

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

ESTUDO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO DA
NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE
ADICIONADA A MATERIAIS CIMENTÍCIOS

GUILHERME FREITAS CASTRO
MATHEUS DOS SANTOS DE SOUZA

ORIENTADOR: JOÃO HENRIQUE SILVA REGO
COORIENTADORA: VALDIRENE MARIA S. CAPUZZO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS
CONSTRUTIVOS E MATERIAIS

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

**ESTUDO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO DA
NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE
ADICIONADA A MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

**GUILHERME FREITAS CASTRO
MATHEUS DOS SANTOS DE SOUZA**

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.º João Henrique da Silva Rêgo, Dr. (PECC-UnB)
(Orientador)**

**Prof.ª Valdirene Maria S. Capuzzo, Dr.ª (PECC-UnB)
(Coorientadora)**

**Prof.ª Eugênia Fonseca da Silva, Dr.ª (PECC-UnB)
(Examinadora Interna)**

**Prof.º Divino Gabriel Lima Pinheiro, M.º (IFG)
(Examinador Externo)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 08 de DEZEMBRO de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO, GUILHERME FREITAS; SOUZA, MATHEUS DOS SANTOS

Estudo do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante adicionada a materiais cimentícios [Distrito Federal] 2016.

xi, 104 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Nanossílica

2. Nanomateriais

3. Sílica ativa

4. Cimento

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRO, G.F; SOUZA, M.S. (2016). Estudo do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante adicionada a materiais cimentícios. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 101 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Guilherme Freitas Castro e Matheus dos Santos de Souza

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante adicionado a materiais cimentícios

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

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.

Guilherme Freitas Castro

SQN 212, Bloco C, Apto. 216

70864030 - Brasília/DF - Brasil

Matheus dos Santos de Souza

Rua 12, chac 147/1, lote 08 VP

72007630 – Brasília/DF - Brasil

RESUMO

Nos últimos anos, o uso de nanopartículas em materiais cimentícios tem recebido atenção especial com o propósito de fabricar materiais com novas funcionalidades. Entre as nanopartículas de uso comum em materiais cimentícios está a nanossílica, no entanto, há divergências na literatura científica vigente no que diz respeito às condições de mistura, à formulação, ao seu percentual de substituição ao cimento, aos seus respectivos efeitos nas propriedades das pastas de cimento Portland e, ainda, à sua dispersão na matriz cimentícia. Neste contexto, este trabalho trata do estudo do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante adicionada em argamassa de cimento Portland, ou seja, um superplastificante com nanossílica estabilizada em sua composição. O programa experimental proposto inicia com a seleção e caracterização dos materiais; em seguida trata do efeito da adição estudada nas argamassas em estado fresco e por fim trata de determinar o índice de desempenho dos traços estabelecidos: a) Argamassa de referência sem adições, b) Argamassa com adição de nanossílica estabilizada em superplastificante, com teores de 0,5%,1%,1,5% e 3% em adição ao cimento Portland e c) Argamassa com adições de 10% sílica ativa em substituição ao cimento Portland e nanossílica estabilizada em superplastificante, com teores de 0,5%,1% e 1,5% em adição ao cimento Portland. Para determinação do índice de desempenho foi utilizado como base a norma NBR 13956-3 (ABNT, 2012) com adaptações, pois esta norma trata apenas da determinação do índice de desempenho de adições de sílica ativa. Com relação às argamassas no estado fresco, a adição de nanossílica estabilizada em superplastificante demonstrou ser eficaz no aumento da trabalhabilidade, representada pelo aumento do espalhamento das argamassas ensaiadas. Já nos resultados de resistência mecânica, observou-se que a adição de nanossílica estabilizada em superplastificante não apresentou resultados esperados quanto ao aumento da resistência à compressão axial simples, porém, observou-se aumento da resistência à tração por compressão diametral. Na compressão, foi observado uma tendência de aumento do índice de desempenho até 7 dias e uma posterior queda no resultado de 28 dias. Constatou-se também que os melhores resultados de aumento de resistência mecânica foram obtidos com a adição de sílica ativa somente, porém, com a consequente diminuição da trabalhabilidade das argamassas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2	MOTIVAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DA PESQUISA	2
1.3	OBJETIVOS	4
1.3.1	Objetivos Gerais.....	4
1.3.2	Objetivos Específicos.....	4
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	NANOTECNOLOGIA	6
2.1.1	Nanossílica (NS)	7
2.2	Sílica Ativa	15
2.3	MISTURAS TERNÁRIAS COM CIMENTO PORTLAND, SÍLICA ATIVA E NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE	25
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
3.1	MATERIAIS	32
3.2	PROCEDIMENTOS	32
3.2.1	Modificações dos Procedimentos do Programa Experimental	32
3.2.2	Seleção e Caracterização dos Materiais	35
3.2.2.1	Nanossílica Estabilizada em Superplastificante.....	35
3.2.2.2	Cimento Portland	38
3.2.3	Determinação do Índice de Desempenho	40
3.2.3.1	Determinação da Resistência à Compressão do Cimento Portland	43
3.2.3.2	Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral	43
3.2.3.3	Cálculo do Índice de Desempenho com Cimento Portland	44
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	46

4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	46
4.1.1	Nanossílica Estabilizada em Superplastificante.....	46
4.1.1.1	Determinação do Teor de Sólidos Dispersos no Aditivo	46
4.1.1.2	Potencial Zeta.....	47
4.1.1.3	Difração de Raios-X (DRX).....	48
4.1.1.4	Eflorescência de Raios-X (EDX).....	50
4.1.2	Cimento Portland	51
4.1.2.1	Determinação do Tempo de Início e Fim de Pega	51
4.1.2.2	Determinação da Massa Específica.....	53
4.1.2.3	Determinação do Índice de Finura por Meio da Peneira.....	
	75 μm (n° 200)	54
4.2	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO	55
4.2.1	Consistência das Argamassas	55
4.2.2	Análise de Compressão Axial Simples	57
4.2.2.1	Adição de Apenas Nanossílica Estabilizada em Superplastificante	57
4.2.2.2	Adição de Sílica Ativa e Nanossílica Estabilizada em Superplastificante.....	60
4.2.2.3	Análise Geral.....	65
4.2.3	Análise de Tração por Compressão Diametral	71
5	CONCLUSÃO	76
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	76
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXOS	86
I.	RESULTADOS COMPLETOS DA PESQUISA	86
II.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ORIGINAIS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Efeitos da nanossílica (NS) na fluidez de argamassas com de cinzas volantes, FA1 e FA2 (HOU et al, 2013).	9
Figura 2-2: Variação da viscosidade plástica em relação a concentração de superplastificante (SP) e adições de sílica ativa (SA) e nanossílica (NS). (SNEFF et al, 2009)	10
Figura 2-3 – À esquerda, resistência à compressão, e a direita e resistência à flexão de corpos de prova de argamassa em função da idade de hidratação. Sendo OPC, argamassa sem adição, FA5 e FA10 adições de cinza vulcânica, SF5 e SF10 adições de sílica ativa e NS5 e NS10 adições de nanossílica. (BJÖRNSTRÖMET et al., 2004.)	12
Figura 2-4 Efeito na melhoria da resistência do CNS e SF, relação da resistência à compressão = $\frac{\text{Resistência da mistura}}{\text{Resistência da amostra padrão}}$. (HOU et al, 2013)	14
Figura 2-5: Curva de calorimetria da evolução do calor. (JO et al, 2007)	15
Figura 2-6: Esquema de produção do silício metálico ou de ferro silício 75% e obtenção da sílica ativa. (SILVA, 1997)	16
Figura 2-7: Forno elétrico giratório para fabricação do silício metálico (à esquerda) e Filtro de mangas e silos onde é coletada e armazenada a sílica ativa (à direita). (SILVA, 1997)	17
Figura 2-8: Microscopia eletrônica de transmissão da sílica ativa (MEHTA e MONTEIRO, 2008)	19
Figura 2-9: Área de espalhamento em relação ao tempo para pastas com incorporação de sílica ativa (SFS) e sílica da casca de arroz (SCA). (CASTRO e LIBORIO, 2012)	21
Figura 2-10: Análise microscópica da zona de transição de um concreto convencional (à esquerda) e de um concreto com sílica ativava (à direita). (BENTUR;COHEN, 1987)	22
Figura 2-11: Resistência à compressão de argamassas para diferentes teores de sílica ativa. (KANNING, 2013)	24
Figura 2-12: Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes concretos e teores de sílica ativa. (BHANJA; SENGUPTA, 2006)	24
Figura 2-13: Resistências à compressão para diferentes traços de concreto. (NOLLI FILHO, 2015 - modificado)	27
Figura 2-14: Módulos de elasticidade tangente inicial. (NOLLI FILHO, 2015 - modificado)	28
Figura 2-15: Índice de desempenho para misturas ternárias com sílica ativa, nanossílica coloidal e cimento Portland. (ANDRADE, 2015 - modificado)	30

Figura 2-16: Índice de desempenho para misturas ternárias com sílica ativa, cimento Portland e teores elevados de nanossílica coloidal. (ANDRADE, 2015 - modificado)	30
Figura 3-1: Organograma modificado do programa experimental	35
Figura 3-2: Na esquerda: célula DTS1060C utilizada no ensaio de Potencial Zeta. Na direita: aparelho para medição do Potencial Zeta	37
Figura 3-3: Organograma dos novos traços a serem utilizados	41
Figura 4-1: Amostras de superplastificante com nanossílica estabilizada, antes (à esquerda) e depois (à direita) da secagem	46
Figura 4-2: Gráfico do Potencial Zeta - Amostra 1	47
Figura 4-3: Gráfico do Potencial Zeta - Amostra 2	47
Figura 4-4: Sumários de Resultados. Amostra 1 à esquerda e amostra 2 à direita.	48
Figura 4-5: Difratoograma de raios-X da nanossílica estabilizada em superplastificante.	49
Figura 4-6: Detalhe do Halo amorfo (15° a 30°) da nanossílica estabilizada em superplastificante seca em estufa do ensaio de difração de raios-X.	50
Figura 4-7: Aparelho de Vicat para determinação da pasta de consistência normal	51
Figura 4-8: Aparelho de Vicat utilizado na Determinação do tempo de fim de pega	53
Figura 4-9: Aparelho utilizado na determinação da massa específica do cimento	54
Figura 4-10: Peneira de abertura 75 µm utilizada (n° 200)	55
Figura 4-11: Espalhamento para cada traço elaborado	57
Figura 4-12: Resistência à compressão do traço de referência, sem adição.	58
Figura 4-13: Resistência à compressão dos traços com 0,5% e 1% de adição de superplastificante com nanossílica estabilizada.	59
Figura 4-14: Resistência à compressão dos traços com 1,5% e 3,0% de adição de superplastificante com nanossílica estabilizada	59
Figura 4-15: Curva do desenvolvimento da resistência à compressão.	59
Figura 4-16: Resistência à compressão dos traços com 10% de SA e 10% de SA + 0,5% NS.	62
Figura 4-17: Resistência à compressão dos traços com 10% de SA + 1,0% de NS e 10% de SA + 1,5% NS.	63
Figura 4-18: Curva do desenvolvimento da resistência à compressão para traços com sílica ativa.	63
Figura 4-19: Resistência à compressão axial simples	66
Figura 4-20: Resistência à compressão para todos os traços.	67
Figura 4-21: Índice de desempenho para compressão em todas as idades.	68

Figura 4-22: Resistência à compressão para todos os traços - Desconsiderando resultados discrepantes	70
Figura 4-23: Índice de desempenho para compressão em todas as idades - Desconsiderando resultados discrepantes.	70
Figura 4-24: Relação entre a dispersão de resultados à compressão e o espalhamento	71
Figura 4-25: Resistência à tração para todos os traços	73
Figura 4-26: Resistência à tração para todos os traços sem resultados discrepantes.	73
Figura 4-27: Relação entre a dispersão de resultados à tração por compressão diametral e o espalhamento	74
Figura I-1: Resultados da resistência à compressão axial simples com um dia	86
Figura I-2: Resultados da resistência à compressão axial simples com três dias	87
Figura I-3: Resultados da resistência à compressão axial simples com sete dias	88
Figura I-4: Resultados da resistência à compressão axial simples com vinte e oito dias	89
Figura I-5: Resultados da resistência à tração por compressão diametral com vinte e oito dias	90
Figura II-1: Organograma do programa experimental	91
Figura II-2: Na esquerda: célula DTS1060C utilizada no ensaio de Potencial Zeta. Na direita: aparelho para medição do Potencial Zeta	94
Figura II-3: Organograma de traços a serem utilizados	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Composição química da sílica ativa (ALVES; CAMPOS; NETTO, 1994)	18
Tabela 3-1: Definição final dos traços a serem ensaiados	42
Tabela 4-1: Resultados da Determinação do Teor de Sólidos Dispersos no Aditivo	46
Tabela 4-2: Resultados da Determinação da pasta de consistência normal	51
Tabela 4-3: Resultados do ensaio de tempo de início de pega	52
Tabela 4-4: Resultados do ensaio de tempo de fim de pega	52
Tabela 4-5: Resultados dos ensaios de Determinação da massa específica	53
Tabela 4-6: Resultados para o ensaio de índice de finura por meio da peneira 75 μm	54
Tabela 4-7: Teores de superplastificante testados na pesquisa	56
Tabela 4-8: Resultado de espalhamento das argamassas	56
Tabela 4-9: Resultados da compressão axial simples para os traços com adição de nanossílica estabilizada somente.	58
Tabela 4-10: Resultados da compressão axial simples para os traços com adição de nanossílica estabilizada e sílica ativa	61
Tabela 4-11: Resultados da compressão axial simples para todos os traços	65
Tabela 4-12: Resultados da resistência à tração por compressão diametral de todos os traços.	72
Tabela II-1: Traços a serem ensaiados	101

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CP-II F 32	Cimento Portland com adição de filer
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DRX	Difração de raios-x
EDX	Eflorescência de raios-x
MET	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma do Mercosul
NS	Nanossílica
SA	Sílica Ativa
SP	Aditivo Superplastificante
SiO	Subóxido
SiO ₂	Dióxido de Silício (Sílica)
UnB	Universidade de Brasília

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Cada vez mais se busca a melhoria de materiais e processos em todas as áreas científicas e tecnológicas. Nesse contexto aparece a nanotecnologia, ciência que busca entender e manipular materiais em escala atômica, para modificar propriedades do material em sua macro escala.

Os materiais estudados pela nanotecnologia possuem como principal característica a redução do tamanho das partículas que se encontram no intervalo entre 1 e 100 nm, e elevada área superficial, características estas que potencializam suas propriedades físicas e químicas. A crescente disponibilidade de nanomateriais vem possibilitando seu maior uso e estudos, que demonstram cada vez mais a eficiência desses materiais em modificar a microestrutura dos materiais, melhorando fatores como propriedades mecânicas e durabilidade. Na área de Engenharia Civil, a nanotecnologia se encontra principalmente como forma de melhorar algumas propriedades dos materiais de construção, modificando assim aços, vidros, concretos, argamassas etc. Um dos usos mais promissórios na Engenharia Civil é a produção de concretos de alto desempenho com a adição de nanomateriais.

A adição de nanomateriais em concretos e argamassas visa modificar a microestrutura de sua matriz cimentícia, modificando algumas propriedades importantes, como a melhora da zona de transição, aumento da resistência mecânica e diminuição do volume de vazios. Já se sabe que esses nanomateriais possuem maior reatividade do que materiais de mesma composição química e tamanho superior, tendo assim maior reatividade pozolânica, gerando materiais de maior qualidade, como demonstrado por JO *et al* (2007). Entre os nanomateriais que vêm sendo mais estudados e utilizados pode se citar a nanossílica.

A sílica amorfa, na forma de sílica ativa, já foi foco de vários estudos, como o de Kanning (2013) e Moraes (2012) além de testes ao redor do mundo e seus efeitos quando adicionada a materiais cimentícios já são bastante conhecidos. Porém, pouco se sabe sobre os efeitos da adição desse material em “escala nano”, os efeitos causados pelo aumento da área superficial ainda não são bem entendidos e carecem de mais pesquisas. Alguns estudos vêm demonstrando que a adição de nanossílica em concretos e argamassas é mais eficiente no aumento das propriedades mecânicas e diminuição do volume de vazios da argamassa do que a sílica ativa, principalmente devido ao efeito *filler* possibilitado pelas pequenas dimensões da nanossílica e pontos de nucleação dos produtos de hidratação do cimento Portland.

A nanossílica se apresenta de diferentes formas, dependendo de seu processo de obtenção. Entre as formas estão a nanossílica pirogênica, precipitada, coloidal e mais recentemente, a sílica estabilizada. A principal diferença da nanossílica estabilizada em superplastificante para a coloidal é o modo como é apresentada comercialmente. A nanossílica estabilizada em superplastificante é comercializada dispersa homogeneamente em aditivo superplastificante à base de éter-policarboxilato. Enquanto isso, a nanossílica coloidal é estável em um meio líquido, geralmente água. A forma como se apresenta a nanossílica estabilizada em superplastificante permite uma melhor dispersão na massa de concreto, melhorando uniformemente algumas características do concreto, além de apresentar a união entre dois produtos: o aditivo e a nanossílica, tornando assim o seu uso mais prático.

Na construção civil atualmente há uma busca por tecnologias que aprimorem características de materiais cimentícios, como a resistência mecânica, refinamento dos poros, durabilidade, entre outras. É em meio a esse cenário atual que essa pesquisa com a adição de nanossílica estabilizada em superplastificante a materiais cimentícios se enquadra. Será avaliado o efeito da nanossílica estabilizada em superplastificante de maneira isolada e conjuntamente com adições minerais altamente reativas, especificamente a sílica ativa. Os dados obtidos pela pesquisa poderão contribuir para o aumento do conhecimento sobre melhorias que a nanossílica estabilizada em superplastificante pode proporcionar aos concretos de alto desempenho.

1.2 MOTIVAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DA PESQUISA

Atualmente existe uma demanda por pesquisas sobre nanossílica e seus efeitos quando adicionada a materiais cimentícios, uma vez que não há muitos estudos na área. O uso da nanossílica de maneira isolada e em misturas ternárias em conjunto a outra adição mineral ainda hoje é pouco explorado, apesar do crescente estudo e uso de concretos de alto desempenho.

É consenso entre pesquisadores, o potencial da nanossílica no aumento da resistência mecânica e durabilidade de concretos e argamassas, porém ainda existem divergências quanto a teores ótimos de adição, condições de mistura e eficiência de seus efeitos na argamassa de cimento. Divergências como essas poderiam ser esclarecidas com um maior número de trabalhos sobre o tema. No Brasil, são poucos os trabalhos que tratam da nanossílica em suas diversas formas e seus efeitos, apesar da demanda por soluções econômicas, ambientais e técnicas na construção civil.

No ramo prático da construção civil, a nanossílica estabilizada em superplastificante vem sendo utilizada em diversas obras pelo Brasil e pelo mundo. Entre as obras pode-se citar: Porto de Açu-RJ, Ferrovia Norte-Sul, Edifício Madeira-SP, Cervejaria Petrópolis-BA. Com o estudo avançado dos benefícios da nanossílica estabilizada em superplastificante, seu uso poderia ser mais bem difundido, melhorando obras de diversas áreas pelo Brasil.

Na área de pesquisas, a Universidade de Brasília, especificamente o grupo da PECC-UnB (Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil), vem realizando pesquisas com a adição de nanossílica em materiais cimentícios, apresentando resultados que ajudam a compreender a ação da nanossílica em materiais cimentícios. Entre os trabalhos realizados pelo estão Andrade (2015) e Santos (2016). Poucos trabalhos, porém, foram feitos ainda com a nanossílica estabilizada em superplastificante, forma essa que vem sendo comercializada em obras pelo Brasil.

Como continuidade ao trabalho sendo feito pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, a presente pesquisa se propõe a estudar os efeitos da nanossílica estabilizada em superplastificante nos materiais cimentícios, analisando o índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante e servindo como base para futuros trabalhos que poderão ser feitos na área. O índice de desempenho a ser analisado na pesquisa, regido pela NBR 13956-3 (ABNT, 2012), é uma relação entre a resistência de uma argamassa com adição mineral, no caso a nanossílica estabilizada em superplastificante, e a resistência de uma argamassa de referência sem adição. Através do índice de desempenho, é quantificado o efeito da adição na resistência do material, sendo um meio de avaliar a eficiência da adição no acréscimo da resistência mecânica de argamassas.

Os expostos acima exemplificam a necessidade por pesquisas no ramo da nanotecnologia aplicada à Engenharia Civil, principalmente o estudo da nanossílica em sua forma comercial, a nanossílica estabilizada em superplastificante. Os benefícios técnicos, econômicos e ambientais trazidos pelo uso da nanossílica estabilizada em superplastificante nos materiais cimentícios só serão alcançados com estudos que comprovem sua eficácia e justifiquem seu uso comercialmente. Pesquisas como essa se mostram importantes, não somente para se entender melhor os efeitos da nanossílica estabilizada em superplastificante, mas também para servir de base para estudos mais avançados que possam permitir uma consolidação da aplicação do produto na construção civil.

1.3 OBJETIVOS

Aqui são expostos os objetivos da pesquisa, tanto de maneira geral, como de maneira específica.

1.3.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem por objetivo geral avaliar o efeito da nanossílica estabilizada na resistência à compressão axial simples e na resistência à tração por compressão diametral de argamassas de cimento Portland.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da pesquisa são expostos a seguir:

- Caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante utilizada nos ensaios;
- Avaliar o efeito da nanossílica estabilizada no estado fresco das argamassas;
- Avaliação da ação da nanossílica estabilizada, isolada e em conjunto com a sílica ativa, no desenvolvimento da resistência mecânica de argamassas, estudando o índice de desempenho para diferentes teores de aditivo quando em adição ao cimento Portland em massa;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na primeira parte é exibida uma introdução sobre o que será visto ao longo do trabalho, assim como a motivação para realização de tal pesquisa. Além disso, são expostos os objetivos buscados de maneira geral e específica através dessa pesquisa. Por fim, é mostrada a estrutura do trabalho.

A segunda etapa do trabalho contém uma revisão bibliográfica sobre o assunto, dividida em três partes. Na primeira parte, é definido o que vem a ser a nanotecnologia e qual o seu uso em diferentes mercados, inclusive o da Engenharia Civil aplicada à área de materiais de construção. Ainda na primeira parte, é aprofundado teoricamente o principal tópico dessa pesquisa, a nanossílica. É feita uma conceituação, além de uma explicação de sua ação em argamassas de cimento Portland. Na segunda parte da revisão bibliográfica é feita uma análise teórica da adição mineral altamente reativa que será testada juntamente com a nanossílica em misturas ternárias, a sílica ativa. Por fim, na terceira parte, define-se o que são misturas ternárias, seus usos, e resultados já obtidos em algumas pesquisas.

Na terceira etapa do trabalho é definido o Programa Experimental, de modo a planejar e explicar os procedimentos que serão feitos para caracterização dos materiais utilizados e determinação do índice de desempenho das argamassas ensaiadas. Ainda na terceira etapa foi realizada uma revisão do programa experimental inicialmente definido, sendo feita uma explicação e detalhamento que explicam tal decisão.

Na quarta etapa é feita a análise dos resultados de caracterização e determinação dos índices de desempenho obtidos no programa experimental através de gráficos, imagens e explicações. Através dos resultados obtidos são feitas, na quinta etapa, conclusões com base nos objetivos da pesquisa e são sugeridos possíveis estudos futuros sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 NANOTECNOLOGIA

A palavra “nanotecnologia” está associada com tecnologias que possibilitam a construção de materiais ou estruturas, a partir dos próprios átomos e numa escala extremamente reduzida: a do nanômetro (nm), uma subunidade do metro e que corresponde à bilionésima parte do metro (10^{-9} m). Um referencial comparativo dessa dimensão é tomar uma escala de 1000 km, nela um nanômetro corresponderia a um objeto com 1 mm de extensão (RIBOLDI, 2009).

O objetivo da nanotecnologia é criar, produzir, caracterizar e aplicar estruturas, dispositivos e sistemas, controlando forma e tamanho na escala nanométrica. Através da manipulação dos materiais em nano escala, é possível variar suas propriedades micro e macroscópicas, como capacidade de carga, magnetização e temperatura de fusão, sem alterar a sua composição química (SANCHEZ e SOBOLEV, 2010).

Os nanomateriais têm como característica a potencialização de suas propriedades físicas e químicas em concentrações extremamente reduzidas. Esse alcance de propriedades se deve basicamente ao fato de tais estruturas possuírem dimensões nanométricas, que resultam em uma área superficial elevada, maior grau de dispersão e funcionalidades que são dependentes do tamanho da estrutura (ANDRADE, 2015).

Estudar a nanoestrutura de materiais de base cimentícia ajuda a compreender não somente os processos de hidratação, desenvolvimento de resistência, fratura, corrosão, mas também o desenvolvimento de materiais com novas propriedades (SCRIVENER, 2009). Além disso, adições de nanomateriais (como nanossílica e nanotubos de carbono) provaram ser muito eficazes em relação a melhoria de resistência, flexibilidade e outras características em materiais à base de cimento (SOBOLEV et al., 2009)

As nanopartículas mostram propriedades físicas e químicas diferentes de materiais convencionais e por isso vem ganhando atenção. Podem ser aplicados em vários campos da indústria visando à obtenção de novos materiais, com propriedades superiores e com maiores possibilidades de aplicações. O uso de nano partículas em materiais cimentícios tem recebido atenção especial com o propósito de obter concretos e argamassas com propriedades superiores, principalmente resistência mecânica e durabilidade (DANTAS, 2013).

2.1.1 NANOSSÍLICA (NS)

A nanossílica coloidal é uma dispersão estável de sílica amorfa em escala nanométrica, não porosa e partículas normalmente esféricas. Uma dispersão estável de partículas coloidais nesse caso significa que as partículas sólidas não se aglomeram e não sofrem sedimentação a uma taxa significativa (BERGNA, 2006). As nanopartículas apresentam uma grande tendência de aglomeração entre si tornando a dispersão de nanopartículas muitas vezes uma tarefa difícil e deve ser investigada a fim de promover uma melhor homogeneização das partículas dentro de uma matriz cimentícia. As dificuldades em dispersar partículas nanométricas podem ser justificadas pela alta energia de superfície das nanopartículas, a distância entre as partículas e sua configuração molecular (TANAKA e KUMAZAWA, 2008).

A nanossílica é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que, em substituição ao cimento tem acarretado melhoria na resistência dos materiais cimentícios e no aumento da resistência à penetração de água influenciando fortemente na durabilidade do concreto. Esse material demonstra ser mais eficiente no ganho de resistência do que a sílica ativa. Além de proporcionar o efeito *filler* para melhorar a microestrutura de concretos e argamassas, também funciona como um ativador para a reação pozolânica e como pontos de nucleação, contribuindo para a hidratação do cimento. Esse comportamento leva a uma melhora na microestrutura com refinamento dos poros que melhora as propriedades mecânicas dos concretos e argamassas (GLEIZE, 2011).

A adição de nanossílica apresenta duas formas de atuação: uma química, atuando como pozolana de alta reatividade, a adição reage rapidamente com o Ca(OH)_2 liberado durante a hidratação do cimento formando compostos resistentes de silicato de cálcio hidratado, que tendem a preencher os vazios capilares, e outra física, atuando como *filler* e densificando a microestrutura, as partículas dispersam-se nos espaços entre os grãos de cimento, provocando uma distribuição uniforme dos produtos da hidratação, e contribuindo assim para uma estrutura mais densa, menos porosa e, portanto, com menor permeabilidade e maior resistência (AÏTCIN, 1998). A incorporação de elementos finos à pasta de cimento melhora o empacotamento da mistura, já que partículas finas se posicionam nos espaços entre os demais componentes do material, preenchendo os vazios da mistura. No entanto, quanto a isto, existem algumas ressalvas em relação à nanossílica, já que as partículas extremamente finas da substância tendem a formar aglomerados, podendo prejudicar a densidade da pasta (MORAES, 2001).

O mecanismo de reforço, efeito pozolânico, é a reação do material com a cal, sempre liberada na hidratação do cimento, formando um gel o qual contribui com o aumento das propriedades mecânicas, porém para que essa reação ocorra, deve existir em estado amorfo e finamente moído (partículas da ordem de micrômetros), materiais como sílica e alumina. Combinando elementos como silício e nanossílica com os elementos calcários de óxido e hidróxido de cálcio do cimento para adicionar a força de ligação e de volume sólido, resultando numa maior resistência à compressão de pasta de cimento endurecida. Sabe-se também que a velocidade de uma reação química é diretamente proporcional à área superficial dos reagentes. Através das reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio, a nanossílica (nano-SiO₂) pode favorecer a maior formação de silicato de cálcio hidratado (CSH). Como resultado, uma maior densificação da matriz de cimento será obtida e, por conseguinte, uma maior resistência e durabilidade de materiais cimentícios (SENEFF, 2009)

A obtenção de nanopartículas de sílica (SiO₂) pode ser feita por diversos processos e, dependendo da forma e das condições de obtenção, podem apresentar propriedades diferentes, como o tamanho da partícula e sua reatividade (DANTAS, 2013). O diâmetro médio das partículas da nanossílica está entre 15 nm e 40 nm, enquanto a área superficial específica pode chegar a 60 m²/g. (BYUNG-WAN et al., 2007). A presença de grupos silanóis sobre a superfície da sílica, associada a grande área superficial, justifica o fato da nanossílica apresentar grande reatividade superficial em relação aos demais tipos de adições minerais. Essa característica é responsável pela elevada capacidade de adsorção de espécies aquosas, tais como materiais iônicos ou de natureza orgânica (SEEKKUARACHCHIA et al. 2008).

O uso de nanopartículas em materiais cimentícios tem recebido atenção especial em formulações de cimentos com o objetivo de se obter propriedades superiores às obtidas com formulações convencionais ou mesmo quando comparadas às formulações contendo a sílica ativa. Alguns autores (BJÖRNSTRÖM et al., 2004; LI, 2004; JO et al., 2007; LI et al., 2004; BERRA et al., 2012; HOU et al., 2013; KONTOLEONTOS et al., 2012; NAZARI e RIAHI, 2011; ALENCAR et al., 2008; COLLEPARDI et al., 2001; SNEFF et al., 2009; MOHAMMADMEHDI et al., 2012; SHIH et al., 2006) já estudaram a influência da nanossílica nas propriedades mecânicas e reológicas de materiais cimentícios.

SANTOS (2016) estudou o efeito da nanossílica na melhoria de algumas propriedades dos cimentos de alta resistência. Realizou misturas de microconcretos de alta resistência variando com traços que continham apenas polímeros superabsorventes e traços com substituição do cimento por nanossílicas em 1% e 2%. E observou que as adições de nanossílica aumentam o

empacotamento causado pelo efeito *filler*, também ocasionou perda de trabalhabilidade, fazendo-se necessários teores de superplastificante muito acima do recomendado pelo fabricante. Houve também uma diminuição do tempo zero por volta 45%. As misturas com teores de 2% de nanossílica tiveram uma redução significativa na densidade, atribuído pelo efeito de ar incorporado e também a densidade da nanossílica ser menor que a do cimento.

HOU et al (2013) realizaram estudo com objetivo de investigar os efeitos combinados da nanossílica (NS) e da cinza volante sobre as propriedades de materiais de base cimentícia. As propriedades no estado fresco das misturas com nanossílica foram avaliadas para duas classes de cinza volante (FA1 e FA2). Conforme mostrado na Figura 2-1, os resultados revelaram que a adição de nanossílica exerce forte influência na trabalhabilidade das misturas, sendo que quanto maior o teor de nanossílica adicionada, menores são os valores obtidos do espalhamento das argamassas no ensaio da mesa de consistência, para as duas classes de cinza volante utilizadas.

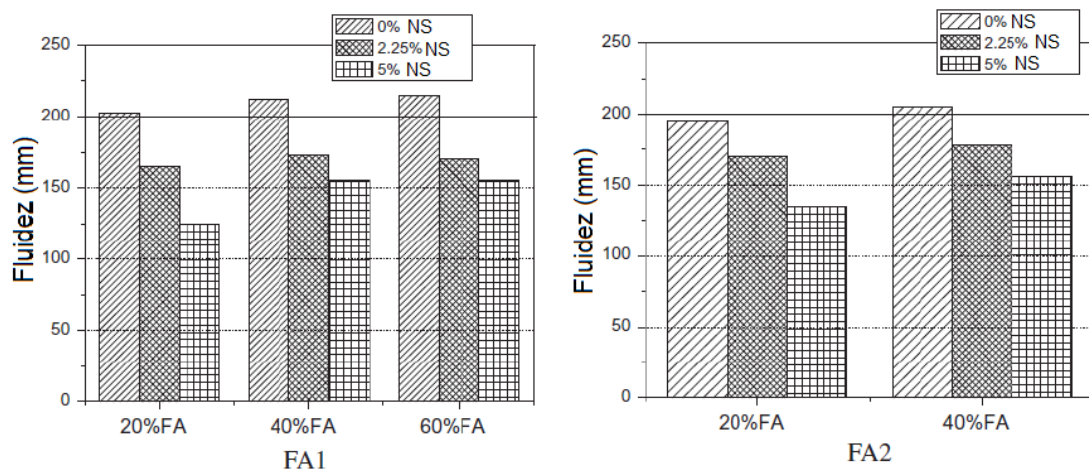


Figura 2-1: Efeitos da nanossílica (NS) na fluidez de argamassas com de cinzas volantes, FA1 e FA2 (HOU et al, 2013).

MOHAMMADMEHDI et al. (2012) estudaram o efeito da adição de nanossílica em pastas de cimento Portland e perceberam uma redução na água livre, permeabilidade e porosidade devido a formação do gel de silicato de cálcio (C-S-H), que possui uma estrutura mais densa, além do efeito *filler* das nano partículas que tendem a ocupar os espaços vazios entre as fases presentes. Observou que com o passar do tempo a nanossílica tende a preencher os espaços entre as partículas de cimento, produzindo poros menores, aumentando a resistência da argamassa e melhorando as características de sua resistência. Além disso, o aumento na quantidade de partículas de nanossílica reforçou a resistência à compressão, atribuídas às possíveis reações pozolânicas entre a nanossílica e o cimento, devido ao fato de que a velocidade da reação pozolânica é proporcional à quantidade da área da superfície disponível para a reação. Segundo os autores, com base nos resultados dos ensaios de

resistência à compressão, é esperado que a nanossílica comporte-se não só como material de enchimento para melhorar a microestrutura do cimento, mas também como um promotor de reação pozolânica. Além disso, a adição de nanossílica diminuiu a quantidade de água disponível na mistura. Por outro lado as alterações na viscosidade plástica foram menos intensa, no entanto, o período de dormência mostra uma grande redução, pela adição de nanossílica.

SNEFF et al, (2009), avaliaram o efeito da concentração de nanossílica nas propriedades reológicas das pastas de cimento com adição de até 1,0% de nanossílica e cimentos com adições entre 2,5% e 10% e uma pasta sem adição para ser utilizada como comparação. Foi utilizado também um aditivo superplastificante à base de ácido policarboxílico, variando sua concentração para avaliar o comportamento. Os valores de limite de escoamento foram mais afetados quando comparados com os de viscosidade plástica. A maior viscosidade plástica é da mistura com nanossílica, como mostra na Figura 2-2.

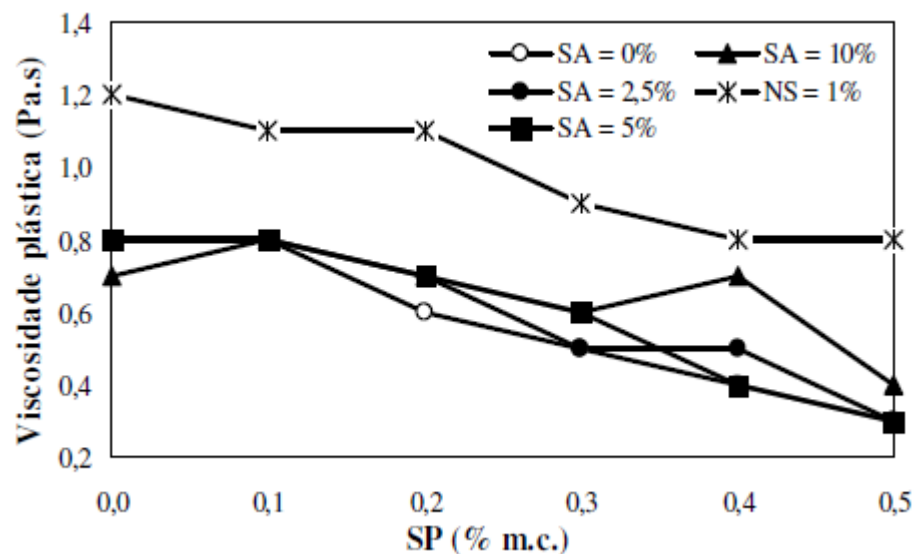


Figura 2-2: Variação da viscosidade plástica em relação a concentração de superplastificante (SP) e adições de sílica ativa (SA) e nanossílica (NS). (SNEFF et al, 2009)

Alguns autores (ALENCAR et al., 2008; COLLEPARDI, 2003) verificaram que a utilização de nanossílica ou sílica coloidal amorfa é extremamente eficiente para reduzir a exsudação e a aumentar a resistência à segregação, por possuir elevada área superficial e diminuir o grau de porosidade do material cimentício.

NAZARI e RIAHI (2011), afirmaram que nanopartículas de SiO₂ podem melhorar a resistência à permeabilidade à água do cimento em 7 e 28 dias de cura. Aos 2 dias de cura, o coeficiente de absorção de água é aumentado pelo aumento do teor de nanopartículas em até 4,0%. Uma vez que as amostras necessitam de mais água, pois há uma rápida formação dos produtos gerados pela hidratação do cimento. À medida que o teor de nanossílica é aumentado até 4%, a resistência à compressão de amostras de cimento é aumentada. Isto ocorre devido a formação de mais produtos hidratados na presença de nanopartículas de SiO₂, por conta da sua alta reatividade.

LI (2004) utilizou a nanossílica em concreto com 50% de adição de cinza volante, e o mesmo com pequenos teores de nanossílica (4%, substituindo o cimento). O concreto com a adição de cinza volante e nanossílica apresenta um comportamento parecido com o concreto produzido apenas com cimento Portland, sem adição, tanto no calor de hidratação (havendo apenas uma pequena diminuição do pico de temperatura); quanto na resistência à compressão, apenas com uma leve diminuição da resistência antes dos 56 dias.

BJÖRNSTRÖMET et al. (2004) comparam as características estruturais de argamassas adicionadas de nanossílica, sílica ativa e cinzas volantes, verificando a resistência à compressão e à flexão, analisando-as 7 dias de cura e aos 28 dias de cura. As resistências à compressão e à flexão desenvolvida nas amostras de argamassa contendo partículas nanossílica foram mais elevadas em comparação às amostras correspondentes de sílica ativa e cinza volante em ambas as idades. Estes aumentos nos pontos fortes das argamassas com NS são atribuíveis às nano partículas de tamanho e área de superfície extensa de NS. As partículas nanométricas, como agentes de nucleação, promoveram a hidratação do C₃S e C₂S e a formação de fases C-S-H. A abundância de sítios ativos na superfície das partículas de NS induziu a sua reatividade pozolânica e a extensão da formação da ligação entre as partículas NS e CH livre. Os resultados são apresentados na Figura 2-3.

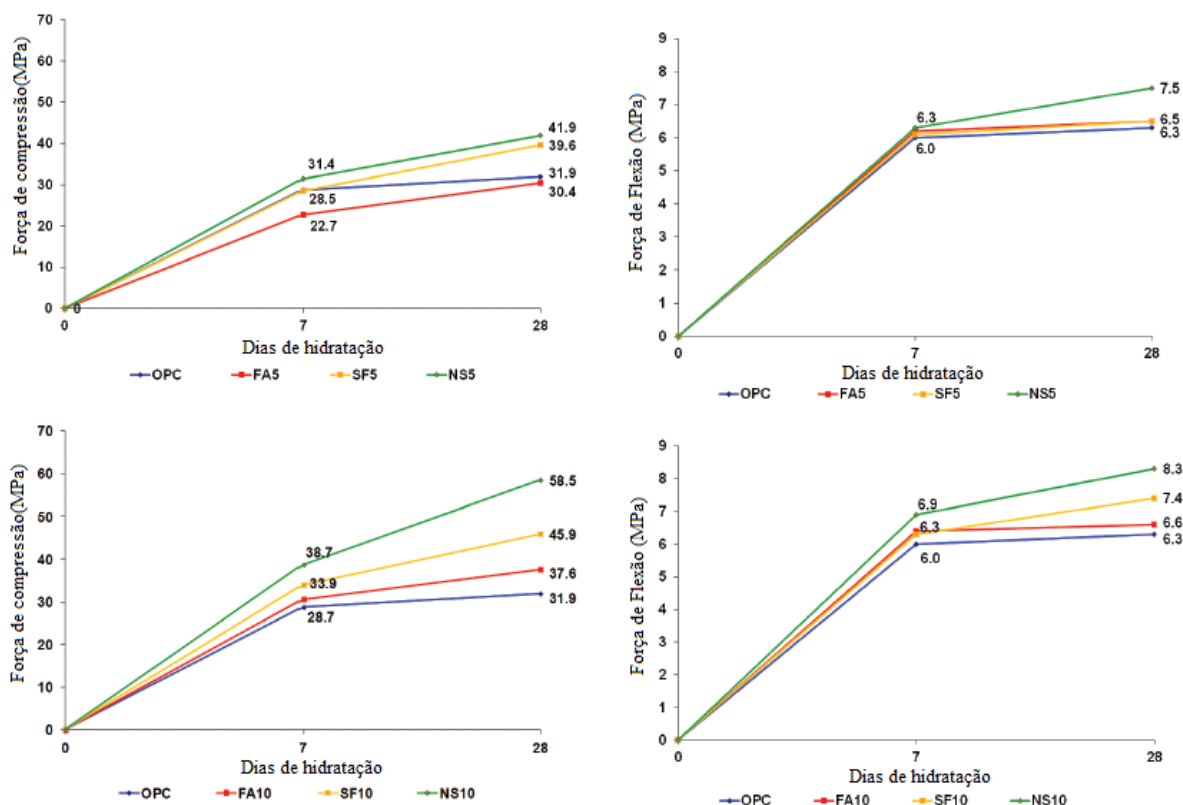


Figura 2-3 – À esquerda, resistência à compressão, e a direita e resistência à flexão de corpos de prova de argamassa em função da idade de hidratação. Sendo OPC, argamassa sem adição, FA5 e FA10 adições de cinza vulcânica, SF5 e SF10 adições de sílica ativa e NS5 e NS10 adições de nanossílica. (BJÖRNSTRÖMET et al., 2004.)

Em paralelo o estudo com o aumento na quantidade de nanossílica, acima da quantidade comum do mercado, de 5% em massa a 10% em massa, foi observado os aumentos na resistência à compressão em ambas as idades. Aos 28 dias, a resistência à compressão das amostras de argamassa com 10% em massa de nanossílica foi 84% mais elevada do que a do controle, enquanto que a resistência à compressão das amostras com 10% em massa de sílica ativa e 10% em massa de FA foi de apenas 44% e 18% maior em relação a argamassa de controle. Os aumentos das resistências à flexão das argamassas com 5% em massa e 10% em massa de nanossílica também eram perceptíveis em comparação com a argamassa controle.

SHIH et al. (2006) adicionaram nanopartículas de sílica na forma de dispersão coloidal no cimento e verificaram mudanças na microestrutura. Houve alteração nas propriedades mecânicas chegando a um aumento de 43% de resistência à compressão com adição de apenas 0,6% de nanossílica em relação à massa de cimento. É ressaltado principalmente o aumento nas primeiras idades. As reações pozolânicas entre o hidróxido de cálcio e sílica amorfa (dióxido de silício) tendem a ocorrer lentamente, durante um período prolongado de cura.

Porém a nanossílica possui alta reatividade, pois possui uma grande superfície de contato, como já citado anteriormente, reagindo muito rapidamente com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio em um meio alcalino. A contribuição da nanossílica adicionada ao aumento da resistência da pasta de cimento endurecida se torna evidente nas idades iniciais. Foi definido que dentre todas as idades de cura, o valor ótimo de concentração, ou seja, a concentração de nanossílica que apresentou os maiores valores de resistência à compressão foi 0,6%. Sendo a idade de 56 dias a que apresentou a maior resistência. Com 0,8% os valores de resistência à compressão caíram para valores inferiores. Eles definiram que dentre todas as idades de cura, o valor ótimo de concentração, ou seja, a concentração de nanossílica que apresentou os maiores valores de resistência à compressão o de 0,6%.

LI et al. (2004) avaliaram argamassas com apenas cimento e areia, e incluíram 3 teores de nanossílica à mistura, 3, 5 e 10% sobre a massa do cimento. Nos resultados, eles obtiveram aumento da resistência à compressão de 13,8%, 17,0% e 26,0%, aos 28 dias, respectivamente com o aumento do teor de nanossílica, em relação à argamassa sem adição. Além disto, eles avaliaram a microestrutura da argamassa sem adição e a argamassa com 3% de nanossílica, utilizando microscopia eletrônica de varredura, e observaram que a microestrutura da mistura com nanossílica era mais densa e compacta, e não havia a presença de grandes cristais de Ca(OH)_2 . Estes autores concluíram que a melhora da estrutura e da resistência da pasta de cimento provavelmente ocorre devido ao fato de as nanopartículas estarem uniformemente dispersas, e com isso atraem os produtos da hidratação do cimento devido à sua grande energia de superfície, promovendo e acelerando a hidratação do cimento devido à sua alta reatividade.

KONTOLEONTOS *et al.* (2012), observou um aumento da resistência à compressão com o aumento de dias de cura e atribuiu isso ao consumo de Ca(OH)_2 por nanossílica (evolução de hidratação). Segundo os autores, com base nos resultados dos ensaios de resistência à compressão, é esperado que a nanossílica comporte-se não só como material de enchimento para melhorar a microestrutura do cimento, mas também como um promotor de reação pozolânica.

HOU et al (2013) observaram que as resistências à compressão das amostras com 2,25% e 5% de nanossílica coloidal e amostras com 2,5 e 5% de sílica ativa sem adição de nanossílica, comparando-as com uma amostras padrão com 0% de adição. Os resultados apresentam que os valores para as amostra com NS foram superiores aos da amostra com 0% de nanossílica para idênticas idades iniciais, mostrando que a nanossílica pode melhorar as propriedades mecânicas de cimento comum. Eles atribuem isto ao efeito de aceleração de

hidratação do cimento na nanossílica e a reação pozolânica da nanossílica. Aos 3 meses, a amostra com 5% de nanossílica apresentou resistência à compressão menor do que a amostra com 0% de nanossílica, como mostra a Figura 2-4, no entanto o autor não faz nenhuma atribuição a este resultado. A atividade pozolânica da NS coloidal é maior que a de sílica ativa e seu efeito de aceleração hidratação também é maiores em idades iniciais.

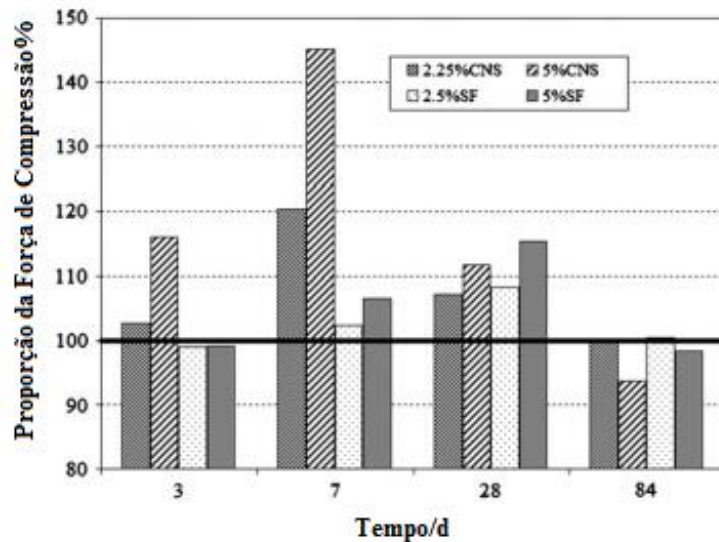


Figura 2-4 Efeito na melhoria da resistência do CNS e SF, relação da resistência à compressão = $\frac{\text{Resistência da mistura}}{\text{Resistência da amostra padrão}}$
 . (HOU et al, 2013)

JO et al. (2007) estudaram a adição da nanossílica em argamassa e comparou com argamassas contendo sílica ativa. Ele utilizou em seu trabalho argamassas com relação água/cimento de 0,5, contendo teores de sílica ativa de 5%, 10% e 15% sobre a massa do cimento, e também contendo teores de nanossílica de 3%, 6%, 10% e 12% sobre a massa de cimento. Todas estas argamassas contendo as adições tiveram resistências à compressão maiores do que a argamassa que não continha adições aos 28 dias. Também é possível verificar que as argamassas contendo nanossílica tiveram resistências superiores às argamassas contendo sílica ativa, sendo que a resistência da argamassa com 3% de nanossílica foi superior à que continha 15% de sílica ativa, mostrando que a nanossílica é mais eficiente quando comparada à sílica ativa. Isto é atribuído à nanossílica possuir uma reação pozolânica mais efetiva (devido à sua maior superfície específica) do que a sílica ativa. A resistência foi maior conforme maior era o teor das adições, porém, apesar do aumento da resistência, neste estudo também é possível verificar que entre as argamassas contendo 10% e 12% de sílica ativa a resistência à compressão foi muito próxima, sendo de 68,2 MPa e 68,8 MPa, respectivamente, indicando que há uma quantidade a partir da qual o aumento do teor de

adição não influencia na resistência. O autor também cita que utilizar uma quantidade tão grande de nanossílica poderia reduzir a resistência da argamassa ao invés de melhorá-la, provavelmente por conta da aceleração das reações e da liberação maior do calor quando adicionado a NS como mostra na Figura 2-5, porém isto não foi verificado no seu estudo.

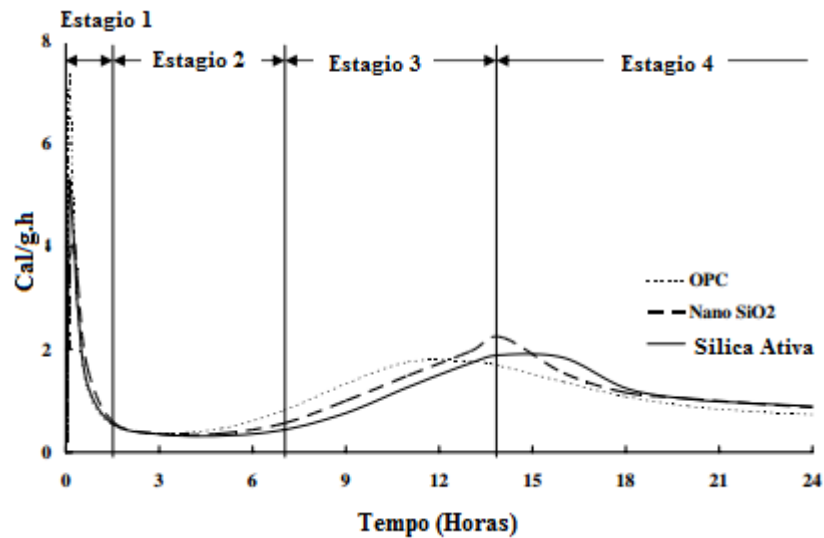


Figura 2-5: Curva de calorimetria da evolução do calor. (JO et al, 2007)

Apesar de existirem vários estudos envolvendo a aplicação da nanossílica em materiais cimentícios ainda existem controvérsias no que diz respeito à quantidade ideal de nanossílica a ser utilizado nas misturas. Alguns afirmam que as percentagens adequadas deveriam ser baixas, em torno de 0,5% até 3% (SHIH et al., 2006; LI et al., 2006; KONTOLEONTOS et al., 2012; HOU et al., 2013), enquanto outros afirmam que o teor poderia ser de 3% a 10% (BJÖRNSTRÖM, 2004; JO et al., 2007). A maioria dos autores (SHIH et al., 2006; 2007; LIN et al., 2008; LI 2004; LI et al., 2006), afirmam que a adição de nanossílica conduz a um aumento das resistências quando comparado aos materiais sem adição de nanossílica.

2.2 SÍLICA ATIVA

A sílica é o nome dado ao óxido de silício, cuja fórmula química é SiO_2 , e tem origem mineral, biogênica ou sintética. Sua forma mais comum e encontrada em grande escala ao redor do mundo é o quartzo, presente na composição química de areias e rochas. Outras fontes de sílica que pode se citar são: Plantas como arroz, bambu e cevada e em terras diatomáceas (ANDRADE, 2015). Além disso, não existe somente um tipo de sílica. Variando-se o processo de produção e condições de preparo é possível se obter diferentes

tipos de sílicas sintéticas, utilizadas para diferentes finalidades. Alguns tipos de sílica são: pirôgenica, precipitada, coloidal, ativa etc. (PAPIRER, 2000).

A sílica ativa é um subproduto da fabricação das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício (NEVILLE, 1997). O silício e suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso onde há a redução do quartzo e carvão a altas temperaturas (cerca de 2000°C). Durante a redução do quartzo puro, um subóxido é liberado na forma de gás, o SiO. Esse subóxido condensa em um material amorfo composto de partículas esféricas extremamente pequenas, com aspecto vítreo e muito reativo: o dióxido de sílica amorfa SiO₂ (CASTRO, 2007). A Figura 2-6 ilustra o processo de obtenção do silício metálico e capturação da sílica ativa amorfa. Na Figura 2-7 são mostrados o forno elétrico giratório, o filtro de mangas e os silos utilizados no processo de obtenção do silício metálico e da sílica ativa.

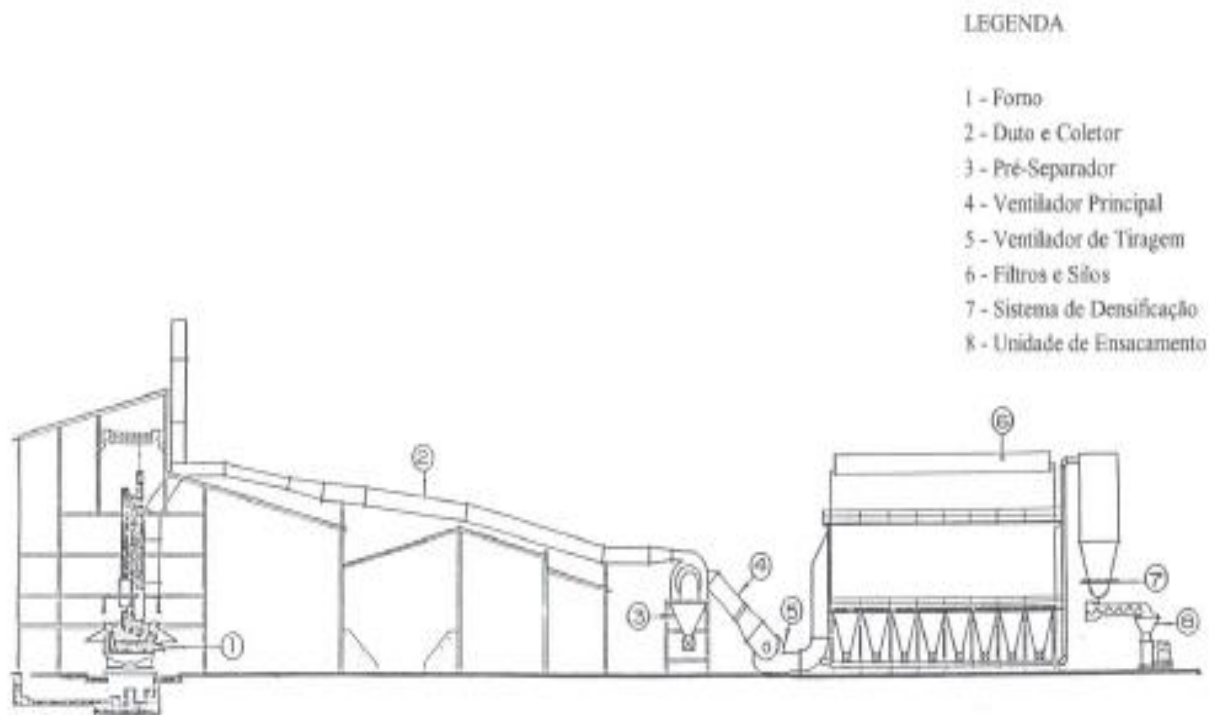


Figura 2-6: Esquema de produção do silício metálico ou de ferro silício 75% e obtenção da sílica ativa. (SILVA, 1997)



Figura 2-7: Forno elétrico giratório para fabricação do silício metálico (à esquerda) e Filtro de mangas e silos onde é coletada e armazenada a sílica ativa (à direita). (SILVA, 1997)

A sílica ativa foi a primeira pozolana altamente reativa a ser utilizada para se buscar altas resistências. Seu uso se iniciou com a Noruega na década de 60 e se estendeu aos Estados Unidos e ao Canadá na década de 80, período em que se iniciou sua exploração comercial. No Brasil, a sílica ativa só começou a receber maior atenção em 1986, durante um seminário ocorrido no Rio de Janeiro. A partir desse momento, iniciou-se um crescente número de pesquisas e teses nessa área, com o intuito de se conhecer melhor os benefícios e aplicabilidade da sílica ativa (CARMO, 2006). No ano de 2001, a produção mundial de sílica ativa era de 585,7 milhões de toneladas, enquanto no Brasil, a produção anual era de 10,5 milhões de toneladas (IBGE, 2002 apud CARMO, 2006).

As características da sílica ativa como cor, composição química e finura dependem de vários fatores, como: tipo de liga produzida, tipo de forno utilizado, composição química e da dosagem de matérias primas (MENDES, 2002). De acordo com Moraes (2012), do ponto de vista químico, a sílica ativa é composta majoritariamente de sílica amorfa. A proporção entre o silício amorfo e outros componentes presentes na composição, depende do tipo de liga utilizada na produção da sílica ativa. A composição química da sílica é mostrada na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Composição química da sílica ativa (ALVES; CAMPOS; NETTO, 1994)

Principais Componentes	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)
SiO ₂	87	96	93
Fe ₂ O ₃	0,04	0,26	0,09
Al ₂ O ₃	0,04	0,72	0,35
TiO ₂	0,001	0,025	0,007
MgO	0,1	0,9	0,65
Na ₂ O	0,1	1,8	0,94
K ₂ O	0,3	3,9	2,26
MnO	0,01	0,07	0,03
CaO	0,1	0,5	0,3

Atualmente, devido a diversos fatores (ecológicos, econômicos e técnicos), procura-se aumentar o consumo de adições minerais, nos materiais cimentícios. O uso de pozolanas, além de melhorar características do material, também diminui a energia envolvida durante o processo, por diminuir o uso de cimento. Aliado a esse fator, outro benefício energético e ambiental é o uso de materiais provenientes de resíduos industriais, como a sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno. Esses materiais que outrora seriam descartados passam a ter valor comercial e tecnológico, servindo de subsídio para pesquisas na área. (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

É possível se conseguir uma economia de energia e custos substituindo parte da massa de cimento por um subproduto pozolânico. Além disso, os materiais podem ser melhorados significativamente com o uso de adições altamente reativas, aliando assim, melhorias tecnológicas com economias financeiras e energéticas. Entre os benefícios do uso de pozolanas pode-se citar: melhor resistência à fissuração, aumento a resistência final, diminuição da permeabilidade e diminuição da zona de transição entre agregado e aglomerante. (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Kanning (2013) em sua pesquisa, concluiu que o emprego de materiais pozolânicos, em especial a cinza de folha de bananeira, a cinza volante e a sílica ativa melhoram as características de argamassas no estado fresco e endurecido. As argamassas estudadas apresentaram uma diminuição de porosidade e permeabilidade, além de aumento da resistência mecânica. Dentre as três pozolanas estudadas por Kanning (2013), a sílica ativa apresentou os melhores resultados em relação ao acréscimo de resistência mecânica.

Segundo Moraes (2012), dentre as adições altamente reativas, a sílica ativa é a que vem tendo mais espaço no mercado, sendo vastamente utilizada na busca por concretos de maior impermeabilidade e resistência. A alta reatividade da sílica ativa é justificada pelo alto teor de

sílica amorfa e elevada finura em sua composição. Segundo Atcin (2000), a sílica ativa age de duas maneiras no concreto: uma química, como pozolana reagindo com o Ca(OH)_2 liberado na hidratação do cimento e formando CSH (Silicato de cálcio hidratado), responsável pela resistência do concreto, e outra física, atuando como *filler* e ocupando os espaços vazios da pasta, densificando assim a estrutura, deixando menos porosa e mais resistente.

O crescente uso de materiais pozolânicos, como a sílica ativa, metacaulim, nanossílica, entre outros, justifica-se pelas seguintes vantagens, segundo Andrade (2015):

- Aumento da resistência ao ataque de águas naturais, especialmente as ricas em sulfatos;
- Redução do calor de hidratação do cimento;
- Aumento da resistência mecânica;
- Prevenção contra a reação álcali-agregado;
- Diminuição da permeabilidade;
- Melhoria das propriedades de concretos e argamassas no estado fresco.

Ainda segundo Andrade (2015), para uma pozolana ser considerada de alta reatividade, como a sílica ativa, deve combinar dois fatores: elevado teor de SiO_2 , essencialmente não-cristalino, e uma grande área específica. Esses dois critérios são atendidos pela sílica ativa e principalmente pela nanossílica, devido à sua área específica elevada. A Figura 2-8 mostra uma imagem microscópica de partículas de sílica ativa. Nota-se seu formato arredondado e pequeno tamanho.

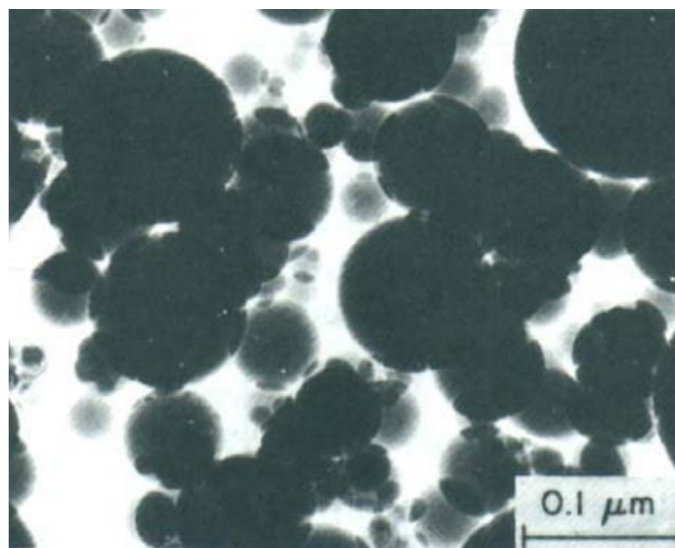


Figura 2-8: Microscopia eletrônica de transmissão da sílica ativa (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Uma importante característica da sílica ativa está em sua reatividade pozolânica, que na presença de água reage com o hidróxido de cálcio, liberado pela hidratação do cimento, e forma silicatos estáveis, em especial o CSH, responsável pela resistência de materiais cimentícios (CASTRO, 2007).

No concreto, o principal efeito da sílica ativa é o refinamento da região de interface entre agregado e aglomerante. A sílica ativa tende a se concentrar na região, evitando a formação de grandes cristais de Ca(OH)_2 . Desse modo, o CSH gerado durante as reações pozolânicas e de hidratação adquire uma maior aderência com os agregados, devido ao contato direto propiciado pela sílica ativa (KANNING, 2013). Segundo Castro (2003), a presença de partículas de sílica ativa nessa região dificulta a orientação dos cristais de hidróxido de cálcio em torno no agregado, reduzindo a porosidade da interface, região essa conhecida por ser a mais fraca no concreto endurecido.

Outro efeito benéfico da sílica ativa na resistência do concreto é produzir pontos de nucleação, devido ao pequeno tamanho de suas partículas, acelerando o processo de hidratação do cimento (MORAES, 2012). A grande área específica da sílica ativa, também ajuda a diminuir a quantidade de água livre na mistura, uma vez que exercem uma grande atração sobre as demais substâncias da mistura. A diminuição de água livre faz com que diminua a exsudação no concreto fresco, melhorando assim sua coesão (HOFFMANN, 2001).

As características do concreto fresco são influenciadas principalmente pela forma das partículas de sílica ativa e sua distribuição granulométrica. Por outro lado, o efeito da sílica ativa sobre as características do concreto endurecido depende principalmente das características químicas da sílica ativa, que interferem na resistência mecânica e porosidade do concreto endurecido (TATTERSALL, 1955)

Moraes e Lopes (2010) explicam que as partículas finas de sílica ativa adicionadas à massa cimentícia fresca segmentam os canais de água na pasta, o que diminui a exsudação e segregação no concreto fresco. Essa exsudação e segregação são as primeiras causas de falta de homogeneidade microestrutural do concreto. Salienta-se também que, segundo Mehta e Monteiro (2014), o pequeno tamanho das partículas de sílica aumenta consideravelmente a demanda por água ou superplastificante para se manter a trabalhabilidade do material. O uso de superplastificante também assegura uma melhor dispersão das partículas de sílica ativa pela massa do concreto. Uma boa dispersão é essencial para que os efeitos químicos e físicos da sílica ativa possam se desenvolver plenamente sobre toda a massa cimentícia.

Castro e Libório (2012) estudaram os efeitos da adição de sílica ativa e sílica de casca de arroz sobre a trabalhabilidade de pastas, através do ensaio de mini-abatimento. A Figura

2-9 mostra que as duas adições diminuem a área de espalhamento das pastas ensaiadas, mantendo o mesmo nível de trabalhabilidade durante o tempo de ensaio de 120 minutos. Porém, nota-se que a sílica ativa não diminui tanto a trabalhabilidade quanto a sílica de casca de arroz. Pelos dados, fica claro o porquê da necessidade da adição de superplastificantes em argamassas e concretos com adição de sílica ativa.

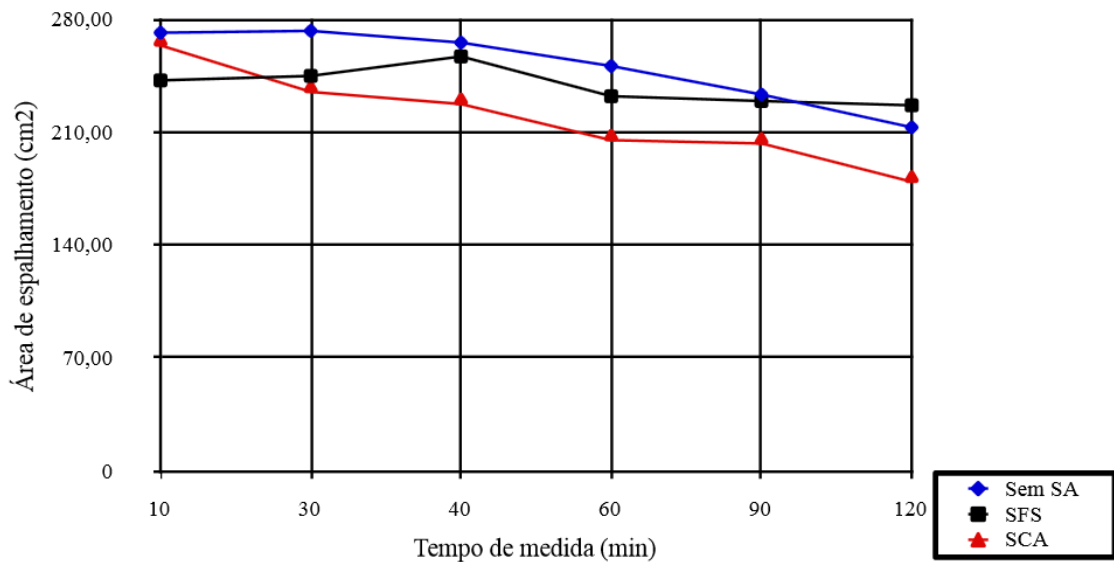


Figura 2-9: Área de espalhamento em relação ao tempo para pastas com incorporação de sílica ativa (SFS) e sílica da casca de arroz (SCA). (CASTRO e LIBORIO, 2012)

Já no concreto endurecido, Moraes (2012) coloca que a sílica ativa preenche os espaços entre os grãos de cimento, diminuindo e seccionando os vazios da pasta. Esse empacotamento da microestrutura da pasta colabora para diminuição da porosidade e permeabilidade do concreto. Segundo Azevedo (2001), a permeabilidade está intimamente ligada à durabilidade do material, uma vez que a durabilidade é função dos ataques químicos, dependente da permeabilidade. Moraes e Lopes (2010) ratificam que a permeabilidade coordena a entrada não só de água, mas de gases e outras substâncias agressivas ao concreto, que podem gerar oxidação do aço, reação álcali-agregado, ataque por sulfatos, entre outros. Assim, a adição de sílica ativa pode aumentar a durabilidade de peças de concreto, por diminuir o volume de vazios do material.

Dinten (2000), explica que a interface entre pasta de cimento e agregados é especialmente susceptível a ataques químicos, uma vez que a exsudação interna e a orientação do Ca(OH)_2 perpendicular ao agregado geram áreas com maior porosidade ao redor dos agregados. Essa porosidade em torno dos agregados é o principal fator de enfraquecimento da pasta na zona de transição. Segundo Paulon (1996), as partículas de sílica se posicionam

próximas aos agregados, diminuindo a porosidade da zona de interface, colaborando para uma zona mais densa e menos sujeira a ataques químicos. A Figura 2-10 mostra a diferença entre as zonas de transição entre dois concretos: um convencional (à esquerda) e um com uso de sílica ativa (à direita). É notável a densificação da zona de interface com o uso de sílica ativa.

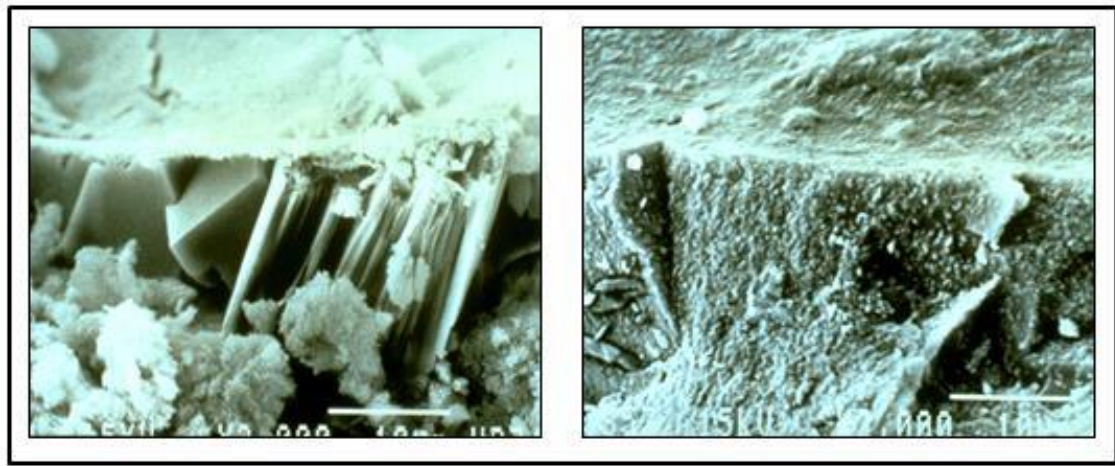


Figura 2-10: Análise microscópica da zona de transição de um concreto convencional (à esquerda) e de um concreto com sílica ativava (à direita). (BENTUR;COHEN, 1987)

Portanto, o uso de sílica ativa aumenta o refinamento dos poros, gerando uma menor porosidade e permeabilidade. Além disso, diminui a interface da pasta de cimento com o agregado, devido à diminuição da exsudação interna do material. Esses efeitos em conjunto levam a um aumento da durabilidade e do desempenho estrutural do material com a utilização de sílica ativa (CASTRO, 2007).

Em relação à resistência mecânica, Mehta e Monteiro (2014) destaca que o composto gerado na reação pozolânica é bastante parecido com o composto gerado na hidratação cimento que lhe confere sua resistência. Porém, apesar de se aumentar a resistência final do material, a adição de sílica ativa retarda o tempo de pega. De acordo com Moraes e Lopes (2010), a reação pozolânica da sílica ativa, para geração de CSH, necessita que certa quantidade de hidróxido de cálcio já tenha sido gerada pela hidratação do cimento. Assim, a resistência do cimento nas idades iniciais é prejudicada, mesmo com o aumento dos pontos de nucleação que acelera a hidratação do cimento.

Essa resistência inicial prejudicada pelo acréscimo de sílica ativa é comprovada por Andrade (2015) em sua pesquisa com adições minerais altamente reativas e misturas ternárias. Todos os traços com adição de sílica ativa em diferentes teores ensaiados depois de um dia da moldagem apresentaram um índice de desempenho menor que 100%, o que indica um valor de resistência menor que o do traço de referência sem sílica ativa. Esse resultado foi

encontrado tanto para a resistência à compressão quanto para a resistência à tração. Entretanto, após sete dias, os traços com adições de sílica ativa apresentaram maior resistência que o traço de referência, comprovando que apesar de um retardo inicial, a resistência final alcançada é maior adicionando-se sílica ativa. O maior acréscimo encontrado por Andrade (2015) com adição de sílica ativa somente, foi com um teor de 15% em substituição à massa de cimento, apresentando um acréscimo de resistência, aos 28 dias, de 36,98% em relação ao traço de referência.

Segundo Netto (2006), a maior diferença entre as reações pozolânicas e as reações de hidratação do cimento não estão nos produtos gerados, mas sim na sua taxa de produção. As reações de hidratação ocorrem de maneira mais rápida, enquanto as reações pozolânicas se apresentam mais lentas. O autor ainda explica que o cimento e a pozolana apresenta estágios diferentes de reação. A reação pozolânica tem início entre sete e quinze dias após mistura, enquanto a reação de hidratação se apresenta em estágio avançado. Ou seja, nas idades iniciais, a resistência gerada é exclusivamente devido à hidratação do cimento, enquanto a sílica ativa age como ponto de nucleação para aceleração da reação de hidratação. Só em estágios posteriores as reações pozolânicas passam a serem importantes, reagindo com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento e formando compostos que darão resistência ao material cimentício.

Hoffman (2001) observa que as opiniões quanto ao teor ótimo de adição de sílica ativa variam muito, pois esse teor ótimo depende de vários fatores relacionados à produção do concreto, muitos deles difíceis de controlar, como condições do ambiente de exposição do concreto e compatibilidade dos materiais. Malhotra e Mehta (1996) sugerem um teor ótimo de substituição de sílica ativa entre 7% e 10%, porém, pesquisas mostram resultados positivos com substituições de até 20%, como a pesquisa de Andrade (2015), citada anteriormente. Por outro lado, Kanning (2013) em seus resultados de resistência a compressão de argamassas para diferentes teores de sílica ativa, obteve como teor ótimo de adição 7,5%, o que evidencia a variabilidade do teor ótimo para argamassas diferentes. Os resultados de Kanning (2013) são mostrados na Figura 2-11.

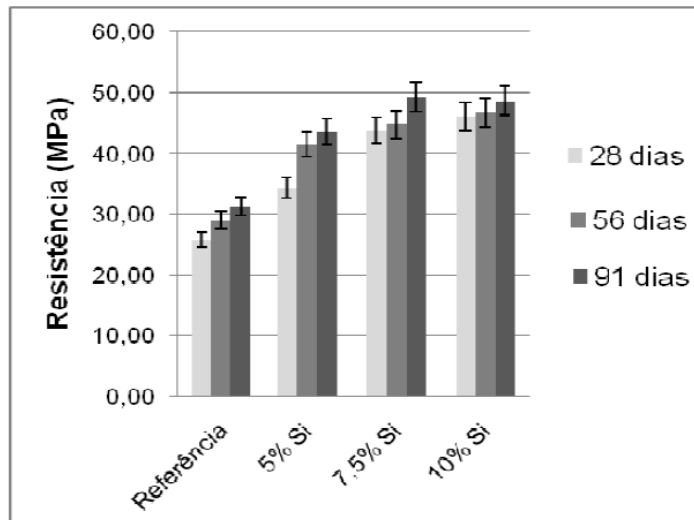


Figura 2-11: Resistência à compressão de argamassas para diferentes teores de sílica ativa. (KANNING, 2013)

Bhanja e Sengupta (2006) analisaram a substituição de cimento por sílica ativa para diferentes concretos aos 28 dias. Os resultados mostrados na Figura 2-12 apontam que o teor ótimo de substituição varia com a relação água/aglomerante.

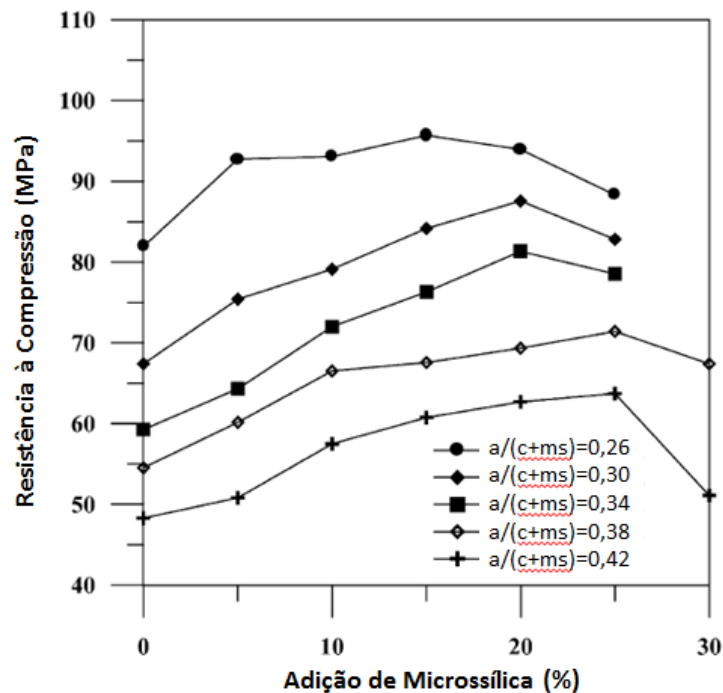


Figura 2-12: Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes concretos e teores de sílica ativa. (BHANJA; SENGUPTA, 2006)

Segundo Moraes (2012), diferentemente da sílica ativa, que possui vários estudos e seus efeitos em materiais cimentícios são bem conhecidos, pouco ainda se sabe sobre os efeitos da

nanossílica. Sabe-se que é um material muito parecido com a sílica ativa, também composta de sílica, porém em uma escala menor.

Delgado et al (2012), o tamanho típico das partículas de sílica ativa é de 200 a 1000 nm, enquanto da nanossílica é de 3 a 150 nm. Segundo o autor, quando as dimensões das partículas são diminuídas da escala macro para micro e depois para nano, suas características mudam drasticamente. A diminuição do tamanho das partículas é acompanhada pelo aumento substancial de sua área específica, aumentando assim sua reatividade química. Combinando a elevada finura e área específica com a sílica em estado amorfo em sua composição, espera-se que a nanossílica tenha elevada capacidade pozolânica, superando as adições atualmente utilizadas. Porém, pelos poucos resultados já encontrados, torna-se necessária a realização de mais pesquisas sobre a nanossílica.

2.3 MISTURAS TERNÁRIAS COM CIMENTO PORTLAND, SÍLICA ATIVA E NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE

Atualmente, são conhecidos vários materiais com efeitos pozolânicos que podem ser adicionados ao cimento Portland. Ao se combinar dois tipos de adições minerais e misturá-las ao cimento, criam-se as chamadas misturas ternárias, sendo que a mistura pode ser feita por substituição parcial em massa de cimento ou com adição na quantidade de aglomerante. (ANDRADE, 2015).

Segundo Andrade (2015), concretos feitos com misturas ternárias quando bem dosados têm suas reações realizadas concomitantemente. A ação conjunta das duas adições gera uma argamassa com menor porosidade e permeabilidade devido a sua microestrutura modificada. As duas adições trabalharão juntas, de modo que os espaços sejam mais bem ocupados, diminuindo assim o volume de vazios e melhorando a microestrutura dos materiais cimentícios.

O concreto de alto desempenho composto por misturas ternárias, com cimento Portland e adições pozolânicas, vem se mostrando um material adequado na produção de estruturas duráveis com menor custo financeiro e energético. Dessa maneira, é possível produzir estruturas de concreto de alto desempenho, com boa durabilidade e com baixo consumo de cimento (HOPPE FILHO, 2008).

Porém, é importante salientar que também há pontos negativos no uso de misturas ternárias. Isaia (2005) ressalta que misturas cimentíceas com grandes teores de adições minerais estão mais sujeitos ao efeito da carbonatação. Porém, o uso de adições minerais

diminui a permeabilidade das argamassas, ou seja, acontece um preenchimento dos vazios da pasta, diminuindo assim o volume de poros. A diminuição da permeabilidade, compensa em parte a possibilidade da carbonatação, uma vez que dificulta a entrada de água e gases para o interior da argamassa.

Moraes (2001), afirma que o acréscimo de resistência obtido pela utilização de misturas ternárias se deve à ação conjunta das adições, onde o efeito *filler* é potencializado. O uso de partículas com diferentes granulometrias faz com que os espaços sejam preenchidos, inclusive em torno dos agregados, na zona de transição, área normalmente mais fraca do concreto. Assim, o uso de misturas ternárias diminui a porosidade e permeabilidade dos materiais, e ainda melhora o contato entre agregado e aglomerante, o que possibilita uma maior resistência do concreto. Em sua pesquisa com adições de cinza volante e cinza de casca de arroz em concretos, para diferentes relações água/aglomerante, Moraes (2001) observou que a resistência à compressão, aos 28 e 91 dias, dos concretos com misturas ternárias aumentou para relação água/aglomerante de 0,35, porém, diminuiu para relações de 0,50 e 0,65. Em média, considerando as diferentes relações água/aglomerante analisadas, as misturas ternárias (25% e 50% de adições) apresentaram índice de desempenho abaixo de 100% para 28 e 91 dias. A exceção foi o traço contendo 12,5% de cinza de casca de arroz e 12,5% de cinza volante, que obteve um índice de desempenho de 101% aos 28 dias. Porém, no seu trabalho Moraes (2001) salienta que em relação à resistência à compressão unitária (Razão entre a resistência à compressão axial simples e a massa de cimento da mistura) o índice de desempenho é crescente com o aumento da quantidade de adições, chegando a um máximo para o traço com 50% de adições (12,5% de cinza de casca de arroz e 12,5% de cinza volante) de 188% aos 28 e 91 dias.

Sari et. al. (1999) ressalta que misturas ternárias com sílica ativa e nanossílica vêm sendo realizadas para concretos de alto desempenho, para garantir uma melhor compactação da microestrutura, devido à ocupação de vazios do material. Segundo Moraes (2012), no caso específico de concretos e argamassas, o empacotamento das partículas é mais facilmente atingido utilizando-se materiais com diferentes granulometrias. Desse modo, as misturas ternárias de sílica ativa, nanossílica e cimento Portland se apresentam como uma forma de se obter uma porosidade mínima, uma vez que, devido ao tamanho dos grãos, os espaços entre grãos podem ser preenchidos (QUERCIA et al, 2012).

Moraes (2012) em sua pesquisa, conclui que, entre as situações propostas, a que obteve os melhores resultados quanto à resistência à compressão foi a adição conjunta de nanossílica e sílica ativa, tanto para concretos de centrais, quanto para produção de concretos pré-

moldados. Acredita-se que os resultados são devido à ação da nanossílica como formadora de pontos de nucleação, enquanto a sílica ativa seria a principal responsável pelos efeitos pozolânicos, além de favorecer o empacotamento de partículas, uma vez que possui granulometria intermediária entre o cimento Portland e a nanossílica. Dessa forma, com essa ação conjunta, se obtém maior formação de compostos resistentes.

Nolli Filho (2015) avaliou em sua pesquisa os efeitos da adição conjunta de nanossílica estabilizada em superplastificante e sílica ativa sobre a resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos. Foram ensaiados traços com relação água/aglomerante aproximadamente constante e igual a 0,41. Testou-se a nanossílica estabilizada em superplastificante adicionada sozinha, em teor de 0,39% em relação ao cimento, e em conjunto com a sílica ativa, com teores em relação ao cimento de 0,39% de nanossílica estabilizada em superplastificante e 3,5% de sílica ativa (7,0% de sílica ativa em suspensão). Os resultados quanto à resistência à compressão são mostrados na Figura 2-13.

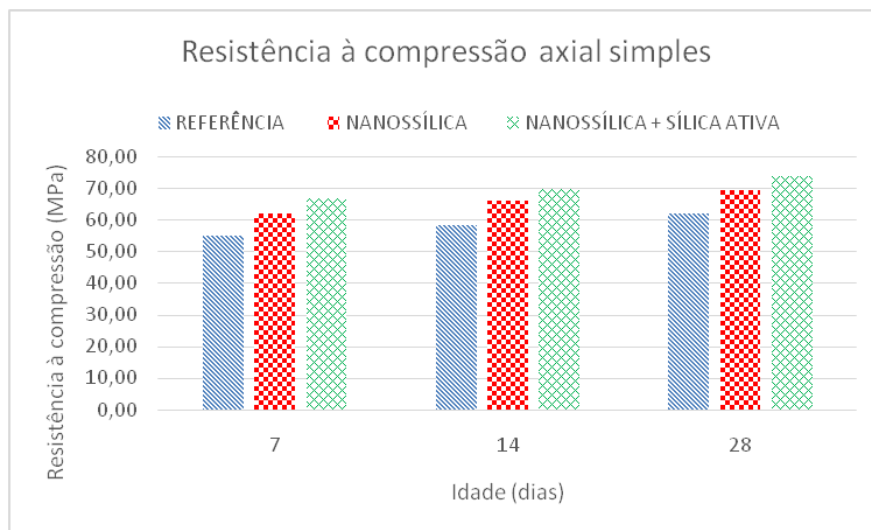


Figura 2-13: Resistências à compressão para diferentes traços de concreto. (NOLLI FILHO, 2015 - modificado)

Observa-se pelos resultados que o traço contendo somente nanossílica estabilizada em superplastificante (0,39%) obteve um acréscimo de resistência de 12,8% aos 7 dias, 13,2% aos 14 dias e 11,8% aos 28 dias. Por outro lado, o traço com mistura ternária (0,39% de nanossílica estabilizada em superplastificante e 3,5% de sílica ativa) obteve um acréscimo de resistência de 21,7% aos 7 dias, 19,7% aos 14 dias e 19,2% aos 28 dias. Logo, os resultados demonstram que a mistura ternária com adição de sílica ativa e nanossílica estabilizada em superplastificante obteve melhores resultados que a adição de nanossílica estabilizada em superplastificante isoladamente para todas as idades ensaiadas. Nota-se também que para o traço de mistura ternária, o acréscimo de resistência foi maior para 7, o que pode ser

explicado pelo desenvolvimento da hidratação do cimento e formação de Ca(OH)_2 a ser utilizado na reação pozolânica.

Quanto ao módulo de elasticidade tangente inicial, os resultados obtidos ensaiando-se os traços citados, Nolli Filho (2015) obteve os resultados explicitados na Figura 2-14. Os resultados demonstram que as adições minerais aumentaram o módulo de elasticidade tangente inicial, melhorando assim as características do concreto. O traço com apenas nanossílica estabilizada em superplastificante obteve um acréscimo de módulo de elasticidade de 21,0% aos 7 dias, 19,0% aos 14 dias e 19,3% aos 28 dias. O traço com adição de nanossílica estabilizada em superplastificante e sílica ativa obteve um acréscimo de módulo de elasticidade de 35,3% aos 7 dias, 31,5% aos 14 dias e 30,2% aos 28 dias. Observa-se que a mistura ternária utilizando-se nanossílica estabilizada em superplastificante, sílica ativa e cimento Portland apresentou melhores resultados para todas as idades ensaiadas, verificado pelo maior valor do módulo de elasticidade.

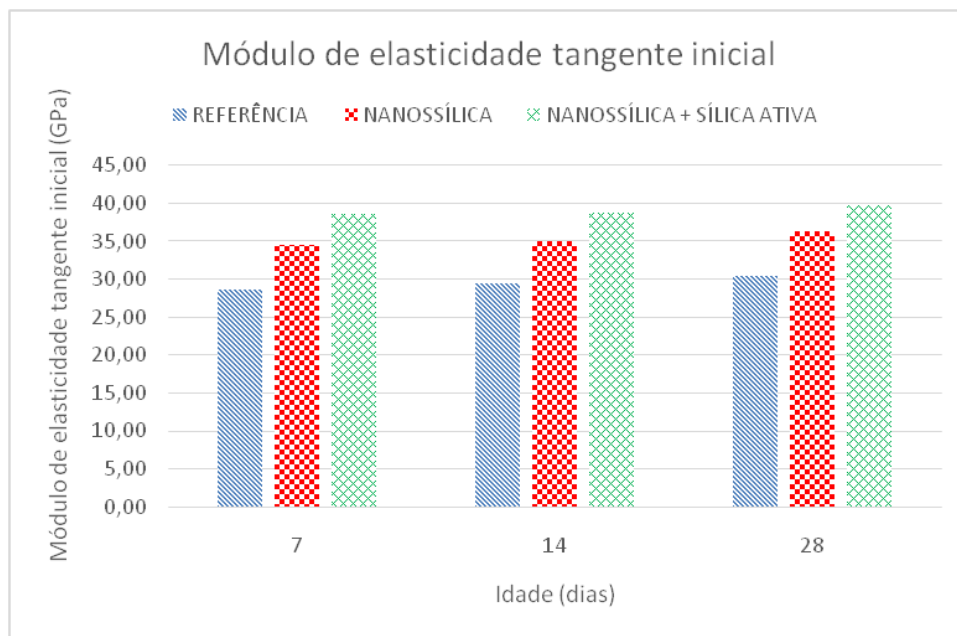


Figura 2-14: Módulos de elasticidade tangente inicial. (NOLLI FILHO, 2015 - modificado)

A pesquisa de Nolli Filho (2015) também incluiu uma análise de viabilidade econômica, cotando o custo do concreto para a região de Belo Horizonte - MG. Foi comprovada a economia de material conseguida com o uso de misturas ternárias. Para o traço com adição de nanossílica estabilizada em superplastificante apenas, foi verificada uma redução de 15,7% de cimento, enquanto para o traço com nanossílica estabilizada em superplastificante e sílica ativa, a redução foi de 18,7%. O consumo de cimento influencia no custo final dos concretos. O custo do traço com adição de nanossílica apresentou uma economia de 5,7% em relação ao

traço de referência, enquanto o concreto de mistura ternária apresentou um acréscimo de 3,2% em relação à referência. Nolli Filho (2015) salienta também que apesar do maior custo, o traço contendo nanossílica estabilizada em superplastificante e sílica ativa pode ser mais econômica, considerando-se a possibilidade de maior esbeltez das peças de concreto, devido ao acréscimo gerado na resistência.

Já Andrade (2015), pesquisou, entre outros traços, misturas ternárias entre cimento Portland, sílica ativa e nanossílica coloidal. Andrade (2015) em um primeiro momento, variou os teores de sílica ativa em 5%, 10% e 15% e os teores de nanossílica coloidal em 1%, 2% e 3%, sempre em substituição ao cimento. Seus resultados mostram que, com exceção dos traços com 10% de sílica ativa, todos os outros tiveram resistências menores com um dia de cura do que o traço de referência. Esse resultado pode ser explicado pelo fato das reações pozolânicas dependerem da formação de hidróxido de cálcio pela hidratação do cimento. Portanto em pequenas idades, é possível que a quantidade de hidróxido de cálcio gerado não seja ideal para desenvolvimento das reações pozolânicas, explicando assim o resultado encontrado.

Nos ensaios com sete dias de cura, todos os traços de misturas ternárias apresentaram índice de desempenho maior que 100, sendo que quanto maior o teor de nanossílica, maiores as resistências. Dentre os traços, o com 10% de sílica ativa e 3% de nanossílica coloidal apresentou os melhores resultados de resistência.

Já nos ensaios com 28 dias de cura, todos os traços continuaram a apresentar uma resistência maior que o traço de referência. Os traços com 5% e 10% de sílica ativa apresentaram uma maior resistência a medida que se aumentou a quantidade de nanossílica coloidal. Por outro lado, o traço contendo 15% de nanossílica apresentou um decréscimo de resistência a medida que se aumentou o teor de nanossílica coloidal. Esse resultado pode estar relacionado com a quantidade disponível de hidróxido de cálcio, uma vez que, com o aumento das adições minerais aumenta-se a demanda por Ca(OH)_2 .

Dentre os traços estudados por Andrade (2015) em uma primeira etapa, o que obteve os melhores resultados foi o produzido com substituições ao cimento de 10% de sílica ativa e 3% de nanossílica coloidal. O maior índice de desempenho para o traço foi aos 28 dias, com o acréscimo na resistência de 56,89% em relação ao traço de referência. Os resultados de Andrade (2015) são mostrados na Figura 2-15.

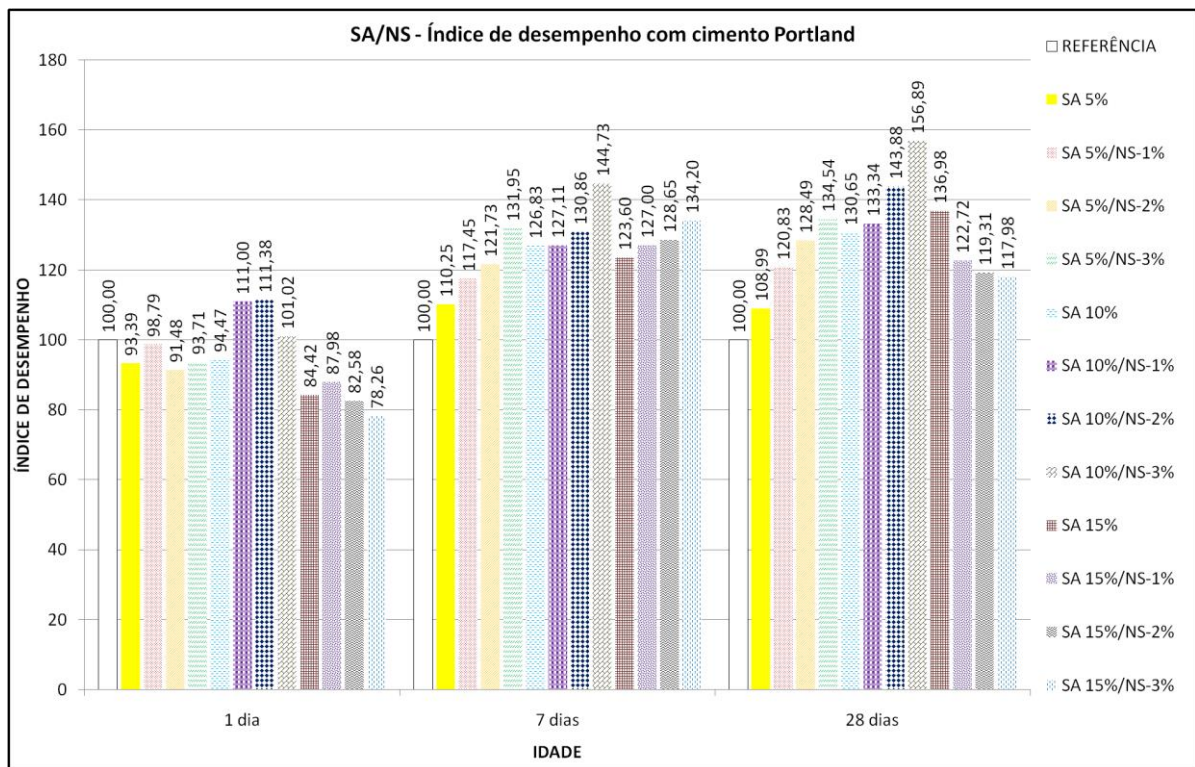


Figura 2-15: Índice de desempenho para misturas ternárias com sílica ativa, nanossílica coloidal e cimento Portland. (ANDRADE, 2015 - modificado)

Em um segundo momento da pesquisa, Andrade (2015) estudou os efeitos da adição de um teor elevado de nanossílica coloidal às argamassas. Foram ensaiados nessa etapa, argamassas com substituição de cimento por 10% de sílica ativa e 5% e 10% de nanossílica coloidal. Os resultados são mostrados na Figura 2-16.

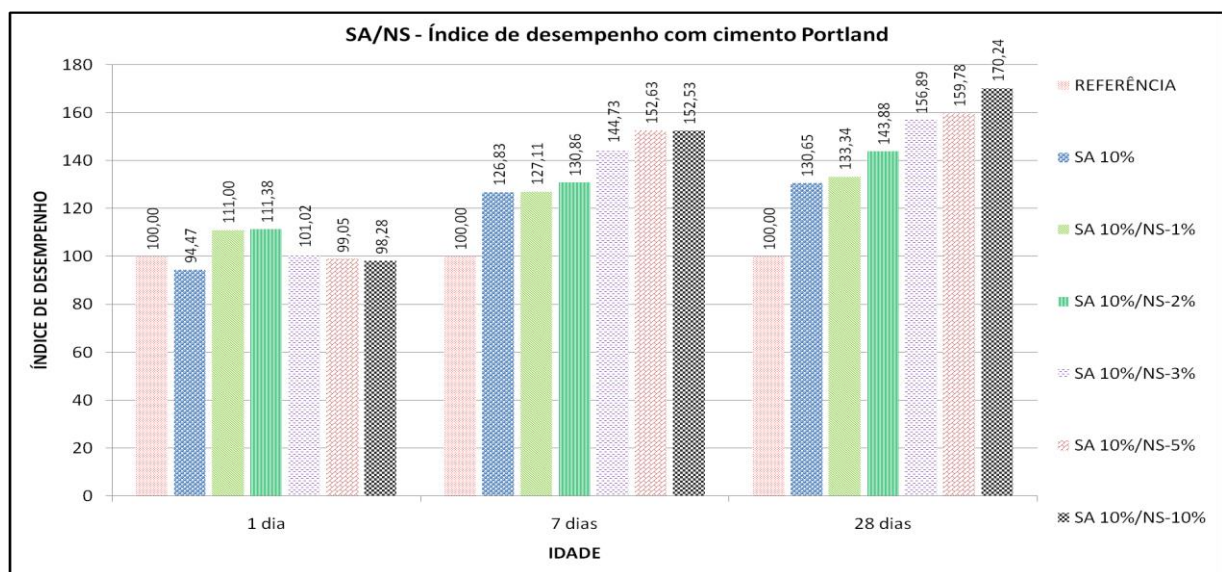


Figura 2-16: Índice de desempenho para misturas ternárias com sílica ativa, cimento Portland e teores elevados de nanossílica coloidal. (ANDRADE, 2015 - modificado)

Pelos resultados obtidos por Andrade (2015), percebe-se que, à medida que se aumentou o teor de nanossílica coloidal, aumentou-se a resistência à compressão das argamassas. Os melhores resultados de resistência foram obtidos para substituições de 5% e 10% de nanossílica em relação ao cimento Portland, gerando aumentos de resistência aos 28 dias de 59,78% e 70,24%, respectivamente, em relação à referência. Porém, também foi constatado por Andrade (2015) que a adição de nanossílica coloidal às misturas, aumentou a consistência das argamassas estudadas, demandando assim maiores quantidades de superplastificante para se manter a consistência desejada, inclusive tendo que utilizar teores maiores do que os indicados pelo fabricante.

Os resultados encontrados demonstram a importância de aliar os efeitos da sílica ativa com a nanossílica em suas diversas formas. Justificando, assim, o uso de misturas ternárias com cimento Portland, sílica ativa e nanossílica na produção de argamassas e concretos, para melhoria de características dos materiais e economia energética e financeira. Nesse contexto, essa pesquisa fornecerá dados sobre o efeito da nanossílica estabilizada em superplastificante atuando isoladamente e atuando em misturas ternárias com cimento Portland e sílica ativa. Os resultados encontrados se somarão às pesquisas do grupo da PECC-UnB (Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil), servindo de base ou complemento a pesquisas envolvendo materiais pozolânicos, visando se conhecer melhor os efeitos da nanossílica estabilizada em superplastificante e contribuir para sua utilização no mercado de trabalho.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesse tópico serão apresentados os materiais e procedimentos que serão executados no decorrer da pesquisa, assim como sua sequência e finalidade. Os procedimentos apresentados visam analisar o índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante, em adição ao cimento, no que diz respeito às resistências de compressão axial simples e tração por compressão diametral. Também será analisado o comportamento da argamassa quando incorporadas a nanossílica estabilizada em superplastificante e a sílica ativa em conjunto.

3.1 MATERIAIS

Os materiais que serão utilizados no prosseguimento da pesquisa, segundo a NBR 13956-3 (ABNT, 2012) são citados a seguir:

- Areia normal brasileira;
- Cimento Portland CP II-F-32;
- Adição mineral altamente reativa utilizada: Sílica ativa densificada;
- Aditivo utilizado: nanossílica estabilizada dispersa em superplastificante éter-policarboxilato. Será utilizada como adaptação à norma, uma vez que não existe norma para índice de desempenho de nanossílica estabilizada em superplastificante.

3.2 PROCEDIMENTOS

Para se analisar corretamente os resultados encontrados e buscar atingir os objetivos da pesquisa dividiram-se os procedimentos em duas etapas: (1) Seleção e caracterização dos materiais; (2) Determinação do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante e da sílica ativa em argamassas de cimento Portland.

Inicialmente foram definidos procedimentos experimentais para a realização dos ensaios. Os procedimentos experimentais originais são mostrados no Anexo II. A seguir é feita uma explicação sobre o andamento do programa experimental, modificações no programa experimental e as respectivas justificativas.

3.2.1 MODIFICAÇÕES DOS PROCEDIMENTOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A princípio foi seguido o passo a passo definido pelo programa experimental inicial, apresentado no Anexo II. No decorrer da pesquisa, entretanto, surgiram empecilhos a partir

dos quais se definiu um novo programa experimental de forma a melhorar a execução da pesquisa e a análise de resultados. A seguir serão mostradas as etapas e as modificações realizadas no programa experimental.

- Inicialmente foi moldado um traço com 3% de nanossílica estabilizada em superplastificante em adição ao cimento Portland (Traço 4) para definição da relação água/aglomerante e espalhamento padrão das argamassas. O espalhamento encontrado foi de 305 mm. Em relação ao fator água/aglomerante, a relação de 0,48 utilizada foi considerada adequada para sequencia dos ensaios, uma vez que não houve separação entre o agregado e a pasta, tendo formado uma argamassa homogênea, além de ser a relação indicada pela NBR 13956-3 (ABNT, 2012);
- Para o traço quatro moldado, com 3% de nanossílica estabilizada em superplastificante, não foi possível desformar os corpos de prova com 24 horas, uma vez que os mesmos ainda não haviam adquirido resistência suficiente. Esse fator foi um problema tanto pela norma, que indica a desforma com 24 horas, quanto pela logística de uso do Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB). Foi necessário modificar os teores de nanossílica estabilizada em superplastificante inicialmente definidos (1%, 2% e 3% em adição ao cimento Portland) de modo a se ter corpos de prova que pudessem ser desformados com 24 horas. Testou-se, portanto, os teores de 1%, 1,5% e 2% de nanossílica estabilizada em superplastificante em adição ao cimento Portland. Entre os teores testados, os traços com 1% e 1,5% adquiriram resistência suficiente com 24 horas para poderem ser desformados. Assim, definiu-se que os novos teores de nanossílica estabilizada em superplastificante das argamassas utilizadas nos ensaios seriam de 0,5%, 1% e 1,5%, de modo a se obter argamassas exequíveis dentro da logística do laboratório. Salienta-se que os novos teores definidos estão dentro de uma faixa de utilização sugerida pelo fabricante do produto analisado. Foi definido também o acréscimo de um traço extra na pesquisa, com 3% de nanossílica estabilizada em superplastificante em adição ao cimento Portland, uma vez que este já havia sido moldado;
- Após definido que, com exceção do traço extra, o maior teor de nanossílica estabilizada em superplastificante seria de 1,5%, definiu-se um novo espalhamento máximo e padrão para as outras argamassas. O espalhamento encontrado foi de 279 ±10 mm que seria reproduzido nas outras argamassas. A relação água/aglomerante continuou sendo de 0,48, ainda considerada adequada para a realização dos ensaios;

- Após definido o espalhamento padrão, passou-se à moldagem das outras argamassas, iniciando pelo traço de referência. Porém, para se obter a mesma consistência do traço com 1,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante, foi necessário a adição de um alto teor de superplastificante à base de éter-policarboxilato. Foram testados dois superplastificantes para se conseguir o mesmo espalhamento padrão de 279 ± 10 mm. Foram necessários altos teores de superplastificante, com isso não foi possível deformar os corpos de prova com 24 horas. Portanto, foi definido nesse ponto que a consistência da argamassa não seria fixada, tornando-se um fator variável durante a pesquisa, uma vez que era necessário a desforma com 24 horas;
- Assim sendo, definiu-se novos teores e a não fixação da consistência da argamassa por razões de logística do uso de laboratório e definições da NBR 13956-3 (ABNT, 2012). O restante do procedimento de determinação do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante seguiu mantendo-se as datas de 1, 3, 7 e 28 dias para compressão axial simples e 28 dias para tração por compressão diametral. Os resultados de compressão axial simples para 91 dias foram retirados da análise da presente pesquisa, sendo que seus resultados poderão ser avaliados futuramente, uma vez que os corpos de prova para ensaio foram moldados;
- Na fase de seleção e caracterização dos materiais, não foi possível utilizar a sílica ativa já caracterizada pela pesquisa de Andrade (2015). Definiu-se, portanto, pela não caracterização da sílica ativa em pó utilizada, uma vez que sua função é apenas de comparação, não sendo o foco principal da pesquisa;
- Na fase de caracterização dos materiais, não se conseguiu os resultados da Microscopia Eletrônica de Transmissão, logo, a mesma foi retirada do escopo da pesquisa.

Na Figura 3-1 é mostrado um organograma com os novos procedimentos do programa experimental.

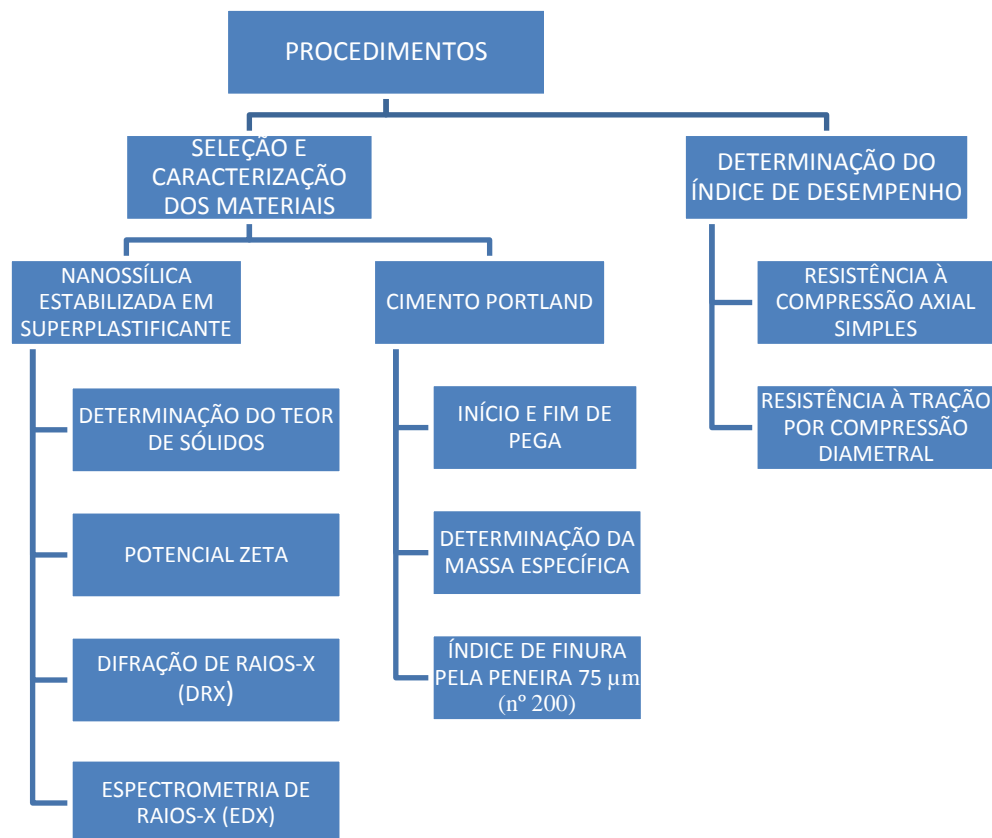


Figura 3-1: Organograma modificado do programa experimental

A seguir são mostrados os procedimentos operacionais realizados no decorrer da pesquisa.

3.2.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nessa fase, foi realizada a seleção dos materiais a serem utilizados assim como a caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante e do cimento Portland CP-II F 32.

Segundo a NBR 13956-3 (ABNT, 2012) no ensaio de índice de desempenho deve-se utilizar areia normal brasileira como definida pela NBR 7214 (ABNT, 2012). Pela areia normal brasileira ter sua produção controlada, apresenta-se devidamente caracterizada, não sendo necessária a realização de ensaios de caracterização para sua utilização.

3.2.2.1 NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE

Apesar da NBR 13956-3 (ABNT, 2012) não englobar o índice de desempenho para nanossílica, será utilizada nanossílica estabilizada em superplastificante como uma adaptação

à norma. Sabe-se que o superplastificante é à base de éter-policarboxilato, porém não se conhece o teor de nanossílica nem a sua dispersão na mistura.

Para caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante é necessário descobrir características como: dispersão da nanossílica no aditivo superplastificante, teor de nanossílica, composição química da mistura, nível de cristalização da nanossílica, entre outras. Portanto, na pesquisa serão realizados os seguintes ensaios para caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante:

3.2.2.1.1 Determinação do teor de sólidos dispersos no aditivo

O aditivo a ser utilizado na pesquisa contém nanossílica dispersa em superplastificante a base de éter-policarboxilato, portanto possui duas fases, uma líquida e uma sólida. Para se conhecer o teor de nanossílica no aditivo é necessário se conhecer o teor de sólidos dispersos no aditivo. Para tanto, será realizada a secagem de três amostras, conhecendo-se assim a porcentagem de sólidos dispersos, através da média dos três resultados.

Inicialmente serão separados cerca de 40g de aditivo e colocados dentro da estufa por aproximadamente 24 horas a 100 °C. Após esse tempo, mede-se a massa remanescente de amostra e determina-se o teor de sólidos pela equação 1, a seguir:

$$\%S = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- %S é o teor de sólidos em massa na amostra, em porcentagem;
- m₂ é a massa da amostra após a secagem, em gramas;
- m₁ é a massa da amostra antes da secagem, em gramas.

Para os ensaios a serem realizados, também é importante se conhecer o teor de água da amostra. Como simplificação, consideraremos o teor de água, em massa, na amostra pela equação 2, a seguir:

$$\%A = 100\% - \%S \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- %A é o teor de água em massa na amostra, em porcentagem;
- %S é o teor de sólidos em massa na amostra, em porcentagem.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB). Para determinação do teor de nanossílica, o resíduo do processo de determinação do teor de

sólidos será submetido ao ensaio de EDX e calculado o teor de SiO_2 em relação ao teor de sólido e depois em relação ao aditivo.

3.2.2.1.2 Potencial Zeta

O Potencial Zeta é um modo de medir a estabilidade coloidal de uma mistura. É função da carga superficial da partícula, de alguma camada adsorvida na interface com o meio e da natureza e composição do meio que a circunda. Como o Potencial Zeta reflete a carga efetiva das partículas, ele é um indicador da repulsão elétrica entre as partículas e da estabilidade da mistura. Quanto maior o valor do Potencial Zeta maior a tendência das partículas de se repelirem, estabilizando assim a mistura coloidal, uma vez que as forças de repulsão tendem a superar as forças naturais de agregação.

O Potencial Zeta não pode ser medido diretamente, usa-se algum tipo de medição indireta para se conhecer seu valor. O mais comum é a medição da mobilidade elétrica das partículas e entrada do valor na equação de Henry para cálculo do Potencial Zeta. Nos aparelhos atuais, essa medição é feita através do espalhamento do laser pelas partículas e medem o deslocamento Doppler na luz espalhada. É um processo automatizado onde se coloca a amostra em uma célula contendo dois eletrodos, e submete-se a célula a corridas de um laser até se obter um resultado satisfatório do Potencial Zeta.

O ensaio será realizado no Laboratório de Análise de Águas da Universidade de Brasília. Na Figura 3-2 são mostrados a célula e o aparelho utilizados na medição.



Figura 3-2: Na esquerda: célula DTS1060C utilizada no ensaio de Potencial Zeta. Na direita: aparelho para medição do Potencial Zeta

3.2.2.1.3 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios-x é utilizada para identificar compostos cristalinos nas amostras. O nível de cristalização da amostra é determinado qualitativamente, não sendo possível quantificar o material cristalino e o material amorfo. Através dos picos produzidos pelo difratômetro de raios-x é possível se ter uma ideia do grau de cristalização através do formato do gráfico gerado. O gráfico mais suave, porém com “ruídos”, indica um material mais amorfo do que cristalino, apresentando assim maior reatividade.

O equipamento utilizado possui uma fonte de raios-x, um analisador de energia fotoelétrica e um detector de elétrons. O ensaio será realizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Será utilizado no ensaio, parte do resíduo resultante do ensaio de determinação do teor de sólidos devidamente moído em almofariz e passado pela peneira nº 200 (abertura de 75 µm).

3.2.2.1.4 Eflorescência de Raios-X (EDX)

A análise química da amostra será feita através da eflorescência de raios-x. Essa técnica consiste em analisar o espectro de fluorescência e obter informações quantitativas sobre a concentração dos elementos químicos que formam a amostra.

A análise química será realizada na parte sólida do aditivo. Para isso, parte do resíduo sólido gerado no ensaio de determinação do teor de sólidos será previamente seco e pulverizado com o auxílio de um almofariz. O pó resultante será utilizado no ensaio de EDX. Esse ensaio visa definir o teor de nanossílica na parte sólida do aditivo, além de outros componentes químicos do produto.

O ensaio de eflorescência de raios-x será realizado no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília.

3.2.2.2 CIMENTO PORTLAND

Segundo a NBR 13956-3 (ABNT, 2012), o cimento Portland que deve ser utilizado na determinação do índice de desempenho é o CP-II F 32.

Para a utilização do cimento Portland serão necessários também ensaios de caracterização, citados a seguir. Salienta-se que um ensaio comum do cimento Portland é a determinação da resistência à compressão, que não será feita nessa fase de caracterização. A

determinação da resistência à compressão será realizada no traço de referência, como mostrado no item 3.2.3.1.

3.2.2.2.1 Determinação do tempo início e fim de pega

O método de determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland é definido pela NBR NM 65 (ABNT, 2003). A amostra será preparada com pasta de consistência normal, definida pela NBR NM 43 (ABNT, 2003).

O tempo de início de pega é o intervalo de tempo desde a adição de água ao cimento até o momento em que a amostra tenha uma consistência que a agulha de Vicat penetre até uma distância de 4 ± 1 mm da placa base. O tempo de fim de pega é o intervalo de tempo desde a adição de água ao cimento e o momento em que a agulha de Vicat penetre 0,5 mm na amostra. O tempo de início e fim de pega será medido através de uma amostra, sendo que será utilizada a mesma amostra para as duas medidas.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB).

3.2.2.2.2 Determinação da massa específica

O ensaio de determinação da massa específica do cimento Portland é definido pela NBR NM 23 (ABNT, 2001).

O ensaio consiste em calcular a variação de volume de uma mistura no frasco volumétrico de Le Chatelier quando adicionada uma massa conhecida de cimento ao líquido dentro do frasco. A variação volumétrica gerada é o volume de cimento adicionado. O produto da divisão da massa de cimento adicionada, em gramas, e o volume de cimento adicionado, em cm^3 , é a massa específica do cimento Portland ensaiado. O resultado final da massa específica é a média dos resultados de duas amostras, desde que não difiram entre si mais que $0,01 \text{ g/cm}^3$.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB).

3.2.2.2.3 Determinação do índice de finura por meio da peneira $75 \mu\text{m}$ (nº 200)

O método de determinação do índice de finura por meio do peneiramento a seco utilizando-se a peneira de $75 \mu\text{m}$ (nº 200) é definido pela NBR 11579 (ABNT, 2012).

O índice de finura é uma relação entre a massa das partículas retidas na peneira nº 200, cujo tamanho é maior que 75 µm, e a massa total ensaiada, corrigindo-se o produto por um fator de correção que depende da peneira utilizada. O resultado final é o índice obtido em uma amostra.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB).

3.2.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO

A seguir será detalhado o novo procedimento experimental definido para determinação do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante, a partir das considerações realizadas no item 3.2.1 e do programa experimental original no Anexo II. Salienta-se que apesar das modificações propostas, a avaliação do índice de desempenho continua seguindo as recomendações das normas: NBR 7215 (ABNT, 1996), NBR 13956-3 (ABNT 2012), NBR 7222 (ABNT, 2011), com algumas modificações que serão descritas adiante.

Foram definidos alguns parâmetros que se manterão fixo ao longo da pesquisa, para se estudar efeitos específicos das adições minerais. As considerações para sequência dos ensaios são mostradas a seguir:

- Serão produzidos nove traços de argamassa, sendo que para cada traço de argamassa serão moldados vinte e quatro corpos de prova para serem ensaiados em diferentes idades. Os corpos de prova serão cilíndricos de diâmetro 50 mm e altura 100 mm, como indicado pela NBR 7215 (ABNT, 1996);
- Para cada traço, serão ensaiados, nos dias 1, 3, 7 e 28, quatro corpos de prova quanto a sua resistência à compressão. Também serão ensaiados para cada traço, aos 28 dias, quatro corpos de prova quanto a sua resistência à tração por compressão diametral.
- A relação material cimentício/areia será constante de 1:3;
- A relação água/aglomerante será constante de 0,48;

Os parâmetros variáveis e comparados durante os ensaios serão:

- Resistência à compressão axial simples das argamassas;
- Resistência à tração por compressão diametral das argamassas;
- O espalhamento das argamassas, definido pelo Anexo B da NBR 7215 (ABNT, 1996).

As argamassas produzidas para os ensaios à compressão e à tração terão os seguintes traços.

- Um traço de referência contendo cimento Portland, areia normal e água;
- Três traços com incorporação de nanossílica estabilizada em superplastificante com 0,5%, 1% e 1,5% em relação à massa de cimento. A massa de nanossílica incorporada à argamassa será em adição ao cimento, para melhor entendimento de seus efeitos;
- Um traço com substituição, em massa, do cimento por sílica ativa somente, na proporção de 10%;
- Três com incorporação de nanossílica estabilizada em superplastificante e sílica ativa à argamassa. Serão misturados 0,5%, 1% e 1,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante em adição, em massa, ao cimento Portland, enquanto a sílica ativa será adicionada em substituição, em massa, ao cimento Portland na proporção de 10%.

Espera-se que as quantidades de nanossílica adicionadas aos traços serão mais bem avaliadas após os ensaios de determinação do teor de sólidos e EDX. Porém, esse valor não é necessário para formulação dos traços, uma vez que a dosagem será feita em adição da nanossílica estabilizada em superplastificante.

A Figura 3-3 apresenta um organograma explicativo dos traços a serem utilizados.

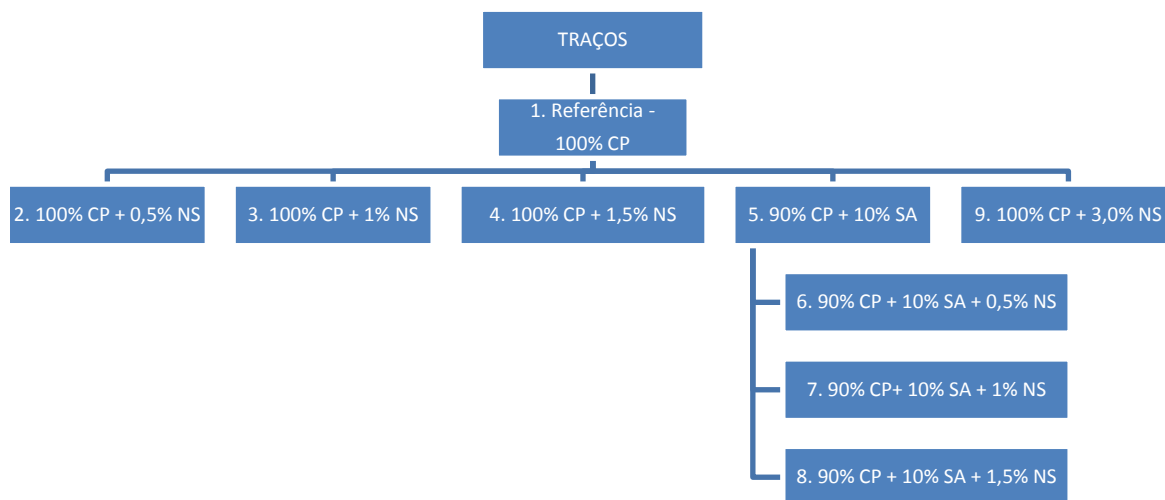


Figura 3-3: Organograma dos novos traços a serem utilizados

Sendo que:

CP = Cimento Portland;

SA = Sílica ativa;

NS = Nanossílica estabilizada em superplastificante;

A sequência das atividades é descrita a seguir:

1. Produção das argamassas com relação água/aglomerante igual a 0,48;
2. Medição da consistência da argamassa com base no ensaio de espalhamento e avaliação do efeito e eficácia dos aditivos na consistência e trabalhabilidade das argamassas;
3. Com as argamassas moldadas determina-se a resistência à compressão axial simples e a resistência à tração por compressão diametral para cálculo dos índices de desempenho nas idades definidas anteriormente.

A Tabela 3-1 mostra os traços de argamassa que serão utilizados nos ensaios. Para definição dos traços, considerou-se a relação água/aglomerante de 0,48 e descontou-se a água do aditivo superplastificante contendo nanossílica estabilizada. Para tanto, foi definido que o teor de água do aditivo superplastificante é de 72,2%, os cálculos serão demonstrados posteriormente nos resultados.

Tabela 3-1: Definição final dos traços a serem ensaiados

Nº	ARGAMASSA	CIMENTO CPII-F 32 (g)	AREIA NORMAL (g)	ÁGUA (g)	NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE (g)	SÍLICA ATIVA (g)
1	Referência	624,00	1872,00	300,00	0,00	0,00
2	100%CP + 0,5% NS	624,00	1872,00	297,70	3,12	0,00
3	100%CP + 1,0% NS	624,00	1872,00	295,50	6,24	0,00
4	100%CP + 1,5% NS	624,00	1872,00	293,20	9,36	0,00
5	90% CP + 10% SA	561,60	1872,00	300,00	0,00	62,40
6	90% CP + 10% SA + 0,5% NS	561,60	1872,00	297,70	3,12	62,40
7	90% CP + 10% SA + 1,0% NS	561,60	1872,00	295,50	6,24	62,40
8	90% CP + 10% SA + 1,5% NS	561,60	1872,00	293,20	9,36	62,40
9	100%CP + 3,0% NS	624,00	1872,00	286,50	18,72	0,00

3.2.3.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND

O ensaio para determinação da resistência à compressão axial simples de argamassas de cimento Portland é regido pela NBR 7215 (ABNT, 1996). O método consiste na elaboração de quatro corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, de argamassa e posterior rompimento, para determinação da tensão de ruptura da argamassa.

A argamassa ensaiada tem fixada sua relação água/aglomerante em 0,48 e a proporção de 1:3 em massa de cimento e areia normal brasileira, respectivamente. O cimento utilizado no ensaio é o CP-II F 32 e a areia é a normatizada pela NBR 7214 (ABNT, 2012).

A NBR 7215 (ABNT, 1996) ainda estabelece critérios para os equipamentos a serem utilizados, controle do ambiente do ensaio, quantidade de materiais a serem ensaiados, procedimentos de moldagem, ruptura, estoque dos corpos de prova, cura da argamassa, entre outros.

Para cada idade são ensaiados quatro corpos-de-prova, sendo determinada sua resistência à compressão dividindo-se a carga de ruptura por sua área de seção transversal. Os resultados individuais são então registrados e têm a sua média calculada e arredondada para o decimal mais próximo, em megapascals. Com o valor médio e os valores individuais, calcula-se o desvio padrão máximo para os corpos de prova ensaiados em cada idade. Quando o desvio máximo, em módulo, for maior que 6% calcula-se uma nova média desprezando-se o resultado discrepante. Com a nova média calcula-se novamente o desvio padrão máximo, caso o segundo desvio padrão máximo, em módulo, for maior que 6%, deve-se desprezar os corpos de prova e refazer o ensaio, caso contrário, a nova média é o valor representativo para aquela idade de ensaio. Os limites de resistência fixados por normas se referem a essa média.

Serão ensaiadas argamassas nas idades indicadas pela norma em questão, sendo elas: 1, 3, 7, 28 e 91 dias. Os traços das argamassas ensaiadas são mostrados na Tabela 3-1.

Os ensaios de determinação da resistência à compressão serão realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília.

3.2.3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos é regido pela NBR 7222 (ABNT, 2011). A aparelhagem necessária ao ensaio é a mesma definida pela NBR 7215 (ABNT, 1996). Os corpos de prova a serem ensaiados serão cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

O ensaio consiste em aplicar uma carga no centro do corpo de prova disposto na horizontal, de modo que haja uma compressão diametral do mesmo até a sua ruptura. Com a carga de ruptura à compressão diametral, estima-se a resistência à tração do corpo de prova cilíndrico pela equação 3, a seguir.

$$f_{ct,sp} = \frac{2*F}{\pi*d*l} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em Megapascals (MPa);
- F é a carga máxima obtida no ensaio, em Newtons (N);
- d é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm);
- l é o comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm);

A NBR 7222 (ABNT, 2011) não especifica datas e quantidade de corpos de prova para realização do ensaio. Optou-se, portanto ensaiar quatro corpos de prova de cada traço na data de 28 dias a partir da data da mistura. A resistência à tração das argamassas será definida como a média dos resultados dos quatro corpos de prova, aplicando-se a mesma regra de desvio padrão adotada para a resistência à compressão axial simples, como descrito no item 3.2.3.1. A adoção de um limite de 6% no desvio padrão máximo é uma adaptação à NBR 7222 (ABNT, 2011), uma vez que não é citado tal critério na norma, porém, foi adotado para uniformizar os critérios com a determinação da resistência à compressão axial simples.

Os ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral serão realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília.

3.2.3.3 CÁLCULO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO COM CIMENTO PORTLAND

A determinação do índice de desempenho da sílica ativa com cimento Portland é regida pela NBR 13956-3 (ABNT, 2012). A aparelhagem necessária ao ensaio, assim como o cimento e a areia a serem utilizados, é definida pela NBR 7215 (ABNT, 1996). Como não há normatização para determinação do índice de desempenho de nanossílicas, serão utilizadas as diretrizes da norma para sílica ativa, com diferentes teores de nanossílica.

Serão determinados os índices de desempenho das argamassas especificadas anteriormente. O índice de desempenho é uma relação entre a resistência mecânica da argamassa com adições e a resistência mecânica da argamassa de referência. Portanto, o índice de desempenho para cada traço será determinado pela equação 4:

$$I = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100\% \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- I é o índice de desempenho do traço analisado em relação à argamassa de referência, representado em porcentagem;
- f_{cB} é a resistência à compressão média dos corpos de prova ensaiados para certa idade da argamassa ensaiada, em megapascals;
- f_{cA} é a resistência à compressão média dos corpos de prova ensaiados para certa idade da argamassa de referência, em megapascals;

Salienta-se que serão feitos ajustes à NBR 13956-3 (ABNT, 2012) para melhor adaptação à pesquisa. Entre as modificações estão:

- O ensaio será realizado para 1, 3, 7 e 28 e não somente para sete dias;
- Será calculado o índice de desempenho para nanossílica estabilizada em superplastificante, mesmo não sendo contemplada pela norma;
- A nanossílica estabilizada em superplastificante será incorporada em adição ao cimento Portland, e não em substituição, como sugere a norma para sílica ativa;
- A água adicionada através do aditivo contendo nanossílica estabilizada será descontada da água da mistura para tentar manter a relação água/aglomerante entre os traços;
- Também será realizado o índice de desempenho para resistência à tração, definida no item 3.2.3.2, aos 28 dias. A NBR 13956-3 (ABNT, 2012) não cita tal índice, mas seu valor é de interesse à pesquisa.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante e do cimento Portland CP II-F-32.

4.1.1 NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE

Para a nanossílica estabilizada em superplastificante utilizada na pesquisa, realizaram-se os ensaios de: Determinação do teor de sólidos no aditivo, potencial zeta, difração de raios-x e eflorescência de raios-x. Os resultados obtidos são mostrados abaixo.

4.1.1.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS DISPERSOS NO ADITIVO

Foram realizadas três amostras para determinação do teor de sólidos no aditivo. O teor de sólidos do aditivo é definido pela equação 1 do item 3.2.2.1.1. O resultado final e representativo do teor de sólidos é a média dos três resultados individuais.

Na Tabela 4-1 são mostrados os resultados. O resultado final do teor de sólidos do aditivo superplastificante com nanossílica estabilizada é 27,8%. Na Figura 4-1 são mostradas amostras da nanossílica estabilizada em superplastificante antes e depois do ensaio, observou-se que após a secagem o produto apresentou aumento em sua viscosidade.

Tabela 4-1: Resultados da Determinação do Teor de Sólidos Dispersos no Aditivo

Amostra	m1 (g)	m2 (g)	%Si	%S
1	42,63	13,07	30,7%	27,8%
2	50,78	14,44	28,4%	
3	40,45	9,86	24,4%	



Figura 4-1: Amostras de superplastificante com nanossílica estabilizada, antes (à esquerda) e depois (à direita) da secagem

4.1.1.2 POTENCIAL ZETA

Foram realizadas duas leituras de potencial zeta em amostras diferentes. O resultado final é a média dos dois resultados. O resultado da amostra 1 foi de 0,0161 mV e o resultado da amostra 2 foi de 0,151 mV, resultando em um resultado médio de 0,0835 mV. Na Figura 4-2, Figura 4-3 e Figura 4-4 são mostrados os gráficos e resultados obtidos nos ensaios.

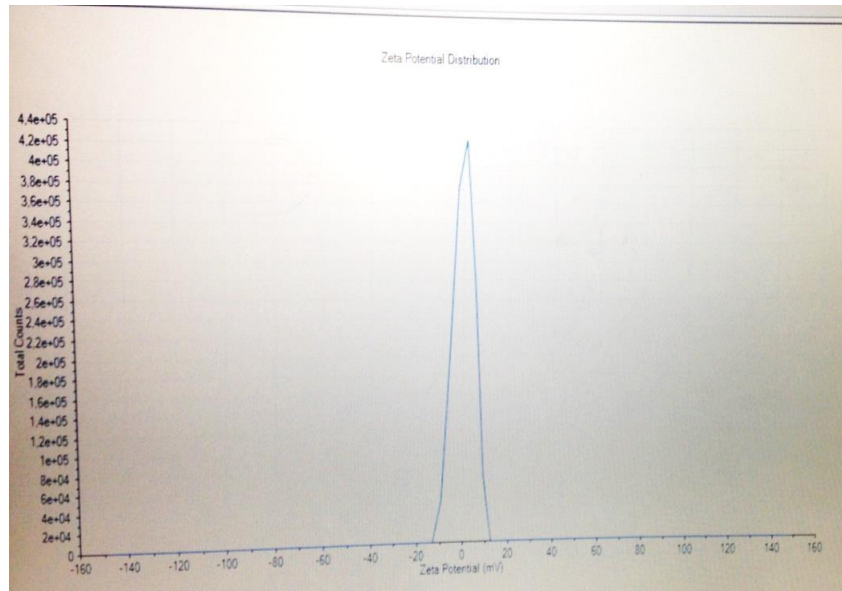


Figura 4-2: Gráfico do Potencial Zeta - Amostra 1

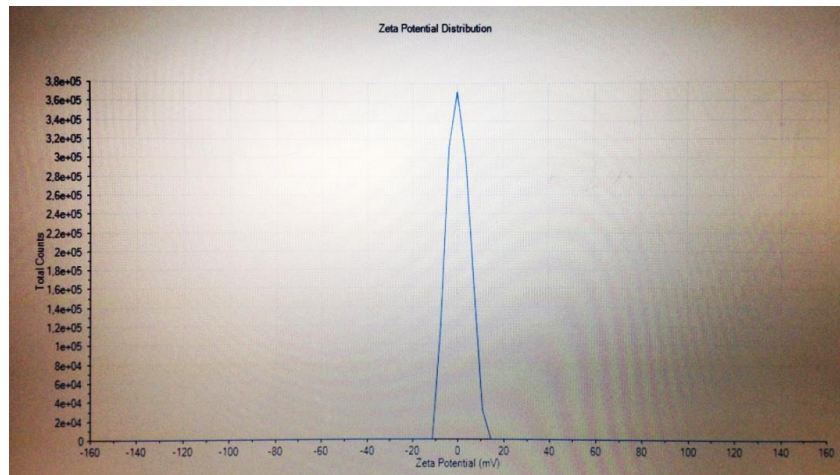


Figura 4-3: Gráfico do Potencial Zeta - Amostra 2

Summary		Summary	
Zeta potential:	0,0161 mV	Zeta potential:	0,151 mV
Std. Deviation:	4,37 mV	Std. Deviation:	4,56 mV
Conductivity:	2,39 mS/cm	Conductivity:	2,34 mS/cm
Effective voltage:	151,1 V	Effective voltage:	151,1 V
Count Rate:	268,0 kcps	Count Rate:	175,0 kcps
Peak 1	Peak / Area 0,0161 mV / 100,0%	Peak 1:	Peak / Area 0,151 mV / 100,0%

Figura 4-4: Sumários de Resultados. Amostra 1 à esquerda e amostra 2 à direita.

O resultado próximo de zero, indica uma baixa carga efetiva das partículas. Como definido em 3.2.2.1.2, um valor próximo de zero indica uma baixa repulsão entre as partículas e consequente baixa estabilidade coloidal. Um dos motivos pensados para o valor encontrado é pela elevada superfície específica da nanossílica, que faz com que haja uma tendência de aglomeração das partículas. Outro fator que pode ter sido fundamental para o valor obtido de potencial zeta é o meio que circunda as partículas de nanossílica, o superplastificante. Outro fator que pode influenciar é o método de funcionamento do superplastificante, sendo este por efeito estérico, onde repulsão ocorre a partir de cadeias moleculares que se projetam sobre a superfície do cimento, causando um distanciamento físico, tais cadeias formam uma camada adsortiva que contém trechos com elevada densidade sobre a superfície das partículas do cimento, sendo este efeito mais efetivo que o efeito das cargas nas partículas. Portanto, é necessária uma análise mais abrangente sobre o superplastificante para se justificar e entender melhor o valor de potencial zeta encontrado.

4.1.1.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Foi realizada uma amostra no material, sendo esta seca, moída e peneirada, por condições do aparelho de difração de raios-X. Utilizando a leitura padrão foi obtido um difratograma mostra na Figura 4-5.

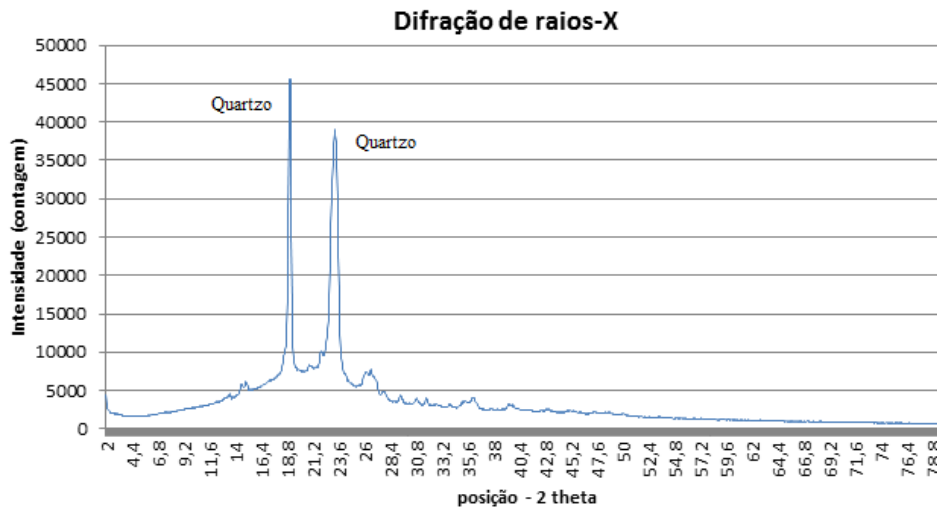


Figura 4-5: Difratograma de raios-X da nanossílica estabilizada em superplastificante.

No halo de amorfo, região entre 15 e 30 graus, apresentado na Figura 4-6 mostra a presença de picos que indicam um possível material cristalizado, mas a amostra possui também uma região constante indicando um material amorfo. Os picos apresentados são característicos de quartzo, provavelmente por conta da presença sílica presente no material.

Como no produto espera-se que haja uma mistura entre sílica e os polímeros do superplastificante não se pode afirmar a presença de sílica amórfica, pois no experimento pode ter a influência dos polímeros que não estão em estado cristalizado, ou seja, não seriam identificados no experimento.

Por este ensaio ser qualitativo ele não indica a quantidade presente de nanossílica no produto analisado, não indicando a quantidade de material cristalino ou amorfo, não sendo possível determinar sua taxa de reatividade apenas por este ensaio.

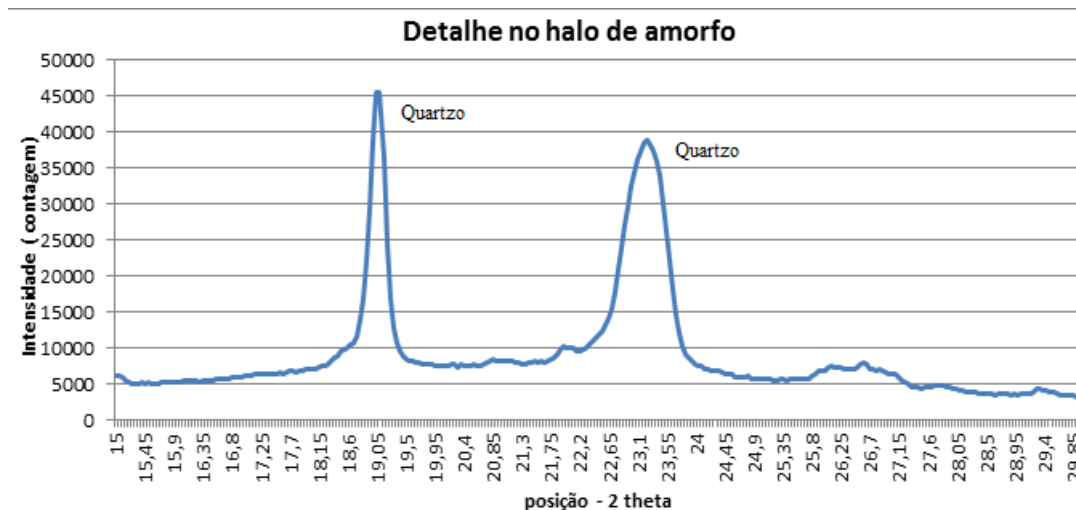


Figura 4-6: Detalhe do Halo amorfo (15° a 30°) da nanossílica estabilizada em superplastificante seca em estufa do ensaio de difração de raios-X.

4.1.1.4 EFLORESCÊNCIA DE RAIOS-X (EDX)

O material a ser ensaiado foi previamente seco e pulverizado com o auxílio de um almofariz. Contudo, a partir de certo ponto, a amostra apresentou duas fases, uma clara e sólida e uma escura e com comportamento plástico. Devido à parte plástica da amostra, a pulverização com almofariz, a partir de certa granulometria, ficou impossibilitada, chegando-se assim a uma granulometria mínima do material seco. Optou-se por não separar as duas fases de material, para se conhecer os elementos presentes na amostra como um todo, não somente em uma parte dela. O material pulverizado então foi levado ao ensaio de fluorescência de raios-x para se conhecer quantitativamente os elementos presentes na amostra, porém, a granulometria ainda grossa da amostra juntamente com a instabilidade da fase escura de permanecer sólida impossibilitaram a realização do ensaio, segundo o técnico do laboratório responsável pelo EDX. Sendo assim, os elementos presentes na mistura, tal como suas proporções, permanecem desconhecidas, inclusive o teor de nanossílica dispersa no aditivo. Outro ensaio que poderia ser utilizado para caracterização química do produto é a espectroscopia por infravermelho, deixando essa análise para possíveis trabalhos futuros.

Portanto, no trabalho não será apresentada a análise química dos elementos presentes no material.

4.1.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II-F-32, e sua caracterização é mostrada seguir.

4.1.2.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE INÍCIO E FIM DE PEGA

4.1.2.1.1 Determinação da pasta de consistência normal

Para determinação dos tempos de início e fim de pega é necessário inicialmente definir a porcentagem de água necessária para se obter a pasta de consistência normal, definida no item 3.2.2.2.1. A porcentagem de água utilizada foi definida com uma amostra, feita a partir de três tentativas, sempre descartando o material com teor incorreto para fabricação da pasta de consistência normal. Os resultados são mostrados na Tabela 4-2. Assim, a pasta de consistência normal a ser utilizada no ensaio de tempo de início e fim de pega terá 30% de água em relação à massa de cimento Portland.

Tabela 4-2: Resultados da Determinação da pasta de consistência normal

Cimento (g)	Quantidade de água (g)	Porcentagem de água na mistura (%)	Leitura no Aparelho de Vicat (mm)
500,14	125,05	25,0%	34
499,90	175,00	35,0%	0
500,10	150,00	30,0%	6

Na Figura 4-7 é mostrado o aparelho de Vicat utilizado no ensaio.



Figura 4-7: Aparelho de Vicat para determinação da pasta de consistência normal

4.1.2.1.2 Determinação do tempo de início de pega

O tempo de início de pega, definido em 3.2.2.2.1, foi realizado em uma amostra de pasta de consistência normal, com teor de água de 30%. O resultado final do ensaio é mostrado na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Resultados do ensaio de tempo de início de pega

Tempo de início de pega	
Tempo transcorrido de ensaio (horas:minutos)	Leitura no Aparelho de Vicat (mm)
03:55	4,0

Portanto, o tempo de início de pega é de 3 horas e 55 minutos. A NBR 11578 (ABNT, 1997) define que para cimentos com classe de resistência de 32, como o utilizado na pesquisa, o tempo de início de pega deve ser maior que 1 hora, portanto o resultado encontrado está de acordo com os requisitos exigidos.

4.1.2.1.3 Determinação do tempo de fim de pega

O tempo de fim de pega, definido em 3.2.2.2.1, foi realizado na mesma amostra do ensaio de tempo de início de pega, fazendo as leituras do lado oposto da amostra. O resultado final do ensaio é mostrado na Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Resultados do ensaio de tempo de fim de pega

Tempo de fim de pega	
Tempo transcorrido de ensaio (horas:minutos)	Leitura no Aparelho de Vicat (mm)
04:45	0,5

Portanto, o resultado encontrado através de interpolação, mostra que o tempo de fim de pega foi de 4 horas e 45 minutos. A NBR 11578 (ABNT, 1997) define que para cimentos CP-II-F, como o utilizado na pesquisa, o tempo de fim de pega deve ser inferior a 10 horas, portanto o resultado encontrado está de acordo com os requisitos exigidos.

Na Figura 4-8 é mostrado o aparelho de Vicat utilizado na determinação do tempo de fim de pega.



Figura 4-8: Aparelho de Vicat utilizado na Determinação do tempo de fim de pega

4.1.2.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

A determinação da massa específica do cimento, definida em 3.2.2.2.2, foi realizada em duas amostras de cimento, utilizando-se querosene como líquido do ensaio. Os resultados encontrados são mostrados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Resultados dos ensaios de Determinação da massa específica

	Amostra 1	Amostra 2
V1 (cm ³)	0,8	0,2
V2 (cm ³)	22,0	21,4
DV3 (cm ³)	21,2	21,2
Massa de cimento (g)	62,66	62,97
Massa específica (g/cm ³)	2,96	2,97
Massa específica média (g/cm³)	2,96	

Assim, a massa específica do cimento da pesquisa é de 2,96 g/cm³. O resultado encontrado ficou abaixo do esperado, em torno de 3,10 g/cm³, porém como a diferença entre os resultados das duas amostras não superou 0,01 g/cm³, o resultado médio encontrado foi aceitável.

Na Figura 4-9 é mostrado o frasco de Le Chatelier utilizado no ensaio.



Figura 4-9: Aparelho utilizado na determinação da massa específica do cimento

4.1.2.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FINURA POR MEIO DA PENEIRA 75 μM (Nº 200)

A determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm foi definida em 3.2.2.2.3. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4-6. Como não havia dados sobre o fator de correção da peneira utilizada, optou-se pelo valor crítico de norma de 1,2.

Tabela 4-6: Resultados para o ensaio de índice de finura por meio da peneira 75 μm

Massa inicial de cimento (g)	50,04
Massa do resíduo de cimento na peneira 75 μm (g)	0,69
C-Fator de correção da peneira	1,2
Índice de finura	1,7%

Portanto o índice de finura encontrado para o cimento utilizado na pesquisa foi de 1,7%. A NBR 11578 (ABNT, 1997) define que para cimentos com classe de resistência 32, o resíduo na peneira de 75 μm deve ser inferior a 12%, portanto, o resultado encontrado está de acordo com os requisitos de norma.

Na Figura 4-10 é mostrada a peneira utilizada no ensaio.



Figura 4-10: Peneira de abertura 75 μm utilizada (n° 200)

4.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO

4.2.1 CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS

É possível observar o desenvolvimento da consistência comparando o resultado do espalhamento para cada traço como mostra na Figura 4-11. Com a adição da nanossílica estabilizada em superplastificante nota-se que houve um aumento do espalhamento acompanhado ao aumento da adição do superplastificante em relação ao traço de referência. O maior espalhamento encontrado foi para o traço 9, com 3% de nanossílica estabilizada, de 305 mm, consideravelmente maior para o traço de referência (185 mm) e para o traço com 10% de sílica ativa somente (168 mm). O aumento do espalhamento se reflete em uma maior trabalhabilidade, portanto, podemos dizer que a adição de nanossílica estabilizada em superplastificante aumentou a trabalhabilidade das argamassas. Porém, foi observado também que o uso de nanossílica estabilizada em superplastificantes afetava diretamente o tempo de pega de argamassas, sendo que para teores acima de 1,5%, a desforma após 24 horas ficava impossibilitada.

Ao adicionar a sílica ativa em substituição ao cimento há uma diminuição do espalhamento, por conta de finura da sílica ativa. Com a adição de sílica ativa junto ao superplastificante houve um aumento ainda maior em relação à referência. Mostrando uma eficiência melhor, no quesito de espalhamento, quando há as duas adições possivelmente por algum tipo de interação entre a sílica ativa e a nanossílica. Salienta-se também, que, qualitativamente, as argamassas com misturas ternárias de sílica ativa e nanossílica estabilizada em superplastificante apresentaram um aspecto mais coeso do que as demais argamassas, sendo indicado para a trabalhabilidade o uso em conjunto de sílica ativa e nanossílica estabilizada. Aqui é necessária uma observação de que a sílica ativa utilizada no

ensaio foi do tipo densificada e deveria ter sido adicionada à argamassa em forma de calda, porém, foi misturada seca ao pó de cimento Portland.

Foram testados outros tipos de superplastificantes com base de policarboxilato no período de testes para manter o espalhamento do traço de maior espalhamento, segundo o programa experimental original (Anexo II). Foi notada a eficiência do produto quanto ao espalhamento, mostrando uma eficiência maior em relação à quantidade x espalhamento. Na Tabela 4-7 são mostrados os resultados de adição de superplastificante ao traço de referência até se chegar a um espalhamento de 279 + 10 mm. Nota-se que, com exceção da nanossílica estabilizada em superplastificante, os aditivos testados extrapolaram o intervalo de uso indicado pelo fabricante. Com isso, é comprovada a eficácia da nanossílica estabilizada em superplastificante de aumentar a trabalhabilidade de argamassas.

Tabela 4-7: Teores de superplastificante testados na pesquisa

Superplastificante	Teor em relação ao cimento Portland para se chegar ao espalhamento especificado (%)	Intervalo de utilização indicado pelo fabricante
Nanossílica estabilizada em superplastificante	1,50%	0,53%-2,86%
Superplastificante 1	3,85%	0,2%-1%
Superplastificante 2	2,69%	0,55%-1,105%

Na Tabela 4-8 são mostrados os resultados que são representados na Figura 4-11.

Tabela 4-8: Resultado de espalhamento das argamassas

	Espalhamento (mm)
Referência - 100% CP	185,00
100%CP + 0,5% NS	230,00
100%CP + 1% NS	232,50
100%CP + 1,5% NS	279,00
100% CP + 3% NS	305,00
90% CP + 10% SA	167,50
90% CP + 10% SA + 0,5% NS	255,00
90% CP + 10% SA + 1% NS	272,50
90% CP + 10% SA + 1,5% NS	282,50

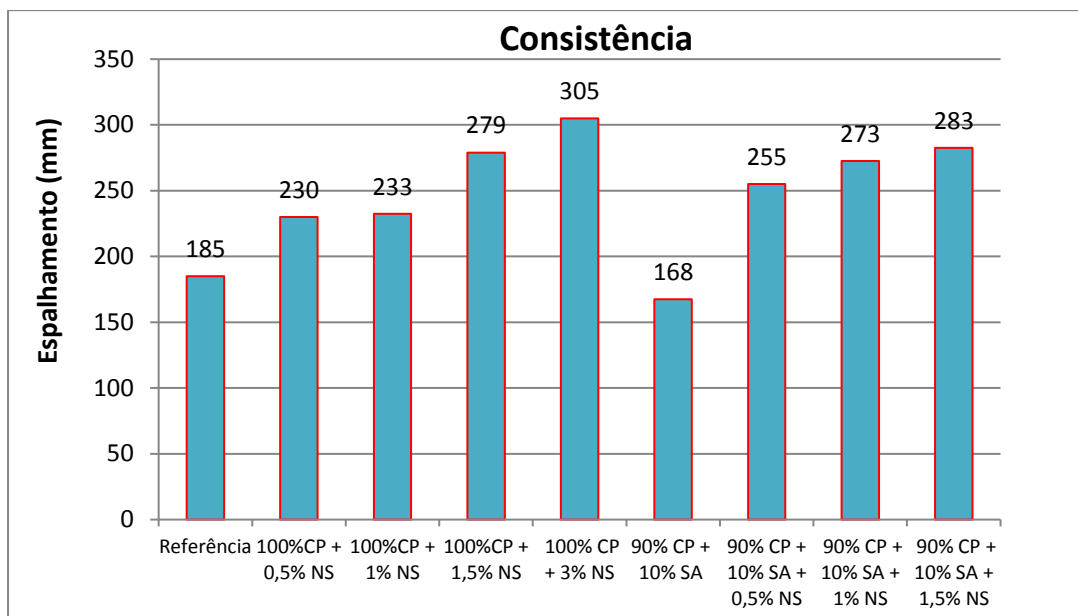


Figura 4-11: Espalhamento para cada traço elaborado

4.2.2 ANÁLISE DE COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES

A análise da compressão axial simples foi dividida em três partes: Análise dos traços com adição de somente nanossílica estabilizada em superplastificante, análise dos traços de misturas ternárias com sílica ativa e nanossílica estabilizada e a análise geral de todos os traços ensaiados.

4.2.2.1 ADIÇÃO DE APENAS NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE

Inicialmente será realizada a análise dos traços com adição somente de nanossílica estabilizada em superplastificante, comparando os resultados encontrados com os de um traço de referência. A Tabela 4-9 mostra os resultados encontrados, que serão representados nos gráficos da Figura 4-12 à Figura 4-15.

Tabela 4-9: Resultados da compressão axial simples para os traços com adição de nanossílica estabilizada somente.

	1 Dia		3 Dias		7 Dias		28 Dias	
	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)
Referência-100% CP	5,6	100,0%	13,1	100,0%	18,2	100,0%	29,5	100,0%
100%CP + 0,5% NS	4,1	73,9%	12,5	95,9%	18,4	101,0%	25,1	85,3%
100%CP + 1% NS	3,2	57,6%	12,2	93,6%	18,1	99,8%	22,4	75,9%
100%CP + 1,5% NS	0,1	0,9%	12,5	95,5%	17,4	95,6%	20,4	69,2%
100% CP + 3% NS	0,0	0,0%	3,2	24,8%	12,2	67,1%	20,9	71,1%

A Figura 4-12 apresenta os resultados dos corpos de prova do traço de referência, sem adições, para uso de comparação com os traços apresentados posteriormente.

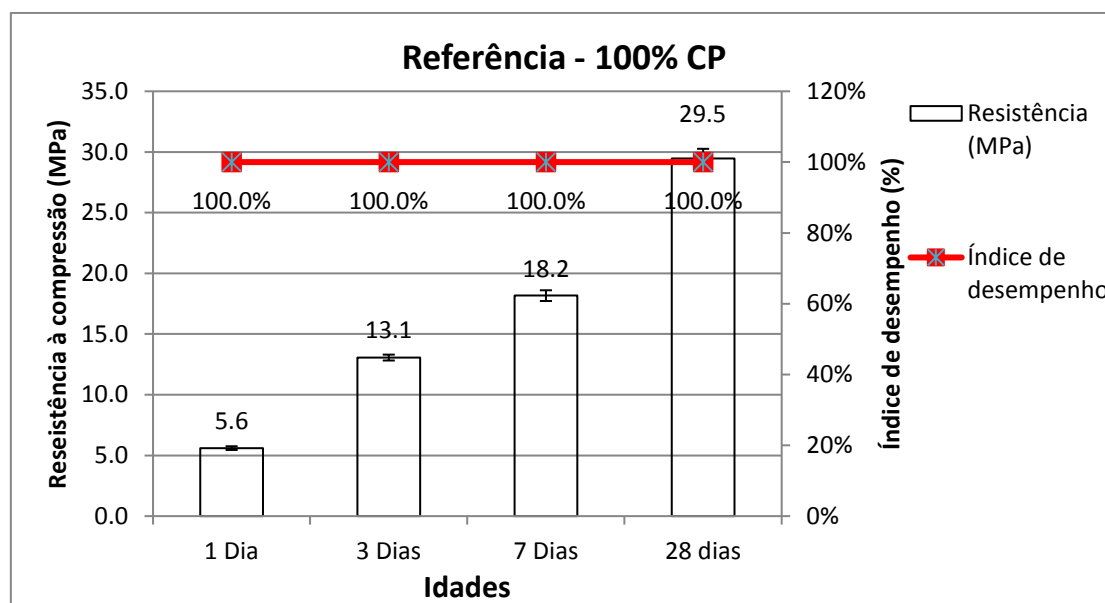


Figura 4-12: Resistência à compressão do traço de referência, sem adição.

A Figura 4-13 apresenta os resultados obtidos para os traços com adições de 0,5% e 1,0% de nanossílica estabilizada em superplastificante. Com a adição de 0,5% é verificado nas idades de 1 e 3 dias um índice de desempenho abaixo do valor do traço referência. Aos 7 dias apresentou um valor de índice de desempenho maior, porém aos 28 dias voltou a apresentar um valor menor em relação ao traço sem adição.

Com a adição de 1,0% de nanossílica estabilizada em superplastificante o desenvolvimento da resistência foi semelhante ao anterior. Nas idades de 1 e 3 dias um índice de desempenho abaixo do valor do traço referência. Aos 7 dias apresentou um valor próximo à referência, porém ainda abaixo, diferente do traço com 0,5%. Aos 28 dias apresentou uma redução do índice de desempenho, assim como o traço com 0,5%.

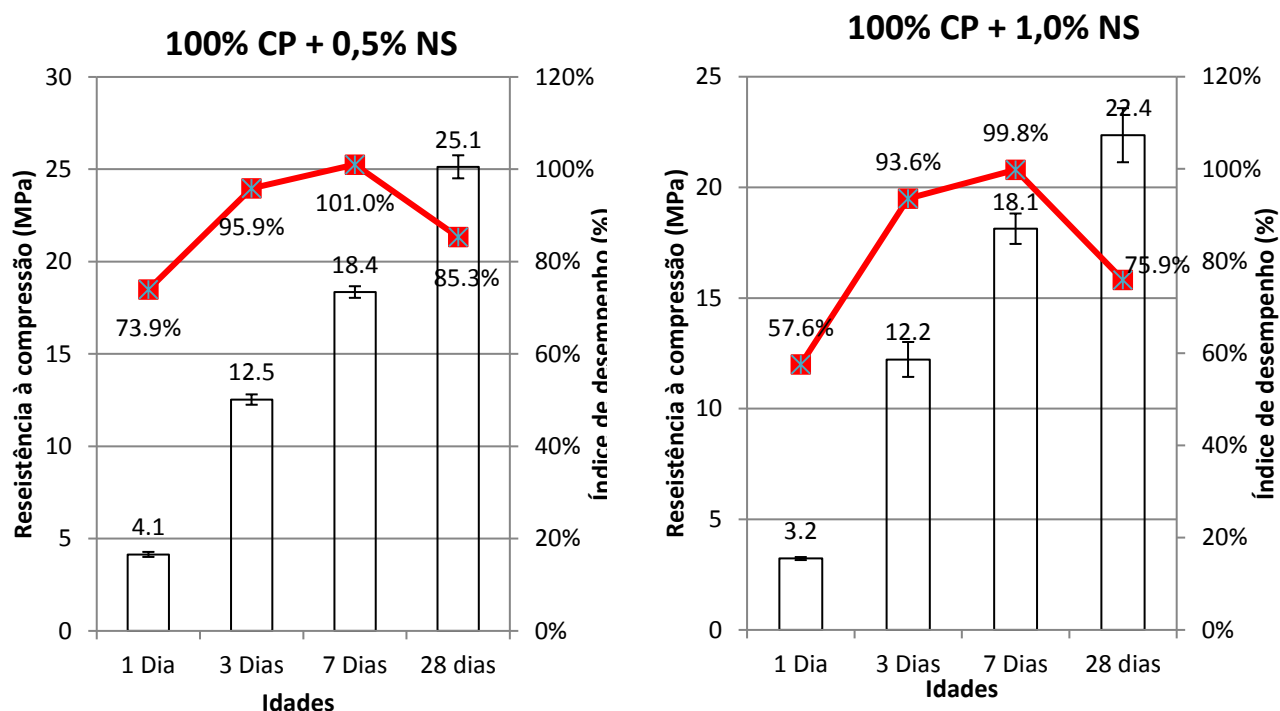


Figura 4-13: Resistência à compressão dos traços com 0,5% e 1% de adição de superplastificante com nanossílica estabilizada.

A Figura 4-14 apresenta os resultados obtidos para os traços com adições de 1,5% e 3,0% de nanossílica estabilizada em superplastificante. O traço com adição de 1,5% no primeiro dia os corpos de prova romperam com a carga mínima da prensa utilizada, provavelmente a cura não foi o suficiente para gerar uma resistência adequada. Com 3 e 7 houve uma resistência próxima à referência, porém ainda abaixo do valor. Aos 28 dias houve uma queda no valor do índice de desempenho, assim como os traços anteriores.

O traço extra, com adição de 3,0% não foi possível desmoldar com 1 dia de pega apenas, só sendo possível ter resultados a partir do dia 3. Todos os valores tiveram índice de desempenho menor que 100%, abaixo do valor de referência, porém diferente dos traços anteriores do dia 7 para o dia 28 houve um aumento em vez de decréscimo no valor do índice de desempenho.

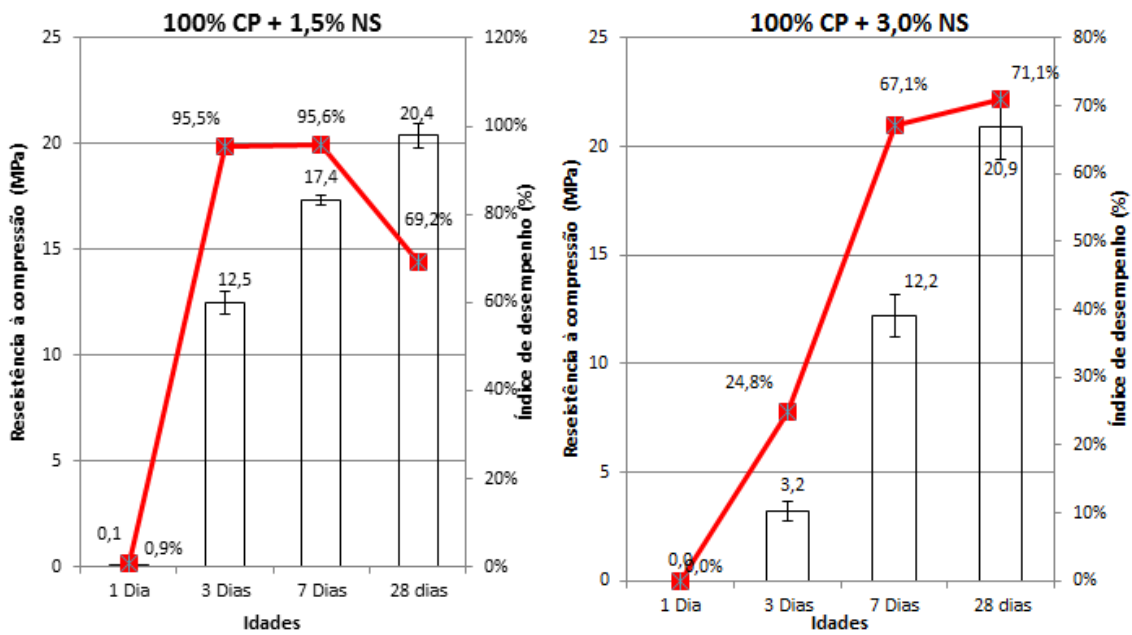


Figura 4-14: Resistência à compressão dos traços com 1,5% e 3,0% de adição de superplastificante com nanossílica estabilizada

Após apresentação de todos os resultados para os traços com adição apenas do superplastificante com nanossílica estabilizada em superplastificante, a Figura 4-15 apresenta as curvas para acompanhar o desenvolvimento da resistência à compressão para cada traço em cada idade respectivamente.

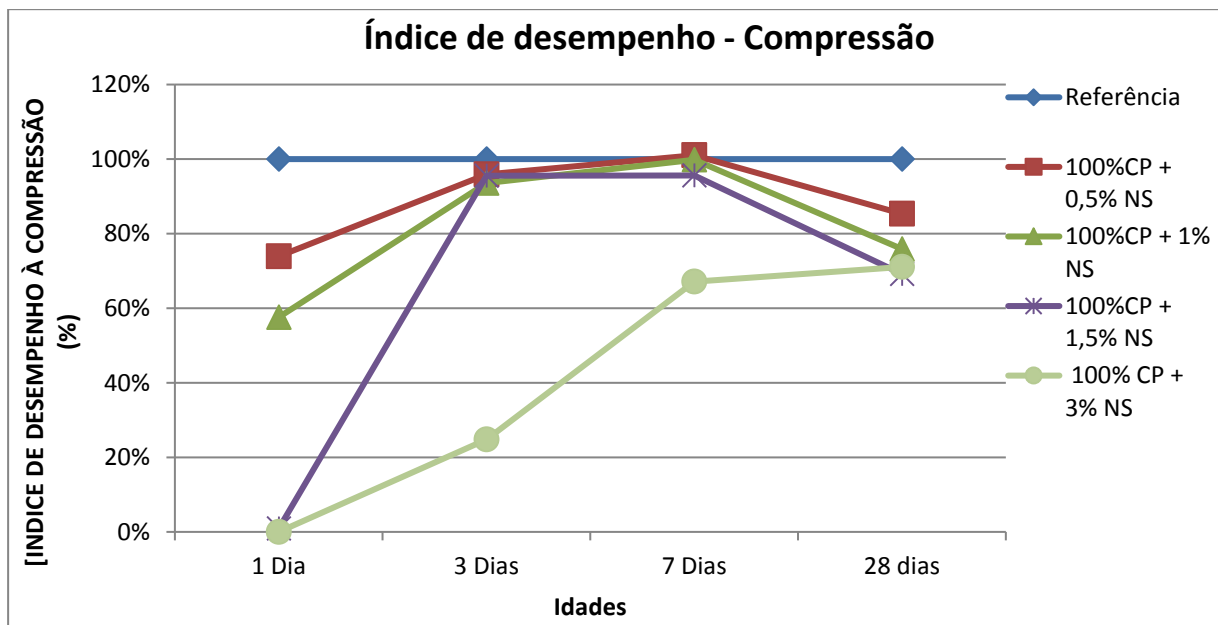


Figura 4-15: Curva do desenvolvimento da resistência à compressão.

Nos traços somente com adição de nanossílica estabilizada em superplastificante, o único traço que teve resistência maior que a referência foi o traço com 0,5% de aditivo aos sete dias, que obteve um índice de desempenho de 101,0%, os demais resultados apresentaram índices de desempenho abaixo de 100%. Observou-se também uma tendência de aumento do índice de desempenho até os sete dias e um decréscimo do índice de desempenho aos vinte e oito dias, sendo que aos vinte e oito dias, o melhor resultado encontrado também foi para o traço com 0,5% de aditivo que teve um índice de desempenho de apenas 85,3%. A tendência do índice de desempenho só não foi vista para o traço com 3% de nanossílica estabilizada que teve um índice de desempenho crescente até os vinte e oito dias, porém sempre com resultados inferiores aos de referência, tendo um índice de desempenho máximo de 71,1%. Portanto, o uso isolado da nanossílica estabilizada em superplastificante não apresentou resultados satisfatórios quanto ao aumento da resistência à compressão axial simples.

4.2.2.2 ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA E NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE

Nessa segunda parte serão analisadas as argamassas de misturas ternárias com adição de sílica ativa e nanossílica estabilizada, assim como um traço contendo somente adição de sílica ativa, tendo seus resultados comparados com a argamassa de referência representada pela Figura 4-12. A Tabela 4-10 mostra os resultados encontrados, que serão representados nos gráficos da Figura 4-16 à Figura 4-18.

Tabela 4-10: Resultados da compressão axial simples para os traços com adição de nanossílica estabilizada e sílica ativa

	1 Dia		3 Dias		7 Dias		28 Dias	
	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)
Referência- 100% CP	5,6	100,0%	13,1	100,0%	18,2	100,0%	29,5	100,0%
90% CP + 10% SA	7,0	124,5%	16,9	129,7%	24,0	132,1%	36,4	123,7%
90% CP + 10% SA + 0,5% NS	3,9	69,1%	10,5	80,4%	21,7	119,4%	22,8	77,4%
90% CP + 10% SA + 1% NS	4,1	73,9%	7,8	59,6%	20,2	111,2%	33,9	115,2%
90% CP + 10% SA + 1,5% NS	2,0	35,2%	9,8	75,2%	16,1	88,9%	24,5	83,3%

Serão analisados os resultados com substituição de 10% de cimento por sílica ativa. A Figura 4-16 apresenta, no gráfico da esquerda, os resultados da resistência à compressão apenas do traço com a substituição de 10% de cimento com sílica ativa, sem a adição de superplastificante. O gráfico da direita apresenta os resultados com a adição de 0,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante no traço anterior.

Com apenas a substituição de sílica ativa o índice de desempenho ficou acima de 100% em todas as idades analisadas, chegando ao ápice no sétimo dia. Apresenta ainda uma tendência de ter uma queda aos 28 dias. Os resultados foram acima de todos os traços anteriores mostrando a maior eficiência em relação à resistência à compressão. Salienta-se ainda que a forma de adição de sílica ativa à mistura não foi adequada, uma vez que a sílica ativa utilizada foi densificada e deveria ter sido adicionada em forma de calda, não a seco como foi realizado.

O próximo traço apresentado é adicionado 0,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante. Nas idades de 1 e 3 dias os resultados do índice de desempenho se mostram abaixo da referência, porém no sétimo dia o valor se tornou superior e voltando a ficar abaixo no dia 28. Este traço apresenta a mesma tendência de desenvolvimento de resistência que a maioria dos traços já avaliados.

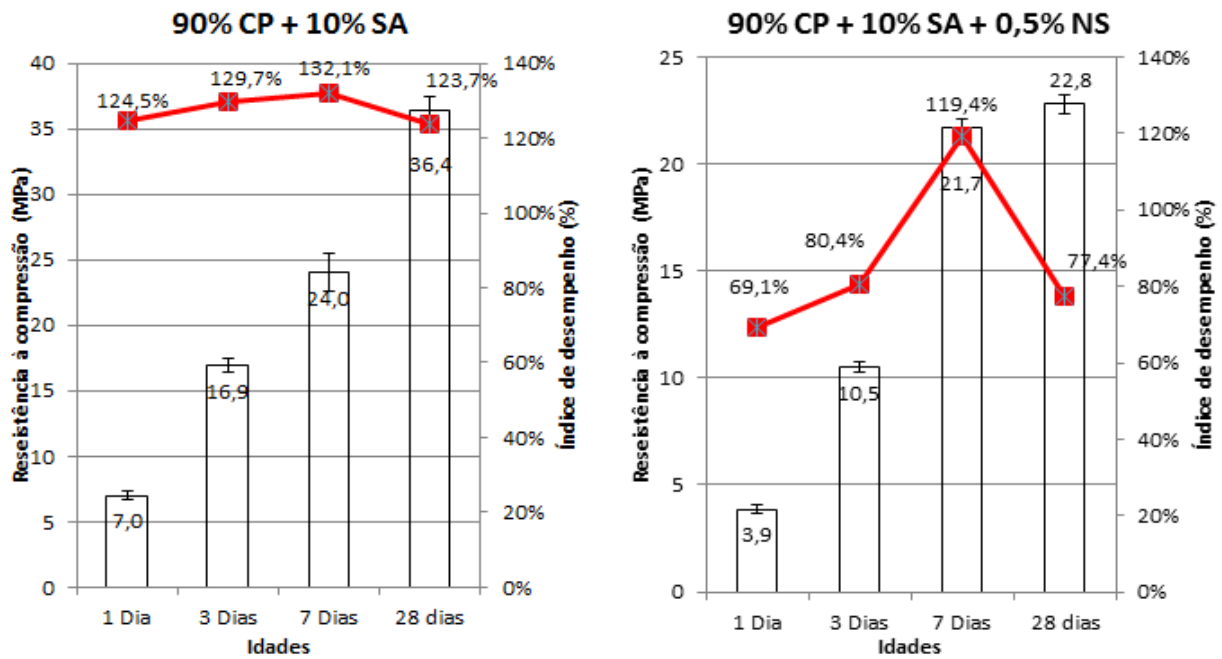


Figura 4-16: Resistência à compressão dos traços com 10% de SA e 10% de SA + 0,5% NS.

A Figura 4-17 apresenta os resultados dos traços com substituição de 10% do cimento por sílica ativa e adição de 1,0% e 1,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante. Com a adição de 1,0% de NS é notado nas idades de 1 e 3 dias valores abaixo do índice de desempenho da referência. No terceiro dia houve uma queda no índice de desempenho em relação ao primeiro dia, diferenciando o seu desenvolvimento em relação à maioria dos traços. O dia 7 apresentou um valor acima da referência, mas voltou a ficar abaixo na idade de 28 dias.

Com a adição de 1,5% os resultados de índice de desempenho ficaram abaixo de 100% para todas as idades. O índice de desempenho apresentou-se crescente até o dia 7, qual atingiu seu ápice, e voltou a decair aos 28 dias. Diferentemente do traço sem a sílica ativa e com 1,5% de NS, houve uma maior resistência inicial no primeiro dia, apesar do valor ainda ser abaixo da referência.

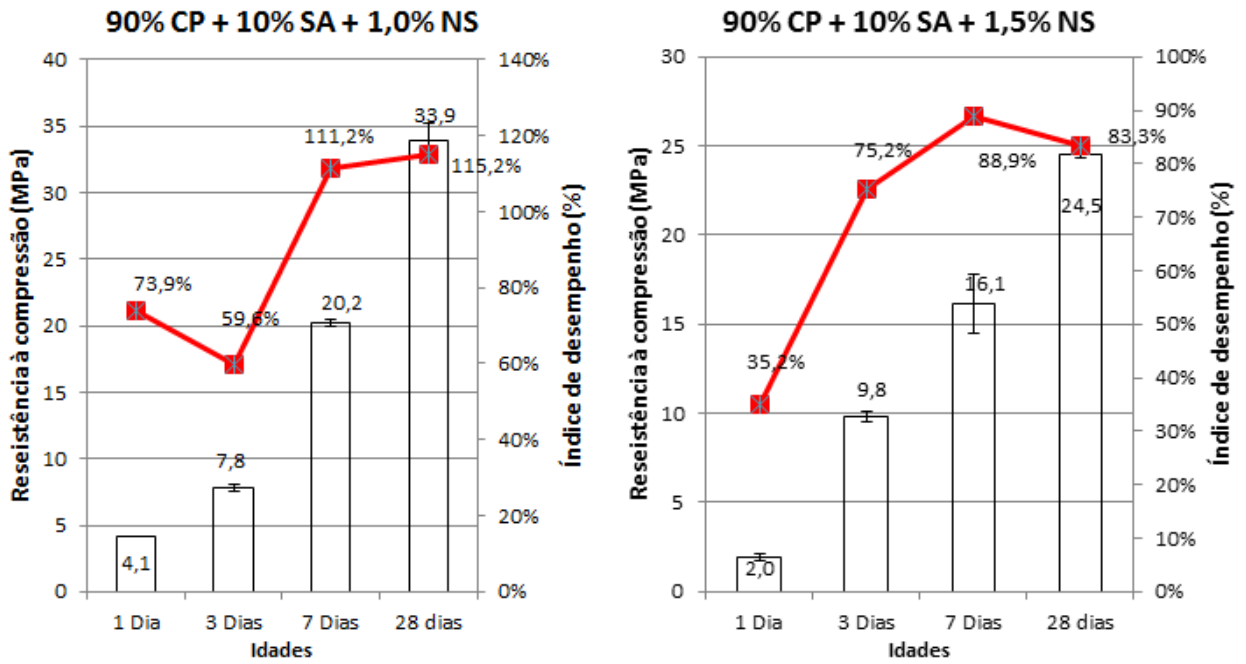


Figura 4-17: Resistência à compressão dos traços com 10% de SA + 1,0% de NS e 10% de SA + 1,5% NS.

Comparando os traços com adição de sílica ativa e nanossílica estabilizada em superplastificante com o traço que há apenas a substituição de 10% de cimento por sílica ativa, é possível notar a eficiência da sílica ativa na resistência à compressão. Porém ao adicionar a NS há uma queda na resistência, mostrando a influência do produto, mesmo com a sílica ativa presente.

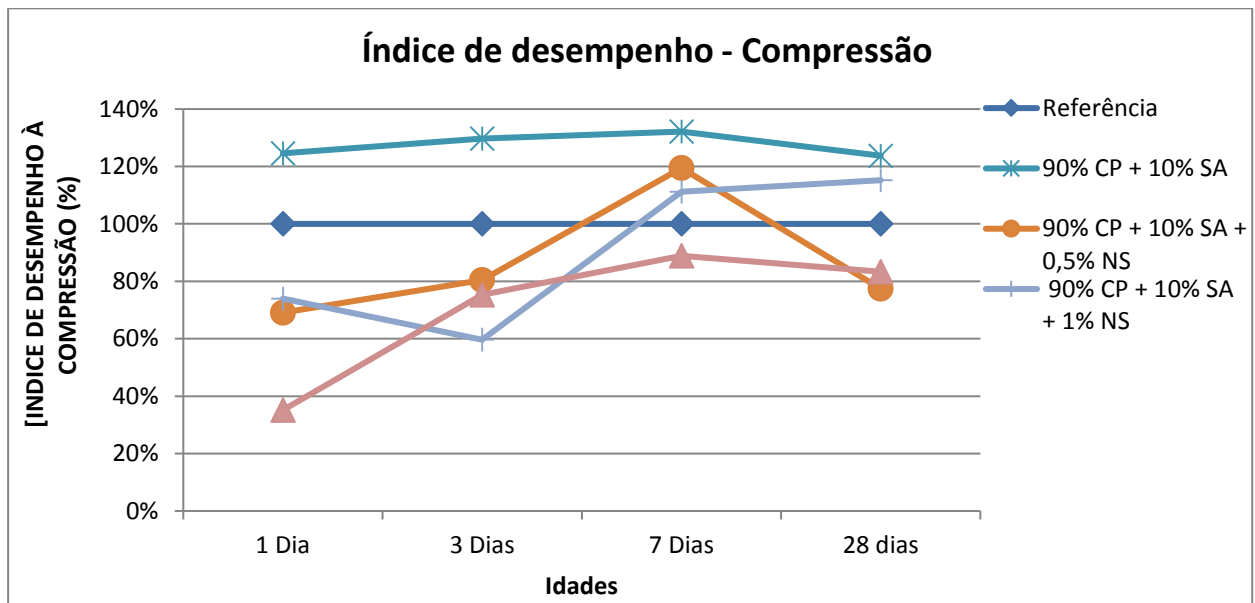


Figura 4-18: Curva do desenvolvimento da resistência à compressão para traços com sílica ativa.

Na Figura 4-18 são mostradas as evoluções dos índices de desempenho dos traços contendo sílica ativa e nanossílica estabilizada em superplastificante, assim como do traço de referência. Na análise de misturas ternárias com sílica ativa e nanossílica estabilizada em superplastificante, observou-se a mesma tendência, citada em 4.2.2.1, de crescimento do índice de desempenho até os sete dias e decréscimo aos vinte e oito dias, menos para o traço com 1% de nanossílica estabilizada em superplastificante e 10% de sílica ativa, em que houve um decréscimo do índice de desempenho aos três dias e a partir daí um crescimento até os vinte e oito dias. Como o índice de desempenho é avaliado de acordo com o traço de referência é possível que essa tendência seja por conta dos valores obtidos da referência utilizada. O melhor resultado encontrado foi para o traço com 0,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante e 10% de sílica ativa aos sete dias, que teve um índice de desempenho de 119,4%. Aos vinte e oito dias, porém, o melhor resultado foi do traço com 1% de nanossílica estabilizada e 10% de sílica ativa, que teve um índice de desempenho de 115,2%, enquanto os outros dois traços com 0,5% e 1% de nanossílica estabilizada em superplastificante tiveram índices de 77,4% e 83,3%, respectivamente.

Observou-se também que nas idades iniciais de um e três dias nenhum traço de mistura ternária teve resultados melhores que o traço de referência, sendo que o melhor índice de desempenho nessas idades foi de apenas 80,4% para o traço com 0,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante e 10% de sílica ativa. É importante salientar também que os melhores resultados encontrados foram para o traço com somente 10% de sílica ativa, sendo que seus índices de desempenho foram melhores que os índices dos traços de misturas ternárias para todas as idades, chegando a um máximo de 132,1% aos sete dias e caindo para 123,7% aos vinte e oito dias.

4.2.2.3 ANÁLISE GERAL

Com todos os dados faz-se a análise geral dos traços. A Tabela 4-11 mostra os resultados encontrados, que serão representados na Figura 4-20 e Figura 4-21.

São necessárias duas considerações aos resultados obtidos. A primeira é que foi decidido se manter resultados dispersos na pesquisa, considerando apenas o primeiro desvio padrão indicados na NBR 7215 (ABNT, 1996), de modo que se pudesse avaliar também a dispersão dos resultados. A segunda consideração é que não foi fixado o espalhamento na fabricação das argamassas, por motivos explicados em 3.2.1, o que pode influenciar nos resultados obtidos.

Tabela 4-11: Resultados da compressão axial simples para todos os traços

	1 Dia		3 Dias		7 Dias		28 Dias	
	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)	Res. Média (MPa)	Índice de desempenho (%)
Referência- 100% CP	5,6	100,0%	13,1	100,0%	18,2	100,0%	29,5	100,0%
100%CP + 0,5% NS	4,1	73,9%	12,5	95,9%	18,4	101,0%	25,1	85,3%
100%CP + 1% NS	3,2	57,6%	12,2	93,6%	18,1	99,8%	22,4	75,9%
100%CP + 1,5% NS	0,1	0,9%	12,5	95,5%	17,4	95,6%	20,4	69,2%
100% CP + 3% NS	0,0	0,0%	3,2	24,8%	12,2	67,1%	20,9	71,1%
90% CP + 10% SA	7,0	124,5%	16,9	129,7%	24,0	132,1%	36,4	123,7%
90% CP + 10% SA + 0,5% NS	3,9	69,1%	10,5	80,4%	21,7	119,4%	22,8	77,4%
90% CP + 10% SA + 1% NS	4,1	73,9%	7,8	59,6%	20,2	111,2%	33,9	115,2%
90% CP + 10% SA + 1,5% NS	2,0	35,2%	9,8	75,2%	16,1	88,9%	24,5	83,3%

Na Figura 4-19 é mostrado o desenvolvimento da resistência a compressão axial simples dos traços analisados. Apesar de não ser a grandeza analisada no estudo, é interessante analisar a evolução da resistência para diferentes teores de adições.

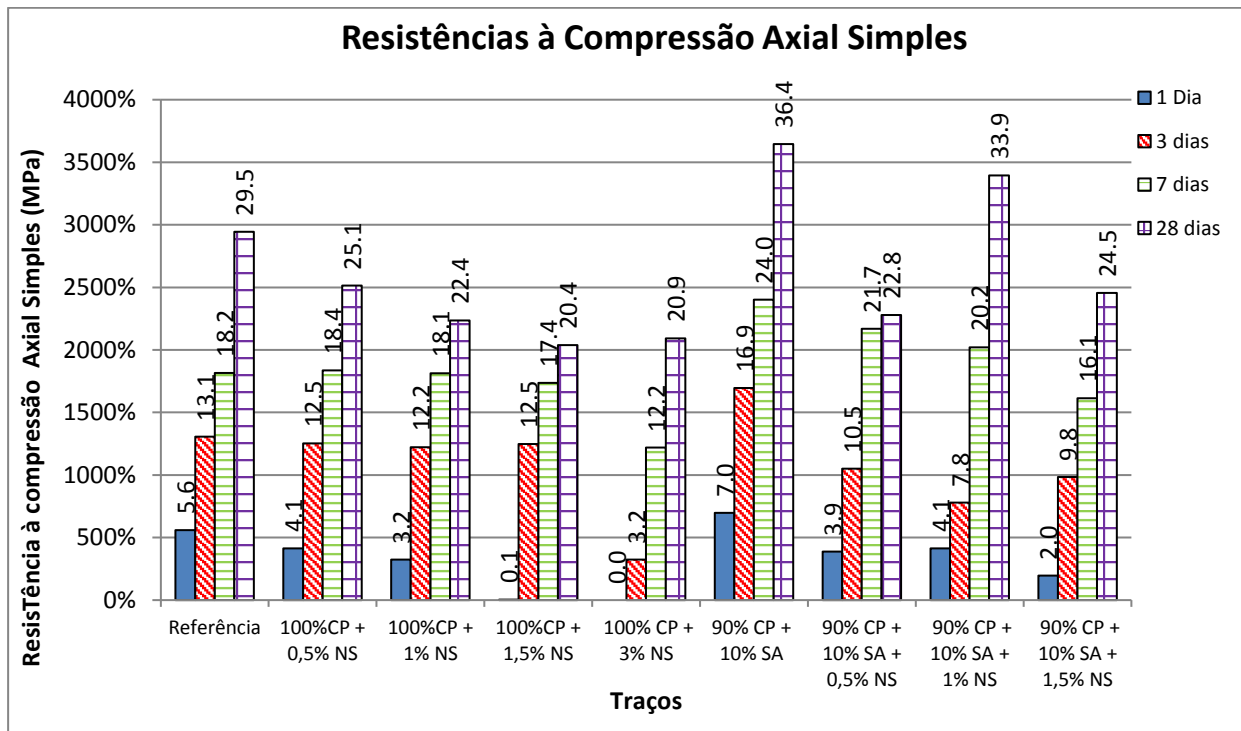


Figura 4-19: Resistência à compressão axial simples

Analisando o gráfico da Figura 4-20 é observado que os valores de índice de desempenho para cada traço e podendo comparar o índice de desempenho de cada um em cada idade. Há uma tendência de maior índice de desempenho quando analisado aos 7 dias.

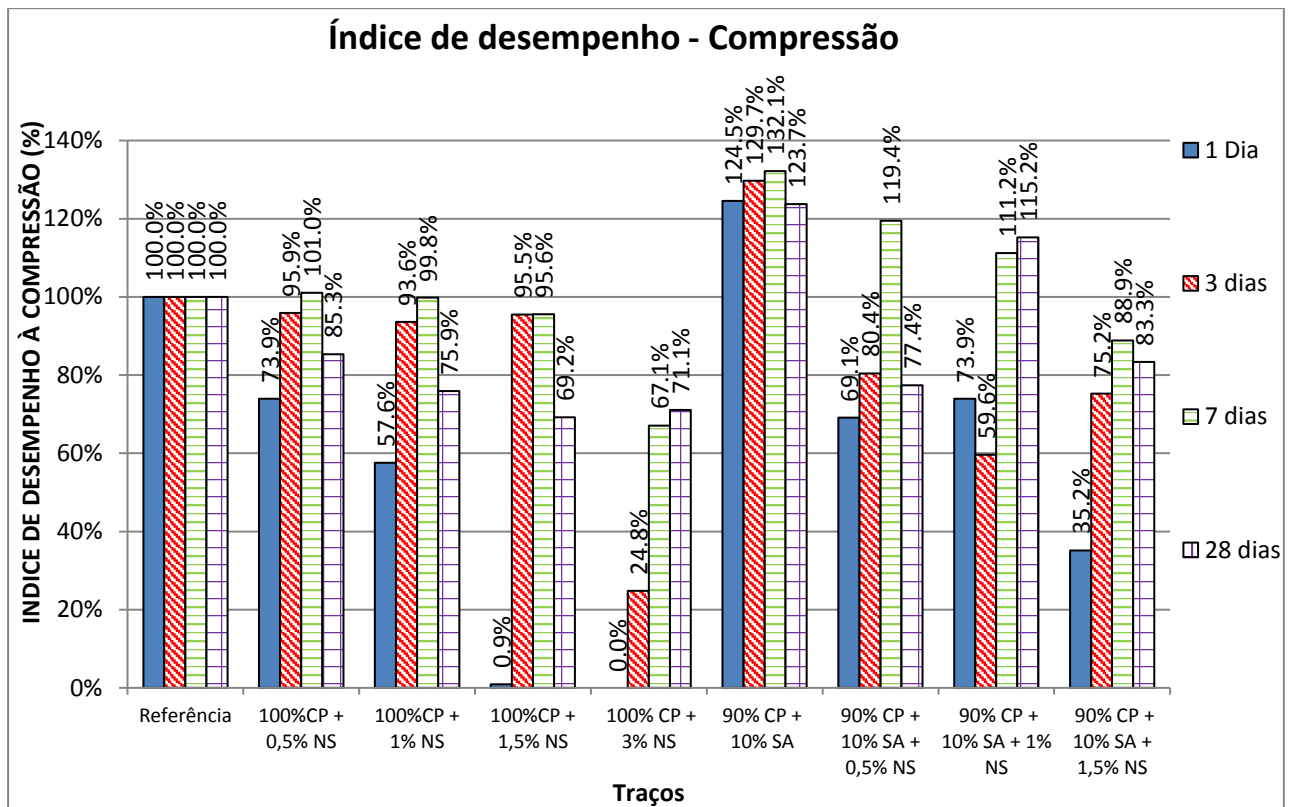


Figura 4-20: Resistência à compressão para todos os traços.

A Figura 4-21 mostra também os resultados para todos os traços, porém com uma mudança nos eixos. Sendo agora possível observar os valores de cada traço para cada uma das idades utilizadas.

Nas primeiras idades, 1 e 3 dias, todos os índices de desempenho, com exceção do traço com apenas substituição do cimento por sílica ativa, ficaram abaixo do valor de 100%. Entretanto no dia 7, quatro traços tiveram valores de resistência superiores aos de referência, enquanto quatro traços tiveram resultados inferiores.

Aos 28 dias, apenas dois traços apresentaram valores superiores ao de referência, o traço com apenas 10% de substituição do cimento por sílica ativa e o traço com 10% de substituição e 1,0% de adição de nanossílica estabilizada em superplastificante.

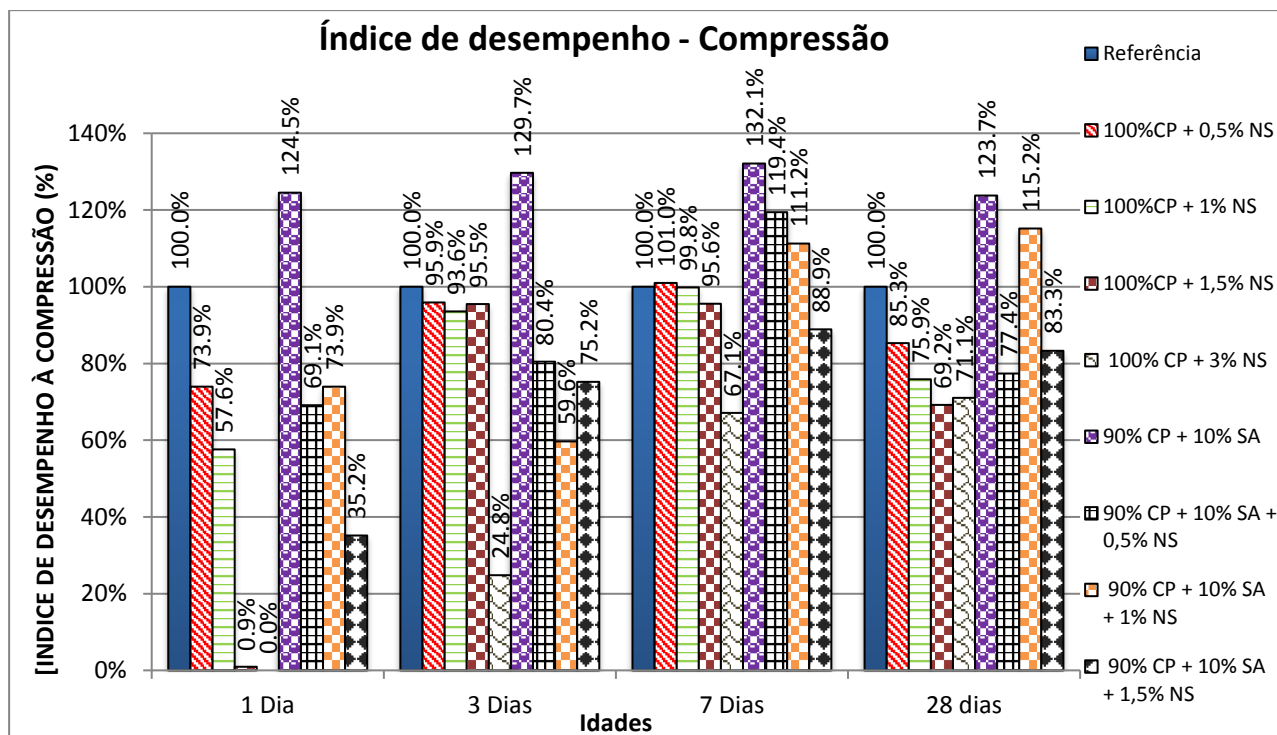


Figura 4-21: Índice de desempenho para compressão em todas as idades.

Na análise geral dos traços, observou-se que a maioria dos resultados das argamassas contendo nanossílica estabilizada em superplastificante tiveram resultados inferiores aos de referência. Comparando-se o uso isolado da nanossílica estabilizada em superplastificante com as misturas ternárias aos três dias, observou-se que os traços contendo somente nanossílica estabilizada foram melhores que os traços com misturas ternárias, porém com resultados de índice de desempenho ainda abaixo de 100%. Já aos sete dias, os traços de misturas ternárias tiveram resultados melhores que os traços com somente nanossílica estabilizada em superplastificante, com exceção do teor de 1,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante, que foi melhor que a mistura ternária de mesmo teor. Aos vinte e oito dias, todos os teores de misturas ternárias se mostraram melhores que os traços com nanossílica estabilizada em superplastificante somente, porém, só o resultado do traço com 1% de nanossílica estabilizada e 10% de sílica ativa foi maior que o de referência. De maneira geral, o melhor traço analisado foi o que continha somente 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland, sendo que esse teve os melhores resultados para todas as idades, tendo sempre resultados melhores que o traço de referência. Portanto, no que diz respeito à resistência a compressão axial simples, a nanossílica estabilizada em superplastificante não exerceu efeitos positivos, uma vez que seus índices de desempenho aos vinte e oito dias foram majoritariamente abaixo de 100%. Observou-se que o traço com maiores resultados de

resistência foi o traço que continha somente 10% de sílica ativa, porém, tal traço apresentou pouca trabalhabilidade, sendo adequado o uso em conjunto com um superplastificante que aumente o espalhamento das argamassas.

É possível também que o aditivo de nanossílica estabilizada seja mais efetivo em concretos de alto desempenho, apesar de o fabricante colocar que seu uso é indicado também para concretos convencionais. Sendo assim, é necessária uma análise em argamassas com menor relação água/aglomerante do que a utilizada na pesquisa, por exemplo, 0,40. O aumento do espalhamento eficaz proporcionado pelo aditivo com o aumento de resistência mecânica gerada pela menor relação água/aglomerante pode ser interessante para fabricação de concretos de alto desempenho.

A NBR 7215 (ABNT, 1996) indica que caso exista um desvio de até 6% na resistência à compressão de um dos quatro corpos de prova deve-se eliminar o corpo de prova com maior diferença e recalcular a média das resistências entre os três que sobraram. Caso persista algum corpo de prova com essa discrepância o adequado é refazer o traço.

Em algumas idades e traços aconteceu o caso do segundo desvio padrão ser maior que 6%, porém, optou-se por manter a resistência média dos três corpos de prova na análise. Um dos motivos é que houve discrepância em todos os traços, com exceção do traço de referência, portanto, vários dados seriam descartados e a análise seria incompleta. Outro motivo é a possibilidade de analisarmos a discrepância dos resultados. E por fim, outro motivo foi o tempo de realização da pesquisa, uma vez que não seria possível refazer os traços discrepantes. A título de ilustração, a Figura 4-22 e a Figura 4-23 mostram os gráficos de resistência à compressão axial simples quando se retiram os dados que tiveram o segundo desvio padrão acima de 6%. Nas figuras do Anexo I são mostrados os resultados completos da pesquisa, onde é possível verificar os desvios padrão.

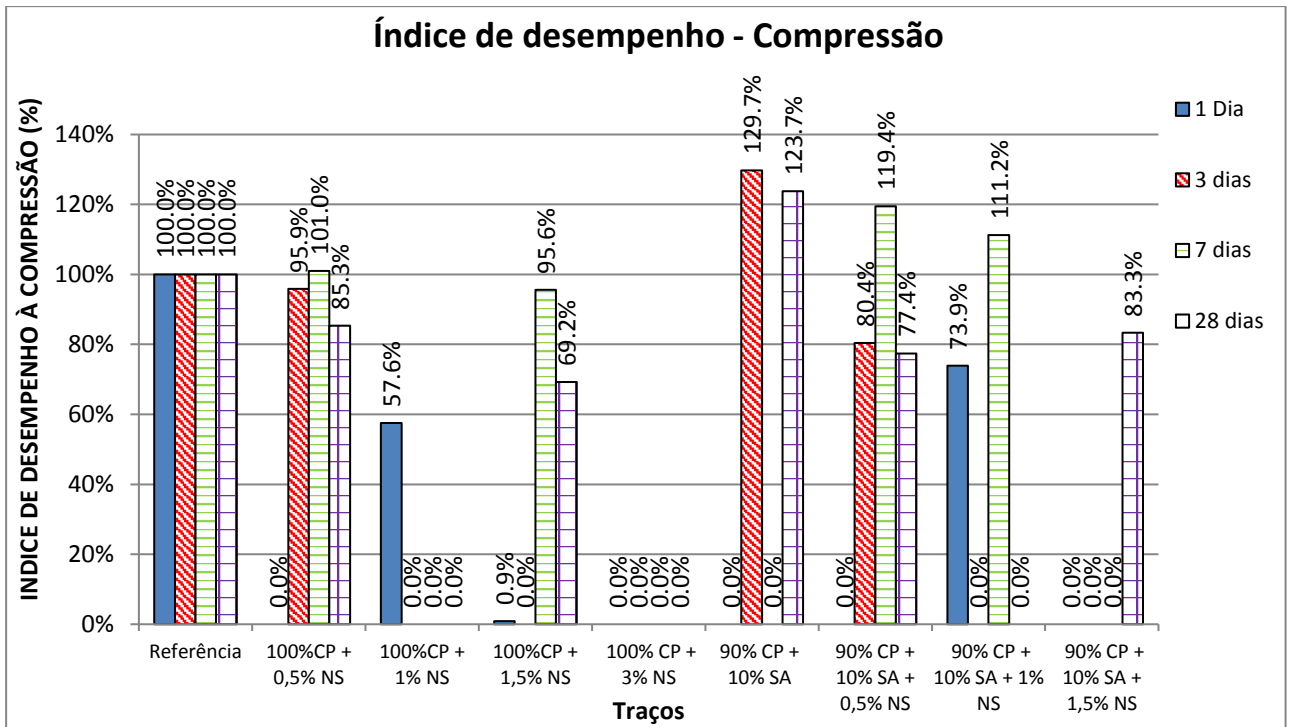


Figura 4-22: Resistência à compressão para todos os traços - Desconsiderando resultados discrepantes

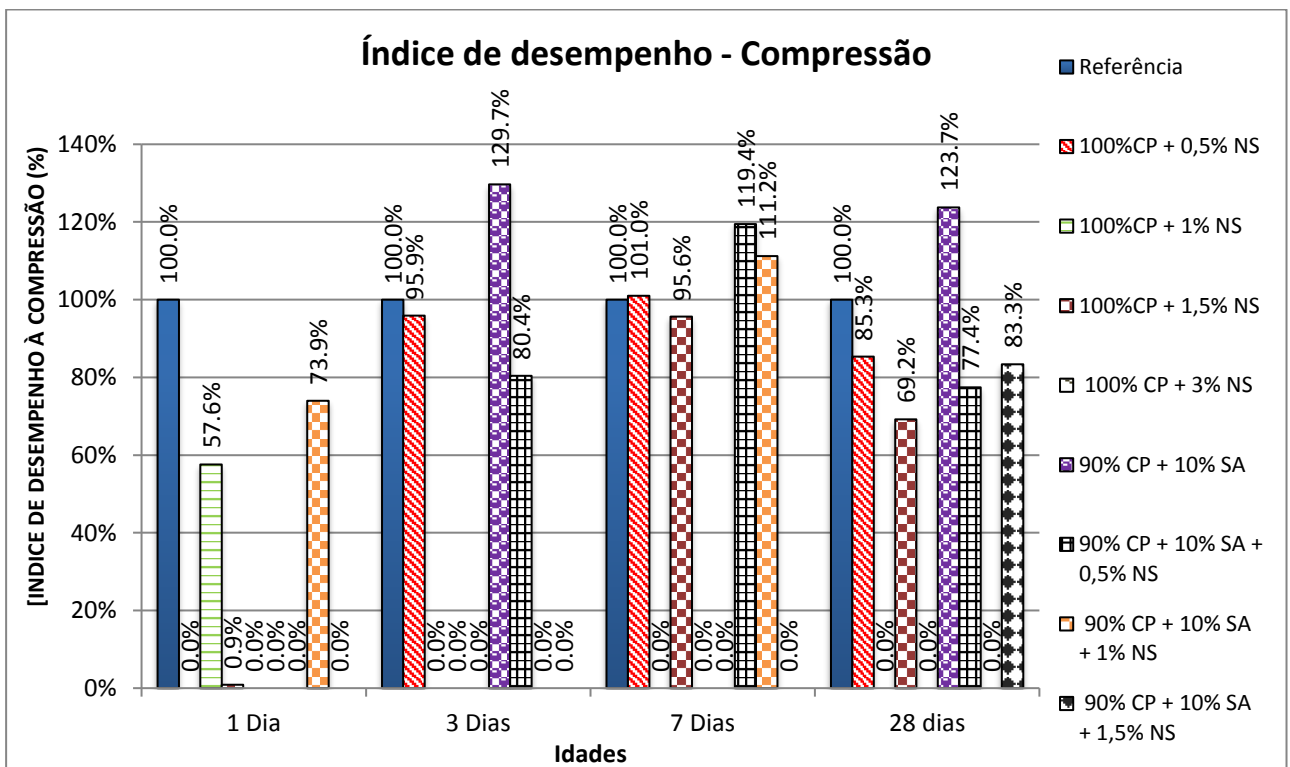


Figura 4-23: Índice de desempenho para compressão em todas as idades - Desconsiderando resultados discrepantes.

Nota-se que os resultados, como mostrados no Anexo I, apresentaram uma dispersão considerável. Analisando os procedimentos realizados, entre os possíveis motivos para tal dispersão estão: a homogeneidade da nanossílica no superplastificante, onde partes do superplastificante podem ter maiores teores de nanossílica; a forma de mistura da sílica ativa e o tipo de sílica ativa utilizada não foram adequados. A sílica ativa utilizada foi do tipo densificada, devendo ter sido diluída em uma calda antes de adicionada à mistura, o que pode influenciar nos resultados dos traços com sílica ativa, porém não explicaria a dispersão nos traços com nanossílica estabilizada em superplastificante somente; a diferença no adensamento das argamassas devido à diferença no espalhamento das mesmas.

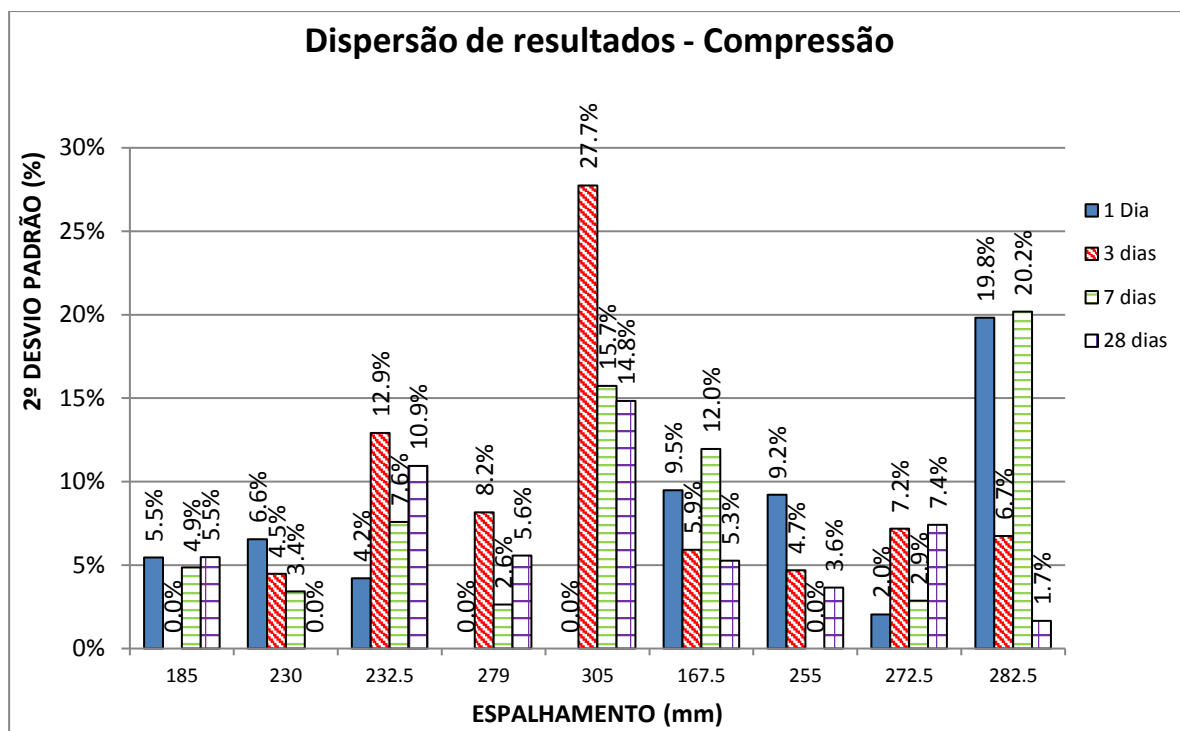


Figura 4-24: Relação entre a dispersão de resultados à compressão e o espalhamento

Na Figura 4-24 tentou-se relacionar a dispersão dos resultados com o espalhamento das argamassas. Não foi observada uma relação direta entre o espalhamento e o desvio nos resultados de índice de desempenho, porém, ainda assim é possível que a diferença entre os resultados encontrados possa ser justificada, pelo menos em parte, pela diferença nas condições de adensamento.

4.2.3 ANÁLISE DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 4-12 mostra os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos vinte e oito dias de todos os traços analisados. Os resultados são ilustrados na Figura 4-25.

Tabela 4-12: Resultados da resistência à tração por compressão diametral de todos os traços.

	28 Dias	
	Resistência Média (MPa)	Índice de desempenho a tração por compressão diametral (%)
Referência- 100% CP	3,4	100,0%
100%CP + 0,5% NS	4,0	115,8%
100%CP + 1% NS	3,7	108,8%
100%CP + 1,5% NS	3,8	112,3%
100% CP + 3% NS	3,6	106,7%
90% CP + 10% SA	6,0	176,4%
90% CP + 10% SA + 0,5% NS	4,6	134,4%
90% CP + 10% SA + 1% NS	4,2	124,2%
90% CP + 10% SA + 1,5% NS	3,2	94,2%
100%CP + 0,5% NS	4,0	115,8%

Na análise da resistência a tração por compressão diametral aos vinte e oito dias, a maioria dos resultados apresentaram uma melhora na resistência em relação ao traço de referência. Nos traços contendo somente nanossílica estabilizada em superplastificante, o melhor resultado foi do traço contendo 0,5% de aditivo e o pior resultado foi do traço contendo 3% de aditivo, tendo índices de desempenho de 115,8% e 106,7%, respectivamente. Nos traços de misturas ternárias, o melhor resultado foi o de 0,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante e 10% de sílica ativa e o pior resultado foi com 1,5% de nanossílica estabilizada em superplastificante e 10% de sílica ativa tendo índices de desempenho de 134,4% e 94,2% respectivamente. Observa-se que os traços de misturas ternárias tiveram melhores resultados que os respectivos traços com mesmo teor de nanossílica estabilizada utilizada de maneira isolada. Porém, mais uma vez o melhor resultado foi o do traço contendo somente sílica ativa, tendo um índice de desempenho de 176,4%.

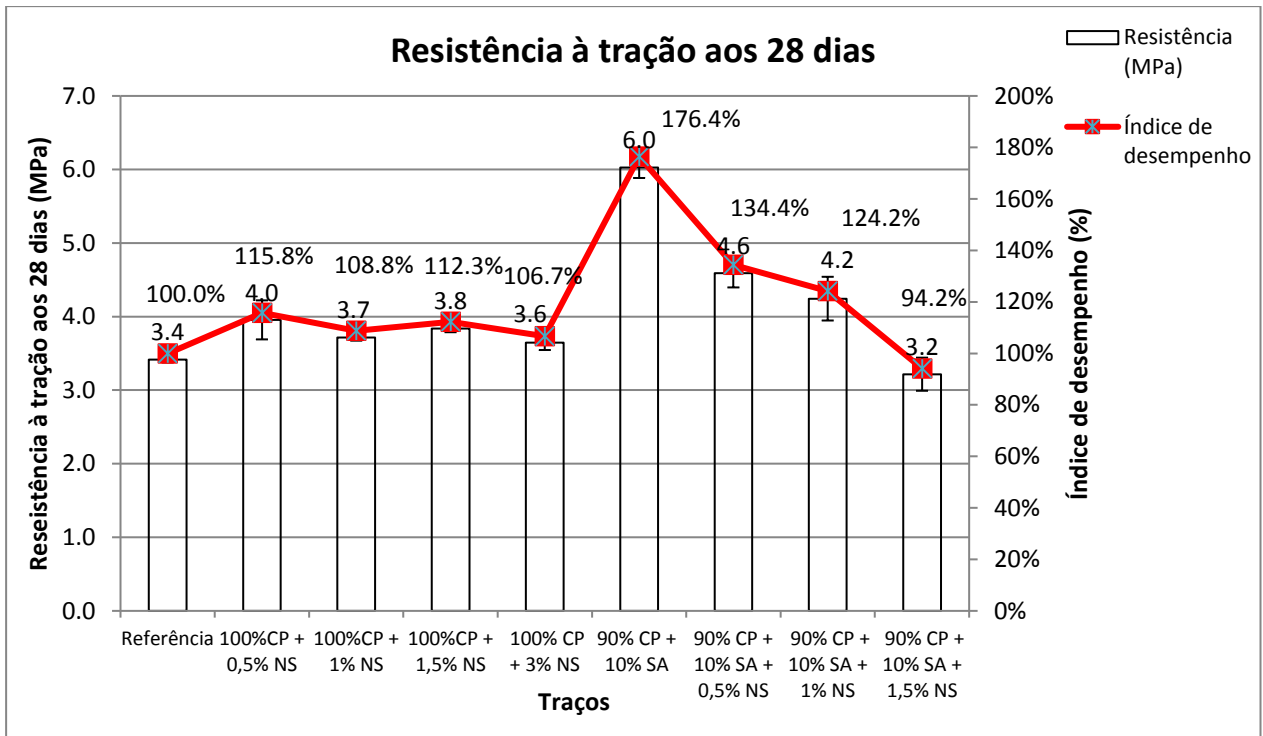


Figura 4-25: Resistência à tração para todos os traços

Considerando os valores discrepantes, como explicado no item 4.2.2.3, o resultado é apresentado na Figura 4-26. O maior valor permanece o do traço com apenas a substituição do cimento por sílica ativa, porém não é possível fazer uma comparação entre os traços com e sem sílica ativa. Também é importante observar que todos os valores de índice de desempenho em que permaneceram estão acima do traço de referência.

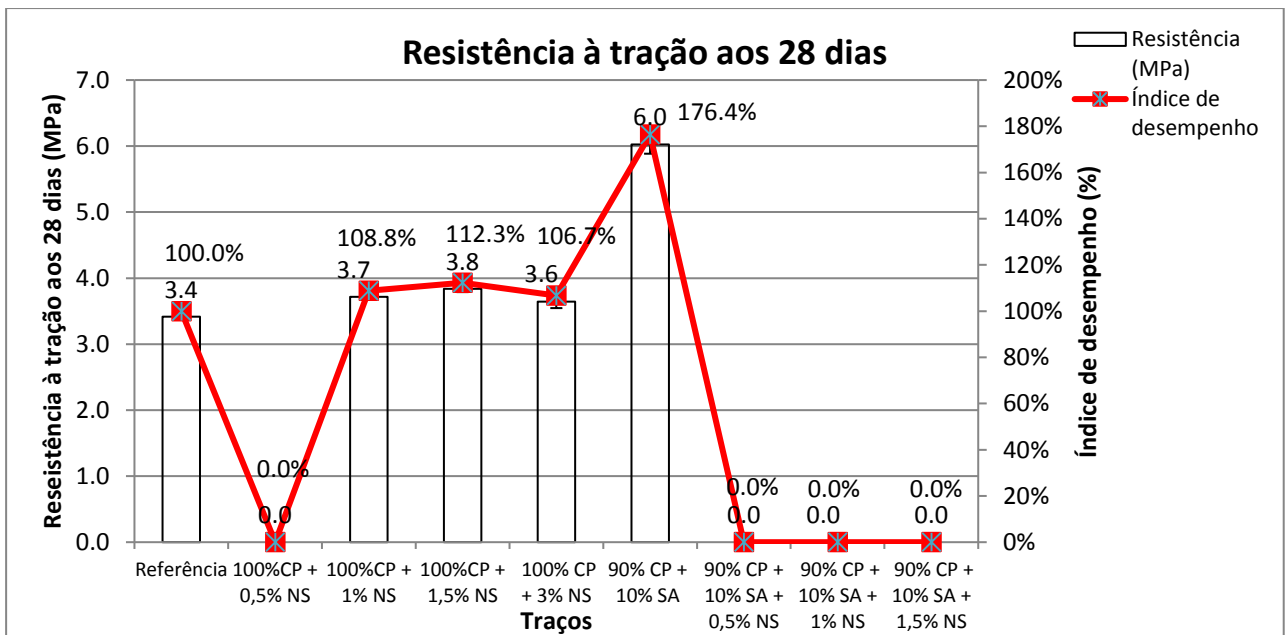


Figura 4-26: Resistência à tração para todos os traços sem resultados discrepantes.

Também é possível se tentar relacionar a dispersão dos resultados, representado pelo 2º desvio padrão do índice de desempenho, como explicado em 4.2.2.3. Na Figura 4-27 são mostrados os resultados de desvio padrão encontrados para o índice de desempenho à tração por compressão diametral aos 28 dias.

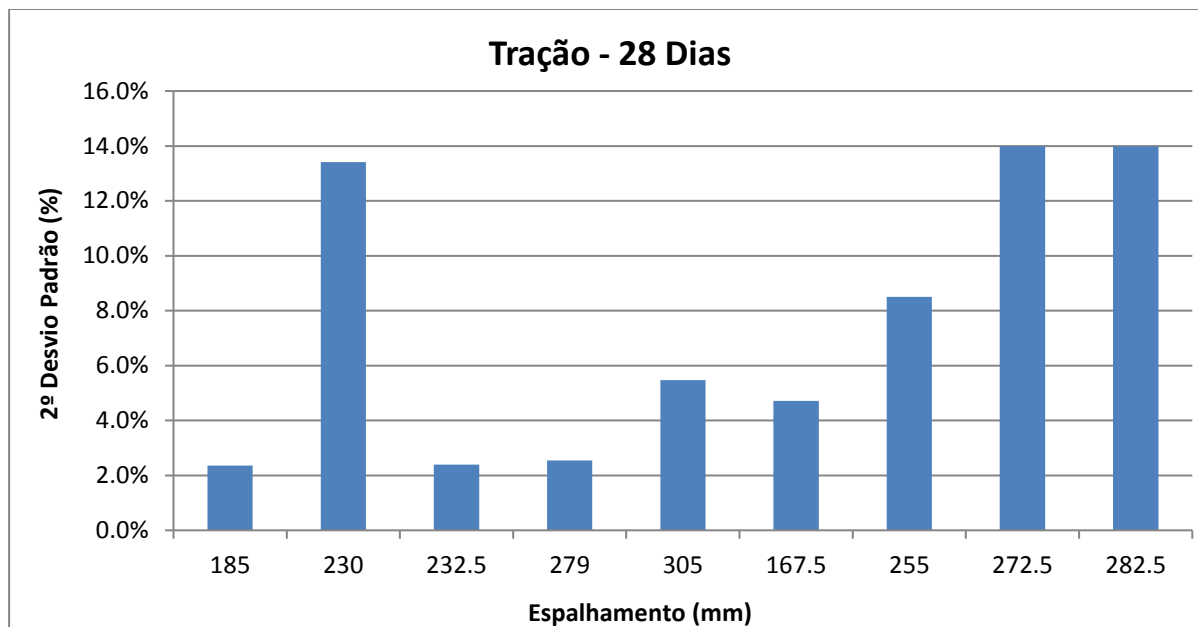


Figura 4-27:Relação entre a dispersão de resultados à tração por compressão diametral e o espalhamento

Assim como para o índice de desempenho à compressão, descrito no item 4.2.2.3, não foi possível observar uma relação direta entre o desvio encontrado e a consistência das argamassas, representada pelo espalhamento das mesmas. Porém, é possível que os resultados de índice de desempenho encontrados e sua dispersão, assim como na compressão, tenham sido influenciados pelo adensamento ter sido realizado em condições diferentes para as argamassas.

É notável que o uso da nanossílica estabilizada em superplastificante aumentou a resistência à tração por compressão diametral das argamassas ensaiadas. Em contrapartida, a mesma tendência de melhora não foi observada na resistência à compressão axial simples, com exceção de alguns traços para certas idades. Talvez essa diferença seja explicada através de interações a nível molecular que tenham efeitos diferentes para esforços de tração e compressão. Outra possível justificativa é uma melhor homogeneidade e preenchimento dos vazios das argamassas com nanossílica estabilizada em superplastificante, que apresentaram maior trabalhabilidade, e assim, talvez tiveram um melhor adensamento, que se refletiu na resistência à tração por compressão diametral.

Análises mais aprofundadas podem ser realizadas futuramente sobre o assunto para que se chegue a uma melhor explicação dessa diferença nos efeitos de resistência á tração por compressão diametral e à compressão axial simples.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs a fazer uma análise de caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante e analisar seu efeito na resistência de argamassas através de índices de desempenho. A análise não se restringiu ao uso da nanossílica estabilizada em superplastificante de maneira isolada, mas também utilizada em misturas ternárias com sílica ativa, buscando assim a melhor forma de utilização do aditivo, assim como teores ótimos.

A caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante foi utilizada principalmente para elaboração dos traços a serem ensaiados e para se obter um maior conhecimento sobre o produto. Porém, não foi possível se conhecer a composição química do produto, seus elementos e teores, dados esses importantes para determinação da quantidade de produto pozolânico adicionada às argamassas. Portanto, não se conhece efetivamente a quantidade de nanossílica adicionada às argamassas, mas sim, a quantidade de aditivo utilizado. Outro fator desconhecido é a homogeneidade da dispersão da nanossílica no superplastificante, o que poderia explicar os resultados de resistência mecânica das argamassas com alto desvio padrão.

Uma característica marcante dos resultados da pesquisa foi o efeito da nanossílica estabilizada em superplastificante nas argamassas em estado fresco. A trabalhabilidade das argamassas, representada pelos espalhamentos das mesmas, aumentou de acordo com o aumento de aditivo, com isso, é possível que seu uso seja mais indicado para produção de concretos de alto desempenho, com baixo teor de água/aglomerante.

Em relação à influência da nanossílica estabilizada em superplastificante na resistência a compressão axial simples das argamassas, observou-se que, de maneira geral, as argamassas contendo nanossílica estabilizada em superplastificante não apresentaram aumento de resistência. Os traços com o uso isolado da nanossílica estabilizada em superplastificante obtiveram resultados abaixo do traço de referência para praticamente todas as idades. Já nos traços de misturas ternárias com sílica ativa e nanossílica estabilizada em superplastificante houve alguns resultados de índice de desempenho acima de 100%, porém de maneira geral o efeito na resistência à compressão não foi satisfatório. O traço que apresentou os melhores resultados de índice de desempenho foi o traço sem adição de nanossílica estabilizada em superplastificante, com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland. O índice de desempenho do traço com somente sílica ativa chegou a 132,1% aos sete dias, sendo esse um

resultado considerável de aumento de resistência. Também é interessante a tendência de aumento do índice de desempenho até a idade de sete dias e posterior queda aos vinte e oito dias observada em seis dos oito traços comparados com a referência.

No estudo da influência da nanossílica estabilizada em superplastificante na resistência à tração observou-se uma melhora em relação ao traço de referência para todos os traços, com exceção do traço contendo 3% de nanossílica estabilizada em superplastificante adicionada de maneira isolada, teor esse fora do indicado pelo fabricante. O resultado encontrado divergiu do obtido na resistência à compressão, sendo explicada, talvez, por uma diferença das interações intermoleculares de acordo com o tipo de solitação imposta, ou talvez por um melhor adensamento gerado pelo aumento da trabalhabilidade das argamassas. Observou-se também que os traços de misturas ternárias tiveram resultados maiores de índice de desempenho em relação aos traços com o mesmo teor de nanossílica estabilizada em superplastificante utilizada de maneira isolada. Porém, os melhores resultados de aumento de resistência, assim como na compressão axial simples, foram do traço contendo somente sílica ativa em substituição ao cimento Portland.

Por fim, de maneira geral, o uso da nanossílica estabilizada em superplastificante demonstrou ser interessante no aumento da trabalhabilidade do material, porém não apresentaram resultados satisfatórios no aumento da resistência à compressão das argamassas. Por outro lado, houve aumento da resistência à tração, principalmente nos traços de misturas ternárias. Na determinação da resistência à compressão os traços com adição de nanossílica estabilizada apresentaram vários valores com índice de desempenho abaixo de 100% e mesmo os resultados com índice de desempenho acima de 100% foram inferiores aos índices de desempenho da argamassa com somente sílica ativa. Inclusive a argamassa contendo somente sílica ativa apresentou ser a melhor no que diz respeito ao aumento da resistência mecânica. Um ponto que se deve analisar ao ler os resultados é que a consistência das argamassas não foi fixada, logo o adensamento durante o ensaio foi realizado em condições diferentes para cada argamassa, mesmo o processo tendo sido o mesmo para todos os traços. Essa diferença no adensamento pode ter influenciado nos resultados de índice de desempenho encontrados, assim como na dispersão dos resultados, uma vez que, na prática, as argamassas não foram moldadas uniformemente, devido à influência da consistência no espalhamento. Os resultados encontrados não foram condizentes com o esperado, uma vez que o efeito *filler* e pozolânico da nanossílica deveria, em tese, densificar a matriz cimentícia, principalmente quando utilizada em conjunto da sílica ativa, porém, de maneira geral, não foi o observado na pesquisa. Salienta-se que um aprofundamento no tema se faz necessário, uma vez que a

caracterização do material pode ser aprofundada, os métodos de ensaio podem ser melhorados e os teores também podem ser variados. Salienta-se que os resultados apresentaram considerável dispersão, sendo, talvez, explicada pela homogeneidade do aditivo ou pelo modo como a sílica ativa foi adicionada à mistura.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar novamente a pesquisa utilizando outros produtos de nanossílica estabilizada em superplastificante, com diferentes teores e indicados para outras situações e comparar os resultados encontrados com os obtidos nessa pesquisa;
- Realizar uma análise de tempo de início e fim de pega de pasta contendo diferentes teores de nanossílica estabilizada em superplastificante, uma vez que se observou na pesquisa que o teor de nanossílica estabilizada em superplastificante influencia no tempo de pega das argamassas;
- Realizar uma maior caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante, incluindo uma análise química dos elementos presentes no produto, caracterização do superplastificante utilizado, entre outros;
- Testar a eficiência da nanossílica estabilizada em superplastificante no que diz respeito ao aumento da trabalhabilidade das argamassas, testando vários outros superplastificantes, além da nanossílica estabilizada em superplastificante, analisando os teores necessários de cada produto para se chegar a um espalhamento previamente definido;
- Realizar novamente a pesquisa, utilizando-se menor relação água/aglomerante, para verificar a possibilidade do uso de nanossílica estabilizada em superplastificante na produção de concretos de alto desempenho;
- Realizar ensaios para análise de incorporação de ar ao adicionar a nanossílica estabilizada em superplastificante.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento — Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 11578: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR11579: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 13956-3: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR NM23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 43: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM ISSO 3310-1: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2010.

AÏTCIN, P.C. Curing high performance concrete to minimize shrinkage: High-performance concrete Series 5. 1 ed. E. & FN Spon, 1998.

ANDRADE, D. S. Microestrutura de Pastas de Cimento Portland com Incorporação de Nanossílica Coloidal e Adições Minerai s Altamente Reativas. Qualificação de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2015.

ANDRADE, J.E. de Síntese, Caracterização e Modificação de Nanopartículas de Prata com 5-Fluorouracil sob a Influência do pH. 2002. 161 p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE. Brasil.

AITCIN, P. C. Concreto de alto desempenho. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667 p.

AZEVEDO, C. S. Contribuição das adições minerais para a resistência à corrosão das armaduras de concreto. 2001. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.

BHANJA, S.; SENGUPTA, B. Modified water–cement ratio law for silica fume concretes. *Cement and Concrete Research*, n. 33, pp. 447-450. 2006.

BENTUR A, COHEN M.D (1987). “Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars. *Journal American Ceramic Society*. 1987; 70(10):738-43.

BERRA M., CARASSITI F., MANGIALARDI T., PAOLINI A.E. and SEBASTIANI M. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*. 2012.

BJÖRNSTRÖM, J.; MARTINELLI, A.; MATIC, A.; BÖRJESSON, L. e PANAS, I. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*, v. 392, 2004, p. 242-248.

BYUNG-WAN J., KIM, C. H., TAE, G., PARK, J. B. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Construction and Building materials*, v. 21, 2007, p. 1351-1355.

CARMO, J. B. M. Análise Comparativa do Desempenho de Concretos Compostos com Sílica Ativa e Metacaulim Face à Resistência Mecânica e à Viabilidade Econômica. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2006.

CASTRO. A. Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação. 2003. 273 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CASTRO, A. L. Aplicação de concretos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho. 2007. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. A importância da avaliação reológica de pastas com e sem sílica ativa para produção de concretos estruturais com cimento Portland para obras marítimas. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos/SP, 2012.

COLLEPARDI, S. Admixtures-Enhancing Concrete Performance, 6th International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, U.K., July 2005

DAL MOLIN, D. C. C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DANTAS, M. H. O. Avaliação dos efeitos da adição nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia civil e ambiental, PE. 2013.

DELGADO, A. et al. Nanosílice estabilizada y microsílice para materiales cementantes expuestos al ambiente marino. Aplicación al caso del Mar Caribe. pp. 1-16, 2012.

DINTEN, C. A. M. Contribuição da Adição de Sílicas nas Propriedades do Concreto. 2000. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

FUKUSHI, K.; SATO, T. Using a surface complexation model to predict the nature and stability of nanoparticles. Environmental Science and Technology, v. 39, p. 1250-1256, 2005.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

HOFFMAN, A. T. Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de clorretos em concretos. 2001. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HOPPE FILHO, J. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo – SP, 2008.

HOU, P et al. Modification effects of colloidal nano SiO₂ on cement hydration and its gel property. Elsevier, Composites: Part B, 2013.

ISAIA, G., GASTALDINI, A. Effects on durability of HPC with very high levels of mineral addition sand hydrated lime. In: MALHOTRA, V. M. (ed). International ACI/CANMET Conference on Quality of Concrete Structures, 4th, Olinda, 2005.Proceedings. American Concrete Institute, Farmington Hills. Supplementary Papers (to be published).

JO BW, Kim CH, TAE G and PARK JB. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. Construction and Building Materials. 2007;

KANNING, R. C. Utilização da Cinza de Folha de Bananeira como Adição em Argamassas de Cimento Portland. Universidade Federal do Paraná. Tese de Doutorado. Curitiba, 2013.

KONTOLEONTOS, F. et al. Influence of colloidal nanosilica on ultra fine cement hydration: Physico chemical and microstructural characterization. Construction And Building Materials, Athens, n. 35, p.347 - 360, 23 jan. 2012.

LI. G. Properties of high-volume flyash concrete incorporating nano-SiO₂. Cement and Concrete Research. 2004.

LI, H.; XIAO, H-G.; YUAN, J.; OU, J. Micro structure of cement mortar with nano-particles. Composites: Part B. v. 35, 2004, p. 185–189

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. Pozzolanic and Cementitious Materials. 1st ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996. 191 p.

MENDES, S. E. S. Estudo experimental de concretos de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. 2002. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais, Ed. IBRACON, 3ª. Edição, São Paulo, Brasil, 2014.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura Propriedades e Materiais. 3ª ed. São Paulo: Pini, 2008. 674 p.

MOHAMMADMEHDI, C. The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement. Department of Chemical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. 2012.

MORAES, R.C. Efeito Físico e Pozolânico das Adições Mineraias sobre a Resistência Mecânica do Concreto. Santa Maria:UFSM, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

MORAES, M. Q. Contribuição aos Estudos da Influência da Nanossílica nas Propriedades Mecânicas e na Trabalhabilidade de Concretos para Produção em Centrais e para Fabricação de Pré-moldados. 2012. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

MORAES, M. Q.; LOPES, R. R. Análise da contribuição de adições de microssílica e nanossílica na resistência à compressão de concretos convencionais. 2010. 81p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

NAZARI, A, R. S. The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. Composites: Part B. 2011.

NETTO, R. M. Materiais Pozolânicos. 2006. 149 p. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto, 2ª. edição, Editora PINI Ltda., São Paulo, 1997.

NOLLI FILHO, P. R. Propriedades Mecânicas do Concreto de Alto Desempenho com Adição de Nanossílica Estabilizada. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2015.

PAPIRER, E. Adsorption on Silica Surfaces. Ed. Marcel Dekker Inc., 2000.

PAULON, V. A. A interface entre a pasta de cimento e agregado: influência na durabilidade dos concretos. Revista Técnica, n. 25, pp. 29-31. 1996.

QUERCIA, G.; SPIESZ, P.; HÜSKEN, G.; BROUWERS, J. Effects of Amorphous Nano-Silica Additions on Mechanical and Durability Performance Of SCC Mixtures. *Internacional Congress And Durability of Concrete (ICDC)*, 2012.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. *Nanotechnology in concrete – A review*. Elsevier, *Construction and Building Materials*. 2010.

SANTOS, T. A. C. (2016). *Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano partículas de Sílica para Melhorar as Propriedades de Concretos de Alto Desempenho*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-02A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145p.

SARI, M.; PRAT, E.; LABASTIRE, J. F. High strength self-compacting concrete: original Solutions associating organic and inorganic ad mixtures. *Cement and Concrete Composites*, n. 28, pp. 813– 818. 1999.

SCRIVENER, K. L. *Nanotechnology and Cementitious Materials* In: BITTNER, Z., BARTOS, P. J. M., NĚMEČEK, J., ŠMILAUER, V., ZEMAN, J. Eds. *Nanotechnology in Construction 3*, Proceedings of the NICOM, ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009, p. 37-42

SEEKKUARACHCHIA, I. N., TANAKA, K., KUMAZAWA, H. Dispersion mechanism of nano –particulate aggregates using a high pressure wet - type Jet Mill. *Chemical Engineering Science*, n. 63, 2008.

SENFF, L – Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento, 2009 – Florianópolis.

SHIH, J.Y., CHANG, T.P., HSIAO, T.C. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite, *Materials Science and Engineering: A*, v. 424, n. 1-2, pp. 266-274, 2006.

SILVA, E. F., 1997. *Concreto de Alto Desempenho: estudo de propriedades mecânicas*. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 003A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 166p.

SOBOLEV, K.; FLORES, I.; TORRES MARTINEZ, L.M.; VALDEZ, P.L., ZARAZUA, E.; CUELLAR, E. L. Engineering of SiO₂ Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials. In: BITTNAR, Z., BARTOS, P. J. M., NĚMEČEK, J., ŠMILAUER, V., ZEMAN, J. Eds. Nanotechnology in Construction³, Proceedings of the NICOM, ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009, p. 139-148

TATTERSALL, G. H. The reology of Portland cement pastes. IOP Science. pp. 165- 167, 1995.

ANEXOS

I. RESULTADOS COMPLETOS DA PESQUISA

	1 dia						Res. Média (MPa)- Final	Índice de desempenho
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
Traço 1 - Referência	1,14	5,8	5,8%	5,8	3,6%	5,6	100,0%	
	1,04	5,3	3,5%	5,3	5,5%			
	1,12	5,7	3,9%	5,7	1,8%			
	1,01	5,1	6,3%	0,0	-			
Traço 2 - 100%CP + 0,5% NS	1 dia						4,1	73,9%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	0,85	4,3	6,1%	4,3	4,5%			
	0,76	3,9	16,0%	3,9	6,6%			
	0,83	4,2	8,3%	4,2	2,0%			
1,18	6,0	30,4%	0,0	-				
Traço 3 - 100%CP + 1% NS	1 dia						3,2	57,6%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	0,66	3,4	7,8%	3,4	4,2%			
	0,55	2,8	10,2%	0,0	-			
	0,63	3,2	2,9%	3,2	0,5%			
0,61	3,1	0,4%	3,1	3,7%				
Traço 4 - 100%CP + 1,5% NS	1 dia						0,1	0,9%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	0,01	0,1	0,0%	0,1	0,0%			
	0,01	0,1	0,0%	0,1	0,0%			
	0,01	0,1	0,0%	0,1	0,0%			
0,01	0,1	0,0%	0,1	0,0%				
Traço 5 - 90% CP + 10% SA	1 dia						7,0	124,5%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	1,21	6,2	9,0%	0,0	-			
	1,44	7,3	8,3%	7,3	5,1%			
	1,43	7,3	7,5%	7,3	4,4%			
1,24	6,3	6,8%	6,3	9,5%				
Traço 6 - 90% CP + 10% SA + 0,5% NS	1 dia						3,9	69,1%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	0,71	3,6	10,1%	3,6	6,6%			
	0,88	4,5	11,4%	0,0	-			
	0,83	4,2	5,1%	4,2	9,2%			
0,74	3,8	6,3%	3,8	2,6%				
Traço 7 - 90% CP + 10% SA + 1% NS	1 dia						4,1	73,9%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	0,83	4,2	3,2%	4,2	2,0%			
	0,81	4,1	5,5%	4,1	0,4%			
	0,99	5,0	15,5%	0,0	-			
0,80	4,1	6,7%	4,1	1,6%				
Traço 8 - 90% CP + 10% SA + 1,5% NS	1 dia						2,0	35,2%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	0,41	2,1	19,7%	2,1	6,0%			
	0,44	2,2	28,5%	2,2	13,8%			
	0,31	1,6	9,5%	1,6	19,8%			
0,21	1,1	38,7%	0,0	-				
Traço 9 (Extra) - 100% CP + 3% NS	1 dia						0,0	0,0%
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
	0,00	0,0	0,0%	0,0	-			
	0,00	0,0	0,0%	0,0	-			
	0,00	0,0	0,0%	0,0	-			
0,00	0,0	0,0%	0,0	-				

Figura I-1: Resultados da resistência à compressão axial simples com um dia

Traço	3 dias						Res. Média (MPa)- Final	Índice de desempenho
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)			
Traço 1 - Referência	2,64	13,4	2,9%	13,4	2,9%	13,1	100,0%	
	2,47	12,6	3,7%	12,6	3,7%			
	2,55	13,0	0,6%	13,0	0,6%			
	2,60	13,2	1,4%	13,2	1,4%			
Traço 2 - 100%CP + 0,5% NS	2,79	14,2	9,7%	0,0	-	12,5	95,9%	
	2,35	12,0	7,6%	12,0	4,5%			
	2,57	13,1	1,1%	13,1	4,5%			
	2,46	12,5	3,2%	12,5	0,0%			
Traço 3 - 100%CP + 1% NS	2,61	13,3	16,5%	13,3	8,7%	12,2	93,6%	
	2,09	10,6	6,7%	10,6	12,9%			
	1,76	9,0	21,4%	0,0	-			
	2,50	12,7	11,6%	12,7	4,2%			
Traço 4 - 100%CP + 1,5% NS	2,02	10,3	13,8%	0,0	-	12,5	95,5%	
	2,35	12,0	0,3%	12,0	4,1%			
	2,65	13,5	13,1%	13,5	8,2%			
	2,35	12,0	0,3%	12,0	4,1%			
Traço 5 - 90% CP + 10% SA	2,85	14,5	11,1%	0,0	-	16,9	129,7%	
	3,34	17,0	4,1%	17,0	0,4%			
	3,13	15,9	2,4%	15,9	5,9%			
	3,51	17,9	9,4%	17,9	5,5%			
Traço 6 - 90% CP + 10% SA + 0,5% NS	2,16	11,0	0,2%	11,0	4,7%	10,5	80,4%	
	2,43	12,4	12,8%	0,0	-			
	2,04	10,4	5,3%	10,4	1,1%			
	1,99	10,1	7,7%	10,1	3,6%			
Traço 7 - 90% CP + 10% SA + 1% NS	1,77	9,0	11,3%	0,0	-	7,8	59,6%	
	1,64	8,4	3,1%	8,4	7,2%			
	1,47	7,5	7,5%	7,5	3,9%			
	1,48	7,5	6,9%	7,5	3,3%			
Traço 8 - 90% CP + 10% SA + 1,5% NS	1,95	9,9	4,6%	9,9	1,0%	9,8	75,2%	
	2,04	10,4	9,4%	10,4	5,7%			
	1,80	9,2	3,5%	9,2	6,7%			
	1,67	8,5	10,5%	0,0	-			
Traço 9 (Extra) - 100% CP + 3% NS	0,46	2,3	10,2%	2,3	27,7%	3,2	24,8%	
	0,65	3,3	26,8%	3,3	2,1%			
	0,14	0,7	72,7%	0,0	-			
	0,80	4,1	56,1%	4,1	25,7%			

Figura I-2: Resultados da resistência à compressão axial simples com três dias

Traço	7 dias					Res. Média (MPa)- Final	Índice de desempenho
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)		
Traço 1 - Referência	3,51	17,9	2,6%	17,9	1,6%	18,2	100,0%
	2,99	15,2	12,6%	0,0	-		
	3,45	17,6	0,8%	17,6	3,3%		
	3,74	19,0	9,3%	19,0	4,9%		
Traço 2 - 100%CP + 0,5% NS	3,48	17,7	7,3%	17,7	3,4%	18,4	101,0%
	4,20	21,4	11,9%	0,0	-		
	3,72	18,9	0,9%	18,9	3,2%		
	3,61	18,4	3,8%	18,4	0,2%		
Traço 3 - 100%CP + 1% NS	3,39	17,3	7,6%	17,3	4,8%	18,1	99,8%
	4,00	20,4	9,0%	0,0	-		
	3,46	17,6	5,7%	17,6	2,8%		
	3,83	19,5	4,4%	19,5	7,6%		
Traço 4 - 100%CP + 1,5% NS	3,45	17,6	5,5%	17,6	1,2%	17,4	95,6%
	2,85	14,5	12,8%	0,0	-		
	3,32	16,9	1,5%	16,9	2,6%		
	3,46	17,6	5,8%	17,6	1,5%		
Traço 5 - 90% CP + 10% SA	3,93	20,0	13,0%	0,0	-	24,0	132,1%
	5,01	25,5	10,9%	25,5	6,3%		
	4,98	25,4	10,2%	25,4	5,7%		
	4,15	21,1	8,1%	21,1	12,0%		
Traço 6 - 90% CP + 10% SA + 0,5% NS	4,13	21,0	3,1%	21,0	3,1%	21,7	119,4%
	4,42	22,5	3,8%	22,5	3,8%		
	4,29	21,8	0,7%	21,8	0,7%		
	4,20	21,4	1,4%	21,4	1,4%		
Traço 7 - 90% CP + 10% SA + 1% NS	4,50	22,9	9,8%	0,0	-	20,2	111,2%
	4,08	20,8	0,5%	20,8	2,9%		
	3,91	19,9	4,6%	19,9	1,4%		
	3,91	19,9	4,6%	19,9	1,4%		
Traço 8 - 90% CP + 10% SA + 1,5% NS	2,38	12,1	19,9%	0,0	-	16,1	88,9%
	2,53	12,9	14,9%	12,9	20,2%		
	3,45	17,6	16,1%	17,6	8,8%		
	3,53	18,0	18,8%	18,0	11,4%		
Traço 9 (Extra) - 100% CP + 3% NS	2,22	11,3	11,6%	11,3	7,2%	12,2	67,1%
	2,77	14,1	10,4%	14,1	15,7%		
	2,86	14,6	13,9%	0,0	-		
	2,19	11,2	12,7%	11,2	8,5%		

Figura I-3: Resultados da resistência à compressão axial simples com sete dias

Traço	28 dias					Res. Média (MPa)- Final	Índice de desempenho
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)		
Traço 1 - Referência	5,65	28,8	0,9%	28,8	2,3%	29,5	100,0%
	5,60	28,5	0,0%	28,5	3,2%		
	5,04	25,7	10,0%	0,0	-		
	6,10	31,1	9,0%	31,1	5,5%		
Traço 2 - 100%CP + 0,5% NS	4,85	24,7	1,7%	24,7	1,7%	25,1	85,3%
	4,94	25,2	0,1%	25,2	0,1%		
	5,18	26,4	5,0%	26,4	5,0%		
	4,77	24,3	3,3%	24,3	3,3%		
Traço 3 - 100%CP + 1% NS	4,63	23,6	2,2%	23,6	5,5%	22,4	75,9%
	3,91	19,9	17,4%	19,9	10,9%		
	4,63	23,6	2,2%	23,6	5,5%		
	5,76	29,3	21,7%	0,0	-		
Traço 4 - 100%CP + 1,5% NS	4,19	21,3	8,0%	21,3	4,7%	20,4	69,2%
	3,78	19,3	2,6%	19,3	5,6%		
	3,51	17,9	9,5%	0,0	-		
	4,04	20,6	4,1%	20,6	0,9%		
Traço 5 - 90% CP + 10% SA	6,78	34,5	11,1%	34,5	5,3%	36,4	123,7%
	7,39	37,6	3,1%	37,6	3,3%		
	9,04	46,0	18,5%	0,0	-		
	7,30	37,2	4,3%	37,2	2,0%		
Traço 6 - 90% CP + 10% SA + 0,5% NS	4,33	22,1	10,4%	22,1	3,3%	22,8	77,4%
	4,64	23,6	3,9%	23,6	3,6%		
	5,89	30,0	21,9%	0,0	-		
	4,46	22,7	7,7%	22,7	0,4%		
Traço 7 - 90% CP + 10% SA + 1% NS	6,17	31,4	2,9%	31,4	7,4%	33,9	115,2%
	6,85	34,9	7,8%	34,9	2,8%		
	6,97	35,5	9,7%	35,5	4,6%		
	5,42	27,6	14,7%	0,0	-		
Traço 8 - 90% CP + 10% SA + 1,5% NS	4,83	24,6	4,7%	24,6	0,2%	24,5	83,3%
	5,82	29,6	14,8%	0,0	-		
	4,89	24,9	3,6%	24,9	1,5%		
	4,74	24,1	6,5%	24,1	1,7%		
Traço 9 (Extra) - 100% CP + 3% NS	2,56	13,0	31,2%	0,0	-	20,9	71,1%
	3,81	19,4	2,4%	19,4	7,3%		
	3,80	19,4	2,1%	19,4	7,5%		
	4,72	24,0	26,8%	24,0	14,8%		

Figura I-4: Resultados da resistência à compressão axial simples com vinte e oito dias

Traço	Tração aos 28 dias					Res. Média (MPa)- Final	Índice de desempenho
	Carga (tf)	Res. Individual 1 (MPa)	Desvio Padrão 1 (Em módulo)	Res. Individual 2 (MPa)	Desvio Padrão 2 (Em módulo)		
Traço 1 - Referência	2,62	3,3	11,1%	3,3	2,4%	3,4	100,0%
	3,74	4,8	26,9%	0,0	-		
	2,69	3,4	8,7%	3,4	0,2%		
	2,74	3,5	7,0%	3,5	2,1%		
Traço 2 - 100%CP + 0,5% NS	2,69	3,4	20,6%	3,4	13,4%	4,0	115,8%
	3,20	4,1	5,6%	4,1	3,0%		
	4,24	5,4	25,1%	0,0	-		
	3,43	4,4	1,2%	4,4	10,4%		
Traço 3 - 100%CP + 1% NS	2,96	3,8	3,4%	3,8	1,4%	3,7	108,8%
	2,69	3,4	6,0%	0,0	-		
	2,85	3,6	0,4%	3,6	2,4%		
	2,95	3,8	3,1%	3,8	1,0%		
Traço 4 - 100%CP + 1,5% NS	2,63	3,3	9,9%	0,0	-	3,8	112,3%
	3,09	3,9	5,9%	3,9	2,5%		
	2,98	3,8	2,1%	3,8	1,1%		
	2,97	3,8	1,8%	3,8	1,4%		
Traço 5 - 90% CP + 10% SA	4,91	6,3	9,1%	6,3	3,7%	6,0	176,4%
	4,51	5,7	0,2%	5,7	4,7%		
	3,80	4,8	15,6%	0,0	-		
	4,78	6,1	6,2%	6,1	1,0%		
Traço 6 - 90% CP + 10% SA + 0,5% NS	3,81	4,9	10,8%	4,9	5,6%	4,6	134,4%
	3,71	4,7	7,9%	4,7	2,9%		
	3,30	4,2	4,0%	4,2	8,5%		
	2,93	3,7	14,8%	0,0	-		
Traço 7 - 90% CP + 10% SA + 1% NS	4,06	5,2	15,5%	0,0	-	4,2	124,2%
	3,06	3,9	12,9%	3,9	8,2%		
	3,14	4,0	10,7%	4,0	5,8%		
	3,80	4,8	8,1%	4,8	14,0%		
Traço 8 - 90% CP + 10% SA + 1,5% NS	2,42	3,1	13,3%	3,1	4,2%	3,2	94,2%
	3,59	4,6	28,6%	0,0	-		
	2,88	3,7	3,1%	3,7	14,0%		
	2,28	2,9	18,4%	2,9	9,8%		
Traço 9 (Extra) - 100% CP + 3% NS	3,02	3,8	10,4%	3,8	5,5%	3,6	106,7%
	2,35	3,0	14,1%	0,0	-		
	2,85	3,6	4,2%	3,6	0,5%		
	2,72	3,5	0,5%	3,5	5,0%		

Figura I-5: Resultados da resistência à tração por compressão diametral com vinte e oito dias

II. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ORIGINAIS

Para se analisar corretamente os resultados encontrados e buscar atingir os objetivos da pesquisa dividiram-se os procedimentos em duas etapas: (1) Seleção e caracterização dos materiais; (2) Determinação do índice de desempenho da nanossílica estabilizada em superplastificante e da sílica ativa em argamassas de cimento Portland.

Na Figura II-1 é mostrado um organograma com as fases do programa experimental.

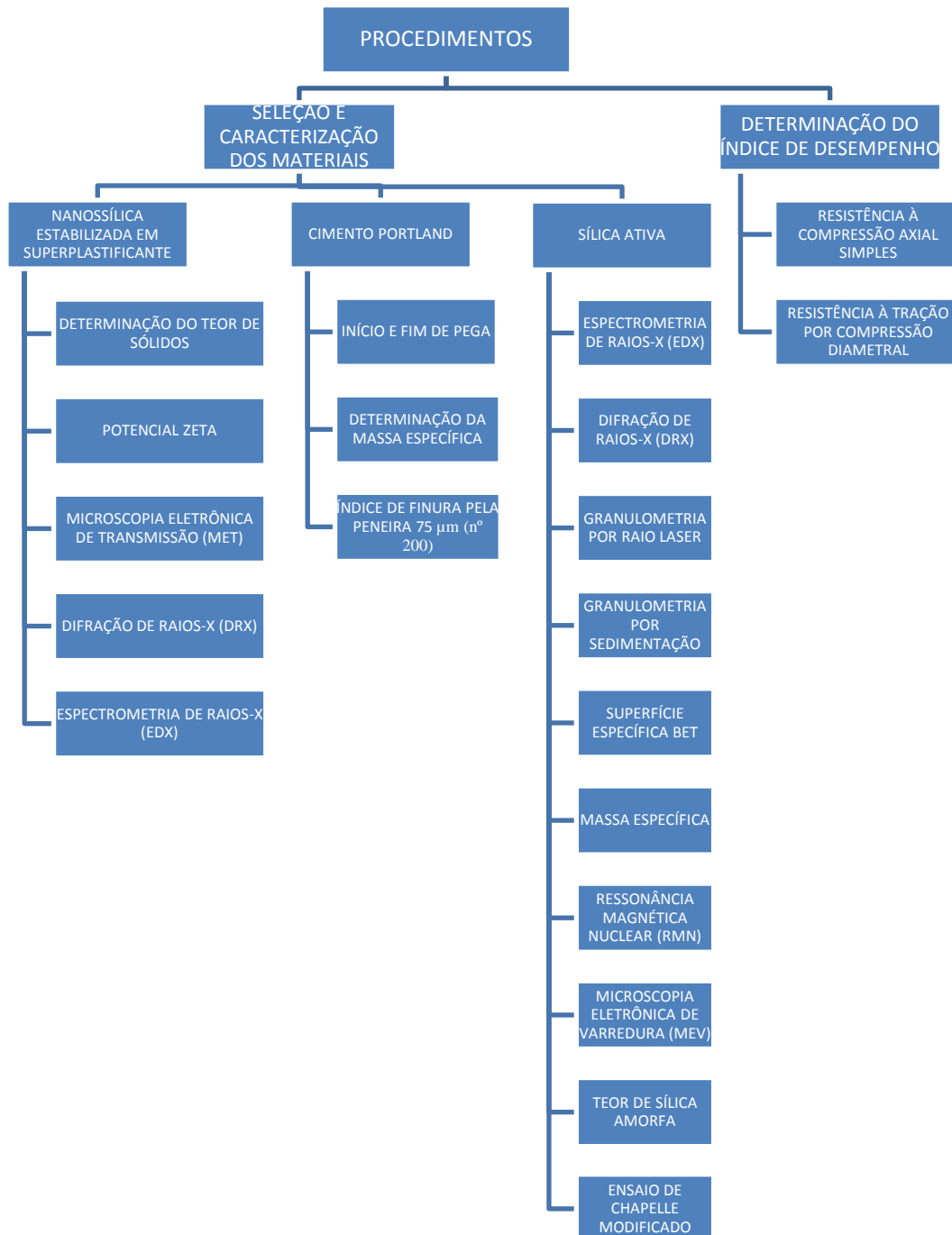


Figura II-1: Organograma do programa experimental

II.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nessa fase, foi realizada a seleção dos materiais a serem utilizados assim como a caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante e do cimento Portland CP-II F 32.

Segundo a NBR 13956-3 (ABNT, 2012) no ensaio de índice de desempenho deve-se utilizar areia normal brasileira como definida pela NBR 7214 (ABNT, 2012). Pela areia normal brasileira ter sua produção controlada, apresenta-se devidamente caracterizada, não sendo necessária a realização de ensaios de caracterização para sua utilização.

II.1.1 NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE

Apesar da NBR 13956-3 (ABNT, 2012) não englobar o índice de desempenho para nanossílica, será utilizada nanossílica estabilizada em superplastificante como uma adaptação à norma. Sabe-se que o superplastificante é à base de éter-policarboxilato, porém não se conhece o teor de nanossílica nem a sua dispersão na mistura.

Para caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante é necessário descobrir características como: dispersão da nanossílica no aditivo superplastificante, teor de nanossílica, composição química da mistura, nível de cristalização da nanossílica, entre outras. Portanto, na pesquisa serão realizados os seguintes ensaios para caracterização da nanossílica estabilizada em superplastificante:

II.1.1.1 Determinação do teor de sólidos dispersos no aditivo

O aditivo a ser utilizado na pesquisa contém nanossílica dispersa em superplastificante a base de éter-policarboxilato, portanto possui duas fases, uma líquida e uma sólida. Para se conhecer o teor de nanossílica no aditivo é necessário se conhecer o teor de sólidos dispersos no aditivo. Para tanto, será realizada a secagem de três amostras, conhecendo-se assim a porcentagem de sólidos dispersos, através da média dos três resultados.

Inicialmente serão separados cerca de 40g de aditivo e colocados dentro da estufa por aproximadamente 24 horas a 100 °C. Após esse tempo, mede-se a massa remanescente de amostra e determina-se o teor de sólidos pela equação 5 a seguir:

$$\%S = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

- %S é o teor de sólidos em massa na amostra, em porcentagem;

- m_2 é a massa da amostra após a secagem, em gramas;
- m_1 é a massa da amostra antes da secagem, em gramas.

Para os ensaios a serem realizados, também é importante se conhecer o teor de água da amostra. Como simplificação, consideraremos o teor de água, em massa, na amostra pela equação 6, a seguir:

$$\%A = 100\% - \%S \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

- %A é o teor de água em massa na amostra, em porcentagem;
- %S é o teor de sólidos em massa na amostra, em porcentagem.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB). Para determinação do teor de nanossílica, o resíduo do processo de determinação do teor de sólidos será submetido ao ensaio de EDX e calculado o teor de SiO_2 em relação ao teor de sólido e depois em relação ao aditivo.

II.1.1.2 Potencial Zeta

O Potencial Zeta é um modo de medir a estabilidade coloidal de uma mistura. É função da carga superficial da partícula, de alguma camada adsorvida na interface com o meio e da natureza e composição do meio que a circunda. Como o Potencial Zeta reflete a carga efetiva das partículas, ele é um indicador da repulsão elétrica entre as partículas e da estabilidade da mistura. Quanto maior o valor do Potencial Zeta maior a tendência das partículas de se repelirem, estabilizando assim a mistura coloidal, uma vez que as forças de repulsão tendem a superar as forças naturais de agregação.

O Potencial Zeta não pode ser medido diretamente, usa-se algum tipo de medição indireta para se conhecer seu valor. O mais comum é a medição da mobilidade elétrica das partículas e entrada do valor na equação de Henry para cálculo do Potencial Zeta. Nos aparelhos atuais, essa medição é feita através do espalhamento do laser pelas partículas e medem o deslocamento Doppler na luz espalhada. É um processo automatizado onde se coloca a amostra em uma célula contendo dois eletrodos, e submete-se a célula a corridas de um laser até se obter um resultado satisfatório do Potencial Zeta.

O ensaio será realizado no Laboratório de Análise de Águas da Universidade de Brasília. Na Figura II-2 são mostrados a célula e o aparelho utilizados na medição.



Figura II-2: Na esquerda: célula DTS1060C utilizada no ensaio de Potencial Zeta. Na direita: aparelho para medição do Potencial Zeta

II.1.1.3 Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)

A microscopia eletrônica de transmissão foi utilizada para se conhecer o tamanho, aglomeração, dispersão e morfologia das partículas de nanossílica no aditivo. A MET consiste na incidência de um feixe de elétrons na amostra, onde esses elétrons sofrerão desvios dependendo das características do material. Dependendo do nível de desvio dos elétrons formam-se imagens claras ou escuras. Através dessa técnica é possível gerar imagens com resolução muito superior às imagens obtidas por microscópios ópticos comuns por se utilizar elétrons na formação das imagens, podendo se chegar à imagens de escala nanométrica.

Além das imagens geradas, será feito o estudo qualitativo da morfologia da amostra, através da técnica da espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A interação do feixe de elétrons com os materiais gera raios-x específicos dependendo dos elementos químicos contidos na amostra, o detector de raios-x do equipamento de EDS mede o número de raios-x, identificando assim, qualitativamente, os componentes químicos da amostra.

O ensaio de microscopia eletrônica de transmissão será realizado no Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás.

II.1.1.4 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios-x é utilizada para identificar compostos cristalinos nas amostras. O nível de cristalização da amostra é determinado qualitativamente, não sendo possível

quantificar o material cristalino e o material amorfo. Através dos picos produzidos pelo difratômetro de raios-x é possível se ter uma ideia do grau de cristalização através do formato do gráfico gerado. O gráfico mais suave, porém com “ruídos”, indica um material mais amorfo do que cristalino, apresentando assim maior reatividade.

O equipamento utilizado possui uma fonte de raios-x, um analisador de energia fotoelétrica e um detector de elétrons. O ensaio será realizado no Instituto de Geologia da Universidade de Brasília. Será utilizado no ensaio, parte do resíduo resultante do ensaio de determinação do teor de sólidos devidamente moído em almofariz e passado pela peneira nº 200 (abertura de 75 µm)

II.1.1.5 Eflorescência de Raios-X (EDX)

A análise química da amostra será feita através da eflorescência de raios-x. Essa técnica consiste em analisar o espectro de fluorescência e obter informações quantitativas sobre a concentração dos elementos químicos que formam a amostra.

A análise química será realizada na parte sólida do aditivo. Para isso, parte do resíduo sólido gerado no ensaio de determinação do teor de sólidos será previamente seco e pulverizado com o auxílio de um almofariz. O pó resultante será utilizado no ensaio de EDX. Esse ensaio visa definir o teor de nanossílica na parte sólida do aditivo, além de outros componentes químicos do produto.

O ensaio de eflorescência de raios-x será realizado no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília.

II.1.2 CIMENTO PORTLAND

Segundo a NBR 13956-3 (ABNT, 2012), o cimento Portland que deve ser utilizado na determinação do índice de desempenho é o CP-II F 32.

Para a utilização do cimento Portland serão necessários também ensaios de caracterização, citados a seguir. Salienta-se que um ensaio comum do cimento Portland é a determinação da resistência à compressão, que não será feita nessa fase de caracterização. A determinação da resistência à compressão será realizada no traço de referência, como mostrado no item II.2.1.

II.1.2.1 Determinação do tempo início e fim de pega

O método de determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland é definido pela NBR NM 65 (ABNT, 2003). A amostra será preparada com pasta de consistência normal, definida pela NBR NM 43 (ABNT, 2003).

O tempo de início de pega é o intervalo de tempo desde a adição de água ao cimento até o momento em que a amostra tenha uma consistência que a agulha de Vicat penetre até uma distância de 4 ± 1 mm da placa base. O tempo de fim de pega é o intervalo de tempo desde a adição de água ao cimento e o momento em que a agulha de Vicat penetre 0,5 mm na amostra. O tempo de início e fim de pega será medido através de uma amostra, sendo que será utilizada a mesma amostra para as duas medidas.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB).

II.1.2.2 Determinação da massa específica

O ensaio de determinação da massa específica do cimento Portland é definido pela NBR NM 23 (ABNT, 2001).

O ensaio consiste em calcular a variação de volume de uma mistura no frasco volumétrico de Le Chatelier quando adicionada uma massa conhecida de cimento ao líquido dentro do frasco. A variação volumétrica gerada é o volume de cimento adicionado. O produto da divisão da massa de cimento adicionada, em gramas, e o volume de cimento adicionado, em cm^3 , é a massa específica do cimento Portland ensaiado. O resultado final da massa específica é a média dos resultados de duas amostras, desde que não difiram entre si mais que $0,01 \text{ g/cm}^3$.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB).

II.1.2.3 Determinação do índice de finura por meio da peneira $75 \mu\text{m}$ (nº 200)

O método de determinação do índice de finura por meio do peneiramento a seco utilizando-se a peneira de $75 \mu\text{m}$ (nº 200) é definido pela NBR 11579 (ABNT, 2012).

O índice de finura é uma relação entre a massa das partículas retidas na peneira nº 200, cujo tamanho é maior que $75 \mu\text{m}$, e a massa total ensaiada, corrigindo-se o produto por um

fator de correção que depende da peneira utilizada. O resultado final é o índice obtido em uma amostra.

O ensaio será realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM/UnB).

II.1.3 SÍLICA ATIVA

Será utilizada sílica ativa na determinação do índice de desempenho, como indicado pela NBR 13956-3 (ABNT, 2012). A sílica ativa utilizada será em pó e já se encontra caracterizada por ter sido utilizada na pesquisa anterior de Andrade (2015), portanto, não será necessário se fazer sua caracterização nessa pesquisa. Os ensaios de caracterização já realizados na sílica ativa são citados a seguir:

- Análise química por efluorescência de raios-x;
- Difração de raios-x;
- Granulometria por raio laser;
- Granulometria por sedimentação;
- Superfície específica BET;
- Massa específica;
- Ressonância Magnética Nuclear (RMN);
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Teor de Sílica Amorfa;
- Ensaio de Chapelle modificado.

II.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO

O objetivo dessa fase é avaliar a influência da adição de nanossílica na resistência mecânica de argamassas através do índice de desempenho. Os métodos de ensaio que serão utilizados para determinação da resistência mecânica são descritos pelas normas: NBR 7215 (ABNT, 1996), NBR 13956-3 (ABNT 2012), NBR 7222 (ABNT, 2011), porém, aqui vale ressaltar que serão feitas algumas modificações nos métodos para melhor adaptação ao programa experimental.

Foram definidos alguns parâmetros que se manterão fixo ao longo da pesquisa, para se estudar efeitos específicos das adições minerais. As considerações para sequência dos ensaios são mostradas a seguir:

- Serão produzidos oito traços de argamassa, sendo que para cada traço de argamassa serão moldados vinte e quatro corpos de prova para serem ensaiados em diferentes idades. Os corpos de prova serão cilíndricos de diâmetro 50 mm e altura 100 mm, como indicado pela NBR 7215 (ABNT, 1996);
- Para cada traço, serão ensaiados, nos dias 1, 3, 7, 28 e 91, quatro corpos de prova quanto a sua resistência à compressão. Também serão ensaiados para cada traço, aos 28 dias, quatro corpos de prova quanto a sua resistência à tração por compressão diametral;
- A relação material cimentício/areia será constante de 1:3;
- O espalhamento será padronizado de acordo com o traço de maior espalhamento.

Os parâmetros variáveis e comparados durante os ensaios serão:

- Resistência à compressão axial simples das argamassas;
- Resistência à tração por compressão diametral das argamassas;
- Provavelmente a relação água/aglomerante não será fixada em 0,48.

As argamassas produzidas para os ensaios à compressão e à tração terão os seguintes traços.

- Um traço de referência contendo cimento Portland, areia normal e água;
- Três traços com incorporação de nanossílica estabilizada em superplastificante com 1%, 2% e 3% em relação à massa de cimento. A massa de nanossílica incorporada à argamassa será em adição ao cimento, para melhor entendimento de seus efeitos;
- Um traço com substituição, em massa, do cimento por sílica ativa somente, na proporção de 10%;
- Três com incorporação de nanossílica estabilizada em superplastificante e sílica ativa à argamassa. Serão misturados 1%, 2% e 3% de nanossílica estabilizada em superplastificante em adição, em massa, ao cimento Portland, enquanto a sílica ativa será adicionada em substituição, em massa, ao cimento Portland na proporção de 10%.

Também será adicionado aos traços, quando necessário, aditivo superplastificante para se conseguir a mesma consistência do traço de menor consistência. Salienta-se que o aditivo superplastificante adicionado não será o mesmo em que a nanossílica se apresenta dispersa, mas será utilizado um com mesma base, ou seja, de éter-policarboxilato.

Espera-se que as quantidades de nanossílica adicionadas aos traços serão mais bem avaliadas após os ensaios de determinação do teor de sólidos e EDX. Porém, esse valor não é

necessário para formulação dos traços, uma vez que a dosagem será feita em adição da nanossílica estabilizada em superplastificante.

A Figura II-3 apresenta um organograma explicativo dos traços a serem utilizados.

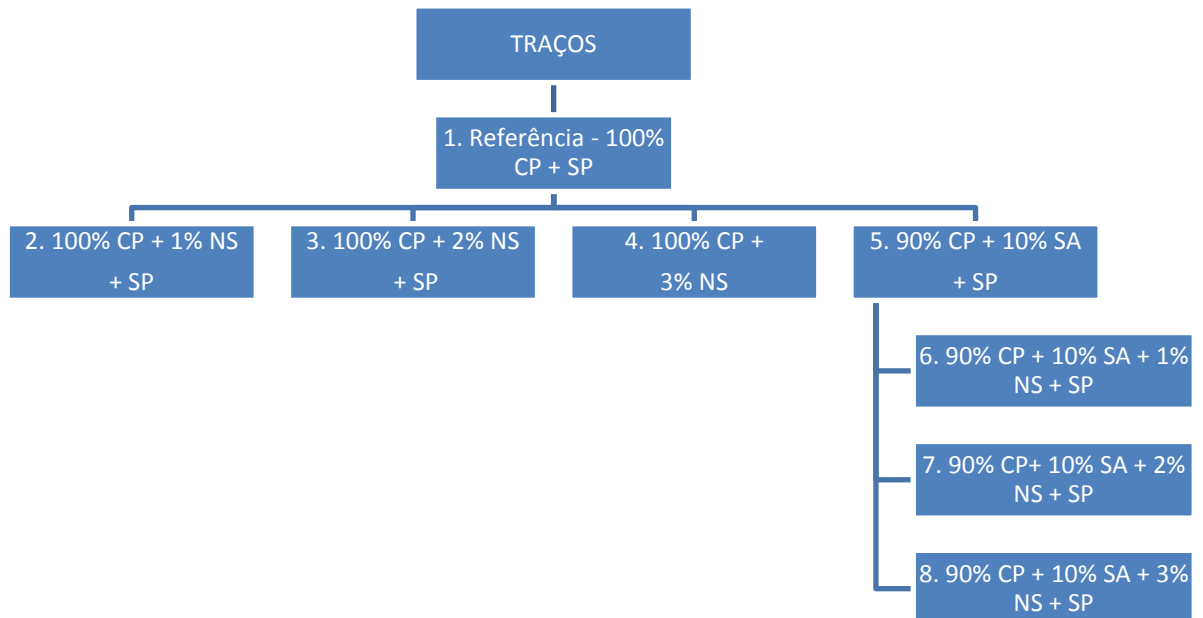


Figura II-3: Organograma de traços a serem utilizados

Sendo que:

CP = Cimento Portland;

SA = Sílica ativa;

NS = Nanossílica estabilizada em superplastificante;

SP = Aditivo superplastificante.

Espera-se, através de experiência, que o traço de maior espalhamento seja o traço 4, pois apresenta maior quantidade de aditivo superplastificante contendo nanossílica, além de não ter adição de sílica ativa que diminui o abatimento. Portanto, a sequência das atividades são descritas à seguir:

1. Produção da argamassa do “traço quatro”, inicialmente com relação água/aglomerante igual a 0,48;
2. Avaliação da consistência da argamassa para se obter uma compactação adequada durante os ensaios. Caso a argamassa apresente uma consistência inadequada ao ensaio, diminui-se a relação água/aglomerante e repete-se o processo, até se obter uma argamassa com consistência adequada aos ensaios. Essa etapa será realizada em adaptação à NBR 13956-3 (ABNT, 2012) para que o espalhamento das argamassas

possa ser padronizado e sua consistência não influencie na avaliação dos resultados do índice de desempenho;

3. Após a definição da relação água/aglomerante adequada, as demais argamassas serão produzidas com mesma relação água/aglomerante e com adição de um aditivo superplastificante para se conseguir o mesmo espalhamento do traço 4. Como já citado, o aditivo superplastificante adicionado será de mesma base do aditivo utilizado na nanossílica estabilizada em superplastificante;
4. Com as argamassas moldadas, fixadas a relação água/aglomerante e a consistência, determina-se a resistência à compressão axial simples e a resistência à tração por compressão diametral para cálculo dos índices de desempenho nas idades definidas anteriormente.

Os ensaios visam avaliar a ação da nanossílica estabilizada em superplastificante de maneira isolada, como aditivo ao cimento, e sua ação em conjunto com a sílica ativa.

A partir dos ensaios realizados, serão determinados: a resistência à compressão axial da argamassa e a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Com os resultados será possível analisar o efeito da nanossílica na capacidade mecânica de argamassas, e será possível comprovar ou rejeitar o objetivo da pesquisa através da análise dos índices de desempenho.

A Tabela II-1 mostra os traços de argamassa que inicialmente serão utilizados nos ensaios. Para definição dos traços, considerou-se inicialmente uma relação água/aglomerante de 0,48 e descontou-se a água do aditivo superplastificante contendo nanossílica estabilizada. Para tanto, foi definido que o teor de água do aditivo superplastificante é de 72,2%, os cálculos serão demonstrados posteriormente nos resultados. Não será possível, no entanto, descontar a água do aditivo superplastificante utilizado para se igualar a consistência das argamassas, uma vez que não se conhece a quantidade que será adicionada.

Tabela II-1: Traços a serem ensaiados

Nº	ARGAMASSA	CIMENTO CPII-F 32 (g)	AREIA NORMAL (g)	ÁGUA (g)	NANOSSÍLICA ESTABILIZADA EM SUPERPLASTIFICANTE (g)	SÍLICA ATIVA (g)
1	Referência	624,00	1872,00	300,00	0,00	0,00
2	100%CP + 1% NS	624,00	1872,00	295,50	6,24	0,00
3	100%CP + 2% NS	624,00	1872,00	290,99	12,48	0,00
4	100%CP + 3% NS	624,00	1872,00	286,49	18,72	0,00
5	90% CP + 10% SA + AS	561,60	1872,00	300,00	0,00	62,40
6	90% CP + 10% SA + 1% NS	561,60	1872,00	295,50	6,24	62,40
7	90% CP + 10% SA + 2% NS	561,60	1872,00	290,99	12,48	62,40
8	90% CP + 10% SA + 3% NS	561,60	1872,00	286,49	18,72	62,40

Os ensaios para determinação da resistência à compressão axial simples e à tração por compressão diametral das argamassas produzidas são descritos a seguir.

II.2.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND

O ensaio para determinação da resistência à compressão axial simples de argamassas de cimento Portland é regido pela NBR 7215 (ABNT, 1996). O método consiste na elaboração de quatro corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, de argamassa e posterior rompimento, para determinação da tensão de ruptura da argamassa.

A argamassa ensaiada tem fixada sua relação água/aglomerante em 0,48 e a proporção de 1:3 em massa de cimento e areia normal brasileira, respectivamente. O cimento utilizado no ensaio é o CP-II F 32 e a areia é a normatizada pela NBR 7214 (ABNT, 2012).

A NBR 7215 (ABNT, 1996) ainda estabelece critérios para os equipamentos a serem utilizados, controle do ambiente do ensaio, quantidade de materiais a serem ensaiados, procedimentos de moldagem, ruptura, estoque dos corpos de prova, cura da argamassa, entre outros.

Para cada idade são ensaiados quatro corpos-de-prova, sendo determinada sua resistência à compressão dividindo-se a carga de ruptura por sua área de seção transversal. Os resultados individuais são então registrados e têm a sua média calculada e arredondada para o decimal mais próximo, em megapascals. Com o valor médio e os valores individuais, calcula-se o desvio padrão máximo para os corpos de prova ensaiados em cada idade. Quando o desvio máximo, em módulo, for maior que 6% calcula-se uma nova média desprezando-se o resultado discrepante. Com a nova média calcula-se novamente o desvio padrão máximo, caso

o segundo desvio padrão máximo, em módulo, for maior que 6%, deve-se desprezar os corpos de prova e refazer o ensaio, caso contrário, a nova média é o valor representativo para aquela idade de ensaio. Os limites de resistência fixados por normas se referem a essa média.

Serão ensaiadas argamassas nas idades indicadas pela norma em questão, sendo elas: 1, 3, 7, 28 e 91 dias. Os traços das argamassas ensaiadas são mostrados na Tabela II-1.

Os ensaios de determinação da resistência à compressão serão realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília.

II.2.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos é regido pela NBR 7222 (ABNT, 2011). A aparelhagem necessária ao ensaio é a mesma definida pela NBR 7215 (ABNT, 1996). Os corpos de prova a serem ensaiados serão cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

O ensaio consiste em aplicar uma carga no centro do corpo de prova disposto na horizontal, de modo que haja uma compressão diametral do mesmo até a sua ruptura. Com a carga de ruptura à compressão diametral, estima-se a resistência à tração do corpo de prova cilíndrico pela equação 7, a seguir.

$$f_{ct,sp} = \frac{2*F}{\pi*d*l} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

- $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em Megapascals (MPa);
- F é a carga máxima obtida no ensaio, em Newtons (N);
- d é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm);
- l é o comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm);

A NBR 7222 (ABNT, 2011) não especifica datas e quantidade de corpos de prova para realização do ensaio. Optou-se, portanto ensaiar quatro corpos de prova de cada traço na data de 28 dias a partir da data da mistura. A resistência à tração das argamassas será definida como a média dos resultados dos quatro corpos de prova, aplicando-se a mesma regra de desvio padrão adotada para a resistência à compressão axial simples, como descrito no item II.2.1. A adoção de um limite de 6% no desvio padrão máximo é uma adaptação à NBR 7222 (ABNT, 2011), uma vez que não é citado tal critério na norma, porém, foi adotado para uniformizar os critérios com a determinação da resistência à compressão axial simples.

Os ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral serão realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília.

II.2.3 CÁLCULO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO COM CIMENTO PORTLAND

A determinação do índice de desempenho da sílica ativa com cimento Portland é regida pela NBR 13956-3 (ABNT, 2012). A aparelhagem necessária ao ensaio, assim como o cimento e a areia a serem utilizados, é definida pela NBR 7215 (ABNT, 1996). Como não há normatização para determinação do índice de desempenho de nanossílicas, serão utilizadas as diretrizes da norma para sílica ativa, com diferentes teores de nanossílica.

Serão determinados os índices de desempenho das argamassas especificadas anteriormente. O índice de desempenho é uma relação entre a resistência mecânica da argamassa com adições e a resistência mecânica da argamassa de referência. Portanto, o índice de desempenho para cada traço será determinado pela equação 8:

$$I = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100\% \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

- I é o índice de desempenho do traço analisado em relação à argamassa de referência, representado em porcentagem;
- f_{cB} é a resistência à compressão média dos corpos de prova ensaiados para certa idade da argamassa ensaiada, em megapascals;
- f_{cA} é a resistência à compressão média dos corpos de prova ensaiados para certa idade da argamassa de referência, em megapascals;

Salienta-se que serão feitos ajustes à NBR 13956-3 (ABNT, 2012) para melhor adaptação à pesquisa. Entre as modificações estão:

- O ensaio será realizado para 1, 3, 7, 28 e 91 dias, e não somente para sete dias;
- Será calculado o índice de desempenho para nanossílica estabilizada em superplastificante, mesmo não sendo contemplada pela norma;
- A nanossílica estabilizada em superplastificante será incorporada em adição ao cimento Portland, e não em substituição, como sugere a norma para sílica ativa;
- A relação água/aglomerante pode não ser fixada em 0,48, dependerá da consistência obtida para o traço com maior espalhamento;

- A água adicionada através do aditivo contendo nanossílica estabilizada será descontada da água da mistura para tentar manter a relação água/aglomerante entre os traços;
- Também será realizado o índice de desempenho para resistência à tração, definida no item II.2.2, aos 28 dias. A NBR 13956-3 (ABNT, 2012) não cita tal índice, mas seu valor é de interesse à pesquisa.