda que este fator ideal de sílica ativa (SA) é impreterivelmente

dependente da relação água/aglomerante do concreto (SHI *et al.*, 2015; TUAN *et al.*, 2011).

3.1.5 Agregado

No que se refere ao agregado utilizado nos concretos de ultra-alto desempenho, é desejável que sejam empregados materiais de menores dimensões, ou seja, agregados miúdos, visando assim diminuir as falhas microestruturais, devido, dentre outros fatores, à diminuição da zona de transição (ZT) ou interface entre o agregado e a matriz cimentícia. A ZT conforme demonstrado na Figura 3.4, é considerada uma região frágil do concreto, tende a ser porosa e influencia fortemente o comportamento mecânico e a durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

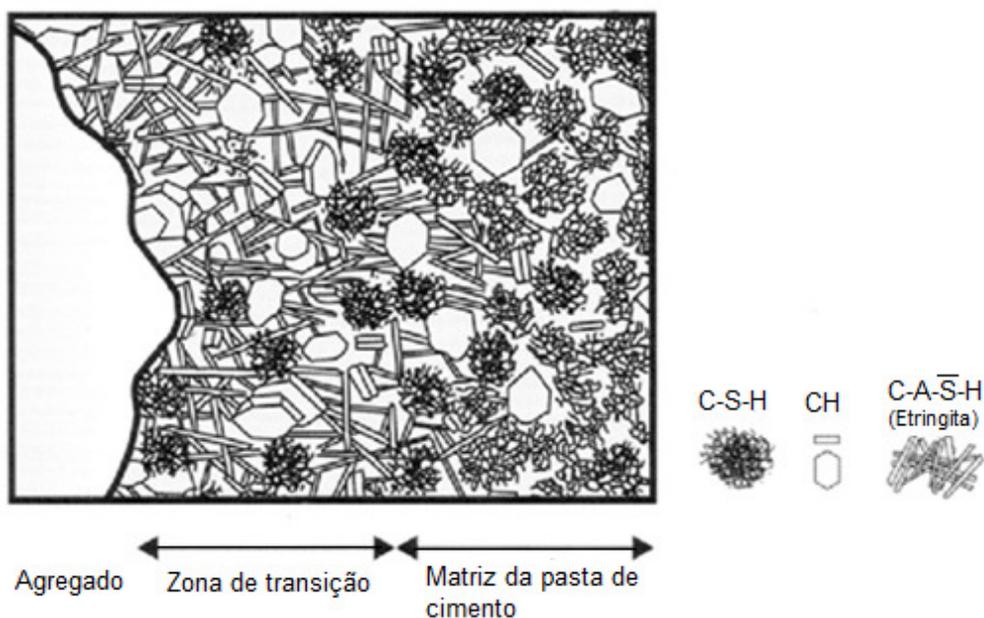


Figura 3.4 – Representação da matriz cimentícia e da zona de transição no concreto.
Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Quando o concreto é submetido a cargas externas, as fissuras decorrentes dos esforços mecânicos tendem a se formar nesta zona de transição. A eliminação do agregado grosso reduz a ocorrência de microfissuras nessa região (entre o agregado grosseiro e a matriz), o que impede que a permeabilidade do concreto seja aumentada (MAGUREANU *et al.*, 2012).

Dentre os agregados utilizados no concreto de ultra-alto desempenho, o quartzo moído é comumente utilizado por conter partículas de menor diâmetro que a areia, sendo assim, as partículas de quartzo atuam preenchendo os espaços vazios entre a areia e os fragmentos de cimento que não foram hidratados, contribuindo para que a pasta de cimento se torne mais densa e conseqüentemente, menos permeável e mais resistente à compressão (ALSALMAN *et al.*, 2017).

3.1.6 Composição, dosagem e cura

Em relação à composição do concreto de ultra-alto desempenho, destacam-se algumas características como a baixa relação água/cimento ou água/aglomerante, alto teor de cimento e incorporação de sílica ativa à mistura. Algumas técnicas especiais geralmente são empregadas na produção do UHPC, como por exemplo, estudo prévio dos materiais bem como da respectiva quantidade de cada um a ser utilizada neste concreto e ainda a cura por meio de tratamentos térmicos (RICHARD; CHEYREZY, 1995; YAZICI, 2007). Alguns estudos também citam a adição de fibras de aço em alguns casos e alto teor de superplastificante para compensar a alta redução de água, conferindo ao UHPC uma baixa relação de água/aglomerante (IBRAHIM *et al.*, 2017; RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Bentz e Stutzman (2006) ainda afirmam em seu estudo que além da relação do fator água/cimento, o tipo de cura também interfere na resistência à compressão e durabilidade do concreto. Estudos mostram que a cura a vapor ou cura em autoclave melhoram a microestrutura do UHPC uma vez que estes tipos de cura otimizam as reações pozolânicas, sendo os maiores valores de resistência à compressão do UHPC alcançados utilizando-se a cura em autoclave. No entanto esses tipos de cura tornam o processo mais dispendioso e aumentam o custo final do concreto de ultra-alto desempenho, sendo a cura em temperatura ambiente mais econômica e de mais fácil execução, tornando-se mais acessível (MASSE *et al.*, 1993; YANG *et al.*, 2009; YAZICI, 2007; ZHANG *et al.*, 2008).

Em um estudo realizado por Alsalman e colaboradores (2017) foi possível produzir um concreto com fator água/aglomerante de 0,2 com adição de 10% de sílica ativa e 3% de superplastificante, que atingiu resistência à compressão de aproximadamente

128 MPa na idade de 90 dias conforme Tabela 3.2. O método de mistura descrito no estudo dura em torno de 20 minutos e a metodologia consiste basicamente na seguinte sequência: os materiais secos são misturados primeiramente por cerca de 10 minutos, logo após é feita a adição gradativa da água e do aditivo superplastificante e a mistura permanece ainda por cerca de mais 10 minutos sendo revolvida. Posteriormente, o concreto era disposto em moldes de aço sem vibração, desmoldado 24 horas depois e, em seguida, os corpos de prova eram dispostos em câmara úmida até o dia do ensaio de resistência à compressão.

Tabela 3.2 - Resistência à compressão de corpos de provas cúbicos em diferentes idades

Mistura	Resistência à compressão (MPa)				
	1 dia	7 dias	28 dias	56 dias	90 dias
UHPC – 1	59.0	95.7	106.3	108.8	114.1
UHPC – 2	70.7	97.4	113.2	113.8	118.1
UHPC – 3	73.2	105.7	117.2	120.1	125.4
UHPC – 4	75.7	102.6	118.6	127.4	127.6
UHPC – 5	70.5	96.8	118.0	120.1	120.9
UHPC – 6	62.1	95.9	111.0	117.2	118.6
UHPC - 7	77.8	106.1	116.6	124.1	126.2

Fonte: Adaptado de Alsalman *et al.* (2017).

Importante ressaltar ainda que esse mesmo estudo concluiu que o concreto moldado em formas cúbicas apresentou aumento em torno de 7% da resistência à compressão quando comparado ao mesmo concreto moldado em formas cilíndricas, utilizando-se o mesmo regime de cura para os dois casos (Alsalman *et al.*, 2017).

3.2 Influência da relação água/aglomerante no concreto

A relação água/cimento ou relação água/aglomerante (que é o cimento mais a adição mineral) é um dos principais fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto e em outras propriedades mecânicas desse (METHA; MONTEIRO, 2014).

3.2.1 Resistência à compressão e durabilidade

A relação água/cimento (a/c) determina o volume de poros do concreto em seu estado endurecido, afeta a matriz da pasta e ainda a zona de transição que existe entre o agregado graúdo e a matriz, impactando na resistência mecânica e durabilidade do concreto. A resistência à compressão do concreto aumenta à

medida que se diminui a relação água/cimento da mistura. No entanto, conforme alguns estudos, o fator água/cimento muito baixo pode comprometer a hidratação do cimento, resultando em redução da resistência à compressão (METHA; MONTEIRO, 2014; WANG, *et al.*, 2012).

Um estudo realizado por Yang e outros (2018) avaliou a resistência à compressão de um concreto de alto desempenho com diferentes relações de água/cimento e em função da idade. A Figura 3.5 mostra os resultados relatados. Os resultados desse estudo corroboraram a ideia de que a resistência à compressão do concreto de alto desempenho aumenta à medida que a relação água/cimento é reduzida e, ainda, que tal resistência também aumenta em função do tempo, isto é, em idades mais avançadas do concreto. Isso ocorre devido ao fato da hidratação do concreto ocorrer de maneira gradativa, logo, em idades posteriores a quantidade de produtos gerados a partir da hidratação é maior, melhorando o concreto em termos de microestrutura e conseqüentemente, aumentando a resistência à compressão. Corroborando estudos anteriores sobre concretos de alto desempenho e concretos de ultra-alto desempenho (ALSAMAN *et al.*, 2017; MENG *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2018).

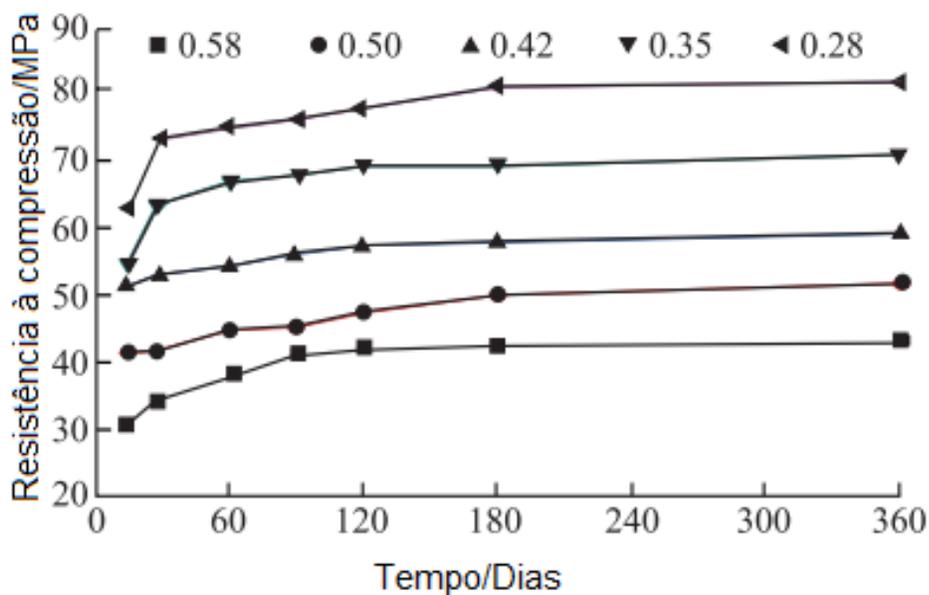


Figura 3.5 - Influência do fator água/cimento na resistência à compressão do HPC em função da idade.

Fonte: Yang *et al.* (2018).

Ainda neste mesmo contexto, em outro estudo, Wang e colaboradores (2012) desenvolveram três misturas de concreto de ultra-alto desempenho com três diferentes fatores água/aglomerante (0,14; 0,16 e 0,18) e obtiveram maior resistência à compressão nas amostras desenvolvidas com o fator água/aglomerante 0,14 nas primeiras idades. No entanto, em idades posteriores, as maiores resistências à compressão foram alcançadas com as amostras desenvolvidas com fator água/aglomerante 0,16, conforme demonstrado na Figura 3.6. Os mesmos autores abordam que a explicação deste acontecimento é devido ao cimento não hidratado em misturas com baixa relação a/c.

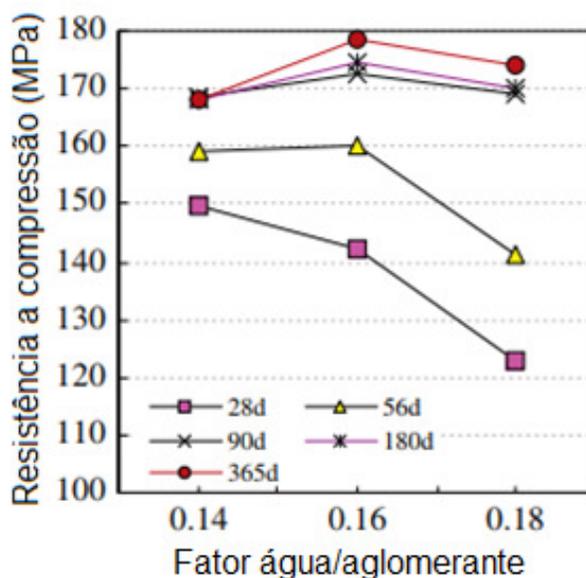


Figura 3.6 - Influência do fator água/aglomerante na resistência à compressão do UHPC.
Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2012).

Um estudo comparando a hidratação e microestrutura de pastas de cimento com diferentes fatores água/cimento confirmou que um menor fator a/c resulta em redução da porosidade da pasta, diminuindo também a conexão destes poros entre si (BENTZ; STUTZMAN; 2006). E quanto menos porosidade, maior a resistência à compressão e durabilidade do concreto, uma vez que um concreto menos poroso, de certa forma, limita a entrada de agentes agressivos, o que poderia comprometer sua durabilidade e ainda outras propriedades do concreto, como a resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO; 2014).

No entanto, mesmo que alguns estudos comprovaram que a relação entre o fator a/agl e a resistência à compressão de um concreto são inversamente proporcionais, ou seja, à medida que a relação a/agl de um concreto diminui maior sua resistência à compressão, essa diminuição do fator água/aglomerante contribui para o aumento da resistência à compressão do concreto até certo limite, até porque há outros fatores que devem ser analisados juntamente com a redução do fator a/agl , tendo em vista que fatores a/agl extremamente baixos tendem a comprometer o ganho de resistência à compressão do concreto. Um estudo realizado por Ahmad e colaboradores (2015), por exemplo, comprovou que fatores a/agl abaixo de 0,15 já demonstram perda de resistência à compressão. A Tabela 3.3 apresenta alguns resultados desse estudo.

Tabela 3.3 - Proporções de mistura em relação a água, fator água/aglomerante e média de resistência à compressão.

Mistura	Água	Relação a/agl	Resistência a compressão (MPa)
M1	0,220	0,175	154
M2	0,220	0,175	158
M3	0,212	0,164	176
M4	0,189	0,150	174
M5	0,244	0,145	166

Fonte: Adaptado de Ahmad *et al.* (2015).

Neste mesmo estudo, Ahmad e outros (2015) concluíram ainda que o UHPC adquire resistência à compressão mais rápido que o concreto convencional, pois enquanto o UHPC atinge 70% da resistência de 28 dias nos três primeiros dias, o concreto convencional demora sete dias em média para atingir a resistência equivalente aos 28 dias.

Alguns estudos mostraram que é possível desenvolver concreto de alto e ultra-alto desempenho com materiais comuns e sem tratamento térmico, por meio da redução da relação água/cimento, aliada às técnicas de otimização do empacotamento de partículas, reduzindo, consequentemente, a porosidade de tais concretos e favorecendo o aumento da resistência à compressão. Um exemplo de um desses estudos foi desenvolvido por Wille e colaboradores (2011). Os resultados obtidos nesse estudo contribuem ainda para a conclusão que a relação a/agl à medida que é

reduzida, aumenta a resistência à compressão do UHPC. Porém os próprios autores afirmam que apenas a redução do fator a/agl não é suficiente para alcançar as elevadas resistências à compressão esperadas quando se trata de um concreto de ultra-alto desempenho.

Este mesmo estudo relacionou ainda a porosidade do concreto de ultra-alto desempenho com a resistência à compressão, conforme Figura 3.7, que demonstra que conforme a porosidade do concreto é reduzida, há uma tendência no aumento dos valores da resistência à compressão (WILLE *et al.*, 2011).

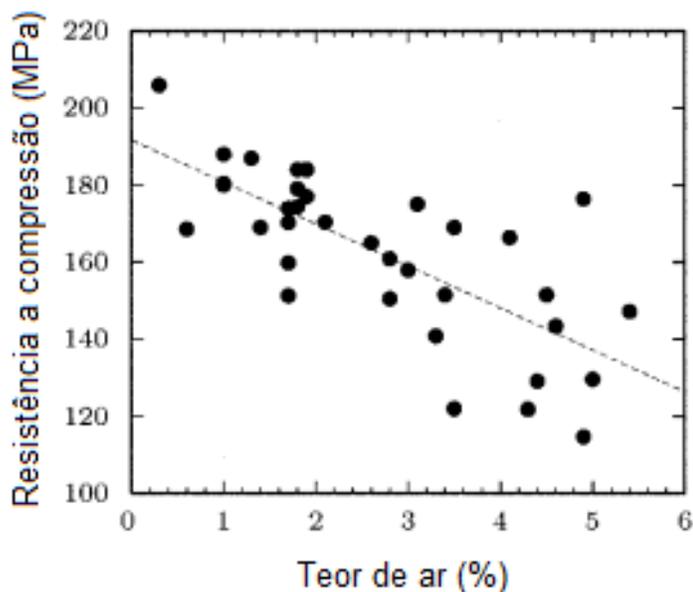


Figura 3.7- Influência da porosidade na resistência à compressão do UHPC.
Fonte: Adaptado de Wille *et al.* (2011).

Outra abordagem interessante ainda neste estudo foi a relação que os autores fizeram entre os valores do *spread* (consistência do concreto) e a porosidade do UHPC. A Figura 3.8 demonstra esta relação dos resultados, que quanto menor os valores do *spread*, ou quanto maior a consistência do concreto, maior porosidade esse irá apresentar, o que também corrobora o conceito já abordado, que a redução da relação a/agl só é diretamente proporcional ao aumento da resistência à compressão até certo limite, pois à medida que esta redução compromete a trabalhabilidade do concreto, há maior incorporação de ar na mistura durante a

execução e moldagem, o que contribui para a redução da resistência à compressão desse concreto (WILLE *et al.*, 2011).

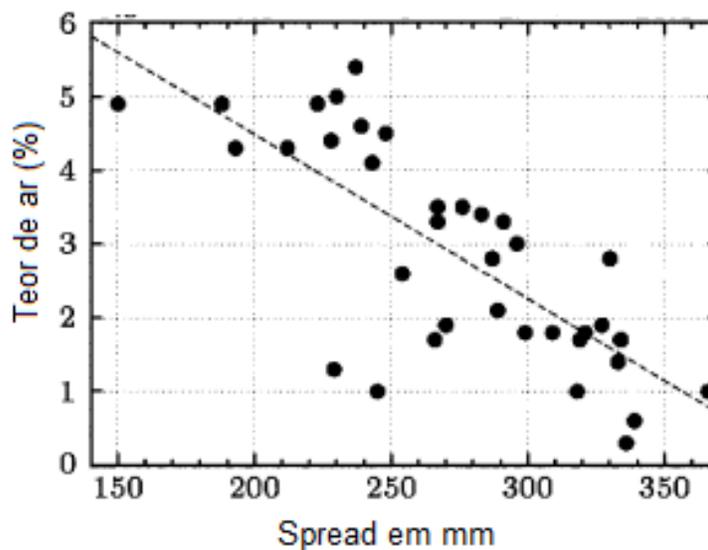


Figura 3.8 – Relação entre os valores do *spread* e porosidade do UHPC.
Fonte: Adaptado de Wille *et al.* (2011).

Neste contexto, os mesmos autores afirmam ainda que para a redução do fator água/aglomerante do concreto resultar em aumento da resistência à compressão, deve haver um melhor empacotamento de partículas na mistura, melhor adensamento, de modo que a redução da água nessa mistura não afete tanto sua trabalhabilidade (WILLE *et al.*, 2011).

3.3 Empacotamento de Partículas

A densidade dos concretos de ultra-alto desempenho é alcançada por meio do aprimoramento do empacotamento das partículas dos materiais utilizados na confecção do UHPC. A exclusão do agregado graúdo da mistura ao passo que se utiliza materiais de granulometria fina e baixo fator água/cimento contribui para uma mistura mais densa (CASTRO; PANDOLFELLI; 2009).

A eficiência do empacotamento de partículas associa-se ao tamanho das partículas dos elementos utilizados na mistura do UHPC e ainda a dispersão dessas partículas. Logo, para o melhoramento do empacotamento de partículas, é necessário que se

utilizem adições minerais no concreto de ultra-alto desempenho, como por exemplo, a sílica ativa, uma vez que as partículas dessa adição são menores que as do cimento, auxiliando no preenchimento da mistura (reduzindo os vazios da mistura), ao passo que contribui ainda para as reações químicas que acontecem no concreto devido ao seu efeito pozolânico. Já a dispersão de partículas da mistura é aprimorada devido ao uso de aditivos superplastificantes, conforme já explicado anteriormente (CASTRO; PANDOLFELLI; 2009).

Portanto, a granulometria e a morfologia das partículas dos materiais utilizados na mistura do UHPC, interferem na densidade do concreto. Por isso a importância de um projeto de mistura, para que seja garantido um melhor empacotamento das partículas dos materiais utilizados no concreto. Tal projeto relaciona-se com o estudo da melhor quantidade de cada material a ser utilizado na mistura, levando em consideração a granulometria de cada material empregado. Desta forma, os vazios formados serão preenchidos por um material de menor dimensão, progressivamente, de forma a reduzir o máximo de vazios da mistura (BONEN; SARKAR; 1995).

Devido à importância da elaboração desse projeto de mistura, surgiram várias fórmulas que possibilitam calcular o fator de empacotamento de uma mistura, baseado na granulometria dos materiais. Um desses modelos que é utilizado em relação ao concreto de ultra-alto desempenho é o modelo de Andreasen e Andersen modificado (ANDREASEN; ANDERSEN, 1930; YU *et al.*, 2014).

Alguns programas computacionais podem facilitar o cálculo do fator de empacotamento do concreto, como por exemplo, o E.M.M.A (*Elkem Materials Mixture Analyzer*), no qual é possível gerar uma curva padrão baseada no modelo modificado de Andreasen e Andersen. Esse método associado ao método dos mínimos quadrados possibilita calcular a quantidade adequada de cada material a ser utilizado para melhor empacotamento de partículas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção do concreto com traço de concreto de ultra-alto desempenho foi realizada uma pesquisa experimental, onde primeiramente foi realizada a caracterização dos materiais a serem utilizados na produção do concreto e, posteriormente, os corpos de prova foram confeccionados e caracterizados utilizando técnicas de difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e porosidade pelo método de Arquimedes. E foram submetidos aos ensaios de *flow table* e resistência à compressão.

4.1 Materiais

Os corpos de prova foram confeccionados com cimento Portland comum – CP V, areia quartzosa (granulometria < 600 µm), quartzo moído (obtido por meio da moagem da areia até obter material passante na peneira de 25 µm), sílica ativa fornecida pela empresa Tecnosil, aditivo hiperplastificante à base de policarboxilato *MasterIgenium* SCC 161 da *Master Builders*, com teor de sólidos variando entre 33,5 – 37,0% e água potável. As composições químicas desses materiais, relatadas em estudos anteriores, foram determinadas por fluorescência de raios X por dispersão de energia e estão apresentadas na Tabela 4.1. (GARCIA *et al.*, 2018; DE SOARES *et al.*, 2016).

Tabela 4.1 – Composição química dos materiais utilizados

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
CP-V	24,59	7,19	4,05	56,47	2,43	0,25	0,12	3,5
Sílica Ativa	94,7	0,24	0,07	0,97	1,29	0,03	0,09	2,81
Pó de Quartzo	96	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2018); De Soares *et al.* (2016).

4.2 Métodos

O trabalho foi dividido nas seguintes etapas: caracterização das matérias-primas; estudo de dosagem; confecção dos corpos de provas; realização dos ensaios mecânicos e caracterização microestrutural: resistência à compressão, porosidade, MEV (microscopia eletrônica de varredura) e difração de raios-X; seguidas pela análise dos resultados. As etapas são apresentadas na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Representação das etapas do trabalho.
Fonte: Autora (2019).

4.2.1 Caracterização dos materiais

Para caracterização física e química dos materiais, um dos métodos utilizados foi a de difração de raios-X. Os difratogramas do cimento, da sílica ativa e do quartzo estão expostos na Figura 4.2. O quartzo apresentou padrão de difração cristalino, enquanto a sílica ativa apresentou característica de material amorfo e os picos identificados no cimento correspondem ao C_3S e C_2S (alita e belita, respectivamente).

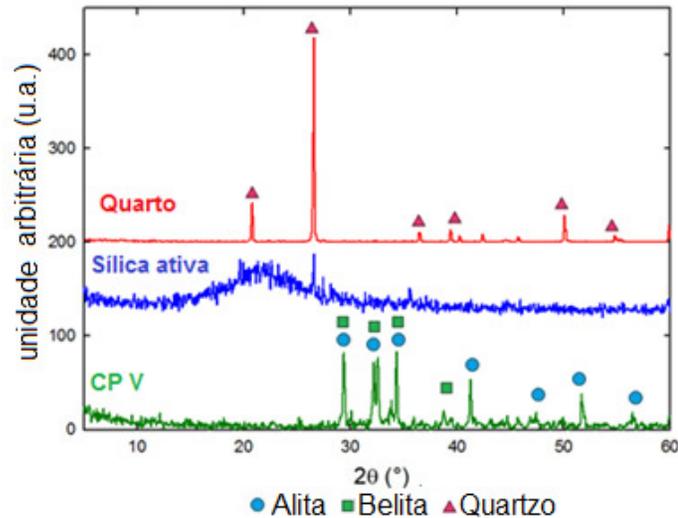


Figura 4.2 - Difratograma do quartzo, sílica ativa e CP V.
 Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2018); De Soares *et al.* (2016).

Para determinação da massa específica dos materiais, foi utilizado o frasco de *Le Chatelier*, sendo que, para o cimento, o líquido utilizado foi o querosene e para os demais materiais, água deionizada. A Tabela 4.2 apresenta as massas específicas de cada material utilizado, obtidas a partir deste método.

Tabela 4.2 - Massa específica dos materiais utilizados

Material	Massa Específica (g.cm ⁻³)
Cimento Portland CPV	3,17
Sílica Ativa	2,18
Quartzo moído	2,68
Areia de Quartzo	2,65

Fonte: Autora (2019).

A distribuição granulométrica dos materiais utilizados no concreto com traço de UHPC foi relatada em estudos anteriores (GARCIA *et al.*, 2018; GARCIA *et al.*, 2017). A distribuição granulométrica foi realizada por meio da técnica de granulometria a laser com o equipamento CILAS 1064, com teoria de Mie, via úmida e sem a utilização de agente dispersante no laboratório de caracterização de sólidos do DEMET - UFMG. As curvas granulométricas para o cimento, quartzo moído, sílica ativa e areia podem ser observadas na Figura 4.3, mostrando que o diâmetro médio do cimento foi 9,0 µm, do pó de quartzo 12,2 µm, da sílica ativa 12 µm, e o da areia 250 µm. No entanto, todas as partículas da areia apresentaram diâmetros inferiores a 600 µm.

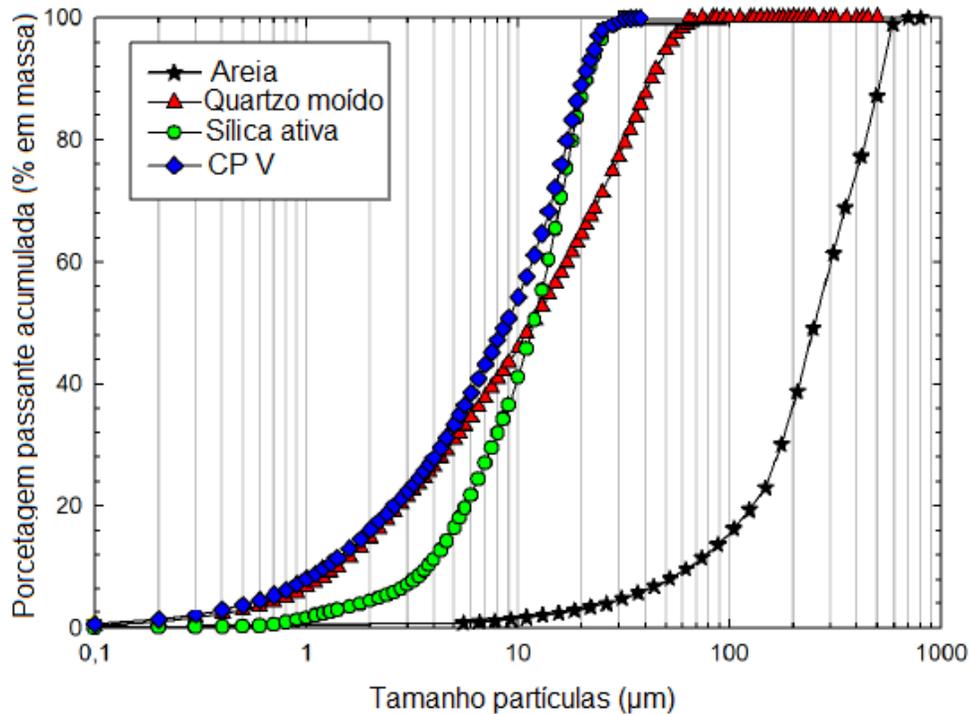


Figura 4.3 - Curvas granulométricas da areia, quartzo moído, sílica ativa e CP V.
Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2018); Garcia *et al.* (2017).

4.2.2 Estudo de dosagem

Vários estudos relatam resultados satisfatórios de resistência à compressão, dentre outras melhorias de algumas características do UHPC com diferentes traços de concreto. Geralmente os traços variam em torno de 1:0,25:1,1 (cimento; sílica ativa; areia) e o fator água/aglomerante menor que 0,20. Alguns traços apresentam pó de quartzo (em torno de 40% do peso do cimento). Há estudos que relatam ainda a incorporação de 2% em volume de fibras de aço (CHEYREZY *et al.*, 1995).

No entanto, para otimização do traço do UHPC, deve ser considerado o fator de empacotamento de partículas, sendo que, a partir deste é possível calcular o melhor traço para que seja obtida uma mistura mais densa e com menor fator a/agl, resultando no aprimoramento de várias propriedades do concreto (SHI *et al.*, 2015).

Desta forma, com o intuito de calcular o fator de empacotamento do concreto a ser executado, foi utilizado o programa computacional E.M.M.A (*Elkem Materials Mixture Analyzer*), no qual é possível gerar uma curva padrão baseada no modelo

modificado de Andreasen e Andersen, conforme Equação 4.1, que pode ser considerada a curva com melhor fator de empacotamento e curvas que simulam as misturas a serem utilizadas no concreto (de acordo com a granulometria e quantidade de cada material utilizado). Esse programa permite comparar essas curvas, sendo que a curva que mais se aproximar da curva modelo, pode ser considerada a que apresentou o melhor fator de empacotamento (SHI *et al.*, 2015).

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (4.1)$$

Onde:

$P(D)$ – Fração total dos sólidos menores do que o tamanho D ;

D – Tamanho da partícula (μm);

D_{\max} – Maior tamanho da partícula;

D_{\min} – Menor tamanho da partícula;

q – Módulo de distribuição.

O D_{\max} foi fixado em 600 μm devido à faixa granulométrica apresentada pela areia, enquanto o D_{\min} em 25 μm , que foi a faixa de distribuição granulométrica apresentada pelo cimento tipo CPV. O módulo de distribuição (q) foi fixado em 0,23 que é o recomendado quando a mistura apresenta alto teor de materiais finos (YU *et al.*, 2014). Foram testadas várias misturas com diferentes teores de sílica ativa (10%; 25%), diferentes teores de pó de quartzo (10%;20%;45%) e com variadas relação areia/cimento a fim de investigar o melhor teor de sílica ativa e quartzo moído a ser incorporado à mistura de acordo com as curvas geradas no programa, sendo no caso a que mais se aproximasse da curva padrão baseada no modelo modificado de Andreasen e Andersen. Entretanto, para verificar a aproximação dessas curvas foi necessário utilizar o método dos mínimos quadrados (MMQ) conforme Equação 4.2 (SHI *et al.*, 2015).

$$\text{MMQ} = \sum_i^n [P_{\text{mix}}(D_i) - P_{\text{tar}}(D_i)]^2 \rightarrow \min \quad (4.2)$$

Onde:

P_{mix} – mistura composta;

P_{tar} – mistura calculada a partir da equação 4.1.

A tabela 4.3 apresenta as proporções dos traços utilizados a partir dos resultados obtidos com as respectivas variações de fator água/aglomerante e aditivo redutor de água.

Tabela 4.3 – Traços utilizados para confecção dos corpos de prova

Traço	Aglomerante		Pó de quartzo	Areia	Superplastificante* (%)	Fator água/aglomerante
	Cimento	Sílica ativa				
1	1	0,25	0,20	1,0	0,25	0,40
2	1	0,25	0,20	1,0	0,5	0,35
3	1	0,25	0,20	1,0	1	0,30
4	1	0,25	0,20	1,0	1,5	0,25
5	1	0,25	0,20	1,0	2	0,20

* Aditivo superplastificante em porcentagem em massa do aglomerante

Fonte: Autora (2019).

Foram utilizados variados fatores água/aglomerante entre 0,20 e 0,40 a fim de investigar a influência dessa variação nas propriedades do concreto produzido. Em contrapartida, a quantidade de aditivo redutor de água foi fixada considerando os valores médios do teste *flow table* (180 mm a 220 mm após 25 golpes) (AHMAD *et al.*, 2015).

4.2.3 Corpos de prova

Primeiramente, os materiais foram pesados em uma balança da marca Ohaus, com precisão de 0,1 gramas. O método de mistura adotado foi baseado nos métodos de mistura descritos na literatura no que tange a metodologia de mistura adotada para confecção de concretos de ultra-alto desempenho e concretos de pós reativos. Inicialmente foram misturados os materiais secos (areia, cimento, SA e pó de quartzo) em uma argamassadeira da marca Contenco, modelo C3010, por 3 minutos na velocidade baixa, posteriormente metade da água e metade do aditivo hiperplastificante foram colocados em um mesmo recipiente e em seguida adicionados à mistura seca e então misturados na velocidade alta por 5 minutos. Na sequência, eram raspadas as laterais da cuba da argamassadeira para retirar os materiais que ficavam aderidos às laterais e posteriormente era adicionado o restante do aditivo hiperplastificante (HP) e da água e então era misturado por mais 7 minutos em velocidade alta. A Figura 4.4 é uma representação da metodologia de

mistura por meio de um fluxograma simples (ALSALMAN *et al.* 2017; HE *et al.*, 2018).

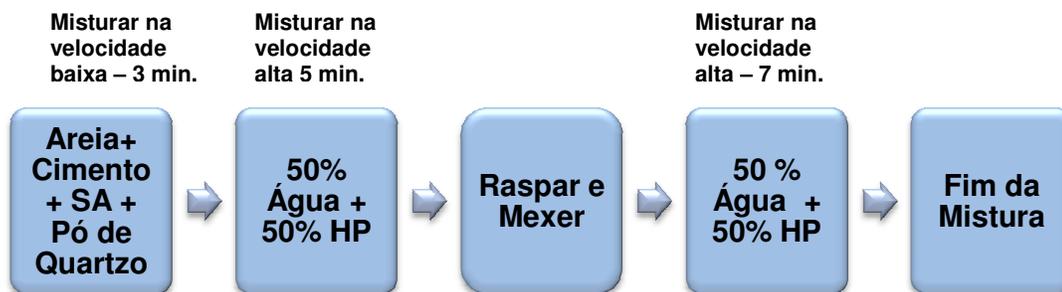


Figura 4.4 - Etapas do processo de mistura.
Fonte: Autora (2019).

Os corpos de prova foram moldados em formas cúbicas de dimensões (40 mm x 40 mm x 40 mm). Durante a moldagem, foi utilizado um aparato para auxiliar na redução do ar da mistura por meio de compressão. A mistura de concreto era colocada em uma forma, onde era comprimida, forçando a saída de parte do ar presente na mistura. A Figura 4.5 é uma imagem do aparato utilizado. Em seguida esta mesma mistura era depositada nas formas cúbicas e levada à mesa vibratória onde permaneciam por cerca de 30 segundos.



Figura 4.5 – Aparato utilizado para auxiliar na melhoria da densidade do concreto. (1) Moldes dos corpos de prova, (2) matriz e (3) punção.
Fonte: Autora (2019).

Os corpos de prova foram desenformados 24 horas após a moldagem e logo após levados para uma sala de câmara úmida (umidade 100% a 24°C), onde permaneceram até o dia do teste de resistência à compressão (sendo este realizado com amostras de concreto nas idades de 7 e 28 dias).

4.2.4 Ensaios

4.2.4.1 Flow Table

Para verificar o abatimento do concreto no estado fresco, foi utilizado o teste da mesa de espalhamento/consistência, também conhecido como *Flow Table*. A Figura 4.6 demonstra o dispositivo utilizado no teste. Este teste foi realizado da seguinte forma: o concreto desenvolvido com traço de concreto de ultra-alto desempenho foi moldado em cone metálico (tendo volume conhecido: 463,29 cm³), em seguida foi derramado sobre a mesa e submetido a 25 golpes padronizados, sendo forçado à deformação. Na sequência foi medido o diâmetro do concreto (em mm), sendo este o resultado do teste. A Figura 4.7 apresenta os resultados gerados a partir da execução deste teste. Importante ressaltar ainda que quanto maior o espalhamento, maior a deformação do concreto, ou seja, mais facilidade em sofrer deformação.



Figura 4.6 - Dispositivo utilizado na execução do teste *Flow Table*.
Fonte: Autora (2019).

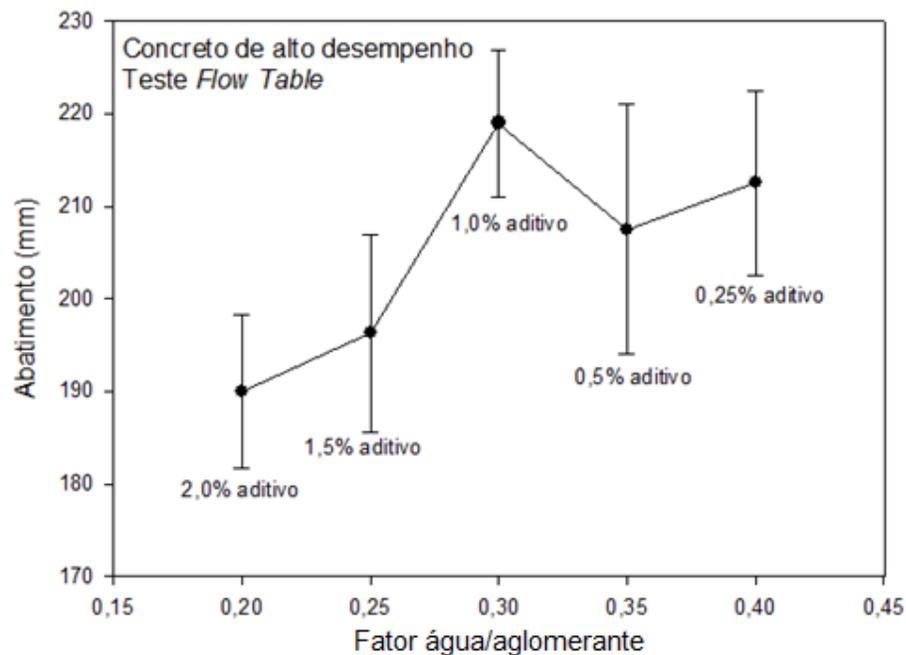


Figura 4.7 - Consistência do concreto em função da quantidade de aditivo e do fator água/aglomerante.
Fonte: Autora (2019)

4.2.4.2 Porosidade

Para obtenção da porosidade de cada amostra do concreto, primeiramente foi necessário utilizar os pesos das amostras secas, úmidas e submersas. A princípio, os corpos de prova permaneceram em uma mufla da marca GP Científica Modelo 2000 – G, por 24 horas a 60° C a fim de eliminar a água presente nos poros para obtenção do peso da amostra seca, por isso logo após as amostras serem retiradas da mufla, foram pesadas em uma balança da marca *Bel Engineering*, modelo M1003 com precisão de 0,001 gramas (Figura 4.1), obtendo, deste modo, o peso da amostra seca.

Logo após, as amostras eram depositadas em um becker de vidro com a água cobrindo as amostras e então este recipiente era colocado em um dessecador com fragmentos de sílica ao fundo e conectado a uma bomba a vácuo até a pressão de aproximadamente - 600 mmHg, com a finalidade de preencher com água os poros das amostras, tendo assim o peso da amostra úmida ao pesá-las. Por fim, as amostras eram pesadas com um aparato acoplado à balança a fim de obter o peso das amostras submersas em água. Importante ressaltar que todas as amostras (de

todas as variações do fator água/aglomerante e nas idades de 7 e 28 dias) foram submetidas a esse procedimento. A densidade teórica foi calculada como a média ponderada da massa específica de cada material sólido utilizado na mistura do concreto e foi de 2,78 g.cm³.

Por fim, com o peso da amostra seca, úmida e submersa foi possível calcular a porosidade total e a porosidade aberta de cada amostra pelo princípio de Arquimedes, conforme Equação 4.3 e Equação 4.4, respectivamente:

$$P_T = 100 \times \left[1 - \left(\frac{m_s}{\rho (m_u - m_{sub})} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$P_A = 100 \times \left(\frac{m_u - m_s}{m_u - m_{sub}} \right) \quad (4.4)$$

Onde:

P_T – Porosidade total (%);

P_A – Porosidade aberta (%);

m_s – Massa seca (g);

m_{sub} – Massa submersa (g);

m_u – Massa úmida (g);

ρ – Densidade teórica dos corpos de provas (g.cm⁻³).

4.2.4.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em corpos de prova cúbicos (40 mm) nas idades de 7 e 28 dias. Para realizar tal ensaio, foi utilizada a máquina de ensaio a compressão da marca EMIC com capacidade de 100.000 kgf do laboratório de materiais cimentícios da escola de engenharia da UFMG.

Importante destacar ainda que, após os testes de compressão, eram selecionados alguns fragmentos dos corpos de prova do concreto para serem depositados em pequenos recipientes de plástico com solução de propanona - CH₃(CO)CH₃, com a finalidade de interromper o processo de hidratação do concreto a fim de utilizá-las

nas técnicas de microscopia e difração de raios-X com a hidratação das amostras equivalentes as idades de 7 e 28 dias.

4.2.4.4 *Microscopia Eletrônica de Varredura*

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no Centro de Microscopia da UFMG. Primeiramente as amostras foram submetidas a um processo de preparação, que consistiu em uma aplicação de camada de carbono na espessura de 15 nm sob a superfície de cada amostra por método de evaporação de carbono. Por fim, para análise da morfologia do concreto, o equipamento utilizado foi o microscópio FEG – Quanta 200 FEI, com distância de trabalho de 10,0 mm e tensão de aceleração de 5 kV, a partir do qual foram geradas imagens com elétrons secundários.

4.2.4.5 *Difração de raios-X*

Inicialmente, as amostras foram moídas com o auxílio de um almofariz e pistilo, passando a amostra moída primeiramente na peneira granulométrica de abertura 0.15 mm e na sequência, a mesma amostra era moída até passar na peneira de abertura 0.075 mm. Foram coletados aproximadamente 5 g de amostra moída que foram conduzidas ao Laboratório de Raios X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (DEMET-UFMG) para determinação do padrão de difração de raios-X. As amostras foram analisadas no Difrátômetro Philips-Panalytical modelo Empryean, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ com comprimento de onda de $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, tempo de contagem de 3 segundos e medição de ângulo a cada $0,03^\circ$. A fim de eliminar o ruído de fundo das difrações, foi utilizado o programa computacional M.A.U.D. (*Material Analysis Using Diffraction*), que possibilitou ainda a verificação da posição dos picos de intensidade de difração das amostras. A identificação dos picos foi feita por meio das cartas do *International Centre for Diffraction Data* – ICDD.

5 RESULTADOS

5.1 Porosidade

Os resultados da porosidade das amostras de concreto de alto desempenho estão apresentados na Figura 5.1. Percebe-se que as porosidades tendem a diminuir conforme a redução do fator água/aglomerante. Conforme demonstrado ainda na mesma, é possível observar ainda uma redução da porosidade total bem como da porosidade aberta aos 28 dias.

A diminuição da porosidade em idades mais avançadas do concreto ocorre devido à hidratação dos compostos cimentícios, com o passar do tempo, os produtos vão se hidratando, consumindo a água disponível no sistema e preenchendo esses vazios com os produtos gerados a partir dessa hidratação, reduzindo assim a porosidade do concreto (AITCIM, 2000).

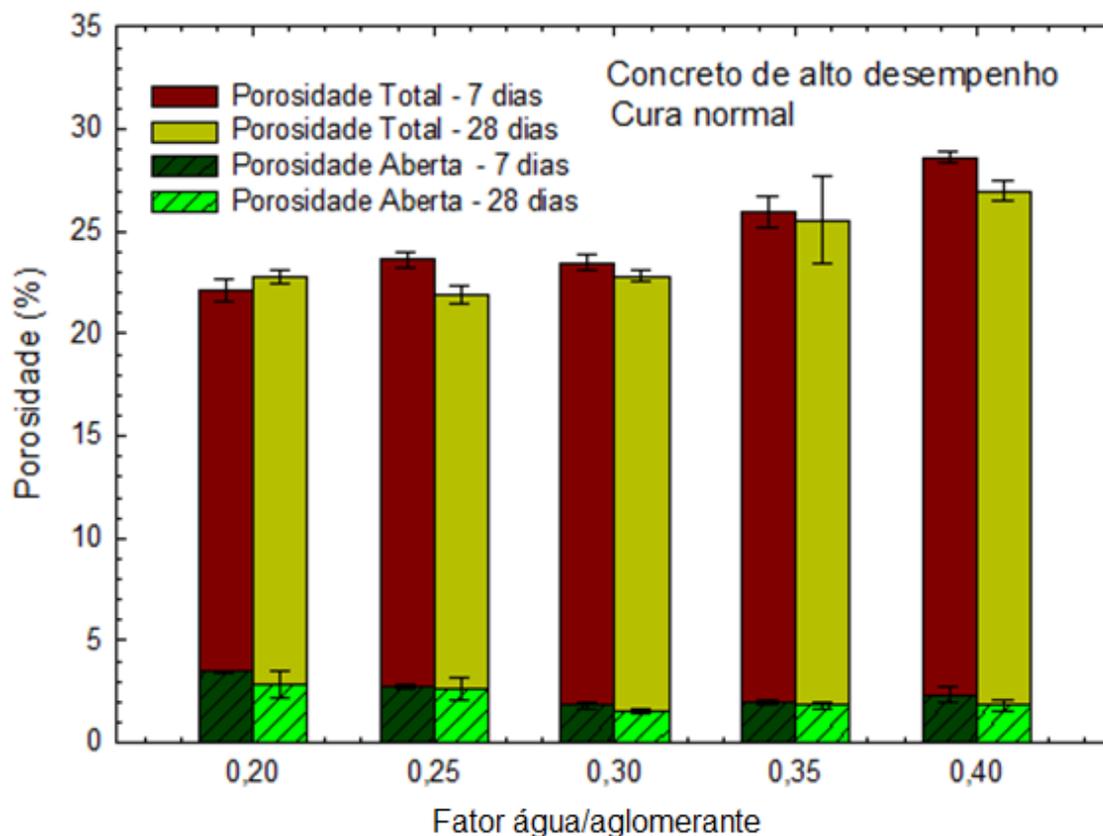


Figura 5.1 – Porosidade dos corpos de provas aos 7 e 28 dias.

Fonte: Autora (2019).

No entanto, percebe-se que a amostra com fator a/agl de 0,20 comportou-se de maneira inesperada, aumentando a porosidade aos 28 dias, fato que pode ser atribuído a possíveis problemas de moldagem.

A menor porosidade total aos 28 dias foi apresentada pela amostra de fator a/agl de 0,25, que também foi a de maior resistência conforme será apresentado posteriormente. Já a menor porosidade aberta aos 28 dias foi apresentada pela amostra com fator a/agl de 0,30, o que pode estar associado à trabalhabilidade da mistura no estado fresco, já que esta mesma mistura foi a que apresentou melhor trabalhabilidade de acordo com o teste *Flow Table*.

Uma possível justificativa para as amostras com menor fator a/agl (0,20; 0,25) apresentarem maior porosidade aberta que as demais amostras com maior fator a/agl , é que a trabalhabilidade, que é uma propriedade do concreto fresco, influencia nas propriedades mecânicas do concreto endurecido, uma vez que Wallevik e Wallevik, (2011) afirmam que a capacidade do concreto escoar pode afetar seu adensamento, pois um concreto menos denso, favorece melhor sua vibração e conseqüentemente, eliminação do ar presente na mistura fresca. Os resultados obtidos no teste *Flow Table* reforçam esse fundamento, uma vez que estas duas misturas foram as que apresentaram menor abatimento.

5.2 Resistência Mecânica

Os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto confeccionados com variados fatores água/aglomerante estão apresentados na Figura 5.2. Com base dos resultados apresentados, nota-se uma tendência ao aumento da resistência à medida que se diminui o fator água/aglomerante. No entanto a maior resistência à compressão foi alcançada com o fator água/aglomerante de 0,25, aproximando-se a 100 MPa e não com o fator água/aglomerante de 0,20, que foi o menor fator a/agl utilizado neste estudo. Isso sugere dificuldades ao moldar as amostras com o fator água/aglomerante muito baixo, influenciando na redução da resistência à compressão das amostras. Logo, as amostras do concreto produzido apresentaram resistência à compressão variando de 60-100 MPa.

Importante ressaltar, ainda, que com base nos dados apresentados na Figura 5.2, observa-se que conforme já era esperado, a resistência à compressão do concreto tende a aumentar com o passar do tempo.

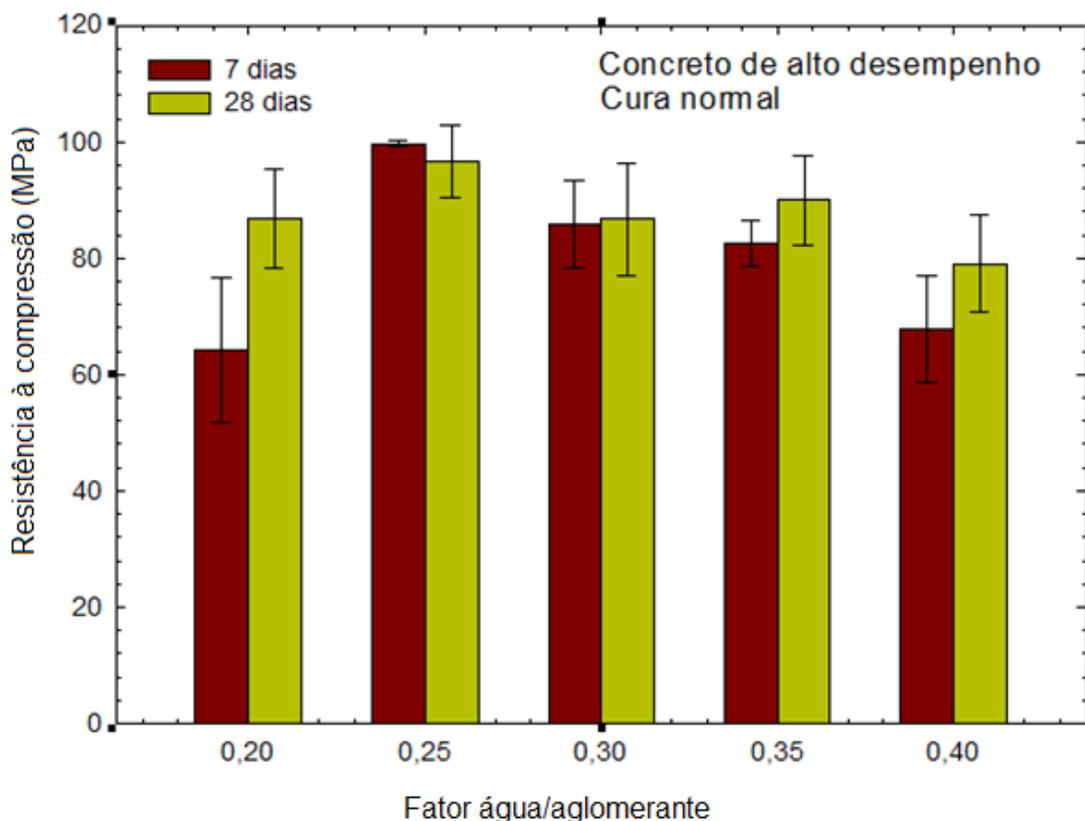


Figura 5.2 – Resistências à compressão das amostras aos 07 e 28 dias.
Fonte: Autora (2019).

A relação da resistência à compressão e a porosidade do concreto executado está apresentada na Figura 5.3. Percebe-se que à medida que a porosidade total das amostras diminui, há uma tendência no aumento da resistência à compressão. No entanto, a amostra com fator água/aglomerante de 0,20, que foi a que apresentou menor porosidade total aos 7 dias, foi a que apresentou menor resistência à compressão nesta mesma idade, o que sugere possíveis problemas de moldagem desta amostra, uma vez que os valores obtidos pelo teste *Flow Table* corroboram essa ideia, visto que esta mesma amostra foi a que demonstrou menor valores de abatimento.

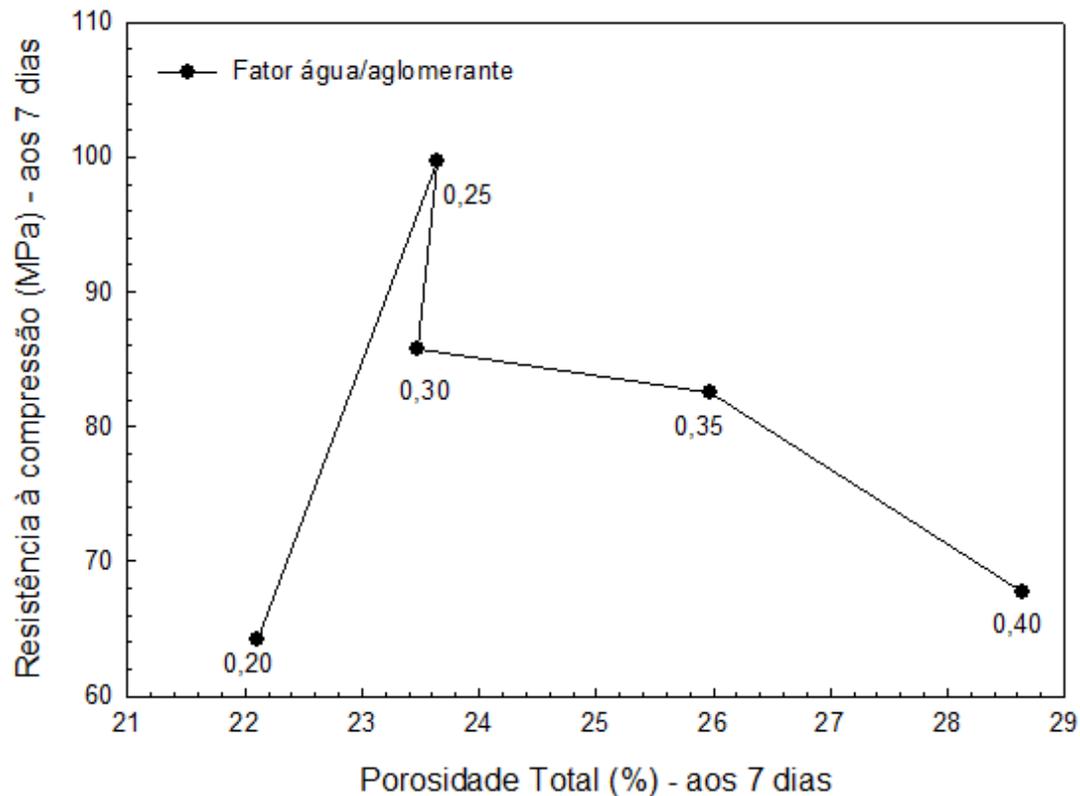


Figura 5.3 - Relação da porosidade e resistência à compressão do concreto
Fonte: Autora (2019).

5.3 Difração de raios-X

Uma das técnicas utilizadas para caracterização dos corpos de prova foi a técnica de difração de raios-X para cinco amostras produzidas com diferentes teores de fator água/cimento. Os difratogramas gerados a partir desta técnica estão apresentados na Figura 5.4. Foram identificadas fases de C-S-H, alita, belita, calcita, etringita, hidróxido de cálcio e quartzo em todas as amostras analisadas. A etringita se forma nos estágios iniciais da hidratação do cimento, e é responsável pelo processo de pega e endurecimento do cimento hidratado. Nota-se no difratograma que há uma diminuição do hidróxido de cálcio à medida que o fator água aglomerante diminui, isso acontece, pois para formação do hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ é necessário que haja água disponível para reagir com o cálcio presente na alita e belita, logo, quanto menor a quantidade de água disponível na mistura, menos favorável será a formação do hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO; 2014).

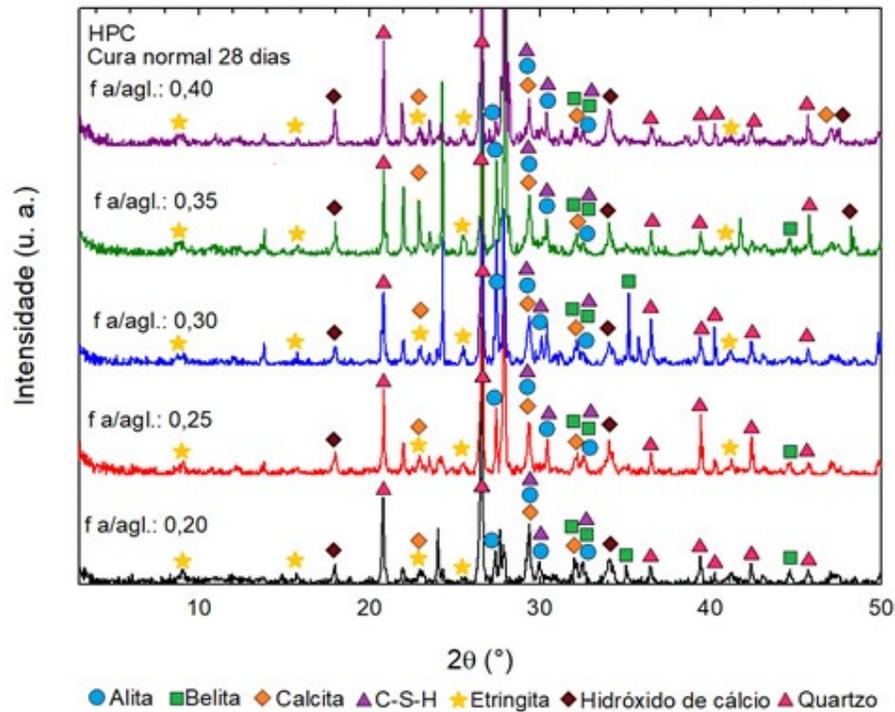


Figura 5.4 – Difração de raios-X para amostras de concreto de alto desempenho.
Fonte: Autora (2019).

A presença de calcita (CaCO_3) nas amostras pode ser explicada devido à reação de carbonatação representada na Equação 5.1, que ocorre quando o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] presente nas amostras de concreto reage com o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar (PAPADAKIS, 1989; JOHANNESSON; UTGENANNT, 2001). Como no processo de preparação das amostras para a técnica de difração de raios-X a amostra moída fica em contato com o ar é esperado que ocorra esta reação.



5.4 Microscopia eletrônica de varredura

Imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura estão apresentadas na Figura 5.5 para representar a microestrutura das amostras de concreto. Foi observada a presença de poros, quartzo e sílica ativa em todas as amostras.

A Figura 5.6 apresenta imagens pelas quais foi possível identificar partículas de sílica ativa em aglomerados em todas as amostras. E a Figura 5.7 (a) apresenta

partículas de etringita (que são as com formato de fios alongados), enquanto a Figura 5.7 (b) apresenta partículas de hidróxido de cálcio (que são as com formato de placas hexagonais).

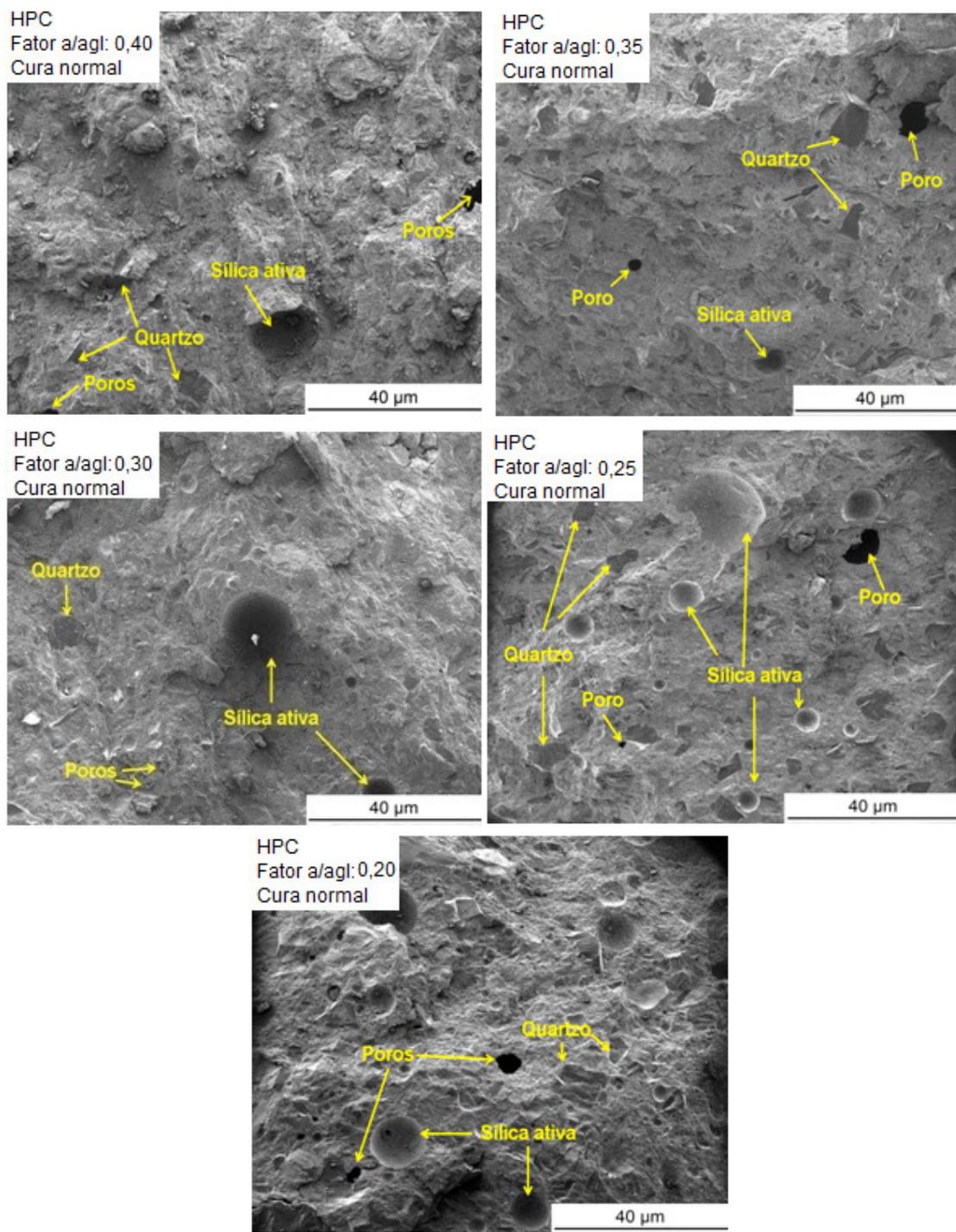


Figura 5.5 – Imagens de MEV (Elétrons Secundários) mostrando microestrutura das amostras com diferentes fatores a/agl.
Fonte: Autora (2019).

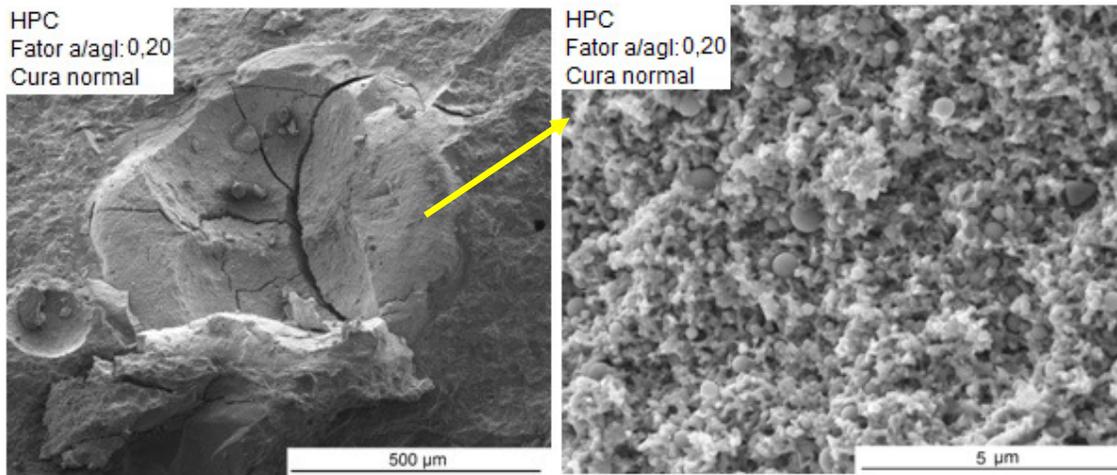


Figura 5.6 – Imagens de MEV (Elétrons Secundários) (a) de uma região contendo partícula esférica e (b) maior ampliação mostrando aglomeração de sílica ativa.
Fonte: Autora (2019).

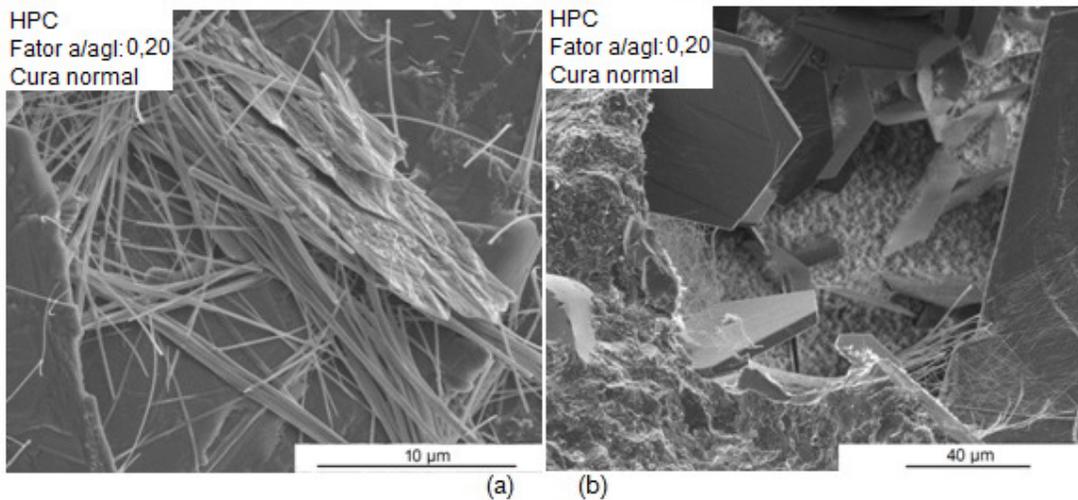


Figura 5.7 – Imagens de MEV (Elétrons Secundários) mostrando (a) etringita e (b) hidróxido de cálcio.
Fonte: Autora (2019).

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O concreto desenvolvido com traço de concreto de ultra-alto desempenho atingiu resistência à compressão aproximadamente de 100 MPa, não atingindo a resistência esperada para ser classificado como concreto de ultra-alto desempenho (que possui resistência à compressão na faixa de 120–150 MPa). Logo, o concreto desenvolvido foi classificado como concreto de alto desempenho devido à faixa de resistência à compressão apresentada pelas amostras (60–100 MPa) (HUANG *et al.*, 2017; RICHARD; CHEYREZY, 1994).

Ainda em relação aos resultados obtidos referentes à resistência à compressão, o concreto desenvolvido com fator água/aglomerante de 0,20, que foi o menor fator a/agl utilizado, não foi o que apresentou melhor resistência à compressão como era esperado, isso pode estar associado à trabalhabilidade e porosidade do concreto, uma vez que a mistura com fator a/agl de 0,20 foi a que apresentou os menores valores no teste *Flow Table* e maior porosidade aberta (SHI *et al.*, 2015).

De acordo com os resultados obtidos relacionados à porosidade e resistência à compressão, foi possível observar um padrão linear, onde a resistência à compressão aumentava à medida que a porosidade era reduzida, conforme era esperado (SHI *et al.*, 2015). No entanto, a amostra com fator a/agl de 0,25, foi a que apresentou maior resistência à compressão, porém não foi a que apresentou menor porosidade aberta.

Por meio de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, foi possível observar a morfologia do quartzo (formato irregular) e da sílica ativa (aglomerados esféricos). Esta aglomeração da sílica ativa pode ter comprometido sua atividade pozolânica, prejudicando a reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, reação que tem como produto, silicato de cálcio hidratado (composto que contribui para o aumento da resistência à compressão do concreto), o que pode estar associado a presença de hidróxido de cálcio em todas as amostras e ainda comprometido a resistência à compressão dos concretos.

As imagens geradas por meio do microscópio eletrônico de varredura por elétrons

secundários ainda possibilitou a identificação de etringita (formato de fios alongados). É normal a presença de etringita no concreto visto que é um produto da hidratação do cimento, já a presença de carbonato de cálcio em todas as amostras, identificado por meio da técnica de difração de raios-X, pode estar relacionada ao método de preparo das amostras, já que as amostras precisam ser moídas e durante este processo ficam em contato com o ar do ambiente, o que favorece a carbonatação do concreto.

7 CONCLUSÕES

Foi possível observar uma tendência à diminuição da porosidade conforme a redução do fator água/aglomerante.

À medida que o fator água/aglomerante foi reduzido, a resistência à compressão do concreto aumentou em forma de padrão linear, no entanto esse padrão não foi observado nas amostras com fator a/agl de 0,20.

Os resultados alcançados demonstraram uma relação entre a porosidade e a resistência à compressão do concreto desenvolvido. À medida que diminuía a porosidade das amostras, aumentava-se a resistência à compressão.

Foram observados hidróxido de cálcio e aglomerados de sílica ativa em todas as amostras, o que pode ter comprometido a resistência à compressão das amostras.

O concreto desenvolvido não atingiu resistência à compressão de concreto de ultra-alto desempenho, sendo classificado como concreto de alto desempenho devido a faixa de resistência apresentada 60 MPa – 100 MPa.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar a influência da variação do fator água/aglomerante na viscosidade da mistura do concreto de ultra-alto desempenho;

Avaliar a influência de aditivos redutores de ar incorporado na resistência à compressão para o traço do concreto utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, S.; HAKEEM, I.; MASLEHUDDIN, M. Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 93, n. 9, p. 591-591a, 2015.
- AITCIN, P. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000. 667 p. Tradução de Geraldo C. Serra.
- ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; HALE, W. M. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. **Construction and Building Materials** v. 133, p 135–145, fev. 2017.
- ANDREASEN, A. H. M; ANDERSEN, J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern. **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, p. 217-228, mar. 1930.
- ARORA, A; AGUAYO, M.; HANSEN, H.; CASTRO, C.; FEDERSPIEL, E.; MOBASHER, B.; NEITHALATH, N. Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 179-190 , jan. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.
- BENTZ, D. P.; STUTZMAN, P. E. Curing, Hidration, and Microstructure of Cement Paste. **Aci Materials Journal**, v. 103, n. 05, p. 348-356, out. 2006.
- BONEN, D.; SARKAR, S. L. The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 07, p. 1423-1434, out. 1995.
- CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, v. 55, p. 18-32, mar. 2009.
- CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN L., Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). **Cement and Concrete Research**, Aubervilliers, v. 25, n. 7, p. 1491-1500, mar. 1995.
- DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing mode. **Cement Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.
- FLATT, R. J.; BOWEN, P. Electrostatic repulsion between particles in cement suspensions: domain of validity of linearized Poisson-Boltzmann equation for nonideal electrolytes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 6, p. 781-791, 2003.

GARCIA, D. C.S.; DE SOUZA SOARES, M. M. N.; BEZERRA, A. C. S.; AGUILAR, M. T. P. A.; FIGUEIREDO, R. B. Microstructure and hardness of cement pastes with mineral admixture. **Revista Matéria**, v. 22, n. 02, 2017.

GARCIA, D. C.S.; WANG, K.; FIGUEIREDO, R. B. The influences of quartz content and water-to-binder ratio on the microstructure and hardness of autoclaved Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 91, p. 138-147, 2018.

GOMES, S. C.; OLIVEIRA, W. G.; MENDES, A. S.; TOCHTROP, H.; QUINTANILHA, L. C.; D'OLIVEIRA, M. C. Influência do aditivo hiperplastificante no concreto convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58., 2016, Belo Horizonte, **Anais do 58º congresso brasileiro do concreto**. Belo Horizonte: p. 1-13, 2016.

HE, Z.; DU, S.; CHEN, D. Microstructure of ultra high performance concrete containing lithium slag. **Journal of Hazardous Materials**, v. 353, p. 35-43, 2018.

HUANG, H.; GAO X.; WANG, H.; YE, H. Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 621-628, set. 2017.

IBRAHIM, M. A.; FARHAT, M.; ISSA, M. A.; HASSE, J. A. Effect of Material Constituents on Mechanical and Fracture Mechanics Properties of Ultra-High-Performance Concrete. **Aci Materials Journal**, v. 114, n. 3, p. 453-465, 2017.

ISAIA, G. C. **Concreto de cimento Portland**. In: TUTIKIAN B. F.; HELENE P. Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 12.

_____. **Concreto de cimento Portland**. In: TUTIKIAN B. F.; ISAIA G. C.; HELENE P. Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36.

JOHANNESON, B.; UTGENANT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. **Cement Concrete Research**, v. 31, n. 06, p. 925-931, mai. 2001.

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

KADRI, E.; DUVAL, R.; AGGOUN, S.; KENAI, S. Silica fume effect on hydration heat and compressive strength of high-performance concrete. **Aci Materials Journal**, v. 106, n. 2, p. 107-113, abr. 2009.

KHUDHAIR, M. H. R.; EL YOUBI, M. S.; ELHARFI, Comparative study of the influence of inorganic additions on the physical-chemical properties and mechanical performance of mortar and/or concrete. **Moroccan Journal of Chemistry**, Marrocos, v. 5, n. 3, p. 493-504, 2018.

KHUDHAIR, M. H. R.; EL YOUBI, M. S.; ELHARFI, A. Study of the influence of water reducing and setting retarder admixtures of polycarboxylate “superplasticizers” on physical and mechanical properties of mortar and concrete. **Journal of Materials and Environment Sciences**, Marrocos, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2018.

KJELDTSEN, A. M.; FLATT, R. J.; BERGSTRÖM, L. Relating the molecular structure of comb-type superplasticizers to the compression rheology of MgO suspensions. **Cement and Concrete Research**, Lausana, v. 36, n. 7, p.1231–1239, mar. 2009.

KRONLOF, A. Effect of very fine aggregate on concrete strength. **Materials and Structures**, v. 27, n. 1, p. 185-194, 1994.

LIBRE, A. N.; KHOSHNAZAR, R.; SHEKARCHI, M. Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p.1262-1271, jan. 2010.

LONG, G.; WANG, X.; XIE, Y. Very high-performance concrete with ultrafine powders. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n.4, p. 601-605, 2002.

MAGUREANU et al., 2012 – M. C.; S, I.; N. C.; H. B. Mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete. **Aci Materials Journal**, v. 109, n. 02, p. 177-189, mar. 2012.

MASSE, S.; ZANNI, H.; LECOURTIER, J.; ROUSSEL, J. C.; RIVEREAU, A. Solid state NMR study of tricalcium silicate and cement hydration at high temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 5, p 1169–1177, 1993.

MATTE, V.; MORANVILLE, M. V. Durability of reactive powder composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 1, p. 1-9, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 1. ed. São Paulo: PINI, 2014. 573p.

MELO, K. A.; MARTINS, V. C.; REPETTE, L. W. Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v.9,n.1,p.45-46, 2009.

MENG, W.; VALIPOUR, M.; KHAYAT, K. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 50, n. 29, p. 1-16, 2017.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **Aci Materials Journal**, v. 88, n. 04, p. 363–373, jan. 1991.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry. **Journal of Cleaner Production**, n. 164, p. 939-949, out. 2017.

RESPLENDINO, J. First recommendations for ultra-high-performance concretes and examples of application. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 2004, Kassel. University of Kassel, Kassel, 2004, p. 79–90.

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

_____ Reactive powder concretes with high ductility and 200–800 MPa compressive strength. **Aci Materials Journal**, v. 144, n. 3, p. 507–518, 1994.

SABET, F. A., LIBRE, A. N., SHEKARCHI, M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 44, n. 1, p. 175–184, abr. 2013.

SHI, C; WU, Z; XIAO, J; WANG, D; HUANG, Z; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741–751, dez. 2015.

DE SOARES, M. N. S.; GARCIA, D. C. S.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Measurement and Comparison of Pozzolanic Activity of Siliceous Materials Using Mechanical Tests. **Materials Science Forum**, v. 881, p. 227-232, 2016.

TUAN, N. V.; YE, G.; BREUGEL, K. V.; COPUROGLU, O. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11 p. 1104–1111, nov. 2011.

WALLEVIK, O. H. E WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1279-1288. 2011.

WANG, C.; YANG, C.; LIU, F.; WAN, C.; PU, X. Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 538–544, abr. 2012.

WILLE, K.; BOISVERT-COTULIO, C. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Connecticut, v. 86, p. 33-43, jul. 2015.

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

YANG, S. L.; MILLARD, S. G.; SOUTSOS, M. N.; BARNETT, S. J.; LE, T. T. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 06, p. 2291–2298, 2009.

YANG, Y.; ZHANG, Y.; SHE, W. Characterization of Surface Hardness and Microstructure of High Performance Concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, v. 33, n. 01, p. 124–132, fev. 2018.

YAZICI, H. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. **Building and Environment**, v. 42, n. 05, p. 2083–2089, 2007.

YI, N. H.; KIM, J. H. J.; HAN, T. S.; CHO, Y. G.; LEE, J. H. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 694–707, 2012.

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

ZHANG, M.; SISOMPHON, K.; SIONG, T. N.; SUN, D. J. Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes. **Construction and building materials**. v. 24, n. 9. P 1700 – 1707, 2010.

ZHANG, Y.S.; SUN, W.; LIU, S. F.; JIAO, C. J.; LAI, J. Z. Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 09, p. 831-838, 2008.