

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA  
COM UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA DENSIFICADA  
E NÃO-DENSIFICADA**

**LUCAS MARTINS GONTIJO SOARES**

**ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA S. CAPUZZO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA  
COM UTILIZAÇÃO DE SÍLICA ATIVA DENSIFICADA  
E NÃO-DENSIFICADA**

**LUCAS MARTINS GONTIJO SOARES**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**PROF.<sup>a</sup> VALDIRENE MARIA S. CAPUZZO, DSc. (UnB)  
(ORIENTADORA)**

---

**PROF. JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**THYALA ANARELLI CUNHA, MSc. (UnB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 06 de DEZEMBRO de 2017.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

SOARES, LUCAS MARTINS GONTIJO

Avaliação das propriedades da argamassa com utilização de sílica ativa densificada e não-densificada [Distrito Federal] 2017.

ix, 76p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Sílica ativa densificada

2. Sílica ativa não-densificada

3. Argamassas de cimento Portland

4. Resistência à compressão

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SOARES, L.M.G. (2017). Avaliação das propriedades da argamassa com utilização de sílica ativa densificada e não-densificada. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Lucas Martins Gontijo Soares

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação das propriedades da argamassa com utilização de sílica ativa densificada e não-densificada

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Lucas Martins Gontijo Soares

Quadra 22, casa 123, Setor Leste, Gama

72460220 - Brasília/DF - Brasil

## RESUMO

Nos últimos tempos, a sílica ativa tem sido um material muito utilizado na construção civil, sendo usada para aumentar a resistência do concreto, diminuir a exsudação e aumentar a sua coesão. Ela pode ser utilizada em dois tipos: densificada e não-densificada. A sílica ativa densificada possui uma densidade maior, fazendo com que seu manuseio e transporte sejam facilitados. A sílica ativa não-densificada é a sílica que aparece naturalmente nos fornos de produção de silício e ligas de ferro-silício, entretanto sua densidade é muito menor. Para a sílica passar do estado não-densificada para densificada, é necessário um processo de densificação, em que as partículas ficam em flutuação em um silo com uma temperatura menor que a sua temperatura de fusão. Poucos estudos mostram as diferenças nos efeitos dos dois tipos de sílica ativa. Logo este trabalho tem como intuito observar se a sílica ativa densificada possui efeito diferente da sílica ativa não-densificada. Foram realizados diversos testes em cimento, sílica ativa, pastas de cimento e argamassas. Inicialmente, a diferença entre a areia normal e a areia natural foi observada em um ensaio de compressão de argamassas. A caracterização do cimento foi feita através dos testes de tempo de pega, massa específica e fluorescência de raios-X. A caracterização da sílica ativa foi realizada através de ensaios de massa específica, de análise de fluorescência de raios-X e microscopia eletrônica de varredura. Os ensaios em pastas de cimento foram difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura. Argamassas com traços sem sílica, com sílica ativa densificada, com sílica ativa não-densificada, e com sílicas ativas densificada e não-densificada dispersas por ultrassom passaram por ensaios de resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias. As argamassas com areia natural apresentaram maior resistência que as argamassas de areia normal, sendo de 12,1% a 37,5% maior. As argamassas e pastas com sílica ativa não-densificada apresentaram características muito próximas às das argamassas e pastas com sílica ativa densificada, tanto em análises mecânicas quanto microestruturais. A maior diferença de resistência mecânica foi de apenas 3,3 MPa. A dispersão por ultrassom propiciou melhora na microestrutura das pastas com sílica ativa não-densificada, mas não mudou muito as pastas com sílica ativa densificada.

**Palavras-chave:** sílica ativa densificada; sílica ativa não-densificada; argamassas de cimento Portland; resistência à compressão.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus familiares, amigos, professora orientadora Valdirene Capuzzo, ao aluno de mestrado Yuri Sotero, à banca de avaliação e a Deus.

Também gostaria de agradecer à Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ) pela realização de ensaios de fluorescência, ao Instituto de Geofísica da UnB, pela realização de ensaios de difração de raios-X, e ao Laboratório de Geocronologia da UnB, pela realização da microscopia eletrônica de varredura.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Importância do tema .....	1
1.2	Motivação .....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	<i>Objetivo geral.....</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1	Concreto de Alto Desempenho (CAD).....	4
2.2	Sílica Ativa .....	7
2.3	Aditivos Redutores de Água .....	12
2.3.1	<i>Plastificantes.....</i>	13
2.3.2	<i>Superplastificantes .....</i>	13
2.4	Influência da Sílica Ativa nas Propriedades dos Materiais Cimentícios.....	15
2.4.1	<i>Diferenças no desempenho nas sílicas ativas densificadas e não-densificadas ..</i>	21
2.5	Considerações Finais.....	33
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
3.1	Materiais .....	35
3.1.1	<i>Areias Normal e Natural.....</i>	35
3.1.2	<i>Sílica ativa.....</i>	35
3.1.3	<i>Superplastificante.....</i>	36
3.1.4	<i>Cimento.....</i>	36
3.2	Procedimentos.....	36
3.2.1	<i>Caracterização dos materiais .....</i>	37
3.2.1.1	<i>Ensaio de determinação de tempo de pega do cimento .....</i>	37
3.2.1.2	<i>Determinação da massa específica .....</i>	38
3.2.1.3	<i>Análise de fluorescência de raios-X.....</i>	39
3.2.1.4	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</i>	39
3.2.2	<i>Procedimentos em argamassas .....</i>	39
3.2.2.1	<i>Procedimento de mistura .....</i>	40
3.2.2.2	<i>Resistência à compressão simples.....</i>	44
3.2.2.3	<i>Cálculo do índice de desempenho .....</i>	45
3.2.3	<i>Procedimentos em pasta de cimento .....</i>	45
3.2.3.1	<i>Difração de Raios-X.....</i>	48

3.2.3.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i> .....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
4.1	Caracterização do cimento Portland .....	49
4.2	Caracterização das sílicas ativas .....	49
4.2.1	<i>Microscopia eletrônica de varredura das sílicas ativas</i> .....	50
4.3	Argamassas no estado fresco .....	52
4.4	Resultados de resistência à compressão simples das argamassas .....	53
4.5	<i>Pastas de cimento</i> .....	59
4.5.1	<i>Difração de raios-X nas pastas de cimento</i> .....	59
4.5.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura das pastas</i> .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>71</b>
<b>A.</b>	<b>ANEXO</b> .....	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>75</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Relação entre porosidade, relação água/cimento e o grau de hidratação do cimento em concretos com mesmo grau de adensamento (NEVILLE; BROOKS, 2010).....	5
Figura 2.2 Relação entre o logaritmo da porosidade e a resistência à compressão de um concreto bem adensado (NEVILLE; BROOKS, 2010) .....	5
Figura 2.3 Representação de como se dá a fabricação e estocagem de sílica ativa (CAMARGO CORREA METAIS, 1996 Apud SILVA, 1997) .....	7
Figura 2.4 Imagem de microscópio eletrônico de varredura no modo de elétrons secundários, mostrando uma amostra de sílica ativa densificada estudada na universidade de Purdue. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004).....	9
Figura 2.5 Imagem de microscópio eletrônico de varredura no modo de elétrons retroespalhados, mostrando uma seção de um aglomerado de sílica ativa densificada. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004).....	9
Figura 2.6 Distribuição de tamanho de partículas em sílica ativa não-densificada (a) e sílica ativa densificada dispersa através de ultrassom (b). (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015).....	10
Figura 2.7 Microscopia eletrônica de varredura mostrando sílica ativa não-densificada (a), sílica ativa densificada (b), sílica ativa não-densificada dispersa por ultrassom (c) e sílica ativa densificada dispersa por ultrassom (d). (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015) .....	11
Figura 2.8 Quantidade de superplastificante demandada em um concreto com um consumo de cimento de 370 kg/m <sup>3</sup> . A menor relação a/c demanda uma maior quantidade de superplastificante e aumenta a resistência do concreto (NEVILLE, 2011) .....	14
Figura 2.9 Esquema de ação de um superplastificante, que pode ser usado para produzir concreto fluido (seta vertical) ou concreto de alta resistência (seta horizontal) (NEVILLE; BROOKS, 2010) .....	15
Figura 2.10 Liberação de calor de hidratação do cimento em cimento com adição de sílicas de diversos tipos e de cimento sem adição de sílica. (OERTHEL et al., 2014).....	16
Figura 2.11 Resistência à compressão de concretos sem sílica ativa, e com 8% e 16% de sílica ativa, por relação de água/cimento (NEVILLE, 2011) .....	17
Figura 2.12 Resultados dos estudos de Oerthel et al. (2014) mostrando a resistência à compressão de argamassa com relação água/cimento de 0,23. São mostrados os valores médios e seus desvios padrões. ....	18
Figura 2.13 Razão Ca/Si no gel de C-S-H formado ao redor de uma partícula de alita (C3S) presente em uma pasta de cimento hidratado com 25% de massa de sílica ativa não-densificada (ROSSEN; LOTHENBACK; SCRIVENER, 2015) .....	19

Figura 2.14 Resultados de razão Ca/Si por porcentagem de CH no cimento, em diferentes pastas de cimento estudadas em diversas temperaturas de hidratação e em variados tempos. Foram escolhidas as pastas de cimento que se hidrataram em uma temperatura de 20° C. (ROSSEN; LOTHENBACH; SCRIVENER, 2015) .....	21
Figura 2.15 Quantidade de água não-evaporável (eixo vertical) por idade da pasta de cimento (eixo horizontal). Em (a), a razão água/cimento está em torno de 0,29. Em (b), a razão água/cimento é de 0,24. PRef simboliza a pasta de cimento de referência, PDSF5 E PDSF10 se referem às pastas com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e PRSF5 e PRSF10 se referem às pastas com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015) .....	24
Figura 2.16 Resistência à compressão de pastas de cimento, por idade, que contém: (a) a/c de 0,29; (b) a/c de 0,24. PRef simboliza a pasta de cimento de referência, PDSF5 E PDSF10 se referem às pastas com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e PRSF5 e PRSF10 se referem às pastas com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015) .....	25
Figura 2.17 Resistência à compressão de argamassas, por idade, que contém: (a) a/c de 0,29 e (b) a/c de 0,24. MRef simboliza a argamassa de referência (sem sílica ativa), MDSF5 E MDSF10 se referem às argamassas com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e MRSF5 e MRSF10 se referem às argamassas com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015).....	26
Figura 2.18 Resistência à compressão por idade dos concretos que contém: (a) a/c de 0,29; (b) a/c de 0,24. CRef simboliza o concreto de referência (sem sílica ativa), CDSF5 E CDSF10 se referem aos concretos com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e CRSF5 e CRSF10 se referem aos concretos com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015) .....	27
Figura 2.19 Resultados dos testes de resistência à flexão nos corpos de prova de pasta de cimento e mármore, por idade. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015). IRef se refere à pasta de referência, IRSF se refere à pasta com sílica ativa não-densificada, e IDSF se refere à pasta com sílica ativa densificada.....	28
Figura 2.20 Desempenho da sílica ativa densificada, por idade, para um sistema com: (a) 5% de sílica ativa em relação à massa total; (b) 10% de sílica ativa em relação à massa total. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015) .....	28
Figura 2.21 Desempenho da sílica ativa não-densificada, por idade, para um sistema com: (a) 5% de sílica ativa em relação à massa total; (b) 10% de sílica ativa em relação à massa total. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015) .....	29
Figura 2.22 Razão entre a resistência à compressão do concreto, por idade, com sílica ativa densificada e resistência do concreto com sílica ativa não-densificada. Em (a), a razão água/cimento é de 0,29 e em (b) é 0,24. O primeiro número no nome simboliza a porcentagem de sílica por massa total (5% ou 10%). O segundo número indica a temperatura da cura (20 graus ou 50 graus) e o terceiro número representa a razão a/c. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2016).....	30

Figura 2.23 Quantidade de hidróxido de cálcio no concreto de: (a) 3 dias e (b) 90 dias. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2016) .....	31
Figura 2.24 imagem mostrando grão de sílica ativa densificada após se tornar C-S-H e análise EDS mostrando a quantidade de Ca menor que a quantidade de Si. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004) .....	32
Figura 2.25 Grão de sílica ativa densificada após se tornar gel de reação álcali-sílica e análise EDS mostrando a quantidade de Ca muito menor que a quantidade de Si e a existência de Na e K.. Nota-se que o grão encontra-se fraturado. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004) .	33
Figura 3.1 Organograma dos procedimentos que serão realizados neste projeto .....	37
Figura 3.2 Organograma mostrando os traços que foram realizados nos ensaios de argamassas .....	40
Figura 3.3 Consistência da argamassa com areia natural e sem o uso de superplastificante. ..	43
Figura 3.4 Argamassa de areia natural com uso de superplastificante.....	44
Figura 3.5 Organograma mostrando os traços que foram usados para os ensaios em pastas de cimento. ....	45
Figura 3.6 Pastas de cimento imersas em álcool etílico.....	46
Figura 3.7 Pasta de cimento passando um tempo no “vácuo”. .....	47
Figura 3.8 Pastas de cimento em uma caixa com sílica gel .....	48
Figura 4.1 Sílica ativa densificada com 500 micrômetros de escala.....	50
Figura 4.2 Sílica ativa densificada com 50 micrômetros de escala.....	51
Figura 4.3 Sílica ativa não-densificada, com escala de 500 micrômetros.....	51
Figura 4.4 Sílica ativa não-densificada com escala de 50 micrômetros.....	52
Figura 4.5 Resistência à compressão simples em 7, 14 e 28 dias das diferentes argamassas..	54
Figura 4.6 Comparação entre argamassas de areia normal e natural .....	56
Figura 4.7 Comparação entre argamassas de sílica ativa densificada e não-densificada.....	57
Figura 4.8 Comparação entre argamassas de sílica ativa densificada com e sem dispersão por ultrassom .....	57
Figura 4.9 Comparação entre argamassas de sílica ativa não-densificada com e sem dispersão por ultrassom .....	58

Figura 4.10 Comparação entre argamassas de sílica ativa não-densificada e densificada com dispersão por ultrassom.....	59
Figura 4.11 Resultados de DRX nas pastas de 7 dias. ....	60
Figura 4.12 Resultados de DRX nas pastas de 28 dias. ....	60
Figura 4.13 DRX da pasta Ref com 7 dias de idade. ....	61
Figura 4.14 DRX da pasta SUP com 7 dias de idade.....	62
Figura 4.15 DRX da pasta Ref com 28 dias de idade .....	62
Figura 4.16 DRX da pasta SUP com 28 dias de idade.....	62
Figura 4.17 DRX em pasta SD com 7 dias .....	63
Figura 4.18 DRX em pasta SND com 7 dias.....	63
Figura 4.19 DRX da pasta SD de 28 dias.....	64
Figura 4.20 DRX da pasta SND de 28 dias.....	64
Figura 4.21 DRX da pasta SDU com 7 dias.....	65
Figura 4.22 DRX da pasta SDU com 28 dias.....	65
Figura 4.23 DRX da pasta SNDU com 7 dias.....	66
Figura 4.24 DRX da pasta SNDU com 28 dias.....	66
Figura 4.25 Pasta com sílica ativa não-densificada com tratamento de dispersão por ultrassom, com uma escala de 1 mm. ....	67
Figura 4.26 MEV da pasta Ref com 500 micrômetros de escala .....	68
Figura 4.27 MEV da pasta SP com 1 mm de escala .....	68
Figura 4.28 MEV da pasta SD com 1 mm de escala.....	69
Figura 4.29 MEV da pasta SND com 1mm de escala.....	69
Figura 4.30 MEV da pasta SDU com 1 mm de escala.....	69
Figura 4.31 MEV da pasta SNDU com 1 mm de escala .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Requisitos químicos e físicos da sílica ativa (ABNT NBR 13956-1, 2012) .....	12
Tabela 2.2 Requisitos químicos e físicos da sílica ativa, continuação (ABNT NBR 13956-1, 2012).....	12
Tabela 2.3 Proporções de mistura de pastas no estudo de Zhang, Zhang e Yan (2015) .....	22
Tabela 2.4 Proporções de mistura de argamassas no estudo de Zhang, Zhang e Yan (2015) .	22
Tabela 2.5 Proporções de mistura de concretos no estudo de Zhang, Zhang e Yan (2015) ....	23
Tabela 3.1 Dosagem para as argamassas que serão realizadas. A argamassa sem sílica terá a dosagem “A” e as argamassas com sílica terão a dosagem “B”, onde a sílica ativa será densificada e não-densificada (ABNT NBR 13956-3, 2012) .....	41
Tabela 4.1 Caracterização do cimento Portland.....	49
Tabela 4.2 Caracterização das sílicas ativas.....	50
Tabela 4.3 Espalhamento das argamassas.....	52
Tabela 4.4 Valores médios de resistência à compressão a serem considerados neste projeto, valores emMPa.....	53
Tabela 4.5 Índice de desempenho das argamassas com sílica ativa.....	55
Tabela 4.6 Intensidade do pico de CH com $d= 4,9 \text{ \AA}$ .....	61
Tabela A.1 Resultados de resistência à compressão das argamassas.....	73
Tabela A.2 Resultados corrigidos de resistência à compressão simples das argamassas .....	74

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
a/c - Relação água-cimento  
ANA - Argamassa de areia natural  
ANO - Argamassa de areia normal  
C<sub>3</sub>S Alita  
Ca(OH)<sub>2</sub> e CH – Hidróxido de cálcio  
Ca/Si Relação cálcio-silício  
CP Cimento Portland  
C-S-H Silicato de cálcio hidratado  
EDX ou EDS Análise de energia dispersiva de raios-X  
DTA Análise térmica diferencial  
DTG Derivada da termogravimetria  
Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O Exemplos de álcalis  
NBR Norma brasileira  
NM Norma do Mercosul  
Ref Argamassa de referência  
SD Sílica densificada  
SDU Sílica densificada dispersa por ultrassom  
SiO Monóxido de silício  
SiO<sub>2</sub> Sílica  
SND Sílica não-densificada  
SNDU Sílica não-densificada dispersa por ultrassom  
SUP Superplastificante  
TG Termogravimetria  
µm Micrômetro

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, juntamente com o aço. Inicialmente, ele era composto por água, cimento Portland comum e agregados graúdos e miúdos.

Com o passar do tempo, adições químicas e minerais foram incorporadas à mistura, para melhorar as suas propriedades. Algumas dessas adições começaram a ser usadas porque podiam ser incorporadas no concreto sem muito processamento e porque eram subproduto de indústrias. Um desses produtos é a sílica ativa.

Além dessas questões, há a questão ambiental. Produzir cimento Portland gera diversos impactos ambientais, como uma grande emissão de CO<sub>2</sub>. Por esse motivo, a redução do seu consumo está sendo buscada ultimamente. Além disso, o uso da sílica ativa faz com que essa tenha um destino final e utilidade, ao invés de ser apenas um subproduto ou resíduo da fabricação de silício e ligas de ferro-silício. (NEVILLE, 2011)

A sílica ativa é considerada um material pozolânico. Ela ajuda na resistência do concreto de maneira química, servindo como nucleação da hidratação da alita e reagindo com o hidróxido de cálcio, e de maneira física, trabalhando como *filler* e diminuindo a porosidade do concreto.

Existem dois tipos de sílica ativa: a densificada e a não-densificada. A não-densificada é a que aparece naturalmente nos fornos, e a densificada precisa passar por um aumento de densidade, para facilitar o seu transporte e manuseio. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015). A sílica ativa não-densificada é muito fina e possui massa específica aparente muito baixa, o que dificulta o manuseio, o transporte e a estocagem.

Suas propriedades são bastante conhecidas, tanto que a sílica é um dos principais ingredientes usados na produção de concretos de alta resistência. Entretanto, poucos estudos mostram quais diferenças podem ser causadas pelo uso dos dois tipos de sílica ativa. Este é o objetivo deste trabalho.

## 1.1 Importância do tema

Como a sílica ativa é um dos componentes do concreto de alto desempenho, entender melhor sobre suas propriedades ajudará a melhorar a qualidade destes concretos.

De acordo com Neville (2011), concreto de alto desempenho (CAD) é um termo que abrange concretos de alta resistência, de alta durabilidade e de elevado módulo de

elasticidade. Normalmente, o concreto de alta resistência já possui um módulo de elasticidade maior e maior durabilidade. (SILVA, 1997)

De acordo com Neville (2011), a resistência de um concreto é considerada grande quando ela ultrapassa 80 MPa. Vários fatores contribuem para o aumento de resistência, como a menor porosidade, a maior quantidade de C-S-H na matriz cimentícia, uma menor quantidade de CH e uma melhor qualidade da zona de transição interfacial, que é a zona mais crítica de um concreto.

A adição de sílica ativa ajuda a aumentar a quantidade de C-S-H e diminuir a quantidade de CH. Isso acontece devido à reação pozolânica gerada pela existência da sílica ativa.

Como as partículas de sílica ativa são muito pequenas, menores que as de cimento, ocorre o efeito *filler*, no qual essas partículas se acomodam em espaços vazios entre as partículas de cimento e agregados. Com isso, há uma diminuição na porosidade das argamassas e concretos, aumentando a sua resistência. Além disso, a diminuição da porosidade aumenta a durabilidade desses materiais.

Outro fator que ocorre devido ao pequeno tamanho de partículas é a capacidade destas de ficarem mais próximas do agregado. Com isso, a porosidade ao redor dos agregados diminui, aumentando a resistência da zona de transição, e conseqüentemente, a resistência do concreto.

Portanto, a sílica ativa influencia de maneira positiva nas características dos concretos. Estudar e entender melhor as suas características é importante para produzir melhores concretos e argamassas com essa adição.

## **1.2 Motivação**

Existem dois tipos de sílica ativa, a densificada e a não-densificada. A sílica ativa não-densificada possui diâmetros de partículas entre 0,3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ . A densificada possui diâmetros maiores que 10 $\mu\text{m}$ . (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

De acordo com a ABNT, a massa específica aparente da sílica ativa não-densificada está entre 150  $\text{kg/m}^3$  e 350  $\text{kg/m}^3$ , e a da densificada está entre 350  $\text{kg/m}^3$  a 700  $\text{kg/m}^3$ .

Poucos estudos mostram a diferença que os dois tipos de sílica ativa geram em um material. Portanto, este trabalho tem como objetivo diferenciar os efeitos de cada tipo de sílica ativa, tanto no quesito de resistência mecânica quanto no quesito de qualidade microestrutural.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo geral***

Essa pesquisa tem como objetivo geral descobrir se há diferença no desempenho da sílica ativa densificada e não-densificada, nos quesitos de resistência mecânica e qualidade da microestrutura, e avaliar se o tratamento de dispersão por ultrassom influencia nesse desempenho.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Observar se há diferença na resistência à compressão simples de argamassas confeccionadas com a areia normal e a areia natural;
- Observar se há diferença no desempenho da sílica ativa densificada e não-densificada, utilizando resultados de propriedades mecânicas;
- Observar se o tratamento de dispersão por ultrassom influencia no desempenho da sílica densificada e não-densificada;
- Avaliar o comportamento microestrutural das pastas de cimento Portland com os dois tipos de sílica ativa e com e sem tratamento de ultrassom, comparando os resultados com os das pastas de referência sem sílica ativa.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Concreto de Alto Desempenho (CAD)**

Segundo Neville (2011), concreto de alto desempenho abrange diversos tipos de concreto diferentes: concreto de alta resistência, concreto de alta durabilidade ou concreto com elevado módulo de elasticidade. Silva (1997) aponta que, normalmente, os concretos de alta resistência (CAR) já possuem essas características citadas acima.

Neville (2011) considera que uma resistência a partir de 80 MPa já é considerada alta. Um concreto de alto desempenho é composto por: agregados de alta qualidade; elevada quantidade de cimento Portland; sílica ativa, normalmente em uma quantidade de 5% a 15% de massa do cimento; às vezes são usadas cinza volante ou escória granulada de alto forno; e superplastificante, em uma quantidade de 5 litros a 15 litros por metro cúbico de concreto, causando uma redução entre 45 kg a 75 kg de água por metro cúbico de concreto; outras adições, como polímeros e fibras também podem ser utilizados.

A porosidade é um fator que afeta de maneira muito significativa a resistência de alguns materiais, como metais e concreto. (NEVILLE; BROOKS, 2010)

Em um concreto, três fatores básicos influenciam a sua porosidade: a relação água/cimento, a quantidade de ar que está inserida na mistura e o grau de hidratação do cimento. Como a quantidade de ar é controlada através do adensamento do concreto, tem-se então que a porosidade depende indiretamente do seu adensamento. Isso é observado nas Figuras 2.1 e 2.2:

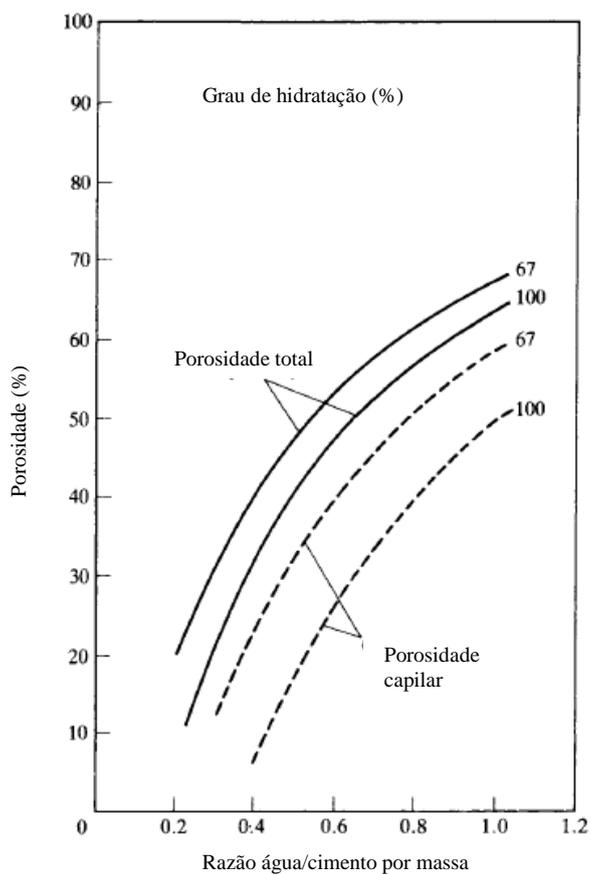


Figura 2.1 Relação entre porosidade, relação água/cimento e o grau de hidratação do cimento em concretos com mesmo grau de adensamento (NEVILLE; BROOKS, 2010)

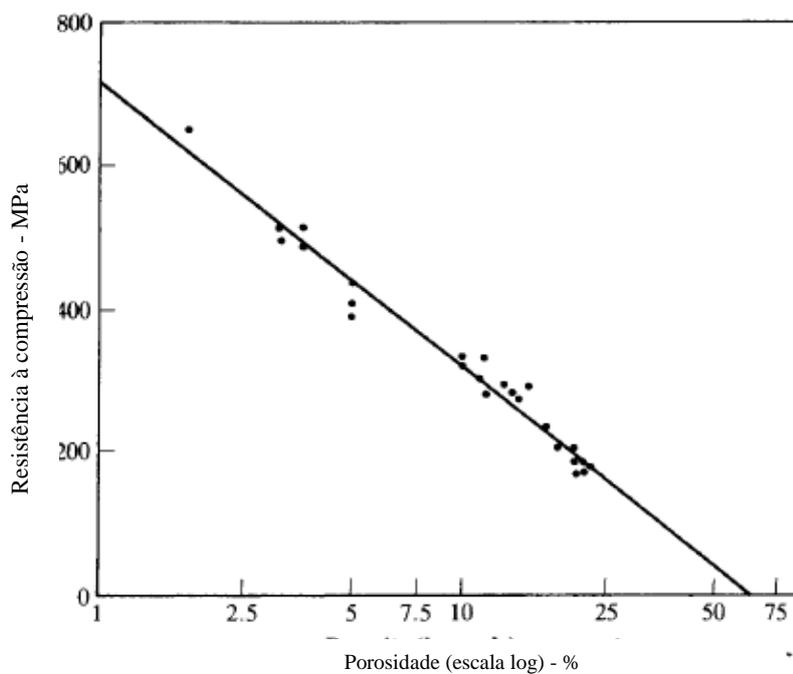


Figura 2.2 Relação entre o logaritmo da porosidade e a resistência à compressão de um concreto bem adensado (NEVILLE; BROOKS, 2010)

De acordo com Neville e Brooks (2010), apesar de a porosidade ser um fator primário na resistência do concreto, ela não é fácil de ser medida, já que depende do grau de hidratação deste. De maneira prática, são observados os seguintes fatores para estimar e ou analisar a resistência do concreto: relação de água/cimento, idade, grau de compactação e temperatura. Outros fatores secundários também afetam a resistência, como razão agregado/cimento, qualidade do agregado, qualidade da zona de transição e tamanho dos agregados.

Quanto maior a relação água/cimento, menor é a resistência do concreto, como mostrado anteriormente. Em um concreto comum, a menor relação de água/cimento possível para uma completa hidratação do cimento é 0,38. (NEVILLE, 2011)

Com o uso de plastificantes e superplastificantes, esse valor pode ser reduzido a até 0,20. Com isso, surgem os concretos de alto desempenho, que possuem uma relação água/cimento sempre menor que 0,35 e normalmente em torno de 0,25. (NEVILLE, 2011)

O concreto é composto de três fases: matriz, agregados e interface agregado-pasta. A matriz é composta da pasta de cimento, onde o cimento encontra-se hidratado. Na matriz, existem as substâncias C-S-H, ou gel de silicato de cálcio hidratado, que confere resistência ao concreto e o componente CH, ou hidróxido de cálcio, que são cristais que se encontram na interface agregado-pasta, onde a letra C simboliza a substância CaO, a letra H simboliza a água (H<sub>2</sub>O) e a letra S simboliza SiO<sub>2</sub> (sílica). (NEVILLE; BROOKS, 2010)

Silva (1997) aponta que, em um concreto de resistência normal, o teor de CH é alto, ao contrário do concreto de alta resistência, onde o teor de CH é baixo e seus cristais são menores.

Em um concreto, o cimento e os agregados causam influência mútua. No concreto fresco, as partículas de cimento não podem se empacotar com muita eficiência quando estão próximas de uma partícula de agregado. Isso é conhecido como efeito-parede. No concreto, esse efeito faz com que a água se separe das partículas de cimento, fazendo com que haja o surgimento de uma região com menos partículas de cimento e mais água, conhecida como zona de transição interfacial, ou interface agregado-pasta, ou interface agregado-cimento. Essa região possui uma razão água/cimento maior, o que confere a ela uma maior porosidade. Com maior porosidade, há a tendência de haver maiores cristais de hidróxido de cálcio. Quanto maior o agregado, mais larga a sua interface agregado-pasta. Essa região aumenta a permeabilidade do concreto e diminui a sua durabilidade. (THOMAS; JENNINGS, [20--?])

Em um concreto de resistência normal, a fase determinante para a sua resistência é a interface agregado-pasta. Já em um concreto de alta resistência, a matriz de cimento possui

uma qualidade tão elevada que os agregados são a fase determinante para a resistência. (ALMEIDA, I, 1994; BAALBAKI et al., 1992 apud SILVA, 1997)

## 2.2 Sílica Ativa

A sílica ativa, também conhecida como microssílica (marca registrada) ou *silica fume* (termo usado na língua inglesa) é um subproduto derivado da fabricação de silício e ligas de ferro-silício. Ela surge pela queima de quartzo de alta pureza e carvão nos fornos. De acordo com Silva (1997), quando o quartzo é reduzido a silício, é produzido monóxido de silício gasoso, SiO, que é muito instável e se oxida na parte superior do forno quando entra em contato com o ar. Então, é formada a sílica amorfa, SiO<sub>2</sub>, que é coletada por filtros e estocada para ser vendida posteriormente. A fabricação da sílica ativa é mostrada na Figura 2.3.

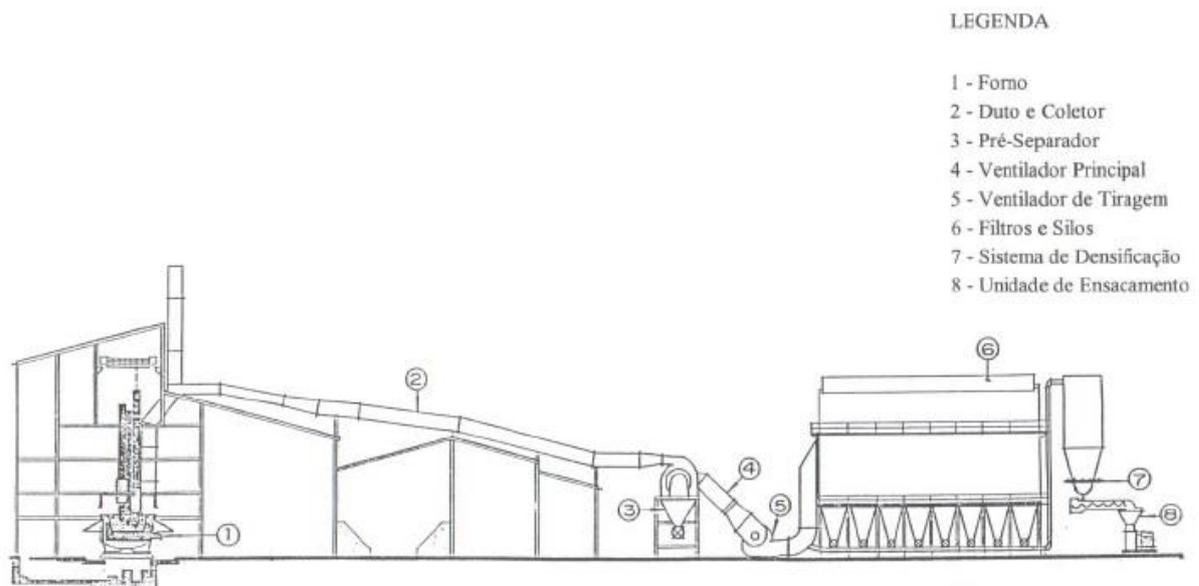


Figura 2.3 Representação de como se dá a fabricação e estocagem de sílica ativa (CAMARGO CORREA METAIS, 1996 Apud SILVA, 1997)

As ligas de ferro-silício normalmente possuem 50%, 75% ou 90% de silício em sua composição. Quanto maior a quantidade de silício na composição da liga, maior a quantidade de silício presente na sílica ativa que sai dos fornos. É necessário então saber a proveniência de determinada sílica ativa para poder determinar suas propriedades. Uma liga de ferro-silício com 50% de silício libera, em sua fabricação, sílica ativa com 80% de sílica. (NEVILLE, 2011)

A sílica ativa amorfa é um material muito reativo, acelerando a reação de hidratação e reagindo também com o Ca(OH)<sub>2</sub> durante a hidratação do cimento Portland. Além disso, suas

pequenas partículas preenchem os espaços vazios em pastas de cimento, argamassas e concreto, fenômeno conhecido como efeito *filler*. Isso aumenta a resistência desses materiais.

Para poder ser usada no concreto, a sílica ativa não pode ter muitas impurezas. Devem ter entre 85% a 95% de  $\text{SiO}_2$  e a menor quantidade possível de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . (OLIVEIRA ET AL., 1991; DE LARRARD, 1988; MALHOTRA, 1982 Apud SILVA, 1997)

A massa específica comum da sílica ativa está em torno de  $2,20 \text{ g/cm}^3$ , enquanto a do cimento Portland é aproximadamente  $3,15 \text{ g/cm}^3$ . Suas partículas individuais possuem diâmetros que vão de  $0,03 \mu\text{m}$  a  $0,3 \mu\text{m}$ . Sua área específica, no caso de partículas individuais, é de aproximadamente  $20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ . (NEVILLE, 2011)

A sílica ativa natural surge em agrupamentos de diversos tamanhos. Esses agrupamentos são formados na parte mais fria dos fornos, onde as gotas de sílica fundida dispersas no ar entram em contato com outras e se solidificam juntas, formando uma ligação forte e praticamente inquebrável. Essa sílica ativa é conhecida como sílica ativa não-densificada. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004).

Diamond e Sahu (2003) *apud* Diamond, Sahu e Thaulow (2004) apontam que a existência de partículas individuais é muito pequena, e que os agrupamentos de partículas podem possuir de poucas a centenas de partículas individuais de sílica ativa. Os diâmetros dos grupos variam de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$ . Entretanto, a dificuldade de lidar com esses grupos fez com que surgisse a sílica ativa densificada. Segundo Zhang, Zhang e Yan (2015), a sílica ativa não-densificada não é muito utilizada devido à sua baixa densidade, o que dificulta o manuseio e o transporte. Os métodos de densificação servem para aumentar a densidade aparente da sílica ativa.

Portanto, existem dois tipos de sílica ativa: sílica ativa densificada e sílica ativa não-densificada. Segundo a norma ABNT NBR 13956-1 de 2012, a sílica ativa não-densificada possui densidade aparente em um intervalo entre  $150 \text{ kg/m}^3$  e  $350 \text{ kg/m}^3$ , enquanto a sílica ativa densificada apresenta densidade aparente de  $350 \text{ kg/m}^3$  a  $700 \text{ kg/m}^3$ .

Sílica ativa densificada é formada pela flutuação das partículas em silos, em uma temperatura muito abaixo da temperatura de fusão, por 24 horas ou mais, fazendo com que o agrupamento não seja permanente como os formados no forno. Esse processo de densificação gera aglomerados densos e maiores, na ordem de  $10 \mu\text{m}$  a até alguns milímetros. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004)

Nas Figuras 2.4 e 2.5, observam-se partículas de sílica densificada. Seus diâmetros são maiores que  $10 \mu\text{m}$ .

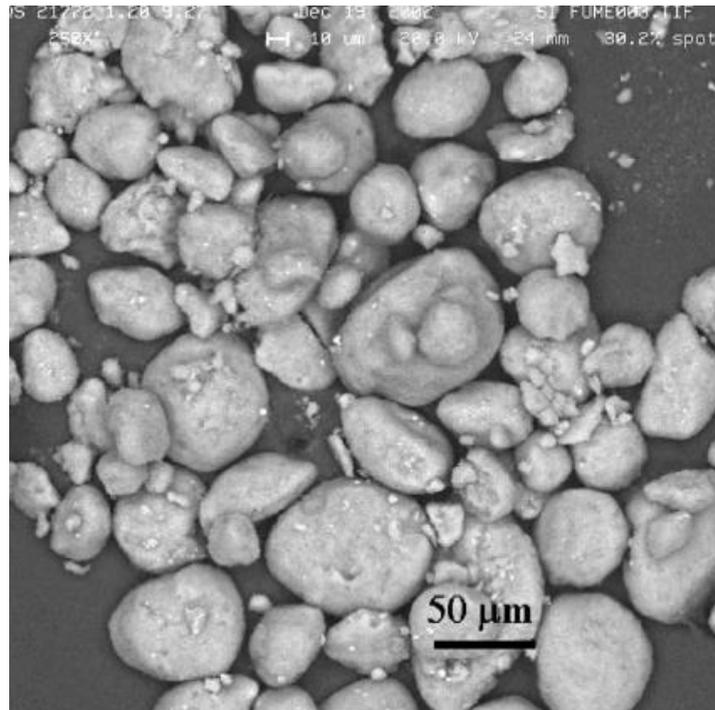


Figura 2.4 Imagem de microscópio eletrônico de varredura no modo de elétrons secundários, mostrando uma amostra de sílica ativa densificada estudada na universidade de Purdue. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004)

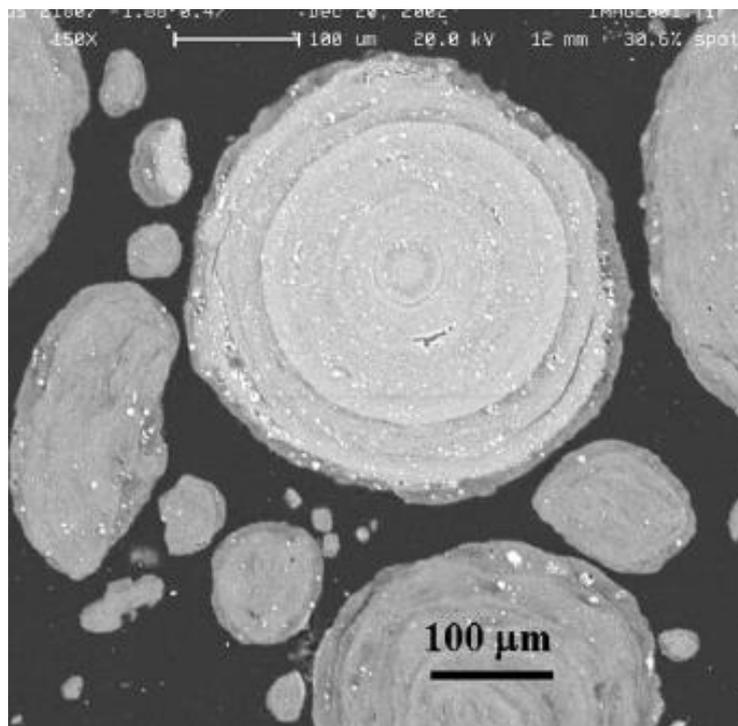


Figura 2.5 Imagem de microscópio eletrônico de varredura no modo de elétrons retroespalhados, mostrando uma seção de um aglomerado de sílica ativa densificada. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004)

Quando a sílica ativa densificada passa por um processo de dispersão por ultrassom, a sua distribuição de tamanho de partículas se assemelha bastante á distribuição de tamanho de

partículas de sílica ativa não-densificada (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015), como pode ser observado nas Figuras 2.6 e 2.7.

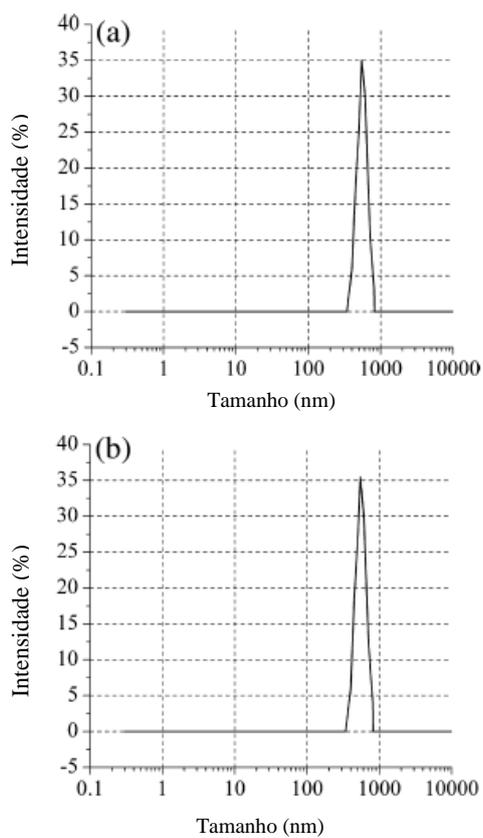


Figura 2.6 Distribuição de tamanho de partículas em sílica ativa não-densificada (a) e sílica ativa densificada dispersa através de ultrassom (b). (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

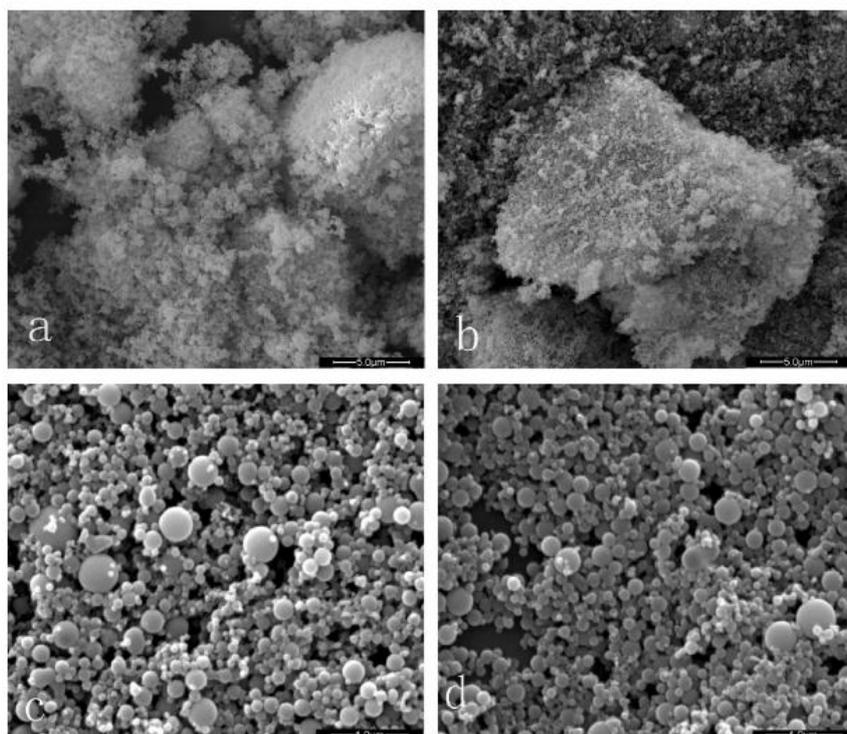


Figura 2.7 Microscopia eletrônica de varredura mostrando sílica ativa não-densificada (a), sílica ativa densificada (b), sílica ativa não-densificada dispersa por ultrassom (c) e sílica ativa densificada dispersa por ultrassom (d). (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Observa-se que há grandes diferenças nas partículas de sílica ativa densificada e sílica ativa não-densificada, entretanto essa diferença é reduzida quando há tratamento de dispersão por ultrassom.

Normalmente, a sílica ativa é incorporada ao concreto no momento de mistura, entretanto, em alguns países, existem cimentos já adicionados do material. Por um lado, isso ajuda na mistura e na uniformidade da composição do concreto ou argamassa produzidos. Por outro lado, as quantidades de sílica ativa não podem ser controladas para satisfazer determinada quantidade específica. (NEVILLE, 2011)

Como a sílica ativa contribui para a resistência de concretos e argamassas de maneira tanto química quanto física, Neville e Brooks (2010) a classificam como um material pozolânico, juntamente com o cimento Portland, cinza volante e a escória de alto forno. Um fator “água/material cimentício” é introduzido como fator crucial para a resistência de concretos, onde um concreto de alto desempenho possui esse valor abaixo de 0,28.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) normatiza a sílica ativa através da Norma NBR 13956 de 2012, “Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta”. Essa norma é dividida em 4 partes. A parte 1 fala dos requisitos que a sílica ativa deve ter para poder ser usada. A parte 2 rege os ensaios químicos que devem ser

realizados na sílica ativa. A parte 3 rege o ensaio de índice de desempenho com Cimento Portland aos 7 dias. A parte 4 rege o ensaio de finura da sílica ativa através do uso da peneira de 45 µm.

As tabelas 2.1 e 2.2 se encontram na parte 1 da norma NBR 13956 e mostram os requisitos que a sílica ativa deve atender. Além disso, elas mostram onde os procedimentos de ensaios para determinar esses requisitos são descritos.

Tabela 2.1 Requisitos químicos e físicos da sílica ativa (ABNT NBR 13956-1, 2012)

Determinação	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO <sub>2</sub> <sup>a</sup>	%	≥ 85,0	ABNT NBR 13956-2
Umidade <sup>b</sup>	%	≤ 3,0	
Perda ao fogo <sup>a</sup>	%	≤ 6,0	
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O <sup>a</sup>	%	Informar	
Teor de sólidos na dispersão aquosa <sup>c</sup>	%	Não pode variar mais do que ± 2 % do valor declarado pelo fabricante	

Tabela 2.2 Requisitos químicos e físicos da sílica ativa, continuação (ABNT NBR 13956-1, 2012)

Determinação	Unidade	Limite	Método de ensaio
Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 13956-3
Finura por meio da peneira 45 µm	%	≤ 10,0	ABNT NBR 13956-4
Área específica B.E.T. (opcional) <sup>d</sup>	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	15 ≤ B.E.T. ≤ 30	ASTM C 1069
<p><sup>a</sup> A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após a determinação do teor de umidade a (105 ± 5) °C.</p> <p><sup>b</sup> Não se aplica à sílica ativa na forma de dispersão aquosa (3.4).</p> <p><sup>c</sup> Não se aplica à sílica ativa nas formas densificada (3.2) e não densificada (3.3).</p> <p><sup>d</sup> O ensaio para a determinação da área específica, pelo método da ASTM C 1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), substituindo-se alumina e quartzo por sílica ativa, deve ser realizado pelo produtor quando solicitado pelo consumidor.</p>			

### 2.3 Aditivos Redutores de Água

Existem aditivos que possibilitam a redução da quantidade de água a ser usada na mistura de pastas, argamassas e concretos, mantendo a mesma trabalhabilidade. São esses os aditivos plastificantes e superplastificantes.

### ***2.3.1 Plastificantes***

Os aditivos plastificantes são usados para: aumentar a resistência de um concreto; diminuindo a sua relação água/cimento ( $a/c$ ) mantendo a mesma trabalhabilidade; reduzir o calor de hidratação, com o uso de menos cimento Portland e mantendo a trabalhabilidade; e aumentar a trabalhabilidade para o concreto poder ser usado em diversos tipos de obras. (NEVILLE; BROOKS, 2010)

Segundo Neville e Brooks (2010), esses materiais são compostos de agentes de superfície, que se concentram ao redor das partículas de cimento, fazendo com que estas tenham cargas negativas. Com isso, as partículas se repulsam e é formada uma película de água que envolve cada partícula. As partículas adquirem uma mobilidade maior e a água possui maior liberdade para lubrificar uma maior massa de cimento.

A redução de água com o uso de plastificantes é em torno de 5% a 15%. Além disso, os plastificantes aumentam o tempo de pega. Como desvantagem, eles podem fazer com que uma maior quantidade de ar seja incorporada na pasta de cimento. Apesar de o ar aumentar a trabalhabilidade do concreto, ele diminui a sua resistência. (NEVILLE, 2011)

Com o uso de plastificantes, a área de cimento exposta à água, e portanto, à reação de hidratação é maior, fazendo com que a pasta de cimento apresente maior resistência em idades menores. A melhor difusão das partículas de cimento gera uma maior homogeneidade no concreto ou argamassa, aumentando a resistência em idades maiores. (NEVILLE; BROOKS, 2010)

### ***2.3.2 Superplastificantes***

Aditivos plastificantes com maior desempenho são conhecidos como superplastificantes. Superplastificantes não permitem a entrada de muito ar no concreto, e são usados para produzir concreto fresco fluido ou concreto de altíssima resistência com trabalhabilidade normal. (NEVILLE; BROOKS, 2010)

Superplastificantes são polímeros orgânicos solúveis em água, sintetizados em longas moléculas. Como são fabricados, possuem poucas impurezas, portanto a alta dosagem não influi em efeitos colaterais graves. (NEVILLE, 2011)

Superplastificantes são usados para a fabricação de concretos de altíssima resistência, que podem possuir uma relação água/cimento até menor que 0,20, e com resistência de até 150 MPa. Além de possibilitar o aumento da resistência a uma idade avançada, também aumenta bastante a resistência a pouca idade. O seu uso aumenta a resistência do concreto em

24 horas de 50% a 75%, e já foram obtidos valores de resistência à compressão de concreto com 7 horas de idade de 30 MPa. (NEVILLE, 2011). A Figura 2.8 mostra as quantidades de superplastificante usualmente usadas em concretos. Nesta figura, é mostrado que a menor relação a/c demanda uma maior quantidade de superplastificante e aumenta a resistência do concreto.

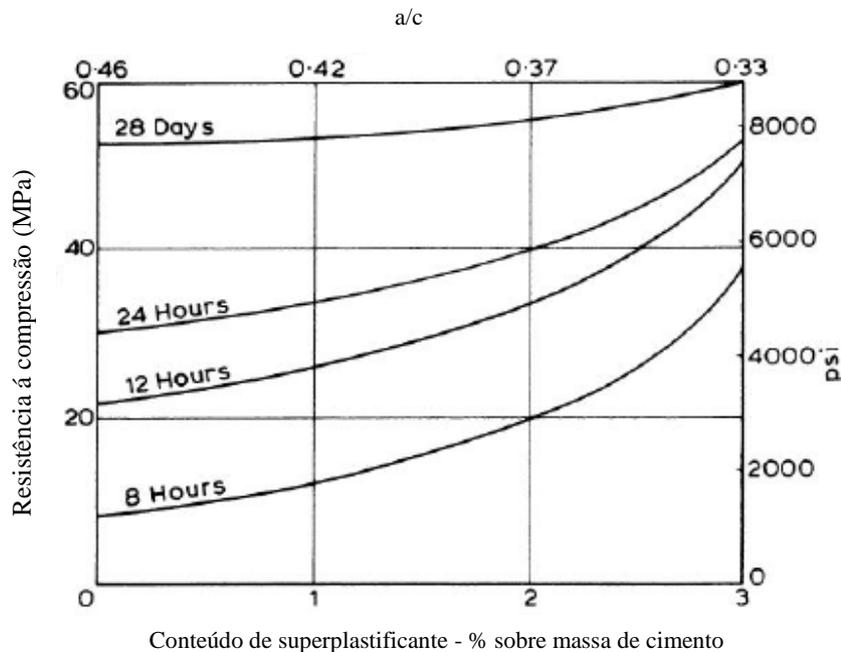


Figura 2.8 Quantidade de superplastificante demandada em um concreto com um consumo de cimento de 370 kg/m<sup>3</sup>. A menor relação a/c demanda uma maior quantidade de superplastificante e aumenta a resistência do concreto (NEVILLE, 2011)

Segundo Neville e Brooks (2010), a sua ação baseia-se na adsorção de ácido sulfônico pelas partículas de cimento, fazendo com que estas fiquem com carga negativa e comecem a se repelir. Com isso, a trabalhabilidade do concreto ou da argamassa aumenta, e então é possível criar concretos com uma quantidade de água reduzida em até 35%.

A melhora na trabalhabilidade resultante dos superplastificantes possui ação rápida, de 30 a 90 minutos. Portanto estes devem ser adicionados na mistura pouco tempo antes do lançamento. Além disso, o seu uso não afeta o tempo de cura do concreto, diferentemente dos plastificantes. A desvantagem dos superplastificantes é seu preço elevado, devido à complexidade de sua cadeia polimérica. (NEVILLE; BROOKS, 2010). A Figura 2.9 mostra os objetivos do uso de superplastificante.

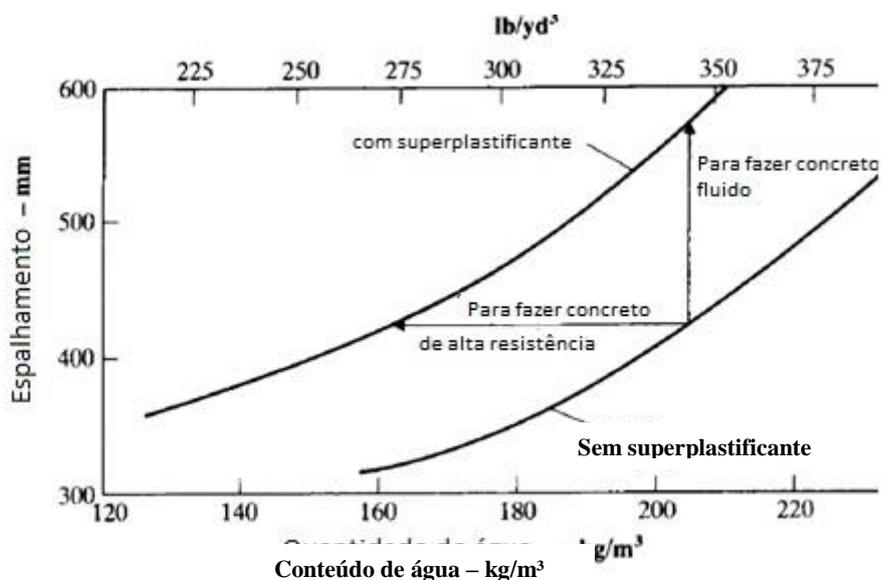


Figura 2.9 Esquema de ação de um superplastificante, que pode ser usado para produzir concreto fluido (seta vertical) ou concreto de alta resistência (seta horizontal) (NEVILLE; BROOKS, 2010)

O próprio uso do superplastificante também aumenta a resistência do concreto, pela maior homogeneidade da pasta de cimento e pela maior superfície disponível para hidratação do cimento.

Segundo Neville (2011), a dosagem comumente usada de superplastificante é de 1 litro a 3 litros do material por metro cúbico de concreto, onde o superplastificante possui cerca de 40% de material ativo. No caso de concretos de alta resistência, o uso é de 5 a 20 litros de material por metro cúbico de concreto. No cálculo da razão a/c, o volume do plastificante deve ser levado em conta.

## 2.4 Influência da Sílica Ativa nas Propriedades dos Materiais Cimentícios

A sílica ativa tem ação tanto física quanto química em um concreto ou argamassa. Neville e Brooks (2010) e Silva (1997) apontam que as partículas de sílica ativa se acomodam entre os grãos de cimento, diminuindo a quantidade de vazios. Além disso, elas reagem com o hidróxido de cálcio, produzindo mais C-S-H. Com isso, forma-se uma pasta de cimento mais aglomerada e com menor porosidade.

Como a sílica ativa é altamente reativa, ela pode ser usada para substituir uma pequena parte de cimento, inclusive em concretos de média e baixa resistência, pois ajuda a diminuir a exsudação e aumenta a coesão. (NEVILLE, 2011)

A sílica ativa deve estar homogeneamente misturada na argamassa ou concreto, então o tempo de mistura aumenta, especialmente para a sílica ativa densificada. Além disso, ela

demanda mais água para a mistura. Tal problema pode ser resolvido com o uso de superplastificantes. (NEVILLE, 2011)

Oertel et al. (2014) e Neville e Brooks (2010) afirmam que a sílica ativa participa em dois tipos de reação:

- A sílica ativa serve como ponto de nucleação para a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H)
- A sílica ativa participa da reação pozolânica, reagindo com CH formando C-S-H

A existência de sílica ativa também acelera a reação de hidratação da alita ( $C_3S$ ), como observado na Figura 2.10. Essa imagem mostra a liberação de calor pelas reações de hidratação em um cimento. Como o pico de liberação de calor do gráfico relacionado à sílica estudada neste trabalho vem antes do pico de liberação de calor relacionado a um cimento sem adição de sílica, conclui-se então que a sílica ativa acelera a reação de hidratação do cimento, (OERTEL et al., 2014).

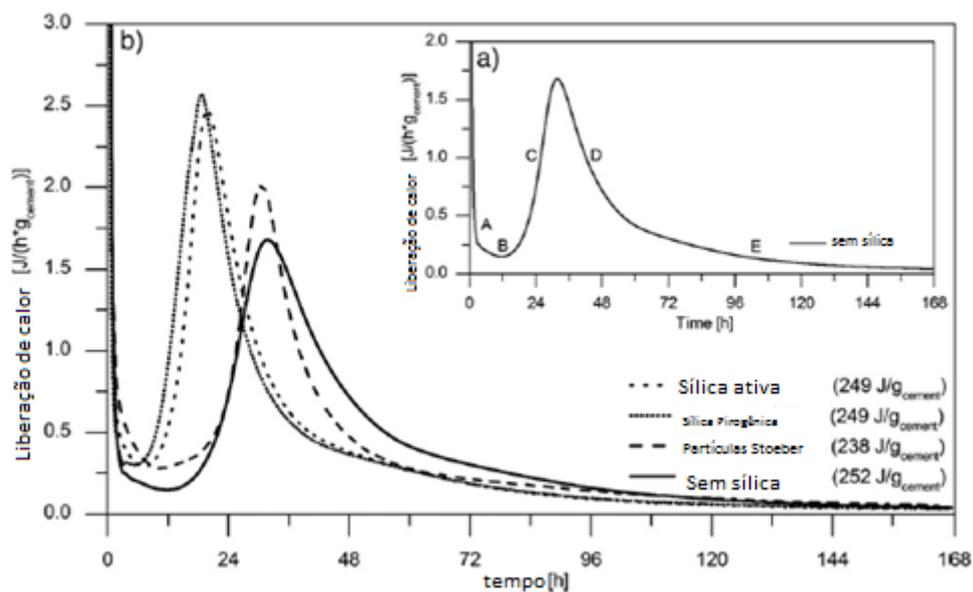


Figura 2.10 Liberação de calor de hidratação do cimento em cimento com adição de sílicas de diversos tipos e de cimento sem adição de sílica. (OERTHEL et al., 2014)

Neville (2011) mostra que a sílica ativa tem capacidade de ficar muito próxima das partículas de agregado, na zona de transição. As partículas de sílica ativa, aproximadamente 100 vezes menores que as partículas de cimento, promovem um empacotamento adequado na zona de transição interfacial. Isso reduz a porosidade nessa região, e somado a este efeito, também existem as reações pozolânicas, aumentando a resistência do concreto. A quantidade

mínima de sílica ativa para envolver os agregados graúdos é em torno de 5% a 10% da massa de cimento.

O autor também aponta que o uso de sílica ativa aumenta a efetividade do superplastificante. Como exemplo, ele cita um concreto com abatimento de 12 cm, onde o uso de superplastificante reduz o uso de água em 10 kg/m<sup>3</sup>. Com o uso de sílica ativa, em uma quantidade de 10% da massa de material cimentício, o consumo de água aumentaria em 40 kg/m<sup>3</sup>. Entretanto a mesma quantidade de superplastificante foi necessária para manter o abatimento igual ao caso sem sílica ativa. Ou seja, quando havia o uso de sílica ativa, o superplastificante reduziu o consumo de água em 40 kg/m<sup>3</sup>, não apenas 10 kg/m<sup>3</sup>, para manter o mesmo abatimento.

Segundo Neville (2011), para concretos com mesma razão água/material cimentício, a resistência à compressão é maior naqueles com adição de sílica ativa. A figura 2.11 mostra a resistência à compressão de três concretos de 28 dias: um sem sílica ativa, um com 8% de sílica ativa e um com 16% de sílica ativa, onde a porcentagem é por massa de material cimentício. Observa-se que a resistência aumenta com o aumento da quantidade de sílica ativa.

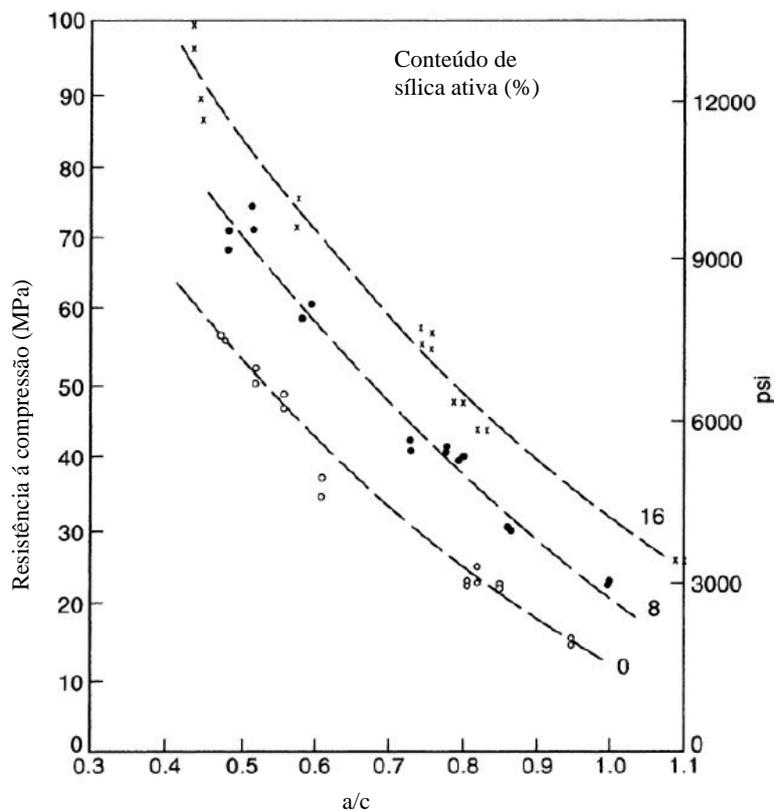


Figura 2.11 Resistência à compressão de concretos sem sílica ativa, e com 8% e 16% de sílica ativa, por relação de água/cimento (NEVILLE, 2011)

No estudo de Silva (1997), foram feitos concretos com sílica ativa e sem sílica ativa, para a avaliação e comparação de suas propriedades.

Silva (1997) observou que, nas idades de um e três dias, a resistência à compressão dos concretos com traços sem sílica ativa foi maior que os concretos com sílica ativa. Quando os concretos estavam com sete dias, a resistência dos concretos com sílica ativa passou a ser 10% maior que os concretos sem sílica ativa. Com 28, 56 e 91 dias, a resistência dos concretos com sílica ativa estava em torno de 20% acima da resistência dos concretos sem sílica ativa.

No estudo realizado por Oerthel et al. (2014), argamassas com diferentes tipos de sílica e sem sílica passaram por testes de resistência à compressão, em diferentes idades. Os resultados estão mostrados na Figura 2.12.

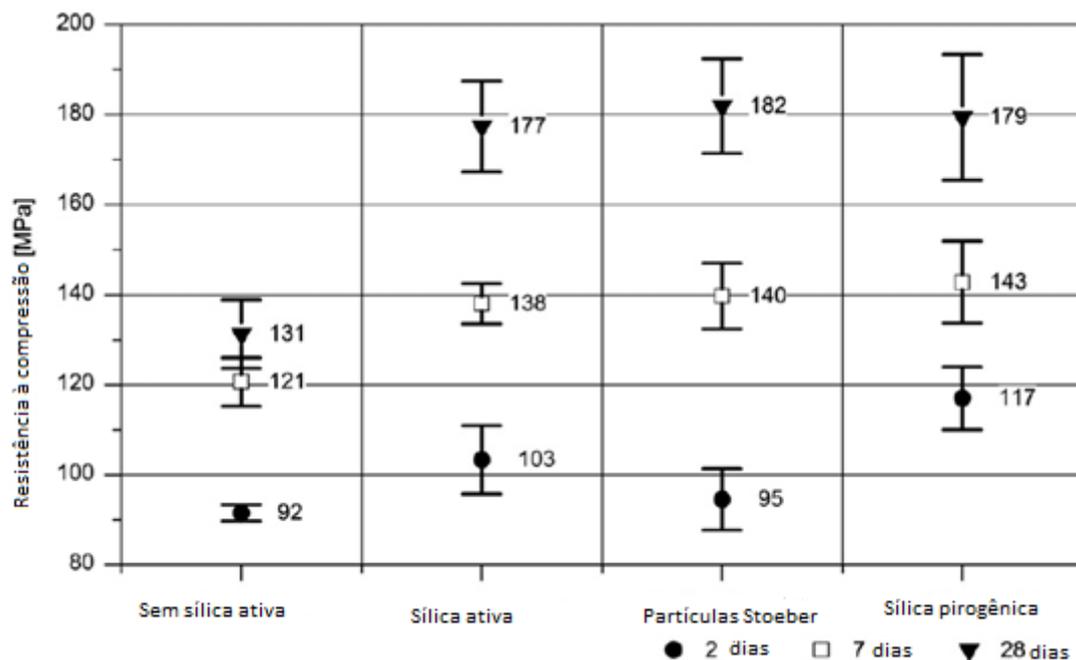


Figura 2.12 Resultados dos estudos de Oerthel et al. (2014) mostrando a resistência à compressão de argamassa com relação água/cimento de 0,23. São mostrados os valores médios e seus desvios padrões.

Nota-se que a resistência com a sílica ativa (*silica fume*) sempre foi maior que na argamassa sem sílica, e que essa diferença é bastante maior na idade de 28 dias, onde a resistência à compressão da argamassa com sílica tem um valor médio de 177 MPa, em comparação com o valor de 131 MPa da argamassa sem sílica.

No estudo de Zhang, Zhang e Yan (2016), foi observado que os concretos que possuem sílica ativa resistem mais que os concretos de referência sem sílica ativa. Além disso, os autores descobriram que a cura em maior temperatura gera maior resistência à

compressão em idades menores, entretanto a sua resistência em idades maiores é menor que no concreto curado em temperatura ambiente.

O uso da sílica ativa reduz significativamente a exsudação. Com isso, menos vazios causados pela água confinada aparecem. Esse uso também pode causar fissura de retração, se uma cura adequada não for realizada. (NEVILLE, 2011)

A sílica ativa também causa algumas mudanças químicas nas pastas de cimento hidratado. Richardson (1999) *apud* Rossen, Lothenback e Scrivener (2015) diz que o valor médio da razão Ca/Si no gel de silicato de cálcio hidratado em um cimento Portland comum hidratado é de 1,75, medido ao redor de uma partícula de cimento.

O gel de C-S-H que se encontra ao redor de uma partícula de clínquer, em uma pasta de cimento com sílica ativa, possui uma camada externa (ou seja, formada primeiro) com um teor maior de cálcio e uma camada interna (formada em maior tempo) com um menor teor de cálcio, como pode ser observado na figura 2.13. Quanto mais sílica ativa é usada, maior a camada com menos cálcio. A formação dessa camada ocorre junto ao desaparecimento da portlandita (CH). (ROSSEN; LOTHENBACK; SCRIVENER, 2015)

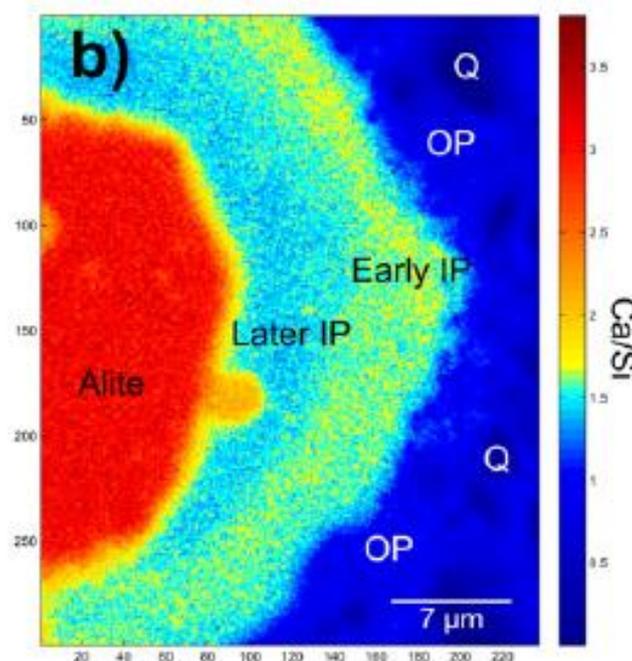


Figura 2.13 Razão Ca/Si no gel de C-S-H formado ao redor de uma partícula de alita (C3S) presente em uma pasta de cimento hidratado com 25% de massa de sílica ativa não-densificada (ROSSEN; LOTHENBACK; SCRIVENER, 2015)

No estudo de Rossen, Lothenback e Scrivener (2015), a razão Ca/Si medida em uma pasta de cimento comum hidratado teve um valor médio de aproximadamente 2. Aos 28 dias

de hidratação, em uma pasta com 10% de sílica ativa não-densificada, foi achada uma razão de 1,65. Com 25% de sílica ativa, foi encontrado o valor de 1,25. Com 45% de sílica ativa, foi encontrado o valor de 1.

Na figura 2.14, observa-se que a razão Ca/Si presente no C-S-H decresce com o aumento da porcentagem de sílica ativa e com o tempo. A quantidade de CH diminui com o tempo, e quando ela cessa, há uma queda brusca na relação Ca/Si. (ROSSEN; LOTHENBACK; SCRIVENER, 2015). PC simboliza a pasta de cimento de referência, PC(Q) 9.1 SF se refere à pasta com 9,1% de quartzo e 9,1% de sílica ativa. PC 10 SF se refere à pasta de cimento com 10% de sílica ativa. PC (Q) 20SF se refere à pasta com 20% de quartzo e 20% de sílica ativa. PC 25SF se refere à pasta com 25% de sílica ativa. PC 45SF se refere à pasta com 45% de sílica ativa.

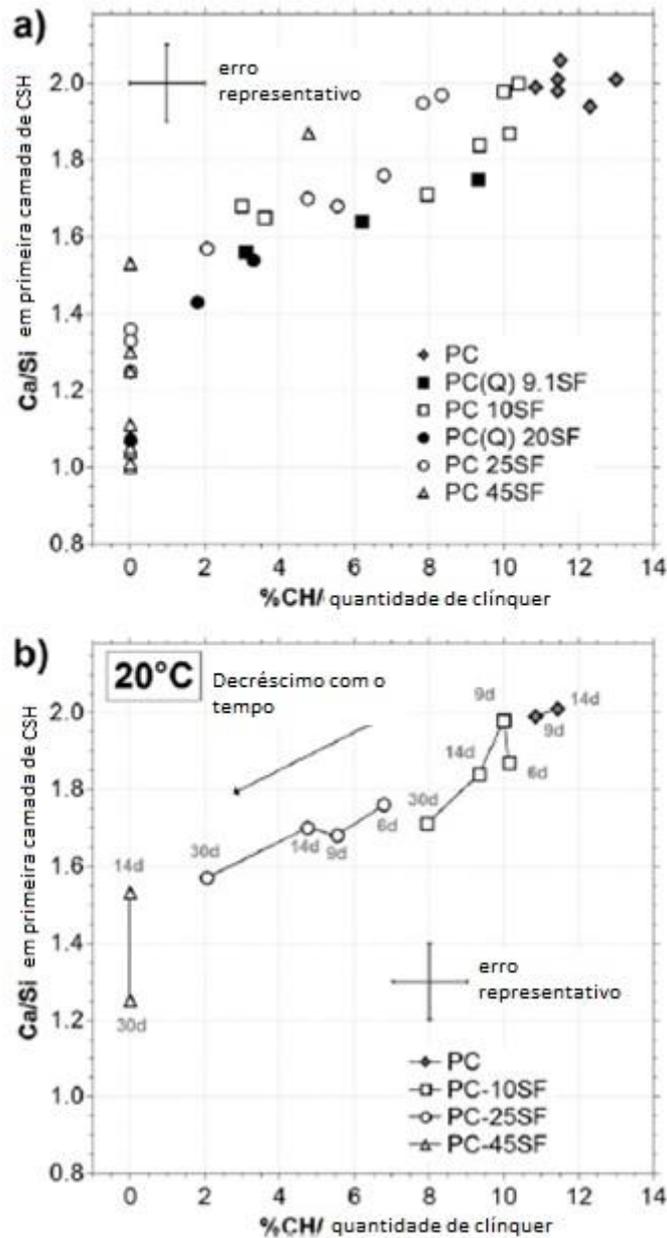


Figura 2.14 Resultados de razão Ca/Si por porcentagem de CH no cimento, em diferentes pastas de cimento estudadas em diversas temperaturas de hidratação e em variados tempos. Foram escolhidas as pastas de cimento que se hidrataram em uma temperatura de 20° C. (ROSSEN; LOTHENBACH; SCRIVENER, 2015)

#### 2.4.1 Diferenças no desempenho nas sílicas ativas densificadas e não-densificadas

Segundo Zhang, Zhang e Yan (2015), a efetividade da sílica ativa depende do seu pequeno tamanho de partícula e área específica, logo a formação de aglomerados de sílica ativa densificada reduz essa efetividade. Além disso, os aglomerados não quebram completamente nem ficam bem dispersos na pasta de cimento. (BAWEJA; CAO; BUCEA, 2003; DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004 *apud* ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Diamond, Sahu e Thaulow (2004) afirmam que a defloculação dos aglomerados depende do processo de mistura. Lagerblad e Utkin (1993,1995) e Baweja et al. (2003) *apud* Diamond, Sahu e Thaulow (2004) mostram que a quebra dos aglomerados não ocorre completamente na mistura convencional. Em um ponto, os grãos de areia amortecem o impacto sofrido pelos agrupamentos. Os autores também mostram que os aglomerados sofrem menos quebra nas argamassas que no concreto.

Zhang, Zhang e Yan (2015) fizeram um estudo comparativo usando sílicas ativas densificada e não-densificada, observando resistência à compressão, hidratação e zona de transição. Foram analisadas pastas, concretos e argamassas, com misturas ternárias de sílica ativa, cimento e cinza volante, com quantidades de sílica ativa de 5% ou 10% sobre o total de massa, com relações água/cimento de 0,24 e 0,29. Também foi usado aditivo superplastificante. As quantidades são mostradas nas Tabelas 2.3, 2.4 e 2.5. No nome das amostras, a primeira letra simboliza se é pasta (P), argamassa (M) ou concreto (C). Ref é a referência sem sílica ativa, RSF simboliza sílica ativa não-densificada, DSF simboliza sílica ativa densificada. O primeiro número simboliza a quantidade de sílica ativa em porcentagem de massa (5% ou 10%) e o segundo número é a razão água cimento (0.29 ou 0.24).

Tabela 2.3 Proporções de mistura de pastas no estudo de Zhang, Zhang e Yan (2015)

Amostras	cimento (% massa)	cinza volante (% massa)	Sílice ativa não-densificada (% massa)	Sílice ativa densificada (% massa)	a/c
PRef-0.29	80	20	0	0	0.29
PRSF5-0.29	76	19	5	0	0.29
PD SF5-0.29	76	19	0	5	0.29
PRSF10-0.29	72	18	10	0	0.29
PD SF10-0.29	72	18	0	10	0.29
PRef-0.24	80	20	0	0	0.24
PRSF5-0.24	76	19	5	0	0.24
PD SF5-0.24	76	19	0	5	0.24
PRSF10-0.24	72	18	10	0	0.24
PD SF10-0.24	72	18	0	10	0.24

Tabela 2.4 Proporções de mistura de argamassas no estudo de Zhang, Zhang e Yan (2015)

Amostras	Cimento (% massa)	Cinza Volante (% massa)	SND (% massa)	SD (% massa)	a/c	areia/cimento
MRef-0.29	80	20	0	0	0.29	3:1
MRSF5-0.29	76	19	5	0	0.29	3:1
MDSF5-0.29	76	19	0	5	0.29	3:1
MRSF10-0.29	72	18	10	0	0.29	3:1
MDSF10-0.29	72	18	0	10	0.29	3:1
MRef-0.24	80	20	0	0	0.24	3:1
MRSF5-0.24	76	19	5	0	0.24	3:1
MDSF5-0.24	76	19	0	5	0.24	3:1
MRSF10-0.24	72	18	10	0	0.24	3:1
MDSF10-0.24	72	18	0	10	0.24	3:1

Tabela 2.5 Proporções de mistura de concretos no estudo de Zhang, Zhang e Yan (2015)

Amostras	Cimento	Cinza Volante	SND	SD	água	Agregados miúdos	Agregados graúdos	SF
CRef-0.29	360	90	0	0	130	817	1083	6.8
CRSF5-0.29	342	85.5	22.5	0	130	817	1083	6.8
CDSF5-0.29	342	85.5	0	22.5	130	817	1083	6.8
CRSF10-0.29	324	81	45	0	130	817	1083	6.8
CDSF10-0.29	324	81	0	45	130	817	1083	6.8
CRef-0.24	440	110	0	0	132	774	1026	10
CRSF5-0.24	418	104.5	27.5	0	132	774	1026	10
CDSF5-0.24	418	104.5	0	27.5	132	774	1026	10
CRSF10-0.24	396	99	55	0	132	774	1026	10
CDSF10-0.24	396	99	0	55	132	774	1026	10

Zhang, Zhang e Yan (2015) fizeram um estudo de água não-evaporável para avaliar a hidratação de pastas. Segundo os autores, quanto maior a quantidade de água não-evaporável, maior a quantidade de produtos de hidratação do cimento. Este ensaio é realizado aquecendo pastas de cimento Portland a 105°C e 1000°C e medindo as suas respectivas massas. A quantidade de água não-evaporável é dada pela Equação 2.1:

$$w_n = \frac{m_{1000} - m_{105}}{m_{105}} - VC \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em que  $w_n$  é a porcentagem de água não-evaporável,  $m_{1000}$  é a massa da amostra aquecida a 1000°C,  $m_{105}$  é a massa da amostra aquecida a 105°C e VC é um valor de correção, que depende da ignição de amostras não-hidratadas.

Os resultados do estudo de água não-evaporável determinados em pasta de cimento Portland são apresentados na Figura 2.15.

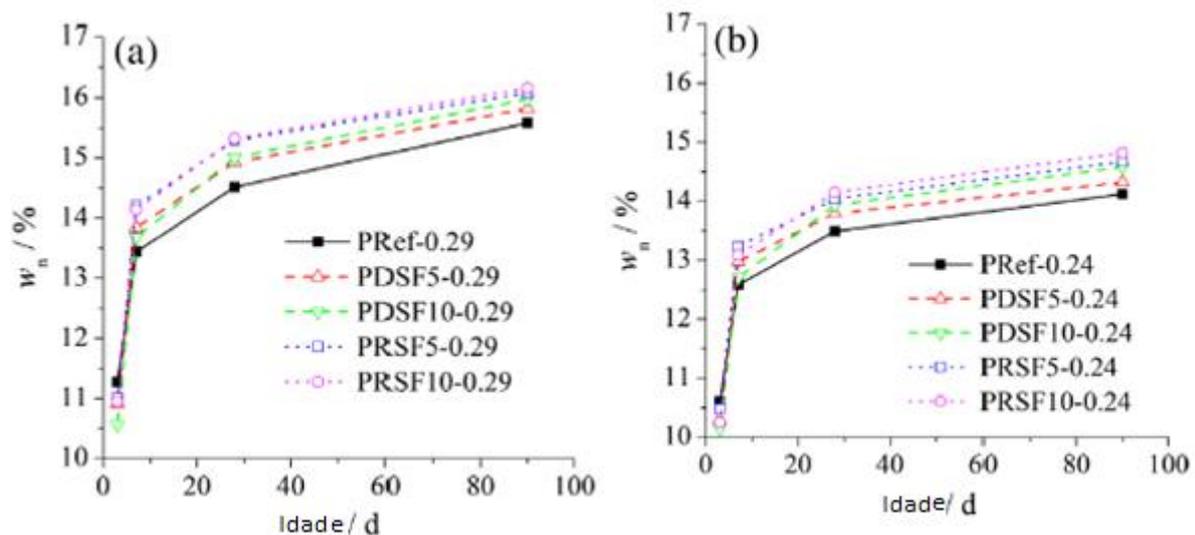


Figura 2.15 Quantidade de água não-evaporável (eixo vertical) por idade da pasta de cimento (eixo horizontal). Em (a), a razão água/cimento está em torno de 0,29. Em (b), a razão água/cimento é de 0,24. PRef simboliza a pasta de cimento de referência, PDSF5 E PDSF10 se referem às pastas com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e PRSF5 e PRSF10 se referem às pastas com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Em 3 dias, a quantidade de água não-evaporável da pasta de cimento sem sílica ativa é maior, mostrando que a sílica ativa possui baixa reatividade em menores idades. Após 7 dias, as pastas com sílica ativa possuem mais água não-evaporável que a pasta de referência, e a quantidade maior de sílica ativa também possui mais água não-evaporável, indicando que a sílica ativa aumenta o grau de hidratação do cimento. O gráfico da Figura 2.15 também mostra que as pastas com sílica ativa não-densificada possuem maior grau de hidratação comparadas às pastas de sílica ativa densificada de mesma idade. Conclui-se então que a taxa de hidratação é maior para a sílica ativa não-densificada. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

No estudo de Zhang, Zhang e Yan (2015), foram obtidos os resultados de compressão de pastas de cimento conforme apresentados na Figura 2.16.

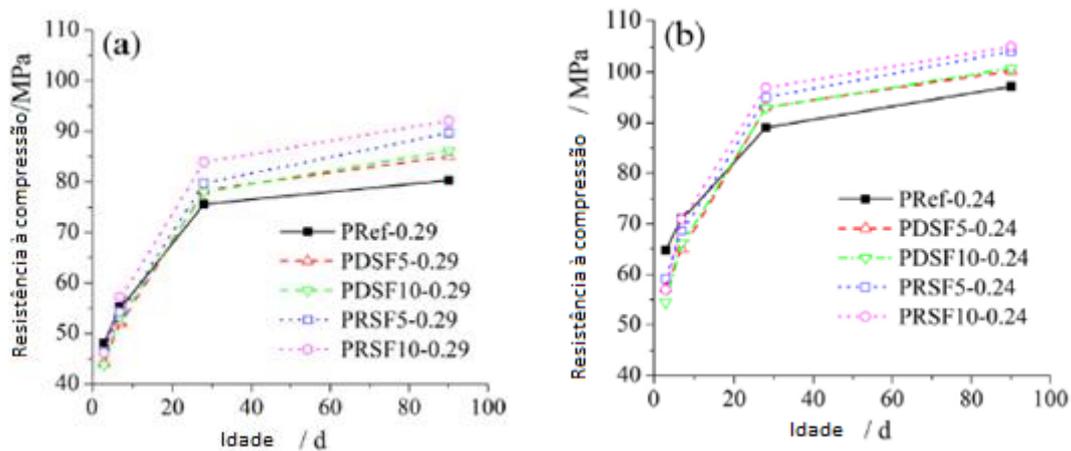


Figura 2.16 Resistência à compressão de pastas de cimento, por idade, que contém: (a) a/c de 0,29; (b) a/c de 0,24. PRef simboliza a pasta de cimento de referência, PDSF5 E PDSF10 se referem às pastas com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e PRSF5 e PRSF10 se referem às pastas com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Zhang, Zhang e Yan (2015) observaram que inicialmente, os valores das pastas que possuem sílica ativa são menores que o valor de resistência da pasta de referência. Eles associam esse fato à baixa reatividade inicial da sílica ativa. Após 28 dias, as pastas com sílica ativa possuem resistência à compressão maior, devido à atividade pozolânica e ao efeito *filler*. Também é observado que as pastas com sílica ativa não-densificada apresentam maior resistência que as pastas com sílica ativa densificada. Isso é associado ao menor tamanho das partículas, causando maior reatividade e maior efetividade do efeito *filler*.

Os autores Zhang, Zhang e Yan (2015) também perceberam que em pastas com razão água/cimento menores, o índice de desempenho da sílica ativa também era menor. Pela figura 2.16 nota-se que a resistência das pastas com 5% e 10% de substituição de cimento por sílica ativa densificada possuem resistências praticamente idênticas. Concluíram que o maior uso de sílica ativa densificada não necessariamente significa que haverá aumento de resistência na pasta de cimento.

No mesmo trabalho, os autores obtiveram os gráficos de resistência à compressão de argamassas conforme apresentado na Figura 2.17.

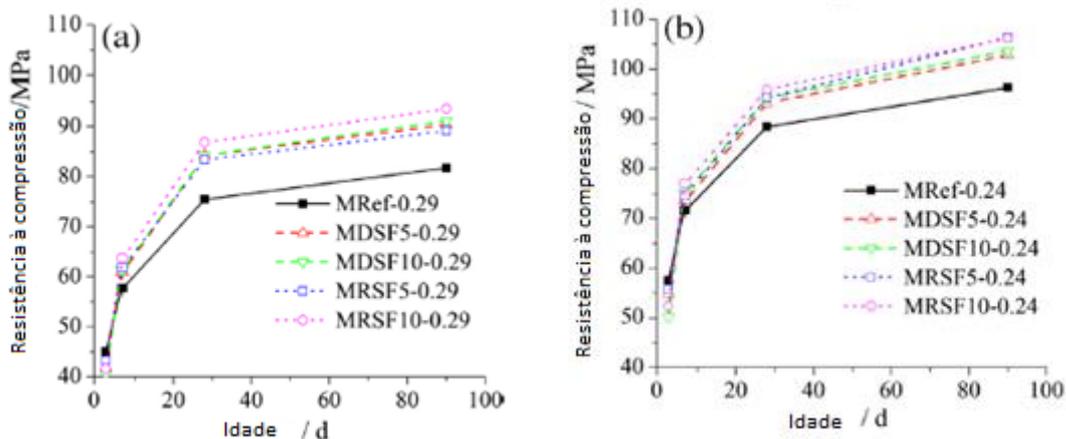


Figura 2.17 Resistência à compressão de argamassas, por idade, que contém: (a) a/c de 0,29 e (b) a/c de 0,24. MRef simboliza a argamassa de referência (sem sílica ativa), MDSF5 E MDSF10 se referem às argamassas com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e MRSF5 e MRSF10 se referem às argamassas com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Pela Figura 2.17, observa-se que a sílica ativa aumenta a resistência das argamassas com o passar do tempo, e que essa melhoria é maior que nas pastas. Isso é explicado pelo fato de que a reação pozolânica e o efeito *filler* aumentam a resistência da zona de transição. Além disso, a melhora na reação ocorre mais cedo em argamassas que nas pastas de cimento. Em argamassas, as resistências dos corpos de prova com sílica ativa não-densificada também são maiores que as dos corpos de prova com sílica ativa densificada, da mesma maneira que ocorre nas pastas. A relação de acréscimo de resistência devido à sílica ativa com a razão a/c continua verdadeira.

Os gráficos relativos ao concreto obtidos por Zhang, Zhang e Yan (2015) são apresentados na Figura 2.18.

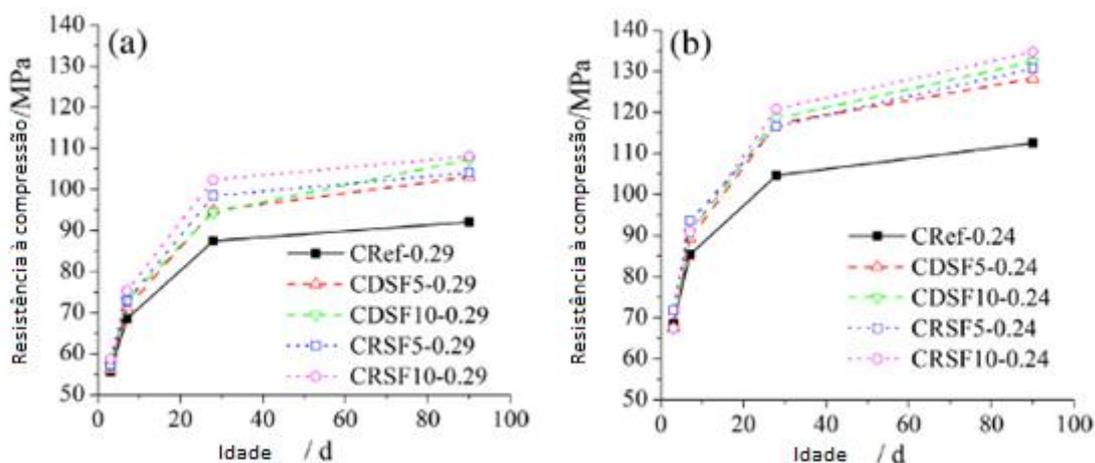


Figura 2.18 Resistência à compressão por idade dos concretos que contém: (a) a/c de 0,29; (b) a/c de 0,24. CRef simboliza o concreto de referência (sem sílica ativa), CDSF5 E CDSF10 se referem aos concretos com sílica ativa densificada em quantidade de 5% e 10%, e CRSF5 e CRSF10 se referem aos concretos com sílica ativa não-densificada em quantidade de 5% e 10%. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Como observado por Zhang, Zhang e Yan (2015) na Figura 2.18, o aumento de resistência trazido pela sílica ativa já começa em idades menores, no concreto. Eles também observam que a quantidade de sílica ativa influencia mais a resistência no concreto que nas argamassas ou pastas. Ou seja, o concreto com 10% de sílica ativa densificada possui resistência maior que o concreto com 5% de sílica ativa não-densificada. Nas pastas e argamassas, isso não acontecia. Como a zona de transição no concreto possui muito mais importância que na argamassa, conclui-se que a sílica ativa, em ambas as formas, fortalece essa região. Além disso, a mistura para fazer concreto é mais potente que a mistura para argamassas e pastas, melhorando a dispersão da sílica e defloculação de aglomerados, no caso de sílica ativa densificada.

Em concretos e argamassas, o desempenho da sílica ativa densificada é maior que o desempenho de sílica ativa densificada em pastas. Isso devido à colisão dos agregados no processo de mistura, o que ajuda a fragmentar mais aglomerados e dispersar a sílica de melhor maneira. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Para avaliar a influência dos dois tipos de sílica ativa na zona de transição interfacial, Zhang, Zhang e Yan (2015) realizaram um teste de resistência à flexão em um corpo de prova composto de metade de mármore e metade de pasta de cimento. As rupturas ocorreram na região entre o mármore e a pasta. Os resultados são apresentados na Figura 2.19:

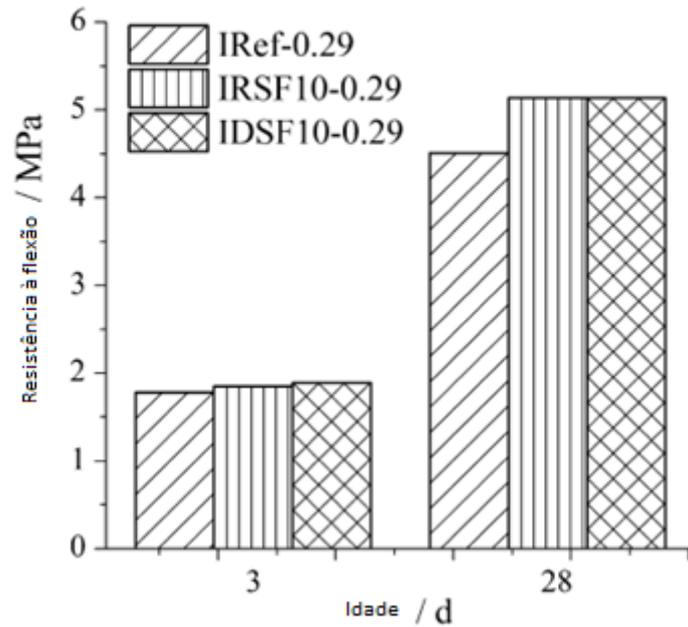


Figura 2.19 Resultados dos testes de resistência à flexão nos corpos de prova de pasta de cimento e mármore, por idade. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015). IRef se refere à pasta de referência, IRSF se refere à pasta com sílica ativa não-densificada, e IDSF se refere à pasta com sílica ativa densificada.

Observa-se, na Figura 2.19, que a sílica ativa traz melhorias à zona interfacial, entretanto o tipo de sílica ativa não influencia nessa propriedade.

Os autores Zhang, Zhang e Yan (2015) fizeram gráficos mostrando os índices de desempenho das sílicas ativas densificadas e não-densificadas em pastas, argamassas e concretos. O índice de desempenho é a razão da resistência do material com sílica ativa pela resistência do material referência sem sílica ativa, subtraindo 1 (ou 100%). Os resultados, para um valor de a/c de 0,24 são apresentados nas Figuras 2.20 e 2.21:

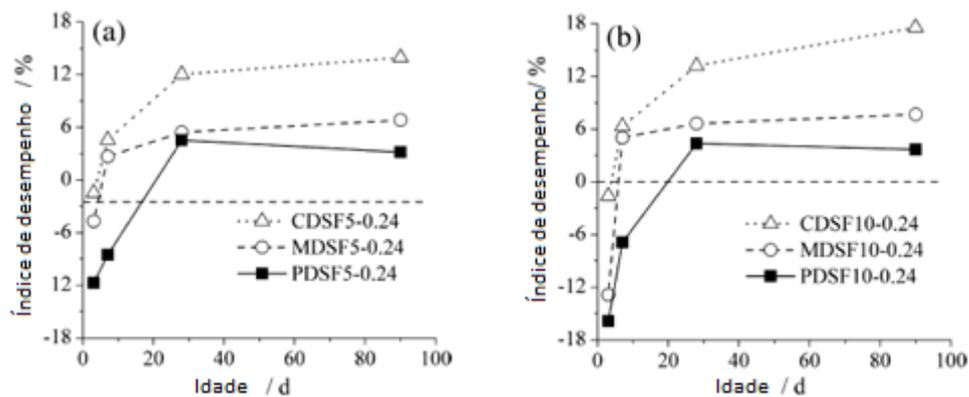


Figura 2.20 Desempenho da sílica ativa densificada, por idade, para um sistema com: (a) 5% de sílica ativa em relação à massa total; (b) 10% de sílica ativa em relação à massa total. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

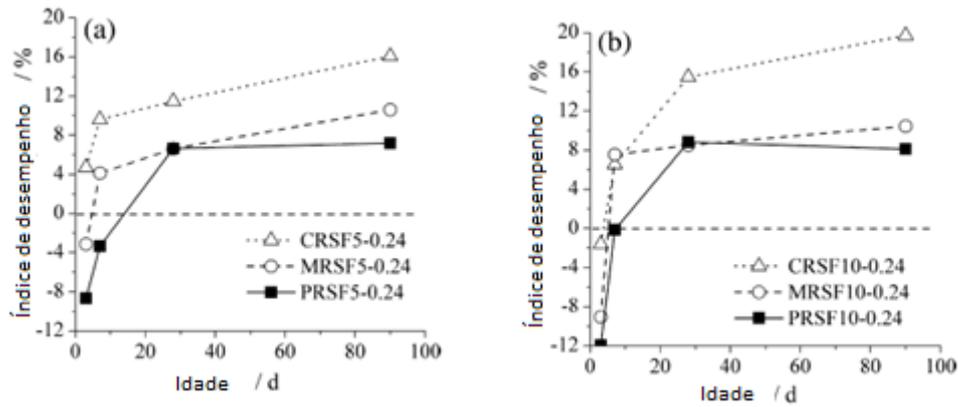


Figura 2.21 Desempenho da sílica ativa não-densificada, por idade, para um sistema com: (a) 5% de sílica ativa em relação à massa total; (b) 10% de sílica ativa em relação à massa total. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2015)

Nota-se nas Figuras 2.20 e 2.21 que o desempenho da sílica ativa não-densificada é sempre maior que a da sílica ativa densificada. Entretanto, no concreto, essa diferença não é muito expressiva, já que os agregados desfazem os aglomerados de sílica ativa e os agregados graúdos possuem uma área maior de superfície de transição.

Zhang, Zhang e Yan (2016) estudaram o efeito do aumento da temperatura durante a cura na resistência final do concreto, usando sílicas ativas densificada e não-densificada. Misturas ternárias de cimento, cinza volante e sílica foram criadas e curadas em dois ambientes: um com temperatura de 20°C e um com temperatura de 50°C. Os resultados do estudo se encontram na Figura 2.22. O primeiro número mostra a quantidade de sílica ativa em porcentagem de massa (5% ou 10%), o segundo número mostra a temperatura do ambiente em que foi realizada a cura e o terceiro número se refere à relação água/cimento.

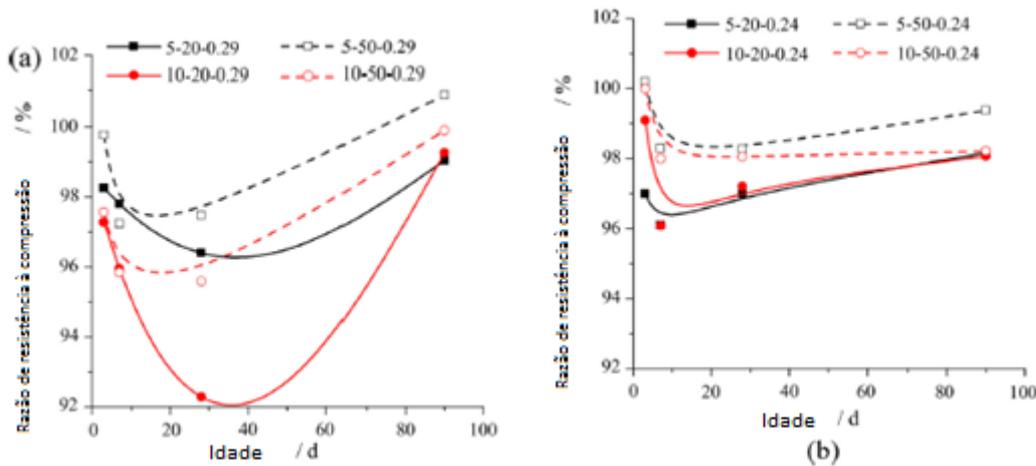


Figura 2.22 Razão entre a resistência à compressão do concreto, por idade, com sílica ativa densificada e resistência do concreto com sílica ativa não-densificada. Em (a), a razão água/cimento é de 0,29 e em (b) é 0,24. O primeiro número no nome simboliza a porcentagem de sílica por massa total (5% ou 10%). O segundo número indica a temperatura da cura (20 graus ou 50 graus) e o terceiro número representa a razão a/c. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2016)

É observado na Figura 2.22 que quase sempre a razão é menor que 100%, mostrando que a sílica ativa não-densificada provoca maior resistência no concreto que a sílica ativa densificada. Entretanto, observa-se que, em geral, o aumento da temperatura de cura do concreto aumenta essa razão, ou seja, faz com que a resistência do concreto com sílica ativa densificada se assemelhe mais à resistência do concreto com sílica ativa não-densificada. Em idades avançadas, entretanto, a diferença é próxima de 100%, mostrando que em concreto, há pouca diferença no efeito dos dois tipos de sílica.

Na Figura 2.23, é medido o teor do hidróxido de cálcio, através de uma análise de termogravimetria com taxa de aquecimento de 10° por minuto. Na nomenclatura, P simboliza que é pasta de cimento, DSF simboliza sílica densificada, RSF simboliza sílica não-densificada e o número simboliza a quantidade de sílica ativa em porcentagem de massa.

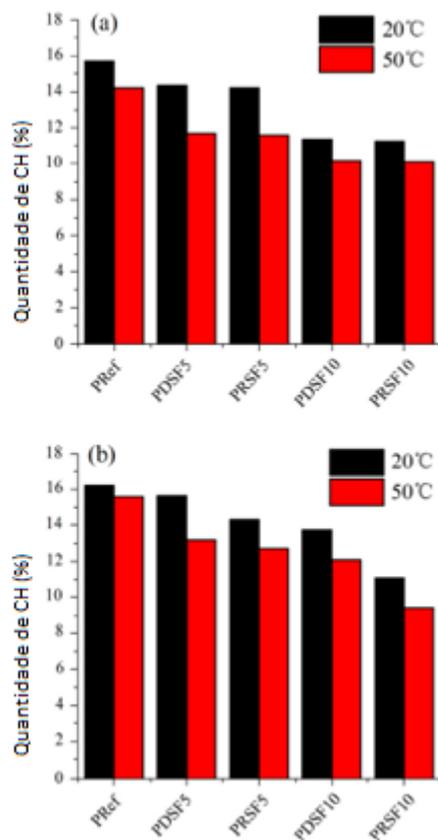


Figura 2.23 Quantidade de hidróxido de cálcio no concreto de: (a) 3 dias e (b) 90 dias. (ZHANG; ZHANG; YAN, 2016)

O consumo de hidróxido de cálcio também aumenta conforme a finura da sílica. Em 3 dias, não há muita diferença entre as sílicas ativas densificada e a não-densificada, conforme a Figura 2.23. Isso mostra que o tipo de sílica ativa não influencia na hidratação inicial do cimento. Entretanto, em 90 dias, percebe-se que a sílica ativa não-densificada reage melhor com o hidróxido de cálcio.

Diamond, Sahu e Thaulow (2004) perceberam que há duas possibilidades de reação dentro de um aglomerado de sílica ativa densificada: se o teor alcalino do concreto for suficiente, a sílica pode se tornar tanto gel de reação álcali-sílica quanto C-S-H de baixo teor de cálcio. Essas reações ocorrem quando o cálcio, os álcalis e outros íons difundem da pasta de cimento para dentro da partícula de sílica densificada.

O grão de sílica ativa densificada que, após a reação, se torna C-S-H mantém uma estrutura uniforme, de volume estável, e firmemente ligada à pasta de cimento que envolve o grão. Entretanto, análises de energia dispersiva de raio X (energy-dispersive X-ray ou EDS) mostram que a quantidade de cálcio é menor que a quantidade de silício (a razão Ca/Si dentro do agregado normalmente é 0,6). Essa análise é mostrada na região onde se encontra o

pequeno quadrado vazado na Figura 2.24. Como exemplo, temos a Figura 2.24. A razão Ca/Si neste caso é baixa comparada à razão média de 1,5 observada em cimento hidratado. Nas bordas do aglomerado, o valor característico dessa razão é maior. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004)

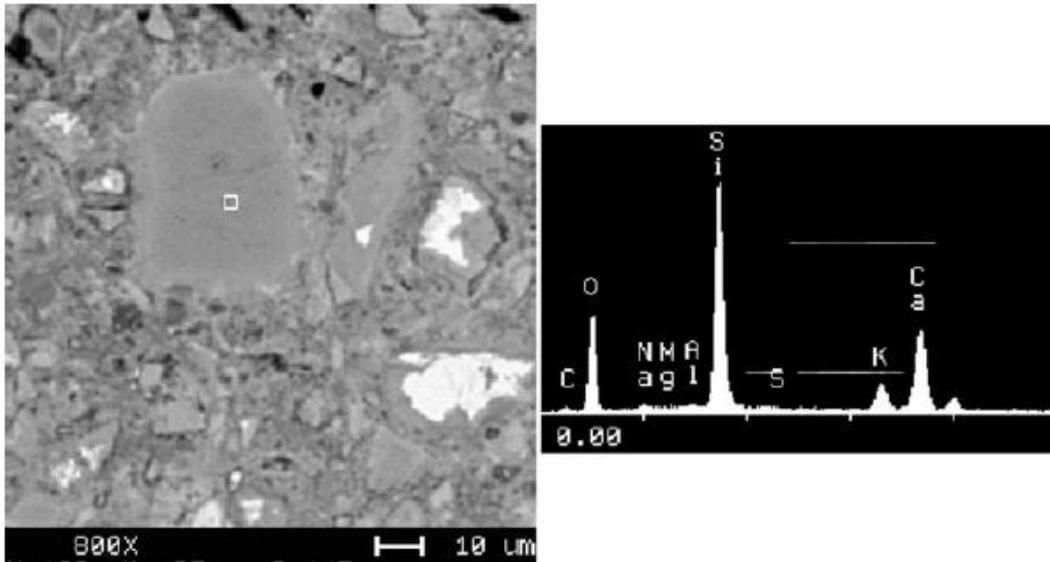


Figura 2.24 imagem mostrando grão de sílica ativa densificada após se tornar C-S-H e análise EDS mostrando a quantidade de Ca menor que a quantidade de Si. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004)

O segundo caso de reação é quando há a formação de gel de reação álcali-sílica. Esse gel é expansivo e gera instabilidade volumétrica no grão, o que causa a fratura deste. Também podem ocorrer encolhimento e dissolução do material. A análise de EDS revela uma razão Ca/Si menor ainda e a existência de metais alcalinos, como sódio e potássio. Esse caso é observado na Figura 2.25. Nas suas bordas, também há teor maior de cálcio. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004)

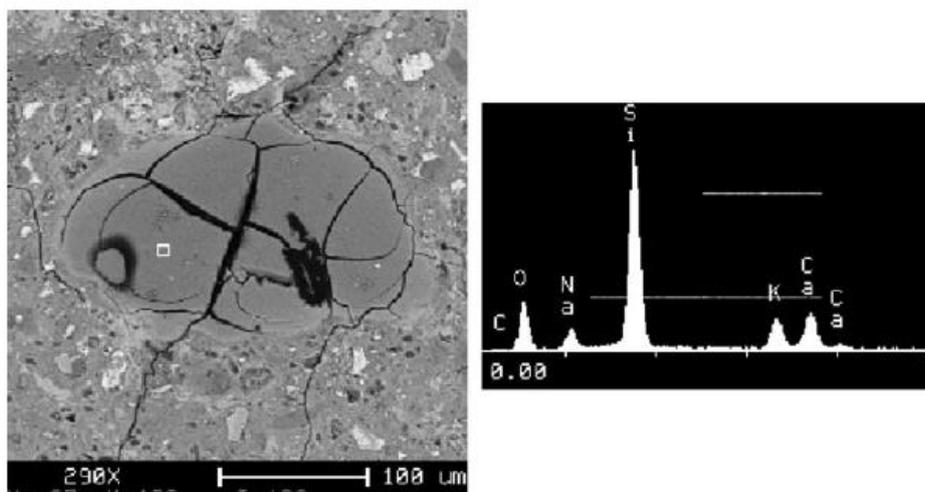


Figura 2.25 Grão de sílica ativa densificada após se tornar gel de reação álcali-sílica e análise EDS mostrando a quantidade de Ca muito menor que a quantidade de Si e a existência de Na e K.. Nota-se que o grão encontra-se fraturado. (DIAMOND; SAHU; THAULOW, 2004)

Ambas as reações na sílica ativa densificada ocorrem simultaneamente no concreto, e os diferentes tipos de grão podem se encontrar fisicamente próximos, às vezes como uma distância menor que 1 milímetro.

Diamond, Sahu e Thaulow (2004) afirmam que a existência de reação álcali-sílica dentro do grão de sílica ativa densificada não necessariamente causa problemas no concreto ou argamassa. Não se sabe ao certo o que faz com que um grão entre em tal tipo de reação, entretanto os autores perceberam que a média dos tamanhos dos grãos estáveis é menor que a média dos tamanhos dos grãos instáveis. Outro fator apontado foi que, se as partículas de sílica densificada não forem quebradas, elas não podem funcionar como *filler*.

## 2.5 Considerações Finais

O principal objetivo da primeira parte deste projeto foi apresentar a revisão bibliográfica que trata a respeito de sílica ativa densificada e sílica ativa não-densificada.

A sílica ativa é uma substância que aumenta a resistência dos concretos, argamassas e pastas onde é inserida. Também aumenta a sua coesão e diminui a sua exsudação. Ela tem basicamente três ações principais: atuar como ponto de nucleação na hidratação da alita, reagir com o hidróxido de cálcio produzindo C-S-H e preencher os vazios entre as partículas de cimento e de agregados, diminuindo a porosidade do concreto, pasta ou argamassa. Além disso, ela fortalece a zona de transição agregado-pasta em concretos e argamassas.

Diamond, Sahu e Thaulow (2004) observaram que a partícula de sílica ativa densificada pode sofrer duas reações distintas: reagir com CH formando C-S-H com baixo

teor de cálcio ou reagir com os álcalis da pasta de cimento formando gel de reação álcali-sílica. A primeira reação gera um produto estável, enquanto a segunda reação produz um produto com instabilidade volumétrica, o que pode romper o aglomerado de sílica ativa densificada. Eles também perceberam que, normalmente, não há quebra completa de todos os aglomerados de sílica ativa densificada em um processo de mistura convencional, sugerindo que o seu uso seja menos efetivo que o da sílica ativa não-densificada.

Oertel *et al.* (2014) mostraram em seu estudo que a sílica ativa, além de aumentar a resistência da argamassa, acelera a reação de hidratação da alita, liberando o calor desta reação antes de quando este é liberado na hidratação de cimento Portland sem sílica. Por outro lado, Zhang, Zhang e Yan (2015) e Silva (1997) notaram que a resistência em menores idades de materiais com sílica ativa era menor que a resistência dos materiais de referência. É sugerido um estudo específico para avaliar a ação da sílica ativa em pastas de cimento, argamassas e concretos em idades menores.

Rossen, Lothenback e Scrivener (2015) observaram que a presença de sílica afeta a composição do C-S-H ao redor de uma partícula de alita, onde o produto possui menor teor de cálcio.

Silva (1997) observou que os concretos com sílica ativa obtiveram resistência à compressão em torno de 20% maiores que as resistências dos concretos sem sílica ativa. Os estudos de Zhang, Zhang e Yan (2015, 2016) também observaram que a sílica ativa aumenta bastante a resistência de pastas, argamassas e concretos.

Zhang, Zhang e Yan (2015, 2016) realizaram ensaios em sílica ativa densificada e não-densificada. Eles notaram que a sílica ativa não-densificada apresenta melhor desempenho que a densificada, entretanto em concretos a diferença não é muito grande. Também observaram que o processo de dispersão por ultrassom em uma amostra de sílica ativa densificada faz com que os aglomerados se dispersem.

### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

No programa experimental, foram realizados ensaios para determinar qual sílica ativa (dentre a densificada e a não-densificada) possui melhor desempenho em uma argamassa. Muitos destes ensaios estão normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Este programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM – UnB).

#### **3.1 Materiais**

Foram usados os materiais:

- Areia normal
- Areia natural
- Sílica ativa densificada
- Sílica ativa não-densificada
- Superplastificante
- Cimento CP V

##### ***3.1.1 Areias Normal e Natural***

Foram usadas areias normal e natural. A areia normal é a padronizada pela norma NBR 7214 de 2015. Porém a principal areia usada foi a natural quartzosa da região, e ela foi usada seca antes de ser incorporada às misturas de pastas e argamassas. Além disso, a areia natural foi peneirada nas mesmas frações em que a areia normal é fornecida. O material retido entre as peneiras de abertura 2,4 mm e 1,2 mm é areia grossa. O material retido entre as peneiras de 1,2 mm e 0,6 mm é areia média grossa. O material retido entre as peneiras de 0,6 mm e 0,3 mm é a areia média fina. E o material retido entre as peneiras de 0,3 mm e 0,15 mm é a areia fina. Para fazer 6 corpos de prova de uma argamassa, foram usados 468 g de cada fração de areia. O uso da areia normal foi para comparar os resultados de resistência à compressão com argamassas de areia natural.

##### ***3.1.2 Sílica ativa***

A sílica ativa foi estudada em duas formas: densificada e não-densificada. A sílica ativa não-densificada é fornecida em forma de pó fino, com baixa massa específica aparente.

A sílica ativa densificada é fornecida em forma de pequenos aglomerados esféricos, com uma massa específica aparente maior. A sílica ativa foi usada em substituição do cimento. 10% da massa do cimento foi substituída por massa de sílica ativa.

### ***3.1.3 Superplastificante***

Como o valor de a/c foi fixado, foi usado superplastificante à base de policarboxilato, para atingir a consistência desejada das argamassas, quando necessário. Já que o uso da areia natural e das sílicas influenciou na consistência dessas argamassas.

### ***3.1.4 Cimento***

Foi usado cimento Portland CP V , por ser mais puro, ou seja, apresentar menos adições.

## **3.2 Procedimentos**

Os procedimentos estão divididos em caracterização dos materiais, propriedades mecânicas de argamassas e testes em pastas de cimento. Na Figura 3.1 é apresentado um organograma para esquematizar o que foi realizado.

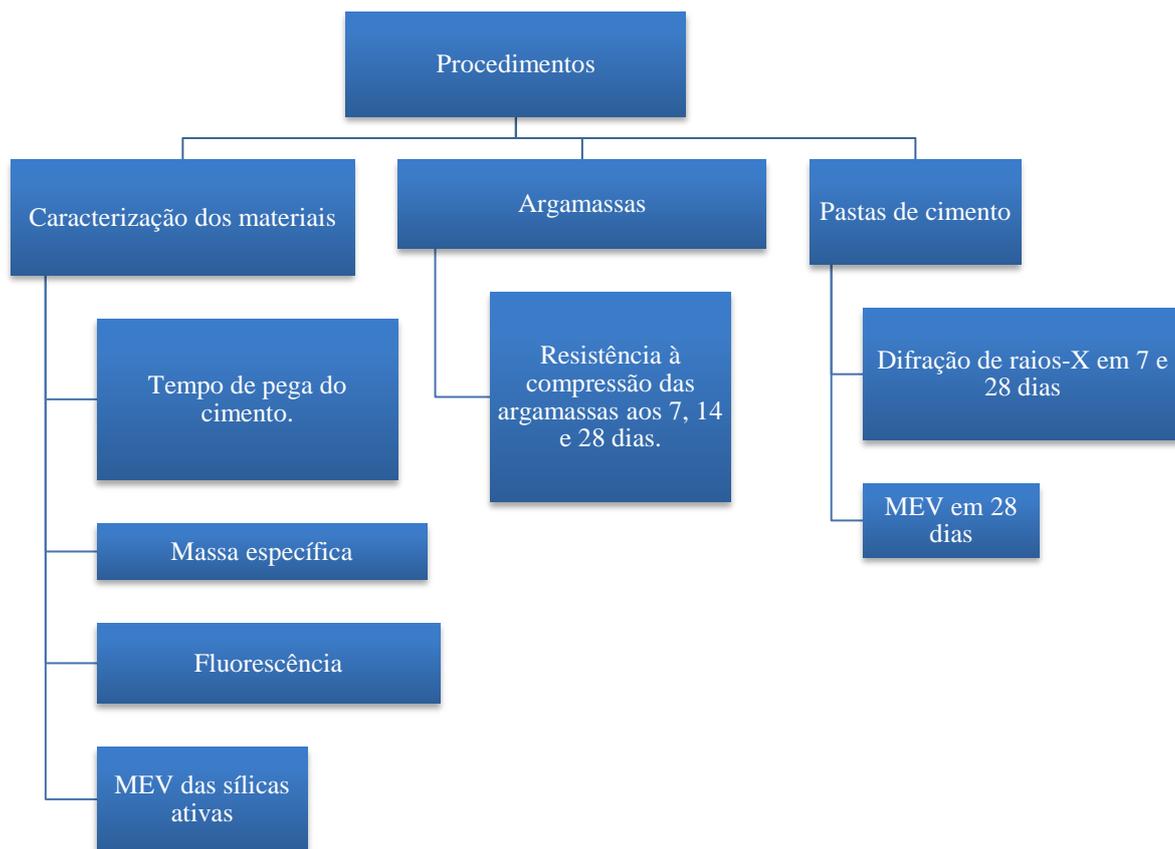


Figura 3.1 Organograma dos procedimentos que serão realizados neste projeto

### 3.2.1 Caracterização dos materiais

Foram realizados os ensaios de determinação de tempo de pega do cimento, massa específica dos cimentos e das sílicas ativas, análise de fluorescência de raios-X do cimento e das sílicas ativas e microscopia eletrônica de varredura das sílicas ativas.

#### 3.2.1.1 Ensaio de determinação de tempo de pega do cimento

Foi realizado o ensaio conforme a norma ABNT NBR NM 65. O ensaio foi realizado pelo aluno Alexandre Negredo.

A norma NBR NM 65 da ABNT (2003) estabelece que o tempo de início e fim de pega de uma pasta de cimento é o tempo entre a adição de água na mistura até o momento em que a agulha do aparelho de Vicat penetra na pasta até uma distância de  $4 \pm 1$  mm da placa base e 0,5 mm na pasta, respectivamente. Um aparelho de Vicat consiste em uma haste móvel, uma agulha, um ponteiro indicador e uma sonda, onde o conjunto dos aparelhos possui 300 gramas (ABNT NBR NM 43, 2003).

Segundo a norma NBR NM 43 (2003), a pasta a ser usada deve conter 500 gramas de cimento. A quantidade de água deve ser tal que a sonda de Tetmajer penetre a pasta até uma distância de 6 mm da placa base em 30 segundos, em um molde com 40 mm de altura. Com isso, é calculada a porcentagem de água para obter a consistência normal no cimento adotado, conforme Equação 3.1:

$$A = \frac{m_a}{m_c} \times 100 \text{ (Equação 3.1)}$$

Sendo:  $m_a$  é a massa de água em gramas e  $m_c$ , a massa de cimento.

Após os moldes serem cheios, eles são armazenados em uma câmara úmida. 30 minutos após a colocação da pasta de cimento no molde, ela é colocada sobre a placa base. A cada 10 minutos, os valores de tempo e penetração devem ser lidos no mesmo corpo de prova e anotados. Com uma interpolação, encontra-se o tempo no qual o valor estabelecido é de 4 mm da placa base, sendo então o resultado do ensaio de tempo de início de pega, com uma precisão de 5 minutos.

Então, substitui-se a agulha de Vicat usada para início de pega pela a de fim de pega. Em intervalos de 30 minutos, é medido o tempo em que a agulha penetra 0,5 mm, por interpolação, com aproximação de 15 minutos. Esse é o tempo de fim de pega.

O desvio de resultados individuais não pode ser maior que 30 minutos.

### *3.2.1.2 Determinação da massa específica*

O ensaio foi realizado no cimento e nas sílicas ativas conforme a norma ABNT NBR NM 23.

Inicialmente, o frasco deve ser cheio com um líquido que não reaja com o cimento e que tenha densidade a 15 graus Celsius maior que 0,731 g/cm<sup>3</sup>. Deve-se encher o frasco até um valor entre 0 ou 1 cm<sup>3</sup>. Com isso, tem-se a primeira leitura. A leitura deve ser calibrada para a temperatura ambiente, e a temperatura deve ser mantida constante no ensaio através da inserção do frasco em um banho de água. Após isso, uma massa conhecida de cimento deve subir o volume total da mistura para um valor entre 18 cm<sup>3</sup> e 24 cm<sup>3</sup>. O frasco deve ser movimentado levemente até o momento em que não subam mais bolhas de ar. Com isso, tem-se a segunda leitura.

A diferença entre ambas as leituras é o volume dos sólidos de cimento Portland. A razão entre a massa e esse volume é a massa específica do cimento estudado. O ensaio deve

ser feito duas vezes e não podem possuir diferença maior que 0,01 g/cm<sup>3</sup>. O resultado final é a média dos dois valores. A massa específica do cimento foi encontrada pelo aluno Alexandre Negro. A massa específica da sílica ativa densificada foi encontrada pelo aluno Matheus Ian Sousa.

#### *3.2.1.3 Análise de fluorescência de raios-X*

A espectrometria por fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que permite mostrar a concentração de elementos químicos em amostras de materiais. Ela é baseada na capacidade dos átomos de absorver energia eletromagnética e emitir uma fluorescência. Cada elemento sofre transições energéticas específicas, logo uma fluorescência característica deste elemento é emitida. É uma técnica rápida e pode quantificar diversos elementos diferentes.

Essa técnica foi utilizada para quantificar os elementos presentes no cimento e nas sílicas ativas usados. O ensaio foi realizado na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília, usando o equipamento EDX 720HS da Shimadzu. Não foi realizada perda ao fogo.

#### *3.2.1.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*

A microscopia eletrônica de varredura, ou MEV, é uma análise de caracterização microestrutural. Nessa técnica, um feixe fino de elétrons é incidido sobre o material a ser estudado. Com isso, pode-se visualizar o material com uma resolução menor que 10 nanômetros. Além disso, permite definir e quantificar elementos químicos presentes no material estudado através da análise de EDS.

Com esse método, foi analisada a microestrutura das sílicas usadas. Foram geradas imagens de elétrons secundários, para análise morfológica, e retroespalhados, para análise de EDS, em amostras não-polidas. A pressão usada foi ambiental.

### ***3.2.2 Procedimentos em argamassas***

Nas argamassas, foram realizados ensaios para avaliar a diferença entre o uso de areia normal e natural, e o efeito do uso das diferentes sílicas ativas. Para isso, foram realizados ensaios de compressão simples com argamassas com traços mostrados na Figura 3.2.

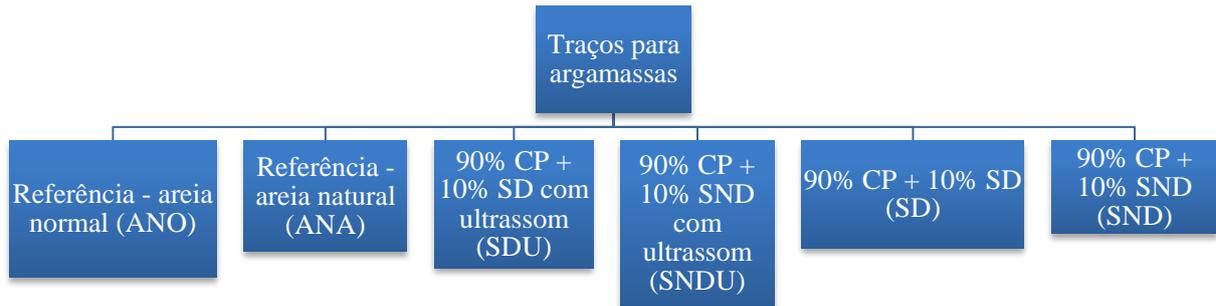


Figura 3.2 Organograma mostrando os traços que foram realizados nos ensaios de argamassas

### 3.2.2.1 Procedimento de mistura

Foram misturadas argamassas com seis traços diferentes:

- Cimento, areia normal, água;
- Cimento, areia natural, água;
- Cimento, areia natural e sílica ativa densificada;
- Cimento, areia natural e sílica ativa não-densificada;
- Cimento, areia natural e sílica ativa densificada com tratamento de ultrassom;
- Cimento, areia natural e sílica ativa não-densificada com tratamento de ultrassom.

A dispersão por ultrassom foi realizada por 30 minutos. As quantidades são observadas na tabela 3.1:

Tabela 3.1 Dosagem para as argamassas que serão realizadas. A argamassa sem sílica terá a dosagem “A” e as argamassas com sílica terão a dosagem “B”, onde a sílica ativa será densificada e não-densificada (ABNT NBR 13956-3, 2012)

Material	Massa necessária	
	g	
	Argamassa A	Argamassa B <sup>a</sup>
Cimento CP II-F-32	624,0	561,6
Sílica ativa	–	62,4
Areia normal <sup>b</sup>	1 872,0	1 872,0
Água	300,0	300,0
Aditivo superplastificante	–	<sup>c</sup>

<sup>a</sup> A sílica ativa e o cimento CP II-F-32 devem ser previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado durante 2 min aproximadamente.

<sup>b</sup> Quatro frações de (468,0 ± 0,3) g.

<sup>c</sup> Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência normal da argamassa B em ± 10 mm do obtido com a argamassa A, conforme a ABNT NBR 7215:1996, Anexo B. O aditivo deve ser adicionado à água de amassamento diretamente na cuba.

Algumas adaptações foram realizadas nas quantidades da Tabela 3.1. Não foi usado Cimento CP II-F-32, já que este não é facilmente encontrado na região. No lugar, foi usado cimento CP V, que possui menores teores de adições. A areia normal não foi sempre usada. Em seu lugar, foi usada areia natural da região, peneirada nas mesmas frações. O material retido entre as peneiras de abertura 2,4 mm e 1,2 mm é areia grossa. O material retido entre as peneiras de 1,2 mm e 0,6 mm é areia média grossa. O material retido entre as peneiras de 0,6 mm e 0,3 mm é a areia média fina. E o material retido entre as peneiras de 0,3 mm e 0,15 mm é a areia fina. Para fazer 6 corpos de prova de uma argamassa, foram usados 468 g de cada fração de areia.

Além disso, foi usado superplastificante nas argamassas de areia natural para manter a mesma consistência.

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas sempre recomendam que a areia usada nos ensaios que ela rege seja areia normal. Entretanto, como é uma areia de alto custo, neste trabalho os ensaios foram realizados com areia natural. Os resultados com a areia natural foram utilizados como referência para a análise comparativa com as demais argamassas, as quais também foram confeccionadas com a areia natural. Ressalta-se que o estudo com a areia normal é simplesmente para avaliar se existe diferença significativa nos resultados. Além disso, como os resultados que foram encontrados pelo autor não serão comparados com ensaios realizados por outros autores, essa padronização com a areia normal não se torna necessária.

A Norma ABNT NBR 13956-3 (2012) recomenda a moldagem de seis corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada dosagem. Entretanto, foram moldados quatro corpos de prova para cada dosagem por idade, de acordo com a norma ABNT NBR 7215. Como foram analisadas três idades (7, 14 e 28 dias), para cada dosagem serão moldados 12 corpos de prova. Como são 6 traços diferentes, foram analisados 72 corpos de prova de argamassa.

Como mostrado na tabela anterior, a sílica ativa e o cimento devem ser misturados por dois minutos, exceto quando houver tratamento de dispersão por ultrassom, e a areia deve estar dividida nas frações grossa, média grossa, média fina e fina. A norma ABNT NBR 7215 rege os procedimentos para a mistura da argamassa a ser estudada. Temos então o seguinte procedimento:

- Obter as quantidades de material listadas na tabela 3.1.
- Misturar previamente a sílica ativa ao cimento Portland em recipiente fechado por dois minutos, para as argamassas em que a sílica ativa não foi dispersa por ultrassom.
- Colocar água e aditivo superplastificante, se necessário (em uma quantidade previamente estabelecida) no misturador.
- Adicionar o cimento e a sílica ativa e iniciar a contagem de tempo. Caso o traço seja com uso de dispersão por ultrassom, a sílica ativa não é misturada com o cimento, e sim com a água. Neste caso, a mistura de sílica ativa e água passa pela dispersão por 30 minutos e é colocada no misturador antes da adição do cimento. Antes de ser colocado no misturador, o material foi pesado para avaliar se houve perda de água.
- Misturar em velocidade lenta por 30 segundos.
- Nos próximos 30 segundos, adicionar gradualmente as quatro frações de areia previamente misturadas.
- Após a adição de areia, mudar a velocidade para alta e misturar por mais 30 segundos.
- Desligar o misturador por 1 minuto e meio. Nos primeiros 15 segundos desse tempo em repouso, deve-se raspar o material que ficou aderido nas paredes da cuba.
- Após isso, ligar o misturador em velocidade alta por mais 1 minuto.
- Adicionar quatro camadas de argamassa em cada molde, e para cada camada, aplicar 30 golpes com o soquete.
- Os moldes com argamassa devem ficar em câmara úmida por um período de tempo entre 20h e 24h.
- A argamassa é então retirada dos moldes, mas deve permanecer em solução de água e cal até o momento do ensaio.

A dispersão por ultrassom foi realizada com água e sílica ativa, no Laboratório de Análise de Águas da Universidade de Brasília. A dispersão da sílica ativa densificada foi feita colocando metade da quantidade de água necessária (150 g) e a sílica ativa em um béquer. A mistura foi dispersa em bacia de ultrassom por 30 minutos. A outra metade de quantidade de água foi usada para misturar superplastificante e enxaguar o béquer, de modo que toda a sílica ativa fosse usada na argamassa. A dispersão da sílica ativa não-densificada, em função da sua área superficial, foi feita colocando  $\frac{3}{4}$  da quantidade de água necessária (225 g) com a sílica no dispersor, por 30 minutos. O  $\frac{1}{4}$  da quantidade de água, restante, foi usado para misturar superplastificante e enxaguar o béquer. O dispersor usado é da marca Unique, modelo USC 5000, com frequência de 40 kHz e potência de 200 W.

As argamassas com sílica devem possuir índice de consistência de  $150 \pm 10$  mm.

A argamassa de areia normal apresentou consistência adequada, possuindo espalhamento de 149,26 mm. Esse valor foi usado como referência para o ajuste de quantidade de superplastificante. A argamassa de areia natural inicialmente possuiu consistência de “farofa”, como observado na Figura 3.3, necessitando do uso de superplastificante. Com isso, obteve-se então a consistência mostrada na Figura 3.4. Com os ajustes de quantidade de superplastificante, o valor usado foi de 0,3% com relação à massa de cimento, ou 1,87 g. O valor de espalhamento então foi de 147,84 mm, dentro do intervalo de  $\pm 10$  mm do valor de referência.



Figura 3.3 Consistência da argamassa com areia natural e sem o uso de superplastificante.



Figura 3.4 Argamassa de areia natural com uso de superplastificante

Ambas as argamassas com sílica ativa demandaram o uso de 1,87 g de superplastificante. A argamassa com sílica ativa densificada apresentou espalhamento de 147,93 mm e a argamassa com sílica ativa não-densificada apresentou espalhamento de 154,12 mm.

As argamassas com sílica ativa dispersa em ultrassom não passaram por observação de espalhamento. O valor usado de superplastificante foi de 1,87 g . A consistência observada foi visualmente igual à das argamassas que não tiveram sílicas dispersas em ultrassom, ou seja, obteve-se trabalhabilidade adequada.

As argamassas foram rompidas à compressão simples nas idades de 7, 14 e 28 dias. Para cada idade, foram montados quatro corpos de prova.

### *3.2.2.2 Resistência à compressão simples*

As argamassas foram rompidas à compressão simples nas idades de 7, 14 e 28 dias. Para cada idade, foram montados quatro corpos de prova. Tem-se o procedimento a seguir:

- Nas idades de 7, 14 e 28 dias, os corpos de prova são retirados da solução de água e cal e então retificados em uma retífica mecânica.
- Carregar o corpo de prova até a sua ruptura. O valor da ruptura é dividido pela área da face do corpo de prova sobre a qual o carregamento foi aplicado.
- Calcular a média da resistência dos quatro moldes, arredondada para o décimo mais próximo.

- Calcular o desvio conforme a Norma NBR 7215 (1996). Encontrar o valor que mais se destoa da média e subtrair a média deste, e dividir esse valor por 100, encontrando a porcentagem do desvio relativo máximo da série. Esse valor não pode ser superior a 6%.

### 3.2.2.3 Cálculo do índice de desempenho

O índice de desempenho é um valor que mostra a eficiência da sílica ativa. Ele é apresentado na Norma NBR 13956-3 (2012). Ele é calculado dividindo a resistência à compressão das argamassas com sílica ativa pela resistência à compressão das argamassas sem sílica ativa, e é fornecido em porcentagem.

### 3.2.3 Procedimentos em pasta de cimento

Em pastas de cimento, foram realizados testes de difração de raios-X, e análise de microscopia eletrônica de varredura. Para isso, foi necessário paralisar a hidratação nas idades de 7 e 28 dias. Os traços que foram usados para os ensaios em pastas de cimento são mostrados na Figura 3.5.

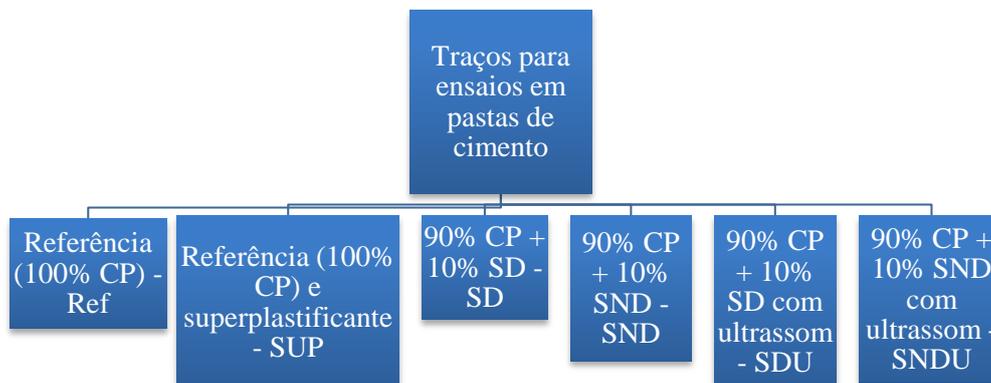


Figura 3.5 Organograma mostrando os traços que foram usados para os ensaios em pastas de cimento.

As pastas foram feitas usando a mesma proporção de materiais que as argamassas, retirando apenas a areia. Os materiais foram batidos na argamassadeira por 1 minuto em

velocidade baixa e mais 1 minuto em velocidade alta. O procedimento de dispersão por ultrassom foi idêntico ao realizado com as sílicas ativas das argamassas.

Foram feitos 2 corpos de prova para cada traço, um para ser ensaiado aos 7 dias e o outro para 28 dias de idade. Entretanto, a sua consistência ficou muito fluida, e corpos de prova comuns não puderam ser moldados. Em vez disso, a pasta fluida foi colocada em copos de plástico. O procedimento de cura foi idêntico ao das argamassas.

Para a realização dos ensaios microestruturais, foi necessário paralisar a hidratação das pastas de cimento Portland. Segundo Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), uma boa maneira de paralisar a hidratação seria imergir as amostras em álcool isopropanol por um tempo, que pode ser de minutos a dias, dependendo do tamanho da amostra. Após isso, as amostras seriam imersas em éter dietil, já que é uma substância muito volátil e permitiria uma secagem rápida. Entretanto, não existe uma maneira exata de paralisar a hidratação do cimento. Cada procedimento tem prós e contras. Devido à não-disponibilidade de materiais, foi realizado um procedimento mais simples, de imersão em solvente (álcool etílico) por 1 dia seguido de secagem a vácuo de alguns minutos.

Quando as pastas atingiam sua idade de estudo, 7 ou 28 dias, elas foram retiradas da câmara úmida e quebradas em pequenos pedaços. Estes pedaços foram colocados em um recipiente de vidro e cobertos com álcool etílico, Figura 3.6. . Após 1 dia imersos em álcool, os pedaços de pasta foram inseridos em um recipiente de vidro e foi realizado vácuo por 10 minutos. O vácuo foi realizado compressão manométrica de aproximadamente -500 mmHg, conforme mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.6 Pastas de cimento imersas em álcool etílico.



Figura 3.7 Pasta de cimento passando um tempo no “vácuo”.

Após a paralização da hidratação, os pedaços de pasta de cimento foram envoltos em papel filme e mantidos separados em uma caixa com sílica gel, de modo a eliminar a umidade no recipiente para não haver a reidratação da pasta. O ideal seria colocar as amostras em um dessecador com sílica gel, mas não havia a disponibilidade do recipiente. Ressalta-se que as amostras ficaram pouco tempo armazenadas nesse recipiente até a realização do ensaio, o que não comprometeu a paralização da hidratação. As amostras foram mantidas no recipiente até a data dos ensaios, conforme Figura 3.8.



Figura 3.8 Pastas de cimento em uma caixa com sílica gel

### 3.2.3.1 Difração de Raios-X

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), a difração de raios-X, ou XRD é uma boa técnica que oferece uma análise mineralógica de materiais cristalinos. Quando um mineral cristalino é atingido por raios-X com um determinado comprimento de onda, as camadas de átomos do mineral difratam esses raios, produzindo um padrão de picos que é uma característica desse mineral.

A escala horizontal mostra o ângulo de difração, que mostra o espaçamento da rede cristalina e a escala vertical (altura do pico) é proporcional à quantidade de determinado mineral na composição do material estudado. (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Essa análise foi usada para identificar os minerais existentes nas pastas de cimento hidratado e foi realizada no Instituto de Geologia da Universidade de Brasília.

O ensaio foi realizado no difratômetro BRUKER D8 Advance, com voltagem de 40 kV e amperagem de 40 mA, em sistema  $\theta/2\theta$ , com velocidade de varredura de  $1,2^\circ/\text{minuto}$ , de  $5^\circ$  a  $60^\circ$  em  $2\theta$ . A fonte de energia foi um filamento de tungstênio (cátodo) e o tubo de raios-X foi de cobre (ânodo), cujos comprimentos de onda são  $K\alpha$  1,5406 Å e  $K\beta$  1,3922 Å.

### 3.2.3.2 Microscopia eletrônica de varredura

Conforme o item 3.2.2.5, a microscopia eletrônica de varredura foi usada para avaliar a microestrutura das pastas de cimento hidratadas em 28 dias de idade. Foi usada microscopia de elétrons secundários e retroespalhados, com análises EDS pontuais e gerais, em amostras não-polidas. Também foi realizada microscopia em amostras de sílica ativa densificada e não-densificada. Nas pastas de cimento, foi usado alto vácuo.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do cimento Portland

Os resultados de caracterização do cimento Portland estão expressos na Tabela 4.1. As características químicas foram obtidas através de ensaio de fluorescência de raios-X, realizado pelo aluno Alexandre Negredo. O tempo de pega e a massa específica foram obtidos através dos ensaios para tempo de pega (NM 65) e massa específica (NM 23) da ABNT, também realizados por ele.

Tabela 4.1 Caracterização do cimento Portland

PROPRIEDADES		RESULTADOS
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3.06
Tempos de pega	Início de pega (min)	130
	Fim de pega (min)	210
Composição química	Perda ao fogo (%)	
	<i>SiO<sub>2</sub></i> (%)	19.87
	<i>CaO</i> (%)	65.83
	<i>MgO</i> (%)	1.98
	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> (%)	3.68
	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> (%)	3.21
	<i>K<sub>2</sub>O</i> (%)	1.25
	<i>SO<sub>3</sub></i> (%)	4.11
	<i>C<sub>3</sub>A</i> teórico	4.31
Outros (%)	0.07	

### 4.2 Caracterização das sílicas ativas

Os resultados da caracterização das sílicas ativas estão mostrados na Tabela 4.2. As características químicas foram obtidas através de ensaio de fluorescência de raios-X. A massa específica da sílica ativa densificada foi obtida através da Norma NM 23 (2001) e a massa específica da sílica ativa não-densificada é um valor de referência.

Tabela 4.2 Caracterização das sílicas ativas

	Elementos	Sílica ativa densificada	Sílica ativa não-densificada
		Porcentagem	Porcentagem
Características químicas	Si	91,701	91,409
	K	3,379	2,13
	Ca	2,565	3,617
	Al	1,582	2,019
	Fe	0,361	0,459
	Mn	0,199	0,110
	S	0,130	0,205
	Sr	0,014	0,012
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,04	2,22

Os valores de Si estão relacionados à quantidade de SiO<sub>2</sub>. Eles são maiores que o valor mínimo de 85% estabelecido pela norma ABNT NBR 13956-1 de 2012.

#### 4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura das sílicas ativas

Foram realizadas imagens de microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários, mostrando a morfologia das sílicas ativas, como mostrado nas Figuras 4.1 a 4.4.

As imagens da sílica ativa densificada são mostradas na Figura 4.1 e 4.2.

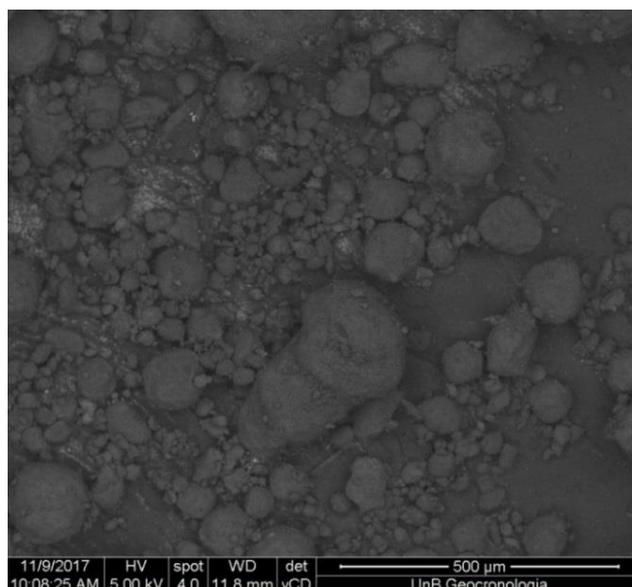


Figura 4.1 Sílica ativa densificada com 500 micrômetros de escala

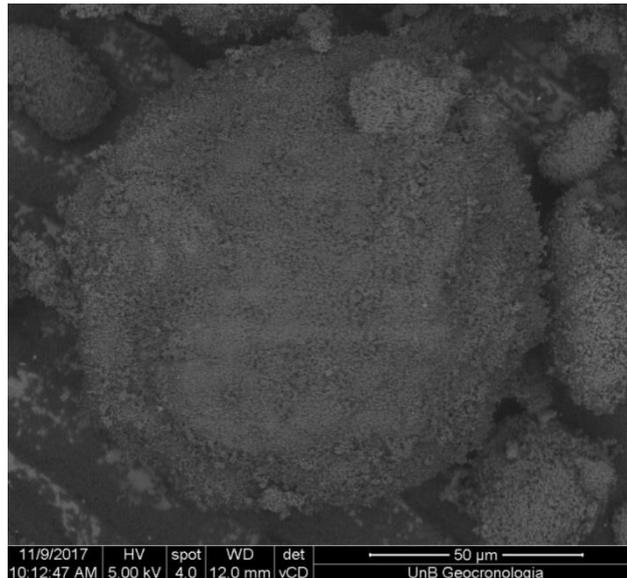


Figura 4.2 Sílica ativa densificada com 50 micrômetros de escala

Na figura 4.1, pode-se observar os aglomerados da sílica ativa densificada. Quando a aproximação do microscópio é maior, como pode ser visto na figura 4.2, nota-se que os aglomerados são formados por várias partículas menores de sílica.

Nas figuras 4.3 e 4.4 são apresentadas as imagens da sílica ativa não-densificada

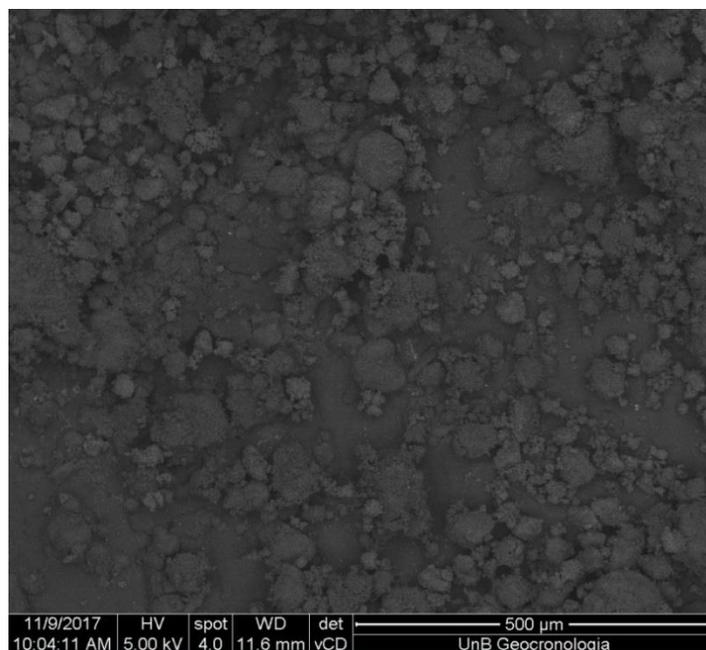


Figura 4.3 Sílica ativa não-densificada, com escala de 500 micrômetros

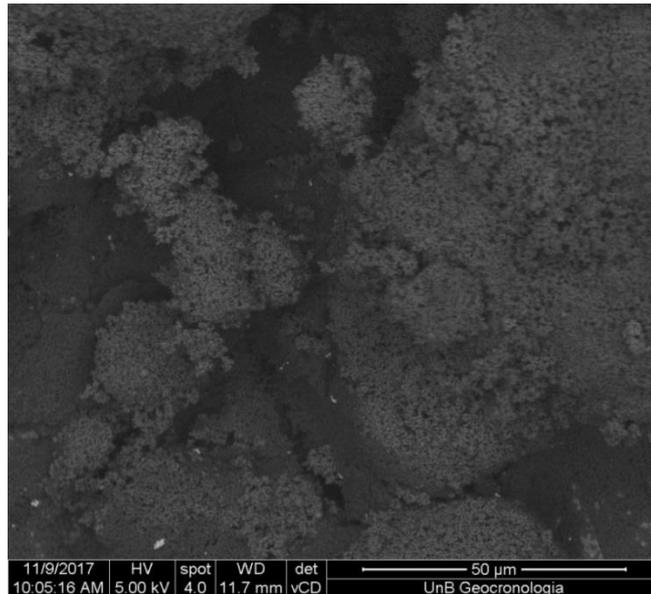


Figura 4.4 Sílica ativa não-densificada com escala de 50 micrômetros

Nas Figuras 4.3 e 4.4, nota-se que a sílica ativa não-densificada também possui aglomerados de partículas menores. A diferença com os aglomerados das partículas de sílica ativa não-densificada é que, neste caso, os aglomerados se formam naturalmente devido à umidade e tensões superficiais e possuem uma força de atração muito menor que das sílicas ativas densificadas, podendo ser facilmente desfeitos.

### 4.3 Argamassas no estado fresco

Os valores de espalhamento das argamassas, já mostrados anteriormente, estão expostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Espalhamento das argamassas

Índice de consistência das argamassas				
Argamassa	ANO	ANA	SD	SND
Espalhamento (mm)	149.26	147.84	147.93	154.12

ANO, ANA, SD E SND simbolizam as argamassas com areia normal sem sílica ativa, areia natural sem sílica ativa, sílica ativa densificada e sílica ativa não-densificada, respectivamente. Todas as argamassas com sílica ativa não-densificada apresentaram consistência mais fluida que as argamassas com sílica ativa densificada, como pode ser observado na tabela 4.3, já que as argamassas SD e SND possuíam a mesma quantidade de superplastificante.

Também foi observado que o manuseio da sílica densificada é melhor que o da sílica não-densificada, devido à sua maior massa específica aparente.

#### 4.4 Resultados de resistência à compressão simples das argamassas

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa são apresentados na Tabela A.1 (em anexo).

A norma ABNT NBR 7215 estabelece que os desvios relativos não podem ser maiores que 6%. Na Tabela A.1 (em anexo), os valores com mais de 6% de desvio relativo estão destacados em vermelho. Quando isso acontece, o valor com maior desvio deve ser descartado. Uma nova média deve ser feita e os desvios relativos devem ser calculados novamente. Se, mesmo com a nova média, algum desvio for maior que 6%, a argamassa deve ser refeita. A tabela A.2 (em anexo) apresenta as novas médias de resistência à compressão, retirando os desvios maiores que 6%. No caso das argamassas de areia normal (ANO) de 28 dias, de sílica densificada (SD) de 14 dias, de sílica não-densificada de 28 dias (SND) e de sílica ativa não-densificada dispersa por ultrassom (SNDU) de 28 dias foi retirado um dos valores. Entretanto, após a nova média, outro valor possuía um desvio maior que 6%. Segundo a norma, essas argamassas deveriam ser refeitas. Entretanto, por motivos de tempo insuficiente, o outro valor destoante foi retirado, sendo criada uma nova média, de dois valores

As células em vermelho representam valores que possuíam desvios maiores que 6%. Esses valores foram retirados. Na Tabela 4.4 são mostrados os valores médios a serem considerados.

Tabela 4.4 Valores médios de resistência à compressão a serem considerados neste projeto, valores emMPa.

Dias	ANO	ANA	SD	SND	SDU	SNDU
7	32,0	44,0	47,5	47,8	43,6	49,6
14	38,9	43,6	52,8	54,7	56,3	54,4
28	40,9	51,1	45,0	48,3	37,6	49,3

Na Tabela 4.4, ANO simboliza as argamassas com areia normal, ANA argamassa com areia natural, SD argamassa com sílica densificada, SND argamassa com sílica não-densificada, SDU argamassa com sílica densificada dispersa por ultrassom e SNDU argamassa com sílica não-densificada dispersa por ultrassom.

Com isso, pode-se traçar o gráfico com os valores de resistência média à compressão simples na Figura 4.5. Neste gráfico, foram colocadas as argamassas com areia natural e superplastificante, para fins de análise comparativa.

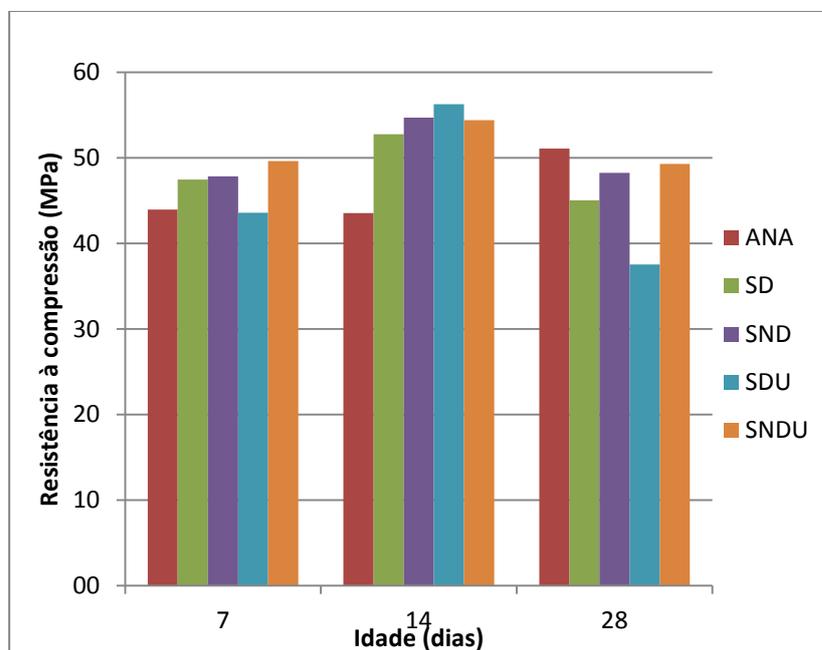


Figura 4.5 Resistência à compressão simples em 7, 14 e 28 dias das diferentes argamassas.

Na Figura 4.5, pode-se observar que em 7 dias, as argamassas SD, SND e SNDU possuíram resistências maiores que as argamassas ANA e ANO, o que é esperado. A argamassa SDU apresentou uma resistência igual a ANA.

Em 14 dias, as argamassas com sílica ativa apresentaram resistência maior que a ANA, o que é esperado. Em 28 dias, as argamassas com sílica ativa apresentaram resistência menor que a ANA, o que não é esperado.

A maior resistência foi alcançada pelas argamassas de sílica densificada dispersa por ultrassom, aos 14 dias. Algumas resistências caíram com o passar do tempo, o que não é esperado, e deveriam ser refeitas.

A argamassa ANA teve uma leve redução da resistência nas idades de 7 para 14 dias. Entretanto, como ambos os valores são próximos, considerou-se que a resistência manteve-se constante nesse período e que essa pequena variação é inerente ao ensaio.

As argamassas SD, SND e SNDU apresentaram queda na resistência média de 14 a 28 dias. Essa variação nos resultados pode ser inerente aos procedimentos laboratoriais ou algum efeito de retração do material. Ressalta-se a necessidade de repetir esses ensaios.

A queda mais brusca foi da argamassa SDU, cuja resistência foi de 56,3 MPa para 37,6 MPa, dos 14 aos 28 dias. Seria necessário refazer as argamassas que apresentaram queda de resistência, especialmente a de sílica densificada dispersa por ultrassom. Essa argamassa apresentou o maior resultado de resistência aos 14 dias, validando uma maior eficiência do material e do tratamento com ultrassom. Há a possibilidade de a alta reatividade da sílica ativa apresentada dos 7 aos 14 dias estar ligada à perda de resistência dos 14 aos 28 dias. A queda na resistência deve ser estudada e analisada em novos ensaios.

Os índices de desempenho das argamassas com sílica ativa são mostrados na Tabela 4.5. A argamassa usada como referência foi a argamassa de areia natural, ANA.

Tabela 4.5 Índice de desempenho das argamassas com sílica ativa

Índice de desempenho (%)				
Dias	SD	SND	SDU	SNDU
7	108,00	108,81	99,15	112,89
14	121,15	125,56	129,16	124,93
28	88,16	94,50	73,54	96,54

Com exceção da argamassa SDU de 28 dias, todas as outras argamassas apresentaram índice de desempenho próximo ou superior a 100%. Isso mostra que, mesmo retirando uma quantidade de cimento Portland, a inclusão da sílica ativa compensa a resistência que seria perdida, ou até supera a resistência das argamassas com maior quantidade de cimento. Com isso, pode-se concluir que a sílica ativa aumenta a resistência das argamassas. A argamassa SDU de 28 dias deve ser refeita. Além da argamassa SDU, as outras argamassas com sílica ativa também apresentaram uma queda na resistência dos 14 aos 28 dias. Isso pode ocorrer devido à fissuração, a problemas na hora da retificação e rompimento dos corpos de prova, ou até a uma possível falta de homogeneidade da argamassa. Recomenda-se então que o tempo de mistura das argamassas com sílica ativa seja maior, de pelo menos 5 minutos.

Na Figura 4.6, é mostrada a comparação da resistência à compressão das argamassas de areia normal e areia natural, sem sílica ativa.

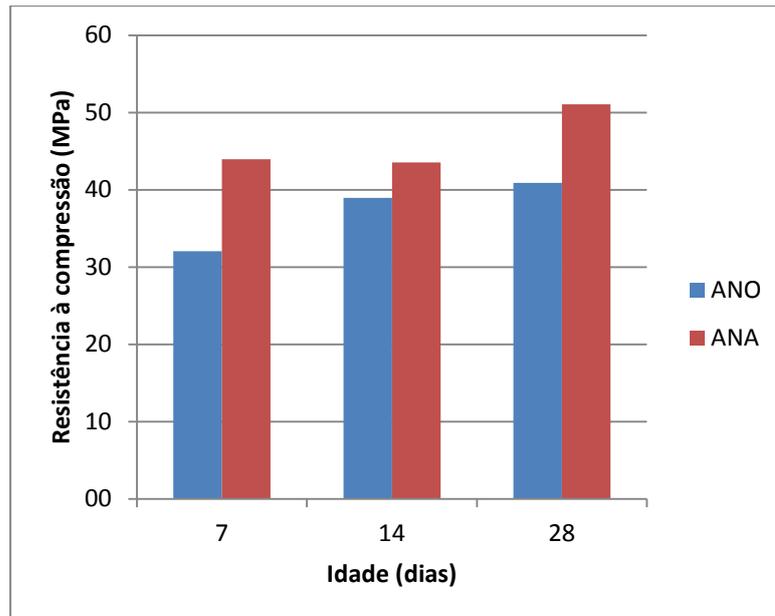


Figura 4.6 Comparação entre argamassas de areia normal e natural

A resistência das argamassas de areia natural foi sempre maior que a das argamassas de areia normal . Como falado anteriormente, as argamassas de areia natural possuíam superplastificante. Isso provavelmente influenciou na homogeneidade da argamassa e aumentou a superfície disponível para hidratação do cimento, aumentando a resistência. Além disso, o tipo de areia também pode ter influenciado esses resultados.

Na Figura 4.7, podemos comparar as resistências das sílicas ativas densificada e não-densificada.

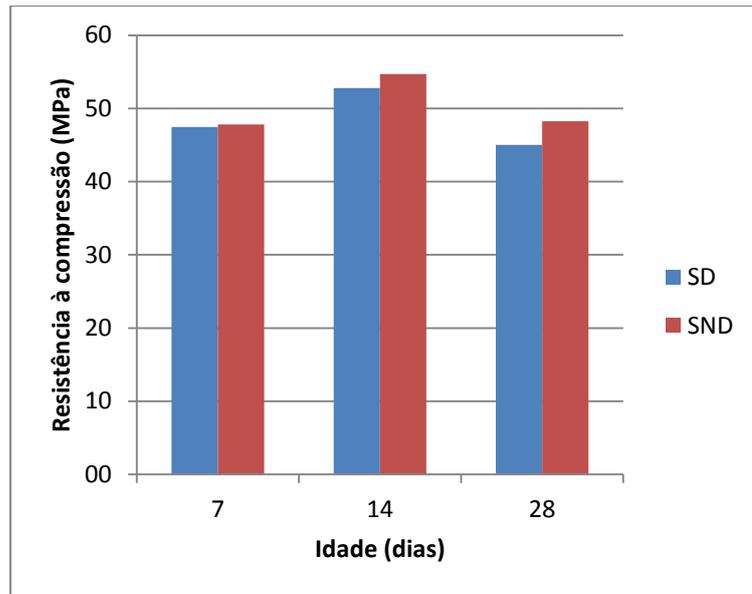


Figura 4.7 Comparação entre argamassas de sílica ativa densificada e não-densificada

Observa-se que a maior diferença foi em 28 dias, de 3,3 MPa. Em todas as idades, SND apresentou maior resistência que SD. Em 7 dias, SND teve uma resistência 0,6% maior que a de SD. Em 14 dias, esse valor foi 3,6% maior. Em 28 dias, foi 7,3%. Os valores de resistência, em todas as idades, são muito próximos.

Na figura 4.8, temos os resultados das argamassas SD e SDU.

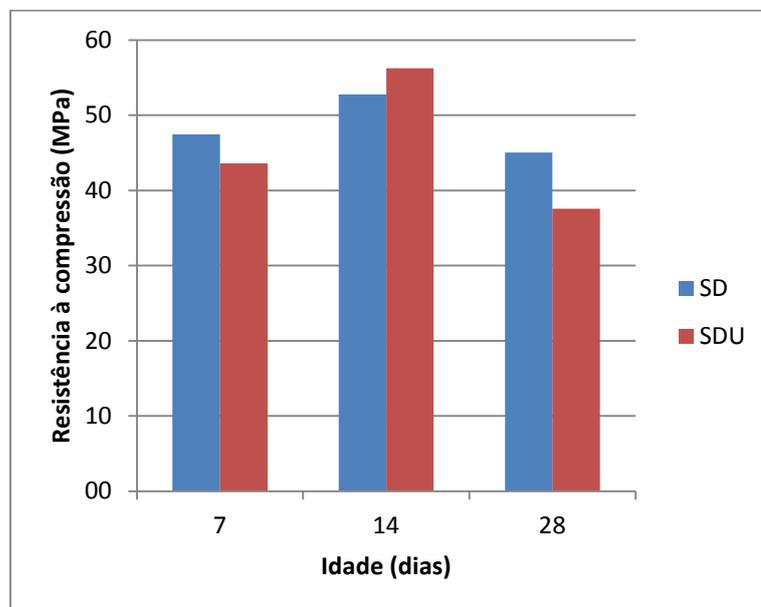


Figura 4.8 Comparação entre argamassas de sílica ativa densificada com e sem dispersão por ultrassom

Em 7 dias, SD possui uma resistência 8,9% maior. Em 14 dias, SDU apresenta uma resistência 6,6% maior. Em 28 dias, SD apresentou resultados muito maiores de resistência

que SDU, em torno de 20% maiores, o que pode ser explicado com os problemas obtidos nos resultados de 28 dias das argamassas com sílica densificada ultrassonicada. Deve ser estudada a possibilidade de mistura não-homogênea ou de problemas na hora da retificação e rompimento dos corpos de prova. Os resultados são inconclusivos, e devem ser refeitos.

Na Figura 4.9, são comparadas as resistências das argamassas com sílica ativa não-densificada, com e sem dispersão por ultrassom.

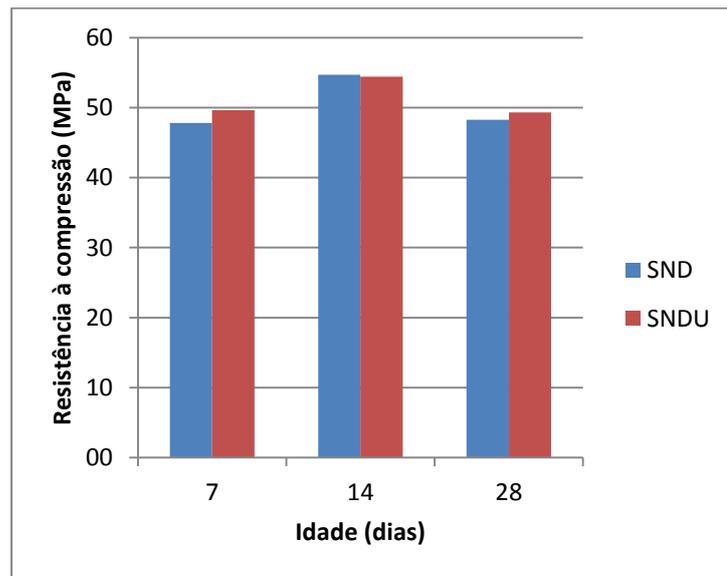


Figura 4.9 Comparação entre argamassas de sílica ativa não-densificada com e sem dispersão por ultrassom

Pode-se observar na Figura 4.9 que, em todas as idades, a dispersão por ultrassom não gerou muitas diferenças na resistência mecânica das argamassas. Em 7 dias, SNDU apresentou resistência 3,8% maior que SND. Em 14 dias, SND apresentou uma resistência 0,6% maior. Em 28 dias, SNDU apresentou resistência 2,1% maior. Todos os resultados foram muito próximos.

Na Figura 4.10, pode-se comparar as resistências das argamassas com sílicas ativas densificada e não-densificada, ambas após processo de dispersão por ultrassom.

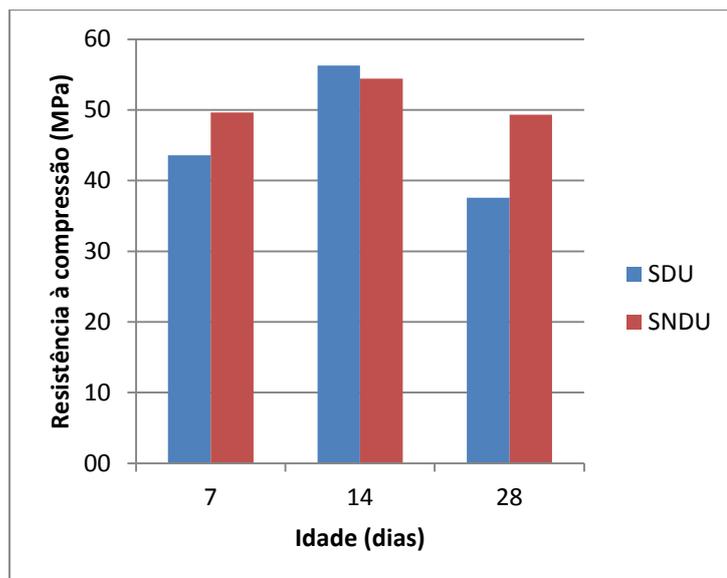


Figura 4.10 Comparação entre argamassas de sílica ativa não-densificada e densificada com dispersão por ultrassom

Em 7 dias, SNDU apresentou resistência 13,8% maior que a resistência de SDU. Em 14 dias, SDU apresentou resistência 3,5% maior. Em 28 dias, SNDU apresentou resistência 31,1% maior, mas isso ocorreu devido ao resultado baixo de SDU em 28 dias. Deve ser investigada a homogeneidade das argamassas e deve ser verificado se houve problemas na execução da retificação e rompimento dos corpos de prova. Os dados são inconclusivos, e devem ser refeitos.

#### **4.5 Pastas de cimento**

A seguir, estão mostrados os resultados obtidos através das pastas de cimento, que seguiram as mesmas proporções de materiais que as argamassas.

##### **4.5.1 Difração de raios-X nas pastas de cimento**

Foi realizado ensaio de difração de raios-X em pastas de cimento com 7 e 28 dias. Os resultados das diferentes pastas estudadas, nas idades de 7 e 28 dias, são apresentados nas figuras 4.11 e 4.12 respectivamente. Os traços das pastas são mostrados na Figura 3.5. As fases cristalinas foram identificadas em todos os traços. Foram observados hidróxido de cálcio, C-S-H, carbonato de cálcio e etringita.

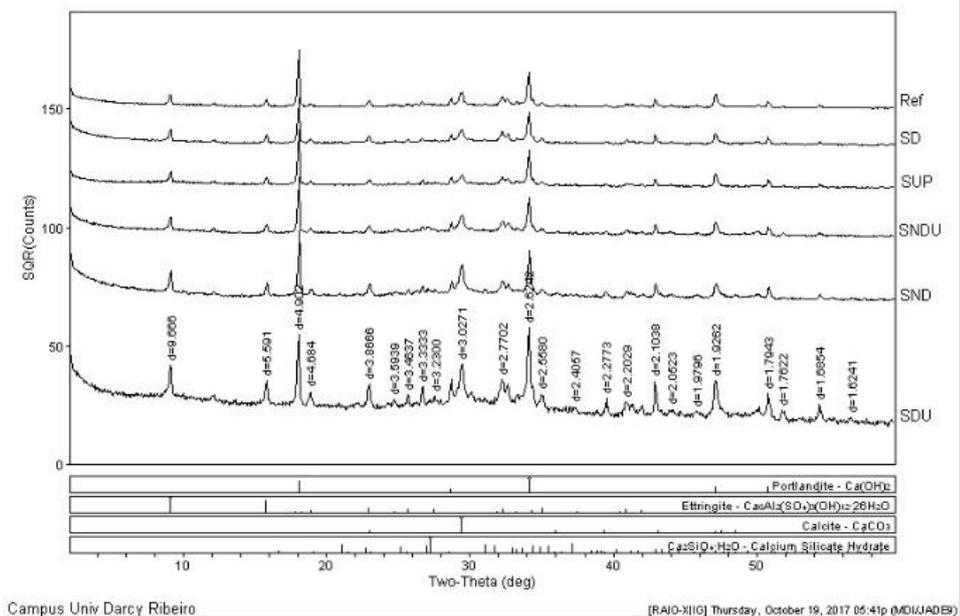


Figura 4.11 Resultados de DRX nas pastas de 7 dias.

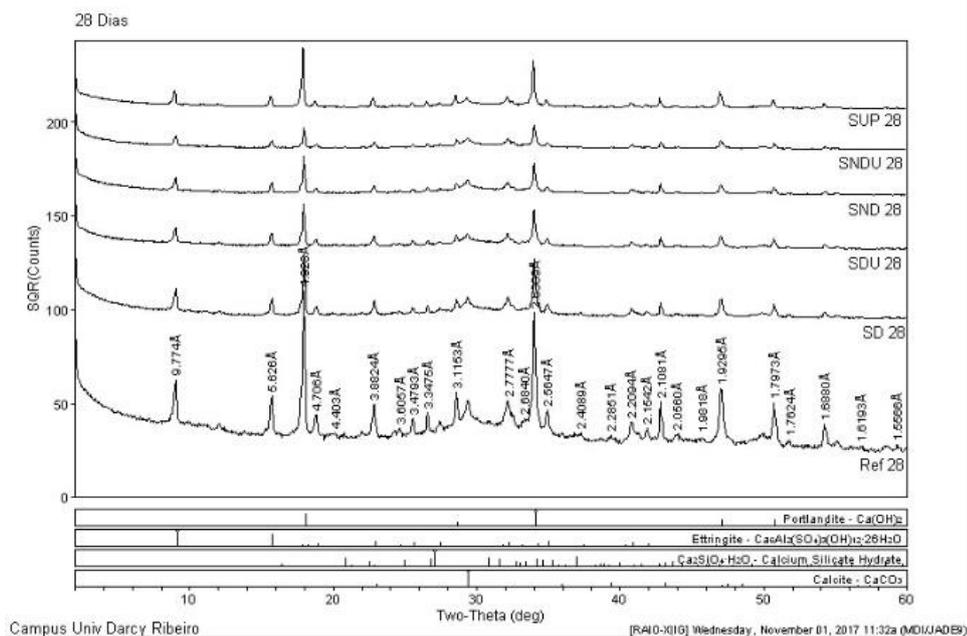


Figura 4.12 Resultados de DRX nas pastas de 28 dias.

O principal mineral observado foi o hidróxido de cálcio, CH. Sua quantidade depende diretamente da reação de hidratação. Através da sua quantificação, pode-se avaliar a evolução da hidratação. O pico está localizado em  $2\theta = 18,0^\circ$  com  $d = 4,9\text{\AA}$ . Com isso, tem-se a Tabela 4.6. REF se refere à pasta simples, sem superplastificante. SUP se refere à pasta com superplastificante. SD se refere à pasta com sílica densificada. SND se refere à pasta com

sílica não-densificada. SDU e SNDU se referem às pastas com sílica densificada e não-densificada com dispersão por ultrassom, respectivamente. Nas Figuras de 4.13 a 4.16 são apresentados os resultados para as pastas Ref e SUP em 7 e 28 dias.

Tabela 4.6 Intensidade do pico de CH com  $d=4,9 \text{ \AA}$

TRAÇO	INTENSIDADE CH ( $d=4,9 \text{ \AA}$ )	
	7 DIAS	28 DIAS
REF	7677	10839
SUP	5836	13901
SD	5352	7154
SDU	2356	6295
SND	4524	6550
SNDU	5087	3927

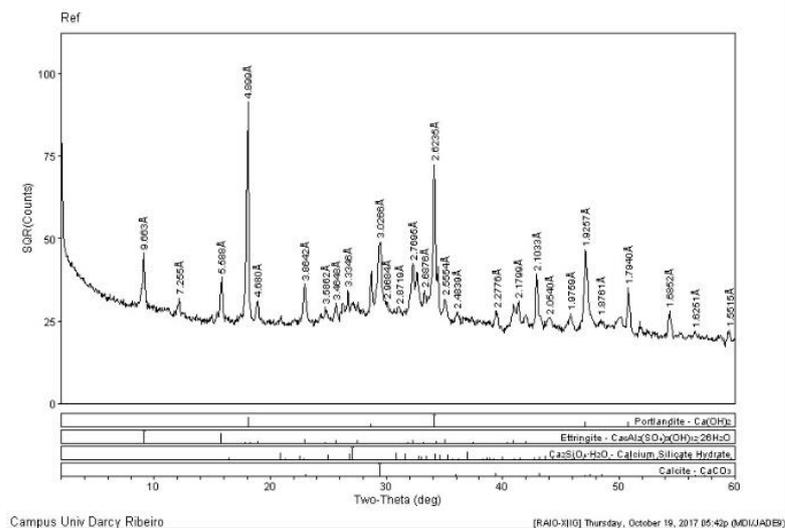


Figura 4.13 DRX da pasta Ref com 7 dias de idade.

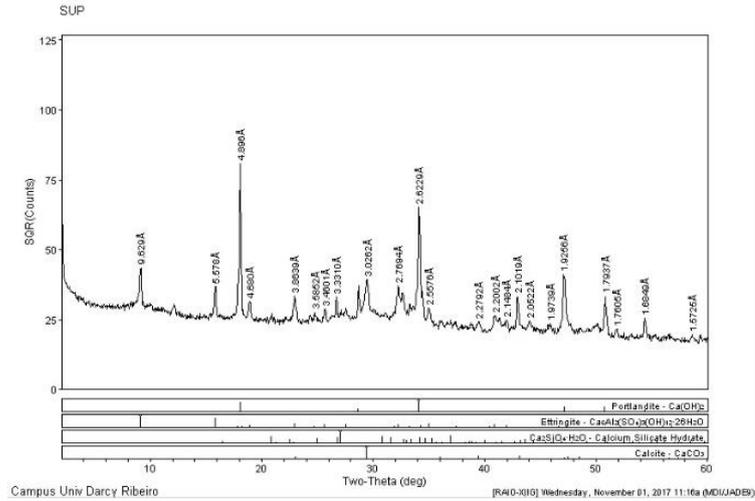


Figura 4.14 DRX da pasta SUP com 7 dias de idade

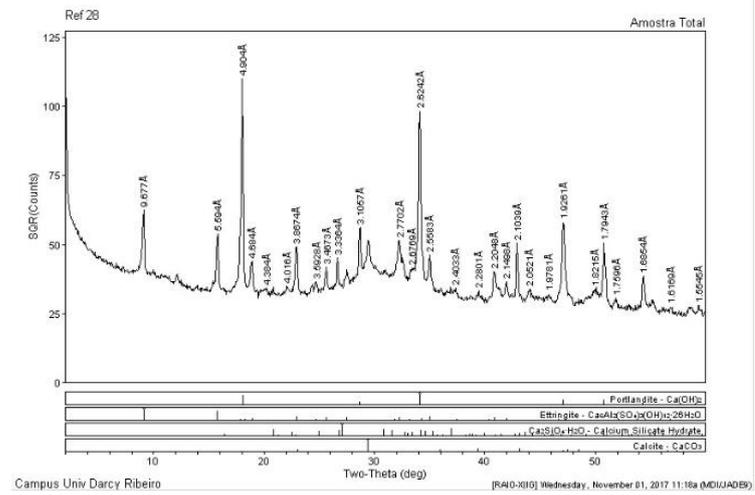


Figura 4.15 DRX da pasta Ref com 28 dias de idade

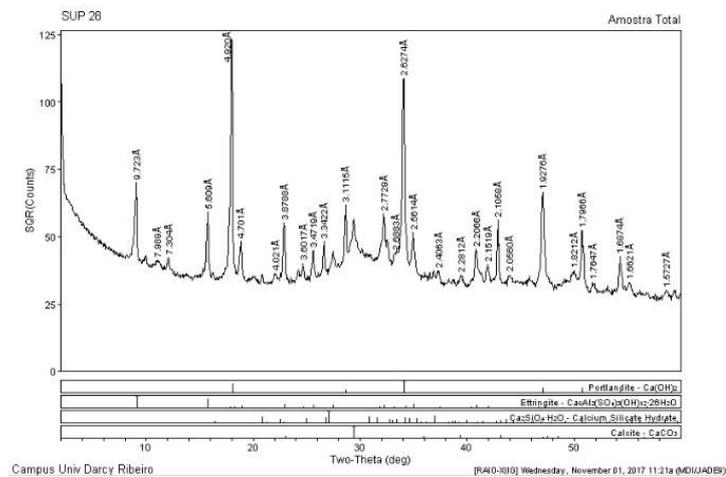


Figura 4.16 DRX da pasta SUP com 28 dias de idade

Com 7 dias de idade, a pasta SUP apresentou um menor valor de pico de CH, o que sugere que o CH ainda em formação foi consumido para formar mais produtos de hidratação, C-S-H. Isso explica o fato de a argamassa com superplastificante possuir maior resistência que a argamassa sem superplastificante, em 7 dias de idade.

Em 28 dias, a pasta SUP apresenta mais CH, mostrando que o superplastificante amplifica a hidratação do cimento, gerando mais produtos de hidratação, como o CH. Com mais produtos hidratados, o resultado foi de uma resistência à compressão maior com a adição de aditivo superplastificante.

Nas Figuras 4.17 a 4.20 são apresentados os resultados de DRX das pastas SD e SND em 7 e 28 dias.

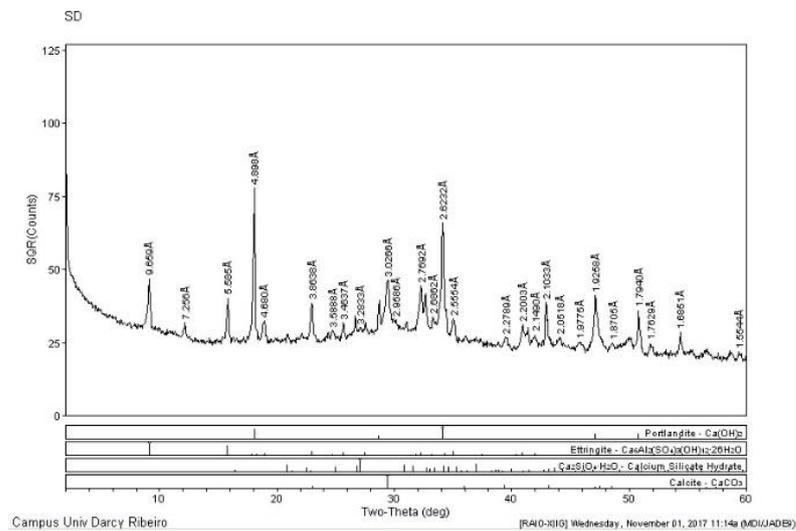


Figura 4.17 DRX em pasta SD com 7 dias

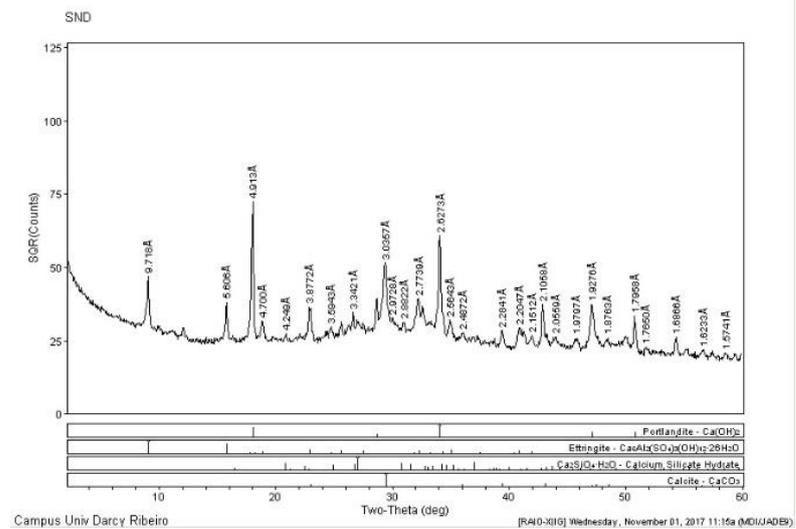


Figura 4.18 DRX em pasta SND com 7 dias

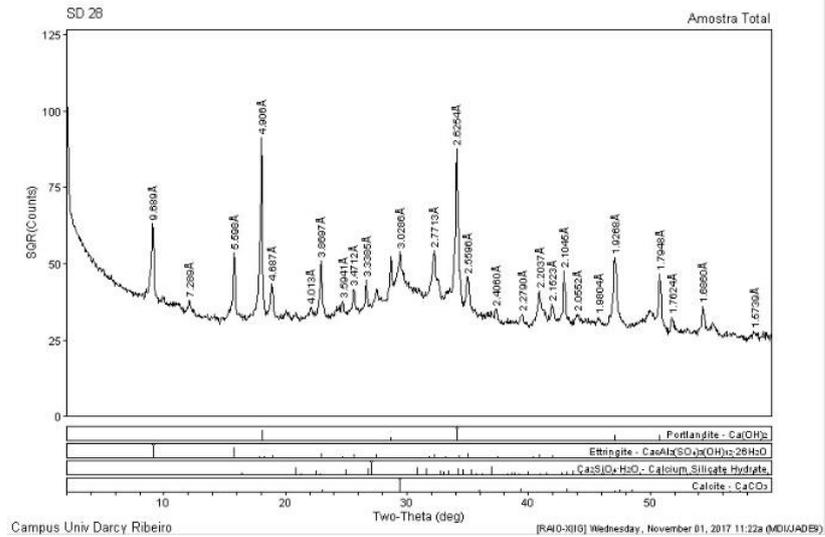


Figura 4.19 DRX da pasta SD de 28 dias

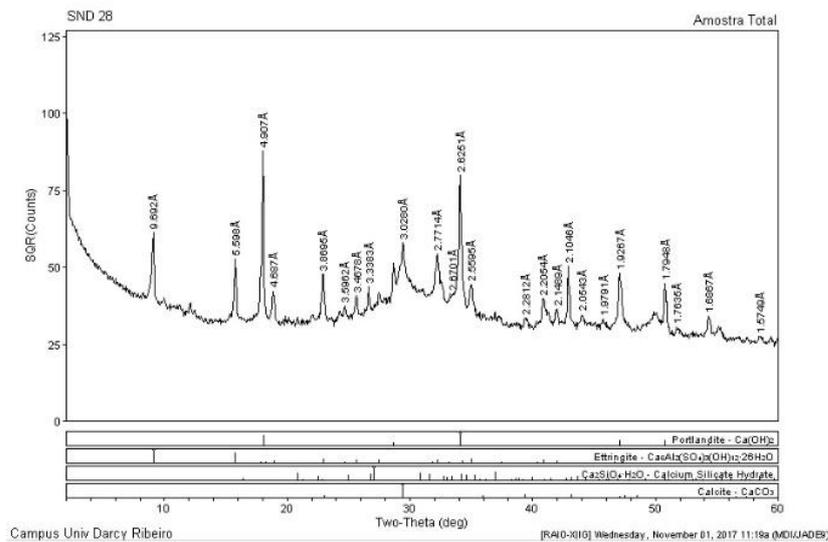


Figura 4.20 DRX da pasta SND de 28 dias

Os valores de pico do CH nos dois tipos de sílica são bem próximos, como pode se observar nas Figuras 4.17 a 4.20, e na Tabela 4.6. O consumo de CH que as sílicas ativas proporcionam é próximo. Isso também pode ser observado na pouca diferença de resistência das argamassas com sílica densificada e não-densificada. Apesar de os valores serem próximos, a pasta SND apresentou valores menores de pico de CH que os da pasta SD. Para afirmar que a sílica não-densificada consome mais hidróxido de cálcio que a sílica densificada seria interessante ter os resultados de termogravimetria uma vez que a diferença não é significativa.

Nas figuras 4.21 e 4.22, apresentam-se os resultados de DRX da pasta SDU com 7 e 28 dias.

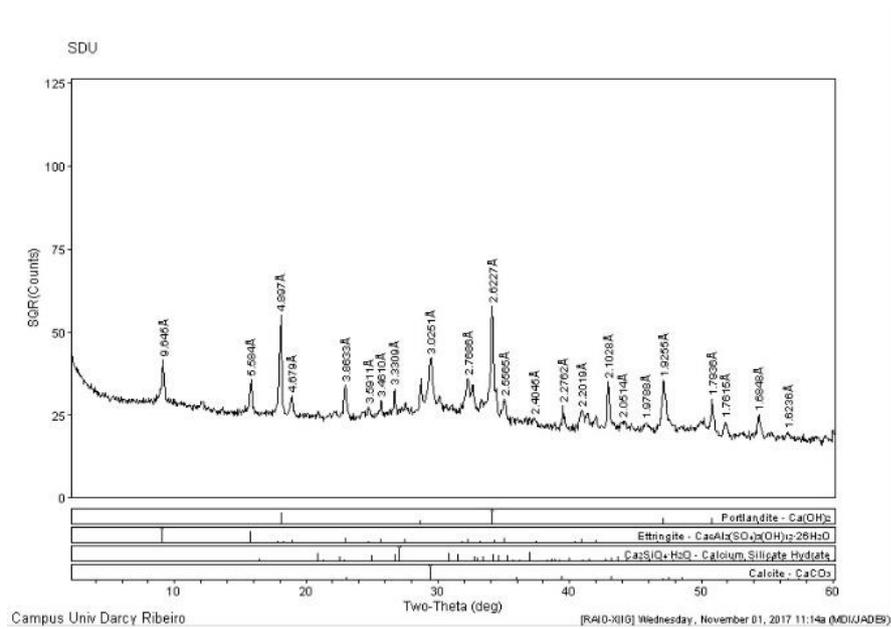


Figura 4.21 DRX da pasta SDU com 7 dias

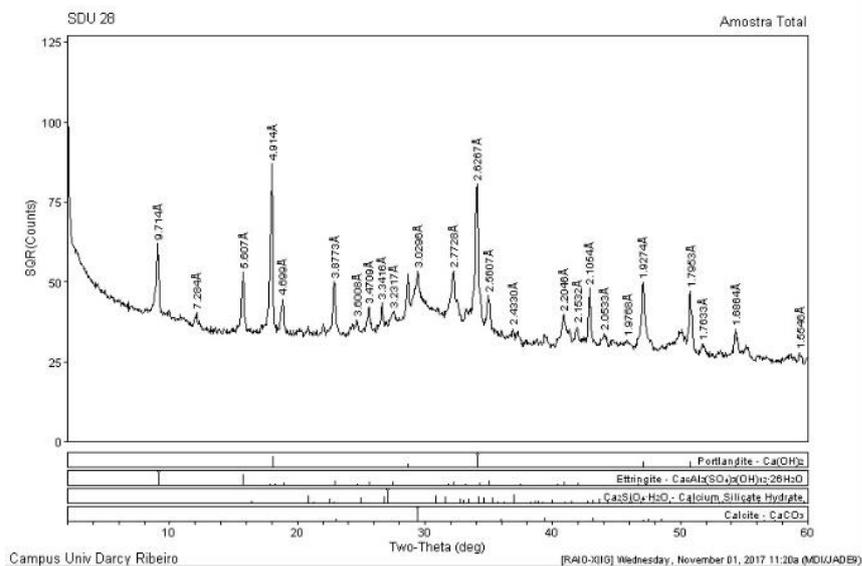


Figura 4.22 DRX da pasta SDU com 28 dias

Comparando as Figuras 4.21 e 4.22 com as figuras 4.17 e 4.19, ou observando a tabela 4.7, o processo de dispersão por ultrassom diminui a quantidade de CH, principalmente em 7 dias. Entretanto, em 7 dias, as resistências mecânicas das argamassas SD e SDU são muito próximas. Isso mostra que outros fatores podem estar influenciando na resistência das

argamassas, além da quantidade de CH. Em 28 dias, os valores de pico de SD e SDU são próximos, mas com uma pequena redução quando se utiliza ultrassom. Pode-se concluir que o efeito da dispersão por ultrassom não teve resultado significativo na sílica densificada. Também é possível que o procedimento de mistura adotado não tenha sido muito eficiente.

Nas Figuras 4.23 e 4.24, são mostrados os resultados de DRX das pastas SNDU com 7 e 28 dias.

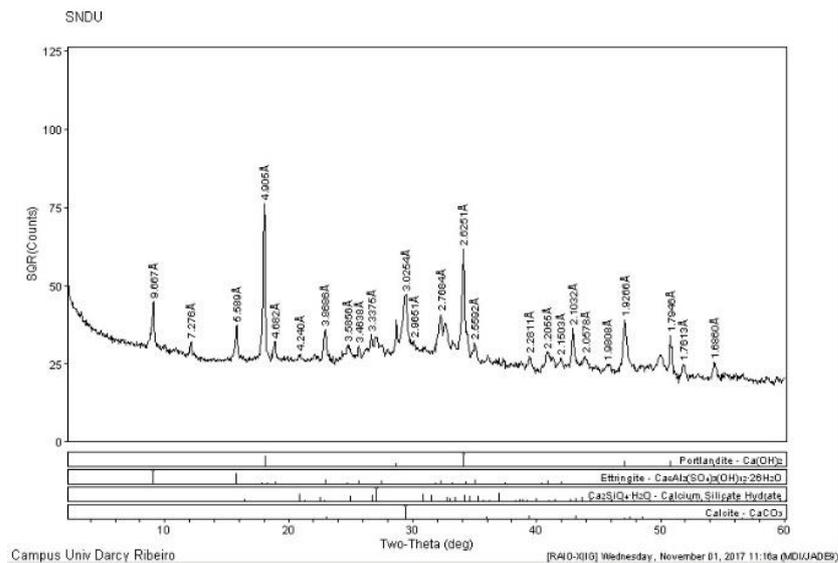


Figura 4.23 DRX da pasta SNDU com 7 dias

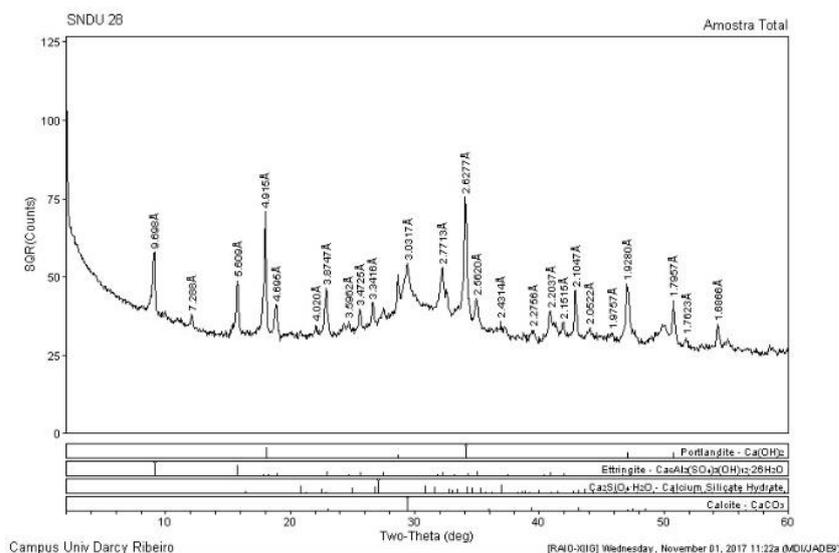


Figura 4.24 DRX da pasta SNDU com 28 dias

Comparando as figuras 4.23 e 4.24 com as figuras 4.18 e 4.20, e observando a tabela 4.6, pode-se observar que o processo de ultrassom não modificou muito o valor de pico de CH em 7 dias, entretanto em 28 dias, o processo de dispersão por ultrassom fez com que a pasta tivesse uma quantidade de CH bem menor, favorecendo então a formação de C-S-H. Entretanto, as resistências das argamassas SND e SNDU em 28 dias são praticamente idênticas. Isso mostra que outros fatores influenciam a resistência das argamassas, além da quantidade de CH.

Comparando os resultados de SDU e SNDU, observa-se que, em 28 dias, o tratamento de dispersão por ultrassom reduziu a quantidade de CH, ou seja, favoreceu a reação pozolânica, entretanto o seu efeito foi muito maior na pasta com sílica ativa não-densificada. O ultrassom não teve muito impacto na sílica ativa densificada, como pode ser observado nas Figura 4.25. Mesmo após o tratamento de dispersão, podem ser vistos aglomerados de sílica ativa densificada.

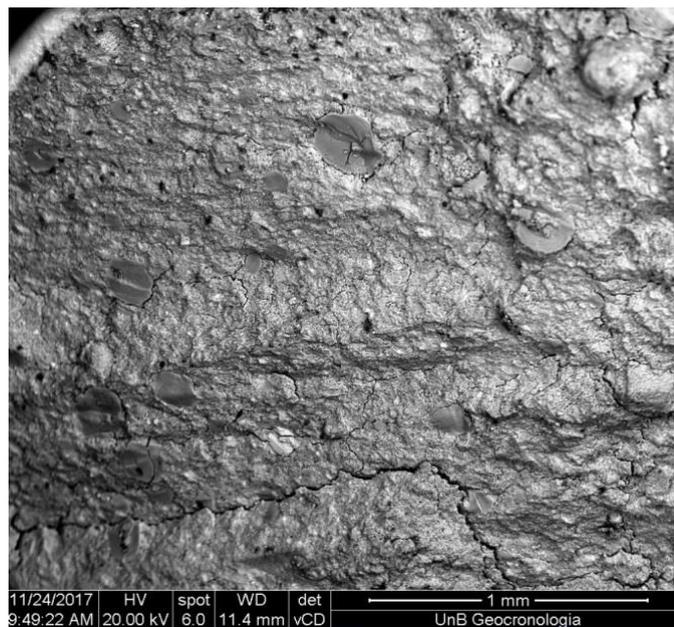


Figura 4.25 Pasta com sílica ativa não-densificada com tratamento de dispersão por ultrassom, com uma escala de 1 mm.

#### ***4.5.2 Microscopia eletrônica de varredura das pastas***

Foram obtidas imagens de elétrons secundários das pastas de cimento, mostrando a sua morfologia. As Figuras 4.26 a 4.31 mostram algumas imagens escolhidas.

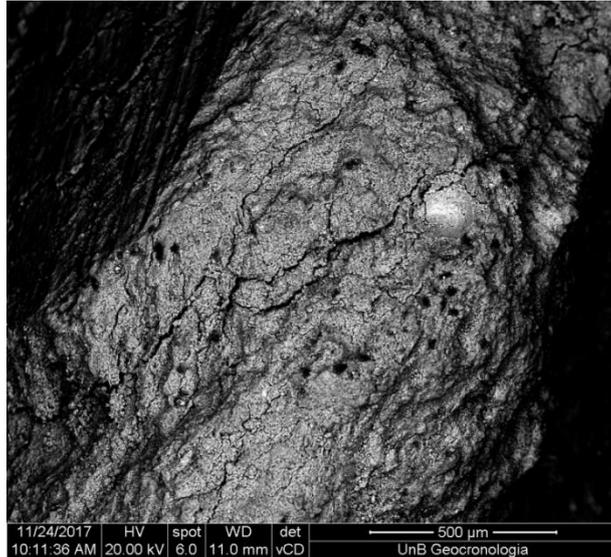


Figura 4.26 MEV da pasta Ref com 500 micrômetros de escala

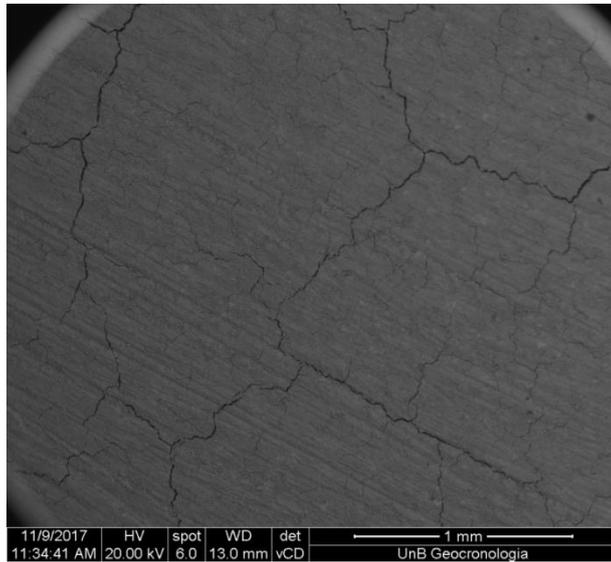


Figura 4.27 MEV da pasta SP com 1 mm de escala

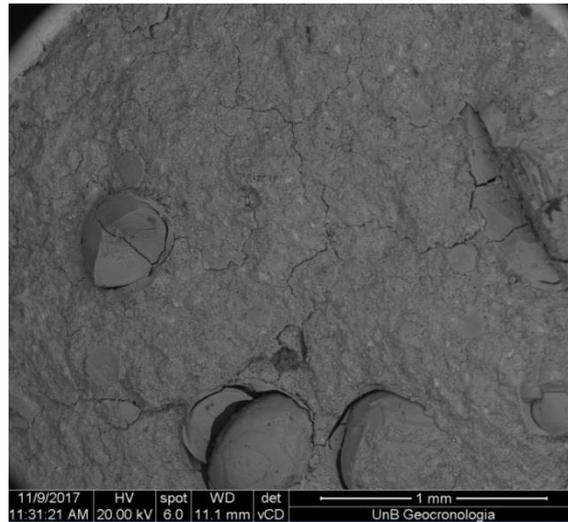


Figura 4.28 MEV da pasta SD com 1 mm de escala

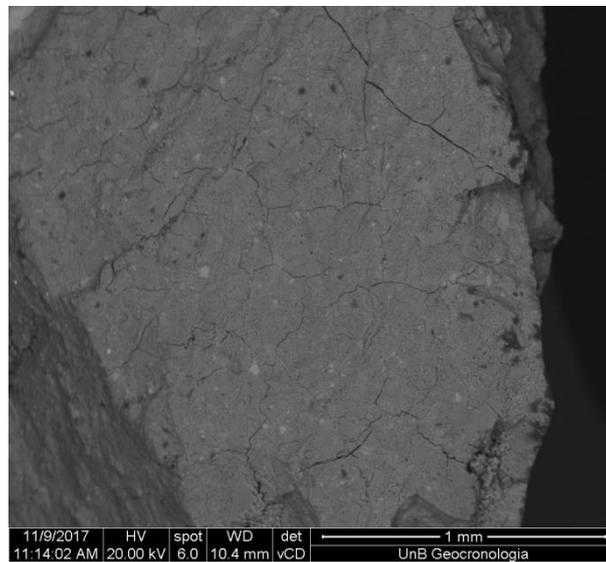


Figura 4.29 MEV da pasta SND com 1mm de escala

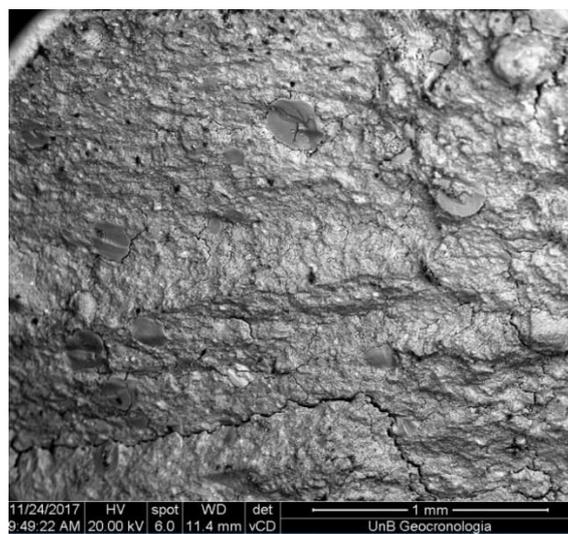


Figura 4.30 MEV da pasta SDU com 1 mm de escala

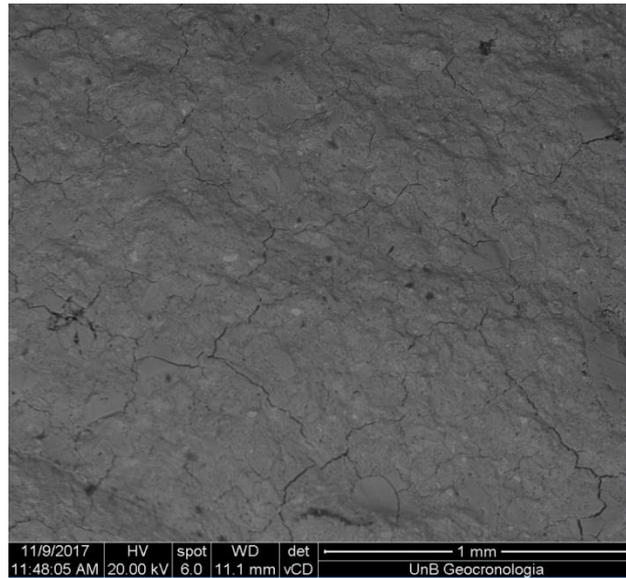


Figura 4.31 MEV da pasta SUNDU com 1 mm de escala

Observa-se na Figura 4.30 que a pasta com sílica ativa densificada com tratamento de ultrassom continuou apresentando aglomerados de sílica ativa, ou seja, o ultrassom não dispersou a pasta SDU como esperado. Recomenda-se o uso de dispersão com maior tempo ou com um aparelho dispersor mais potente.

Também é possível notar que todas as pastas apresentaram fissuração, principalmente as com sílica ativa. Isso pode ser um dos fatores que influenciou na queda da resistência à compressão com o tempo.

## 5 CONCLUSÃO

Neste projeto, foram realizados diversos ensaios com a finalidade de descobrir se há diferença no desempenho da sílica ativa densificada e não-densificada e avaliar se o tratamento de dispersão por ultrassom influencia nesse desempenho.

Observou-se que o uso de sílica ativa não muda a quantidade de superplastificante demandada para manter a coesão das argamassas. Isso confirma o fato de que a sílica ativa aumenta a eficiência do superplastificante.

Além disso, foi notado que a sílica ativa não-densificada gera argamassas com consistência mais fluida que as argamassas com sílica ativa densificada.

As argamassas de areia natural apresentaram resistência à compressão bem maior que a resistência das argamassas de areia normal. O uso de superplastificante e o tipo de areia podem ter influenciado nesses valores. Resultados de DRX mostram que, em 28 dias, a quantidade de CH na pasta SUP era maior que na pasta Ref. Isso mostra que o uso de superplastificante propicia uma maior hidratação do cimento, fazendo com que surja mais CH, e provavelmente mais CSH.

Problemas nos resultados foram encontrados em algumas argamassas. As argamassas com sílica ativa perderam resistência dos 14 aos 28 dias. Esses problemas podem ter ocorrido devido à menor homogeneidade da argamassa, já que a sílica ativa demanda maior tempo de mistura. Também podem ter ocorrido problemas durante a retificação e o rompimento dos corpos de prova. Todas as pastas possuem fissuras. Outro fator que sugere isso é o fato de a argamassa com a maior resistência nos 14 dias (SDU) ter tido a maior queda de resistência aos 28 dias. Logo, é possível que a maior reatividade da sílica tenha causado maior fissuração. Sugere-se que essas argamassas sejam repetidas. As argamassas SD, SND e SNDU também perderam resistência dos 14 aos 28 dias. A argamassa SDU apresentou resultados muito discrepantes. Todas as argamassas com sílica ativa devem ser refeitas e rompidas novamente com 28 dias. As argamassas que possuíram desvio relativo maior que 6% mais de uma vez também deveriam ser repetidas.

Com 14 dias, as argamassas com sílica ativa apresentaram índice de desempenho maior que 100%, o que mostra que a sílica ativa aumenta a resistência das argamassas. Com 28 dias, os índices de desempenho das argamassas SD, SND e SNDU são menores que 100%, o que não é esperado, e sugere a existência de algum problema. Pode-se considerar que, em 14 dias, a sílica ativa presente nessas argamassas compensou a perda de resistência devido à menor quantidade de cimento usada.

As argamassas com sílica ativa densificada e sílica ativa não-densificada apresentaram resistências muito próximas. Os resultados de DRX das pastas com os dois tipos de sílica mostram que as quantidades de CH, tanto em 7 quanto em 28 dias, também são muito próximas. Apesar de serem valores muito próximos, a sílica ativa não-densificada gerou resistências maiores e consumiu mais CH.

A dispersão por ultrassom na sílica ativa densificada não gerou muito consumo de CH em 28 dias. Além disso, a dispersão por ultrassom não conseguiu desfazer os aglomerados de sílica ativa densificada.

A dispersão por ultrassom na sílica ativa não-densificada modificou muito pouco a resistência das argamassas. A quantidade de CH em 7 dias é praticamente idêntica em SND e SNDU. O ultrassom modificou a quantidade de CH em 28 dias, onde SNDU apresentou um valor muito menor de CH que SND. A dispersão por ultrassom gerou muito consumo de CH em 28 dias, porém não houve muita mudança na resistência mecânica. Isso mostra que não é apenas a microestrutura que influencia na resistência mecânica. Outros fatores, como cura e procedimentos laboratoriais podem influenciar nisso.

O uso de sílica ativa não-densificada gera maior consumo de CH em 28 dias, com e sem uso de ultrassom.

Conclui-se que a sílica ativa não-densificada gera melhores resistências mecânicas e maior consumo de CH, entretanto a diferença para as pastas e argamassas com sílica ativa densificada são muito pequenas. Além disso, a trabalhabilidade e o manuseio da sílica ativa densificada é melhor que o da não-densificada. A dispersão por ultrassom gerada neste projeto influenciou mais a sílica não-densificada que a densificada. Provavelmente, o tempo e a potência do ultrassom usado facilitaram a dispersão dos aglomerados da SND, que são mais fracos. Além disso, deve ser estudado o que ocasionou as quedas de resistência.

## A. ANEXO

Tabela A.1 Resultados de resistência à compressão das argamassas

	Argamassa com areia normal		Argamassa com areia natural		Argamassa com sílica densificada		Argamassa com sílica não-densificada		Argamassa com sílica densificada e ultrassom		Argamassa com sílica não-densificada e ultrassom	
	Resistência (MPa)	Desvio relativo (%)	Resistência (MPa)	Desvio relativo (%)	Resistência (MPa)	Desvio relativo (%)	Resistência (MPa)	Desvio relativo (%)	Resistência (MPa)	Desvio relativo (%)	Resistência (MPa)	Desvio relativo (%)
7 dias	30.5	4.97	43.0	2.2	49.1	3.4	49.7	3.8	45.0	5.6	46.9	5.5
	32.4	1.23	44.1	0.3	47.6	0.2	47.0	1.8	43.2	1.4	50.5	1.8
	32.7	2.19	44.7	1.7	46.9	1.3	47.6	0.5	42.5	0.4	49.6	0.1
	32.5	1.55	44.0	0.1	46.3	2.4	47.1	1.5	39.8	6.7	51.5	3.8
média	32.0		44.0		47.5		47.8		42.6		49.6	
14 dias	35.5	6.8	42.5	0.2	53.2	0.9	55.4	1.2	55.0	2.3	43.7	15.5
	39.2	2.8	42.9	1.1	39.7	17.8	52.9	3.3	57.4	2.0	54.9	6.1
	38.9	2.2	39.0	8.1	52.3	8.4	54.5	0.3	57.2	1.8	56.0	8.2
	38.8	1.8	45.3	6.9	47.8	1.0	56.0	2.4	55.4	1.5	52.4	1.2
média	38.1		42.4		48.2		54.7		56.3		51.7	
28 dias	48.5	9.3	46.0	7.6	39.0	10.4	41.7	12.8	39.0	2.1	37.9	13.6
	47.2	6.4	51.1	2.7	45.4	4.3	47.5	0.7	38.0	4.7	39.0	11.2
	41.4	6.7	50.7	1.8	45.7	5.1	53.0	10.9	35.7	10.5	48.9	11.6
	40.3	9.1	51.4	3.2	44.0	1.0	49.0	2.6	46.8	17.3	49.7	13.2
média	44.4		49.8		43.5		47.8		39.9		43.9	

Tabela A.2 Resultados corrigidos de resistência à compressão simples das argamassas

	Argamassa com areia normal	Argamassa com areia natural	Argamassa com sílica densificada	Argamassa com sílica não-densificada	Argamassa com sílica densificada e ultrassom	Argamassa com sílica não-densificada e ultrassom	Argamassa com sílica não-densificada e ultrassom
	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)
	Desvio relativo (%)	Desvio relativo (%)	Desvio relativo (%)	Desvio relativo (%)	Desvio relativo (%)	Desvio relativo (%)	Desvio relativo (%)
7 dias	30.5	43.0	49.1	49.7	45.0	46.9	46.9
	32.4	44.1	47.6	47.0	43.2	50.5	50.5
	32.7	44.7	46.9	47.6	42.5	49.6	49.6
	32.5	44.0	46.3	47.1	43.6	51.5	51.5
	32.0	44.0	47.5	47.8	49.6	49.6	49.6
14 dias		42.5	53.2	55.4	55.0	54.9	54.9
	39.2	42.9	52.9	52.9	57.4	54.9	54.9
	38.9	45.3	52.3	54.5	57.2	56.0	56.0
	38.8		56.0	56.0	55.4	52.4	52.4
	38.9	43.6	52.8	54.7	56.3	54.4	54.4
28 dias					39.0		
		51.1	45.4	47.5	38.0		
	41.4	50.7	45.7	35.7	48.9		
	40.3	51.4	44.0	49.0	49.7		
	40.9	51.1	45.0	48.3	37.6		

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13956-3: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 3: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 43: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 1998.

CAPUZZO, V.M.S.; RÊGO, J.H.S. **Técnicas de análise microestrutural.** Apresentações fornecidas ao autor.

DIAMOND, S.; SAHU, S.; THAULOW N. **Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete.** Cement and Concrete Research, n.34, p.1625-1632, 2004.

FRAGA, Y.S.B. **Efeito da ultrassonificação da sílica ativa densificada e não-densificada em substituição ao cimento Portland em pastas e argamassas.** 15 p. Artigo. 2017.

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

NEVILLE, A.M. **Properties of Concrete.** 5. ed. Harlow: Pearson, 2011.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Concrete Technology.** 2. ed. Harlow: Pearson, 2010.

OERTEL, T. et al. **Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete.** Cement and Concrete Research, n.58, p.121-130, 2014.

ROSSEN, J.E.; LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.L. **Composition of C–S–H in pastes with increasing levels of silica fume addition.** Cement and Concrete Research, n.75, p.14-22, 2015.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. CRC Press, 2016.

SILVA, E.F. **Concreto de alto desempenho: estudo de propriedades mecânicas**. 1997. 166 p. Dissertação de mestrado – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília. 1997.

TESTING BLUHM & FEUERHERDT GMBH. **How to operate the Manual Blaine air permeability apparatus TESTING 1.0209**. Disponível em:  
< [https://www.youtube.com/watch?v=6\\_w9Vo8fKII](https://www.youtube.com/watch?v=6_w9Vo8fKII)>. Acesso em 22 de junho de 2017.  
Vídeo.

THOMAS, J.; JENNINGS, H. **The Science of Concrete**. Disponível em:  
<[http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5\\_5\\_2.html](http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_5_2.html)>. Acesso em 13 de maio de 2017.

ZHANG, Z; ZHANG, B.; YAN P. **Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete**. Construction and Building Materials, n.105, p.82-93, 2015.

ZHANG, Z; ZHANG, B.; YAN P. **Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures**. Construction and Building Materials, n.121, p.483-490, 2016.