

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE NANOSÍLICA ESTABILIZADA**

Autor: Paulo Roberto Nolli Filho

Orientador: Prof<sup>a</sup> Adriana Guerra Gumieri

Co-orientador: Prof. José Márcio Fonseca Calixto

Belo Horizonte

Agosto/2015

PAULO ROBERTO NOLLI FILHO

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO  
COM ADIÇÃO DE NANOSÍLICA ESTABILIZADA**

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

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Adriana Guerra Gumieri

Co-orientador: Prof. José Márcio Fonseca Calixto

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2015

N796p

Nolli Filho, Paulo Roberto.

Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com  
adição de nanosílica estabilizada [manuscrito] / Paulo Roberto Nolli  
Filho. - 2015.

94 f., enc.: il.

Orientadora: Adriana Guerra Gumieri.

Coorientador: José Márcio Fonseca Calixto.

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

Bibliografia: f: 73-77.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3.  
Concreto - Teses. I. Gumieri, Adriana Guerra, II. Calixto, José Márcio  
Fonseca, 1957-. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de  
Engenharia. IV. Título.

CDU: 691 (043)

PAULO ROBERTO NOLLI FILHO

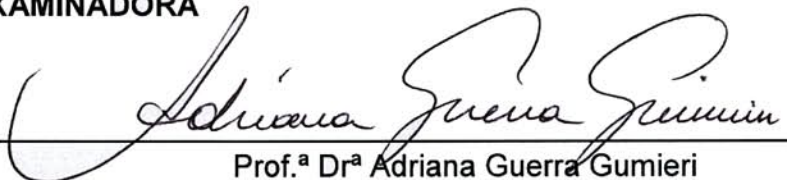
**PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO  
COM ADIÇÃO DE NANOSÍLICA ESTABILIZADA**

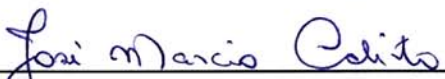
Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

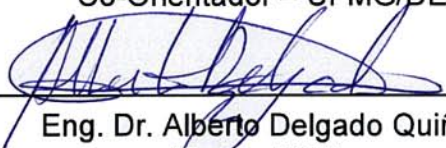
Belo Horizonte, 25 de agosto de 2015

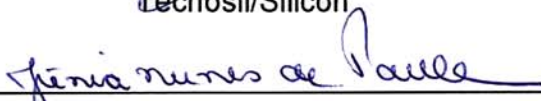
  
Prof.ª Dr.ª Maria Teresa Paulino Aguilari  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

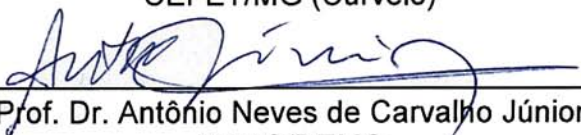
**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof.ª Dr.ª Adriana Guerra Gumieri  
Orientadora – UFMG/DEMC

  
Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto  
Co-Orientador – UFMG/DEES

  
Eng. Dr. Alberto Delgado Quiñones  
Tecnosil/Silicon

  
Prof.ª Dr.ª Júnia Nunes de Paula  
CEFET/MG (Curvelo)

  
Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
UFMG/DEMC

Dedico este trabalho aos meus avós, aos meus pais e à minha querida esposa Nubia.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à professora Adriana Guerra Gumieri pela oportunidade de trabalhar com este tema, por me orientar neste trabalho, repassando seu conhecimento sempre com generosidade.

Ao professor José Márcio Fonseca Calixto por me co-orientar neste trabalho, ajudando com o tema e com sua grande experiência.

Agradeço também aos meus pais, Paulo Roberto Nolli e Neice Campos Nolli por sempre me incentivarem, e por terem me dado uma boa educação e a base para fazer tudo em minha vida.

Agradeço à minha esposa Nubia Vale Nolli, pelo apoio, por ser minha companheira, por sempre me incentivar a ir em frente, não importam quais as dificuldades que apareçam.

Agradeço à empresa Holcim Cimentos, em especial ao Engenheiro Fabrício Carlos França, pelo fornecimento do cimento Portland utilizado nessa pesquisa.

À empresa Betonmix, em especial ao Engenheiro Cláudio Silva, pelo fornecimento dos materiais agregados, pela disponibilização da infra-estrutura do Laboratório de Concreto (Unidade de Santa Luzia, MG) e por sua grande contribuição nas dosagens dos traços de concreto adotados nessa pesquisa, bem como o apoio nas etapas de moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos dos concretos.

À empresa Solução Engenharia, em especial ao Engenheiro Luiz Eugênio Frateschi Corrêa Maia, que gentilmente disponibilizou o laboratório de concreto (Ipatinga, MG), para a realização dos ensaios mecânicos dos concretos. Agradeço também a todos técnicos e engenheiros que colaboraram na realização dos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dos concretos. Meus sinceros agradecimentos à Thaís Calixto e ao Luiz Martins (“Luizinho”), que colaboraram para a realização dos ensaios.

Às empresas Tecnosil/Silicon, em especial aos Engenheiros Alberto Delgado Quiñones e Alciro Gomes Flores e à Arquiteta Simone Viterbo Tartuce, pelo

fornecimento da Sílica Ativa e do aditivo com nanosílica estabilizada, e também pelo apoio técnico durante a realização desta pesquisa.

À empresa LEME Engenharia, pelo apoio durante a realização do curso de mestrado, disponibilizando tempo para a realização do mesmo, juntamente ao meu trabalho na empresa.

Agradeço também a todos que indiretamente colaboraram para este trabalho.

子貢問曰：“有一言而可以終身行之者乎”？

子曰：“其恕乎！己所不欲、勿施於人。”

[論語, 孔丘]

*Zi Gong [um discípulo] perguntou: "Existe alguma  
única palavra que pode guiar uma pessoa do  
começo ao fim de sua vida?"*

*O Mestre Kong replicou: "Que tal 'reciprocidade'.  
Nunca imponha aos outros o que você não  
escolheria para você".*

*[Analectos XV.24, Confúcio]*

## RESUMO

Os nanomateriais podem aprimorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos. Para o concreto de alto desempenho, a boa dispersão dos materiais é um fator essencial para aprimorar suas propriedades. Este trabalho avaliou as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com a adição de nanosílica estabilizada. A influência dessa adição nas resistências à compressão, à tração por compressão diametral e no módulo de elasticidade tangente inicial dos concretos foi avaliada em três idades diferentes. Também foi avaliada a combinação da nanosílica estabilizada e da Sílica Ativa como materiais cimentícios complementares. Foram realizados três diferentes traços de concreto: um de referência (sem nanosílica e sem Sílica Ativa), um contendo nanosílica estabilizada e outro contendo a mistura de nanosílica e Sílica Ativa. A incorporação de nanosílica no superplastificante de polycarboxilato contribuiu para uma melhor aplicação e eficiência da nanosílica nos concretos, visto que houve uma melhor homogeneização da mesma. Os resultados indicaram uma melhoria nas propriedades mecânicas do concreto com adição de nanosílica estabilizada, mesmo com a redução do consumo de cimento. Esta melhoria foi ainda maior quando da combinação de nanosílica estabilizada e a Sílica Ativa, demonstrando que há um efeito sinérgico na mistura destas duas adições. A reação pozolânica das adições contribuiu para o melhor desempenho das propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. Os resultados indicam que a adição da nanosílica é vantajosa, principalmente quando utilizada em conjunto com a Sílica Ativa, sendo uma alternativa para produzir concretos com superiores propriedades mecânicas, redução do consumo de cimento e economia.

## **ABSTRACT**

Nanomaterials can improve the mechanical properties and durability of the concretes. For high performance concrete, the good dispersion of materials is an essential factor to improve its properties. The goal of this investigation was to evaluate the mechanical properties of high-performance concrete with the addition of stabilized nanosilica. The influence of this addition in compressive strength, tensile strength by diametrical compression and initial tangent modulus was evaluated at three different ages. It was also evaluated the combination of stabilized nanosilica and Silica Active as supplementary cementitious materials. Three different concrete mixtures were studied: a reference (without nanosilica and without silica fume), other containing stabilized nanosilica and another containing a mixture of silica fume and stabilized nanosilica. The incorporation of the nanosilica in the polycarboxylate superplasticizer contributed to a better application and efficiency of the nanosilica in the concrete, since the nanosilica was easily homogenized in the concrete. The results indicated an improvement in all the mechanical properties of concrete from the addition of stabilized nanosilica, even with the reduced consumption of cement. The effect was even greater with the combination of silica fume and nanosilica, indicating that there's a synergistic effect between the two. The pozzolanic reaction of the additions contributed to the improved performance of mechanical properties of high performance concrete. The results also revealed that nanosilica is very advantageous, especially when mixed with the silica fume, and can be a good alternative to produce concrete with high mechanical strength, reduction in cement content and economy.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE EQUAÇÕES .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	3
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	4
3.1.1 Introdução .....	4
3.1.2 Fundamentos do Concreto de Alto Desempenho .....	6
3.1.3 Materiais componentes do CAD .....	9
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO .....	25
3.2.1 Resistência à compressão.....	26
3.2.2 Resistência à tração.....	27
3.2.3 Módulo de elasticidade.....	28
3.3 NANOTECNOLOGIA E NANOPARTÍCULAS.....	30
3.3.1 Introdução .....	30
3.3.2 Aplicações.....	31
3.3.3 Nanosílica aplicada em concretos .....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1 MATERIAIS EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS .....	38
4.1.1 Cimento.....	38
4.1.2 Agregados.....	39
4.1.3 Sílica ativa.....	44
4.1.4 Nanosílica .....	44
4.1.5 Aditivo plastificante.....	45
4.1.6 Água.....	45
4.2 TRAÇOS DOS CONCRETOS .....	45
4.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO .....	47
4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS.....	48
4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	49
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	52
5.1 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	52

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	53
5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	58
5.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE INICIAL.....	61
5.5 VIABILIDADE ECONÔMICA .....	65
6. CONCLUSÕES .....	69
6.1 CONCLUSÃO GERAL.....	69
6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	69
6.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferença das reações de formação do gel CSH nos cimentos Portland e Pozolânico .....	18
Figura 2 – Diferença entre o concreto sem e com Sílica Ativa.....	21
Figura 3 - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade conforme NBR 8522 .....	29
Figura 4 - Curva granulométrica da areia natural e limites da norma NBR 7211 .....	40
Figura 5 - Curva granulométrica da areia artificial e limites da norma NBR 7211 .....	41
Figura 6 - Curva granulométrica da brita 1 e limites da norma NBR 7211 .....	42
Figura 7 - Curva granulométrica da brita 0 e limites da norma NBR 7211 .....	42
Figura 8 - Curva granulométrica da brita 00 e limites da NBR 7211 .....	43
Figura 9 - Representação esquemática de um pilar com uma carga P aplicada no centro da sua seção transversal .....	50
Figura 10 - Média e desvio-padrão dos resultados do ensaio de resistência à compressão (MPa).....	54
Figura 11 – Efeito da presença de Sílica Ativa e da nanosilica estabilizada na taxa de crescimento da resistência à compressão - Comparação com a equação prescrita na norma NBR 6118 (ABNT, 2014).....	57
Figura 12 – Média e desvio-padrão dos resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	59
Figura 13 – Relação $f_{ct,sp}$ versus $f_{cm}$ - comparação com equação prescrita pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) .....	61
Figura 14 – Média e desvio-padrão dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade inicial (GPa) .....	63
Figura 15 - Relação $E_{ci}$ x $f_{cm}$ - Comparação com equação prescrita pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014).....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de finura da Sílica Ativa com outros materiais .....	20
Tabela 2 – Características físicas, químicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI – PLUS .....	38
Tabela 3 - Granulometria da areia natural .....	39
Tabela 4 - Granulometria da areia artificial .....	40
Tabela 5 - Granulometria da brita 1 .....	41
Tabela 6 - Granulometria da brita 0 .....	42
Tabela 7 - Granulometria da brita 00 .....	43
Tabela 8 - Características e propriedades do aditivo Silicon NS AD 200 .....	44
Tabela 9 – Traços dos concretos .....	47
Tabela 10 - Preço dos materiais utilizados para produção dos traços de concreto .....	49
Tabela 11 - Preço dos materiais constituintes do CAD por kg .....	50
Tabela 12 – Abatimento do Cone de Abrams dos concretos analisados .....	52
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (MPa) .....	53
Tabela 14 – Média e desvio-padrão do ensaio de resistência à compressão (MPa) .....	54
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral .	58
Tabela 16 – Média e desvio-padrão dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	58
Tabela 17 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial .....	62
Tabela 18 – Média e desvio-padrão dos resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade Inicial .....	62
Tabela 19 - Custo do m <sup>3</sup> do traço de referência .....	66
Tabela 20 - Custo do m <sup>3</sup> do traço com adição de nanosílica estabilizada .....	66
Tabela 21 - Custo do m <sup>3</sup> do traço com adição de nanosílica estabilizada e Sílica Ativa ..	67
Tabela 22 - Comparativo dos custos por m <sup>3</sup> dos três traços analisados .....	67
Tabela 23 - Comparativo das seções transversais, volume, custo e economia dos respectivos traços .....	67

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Resistência à compressão do concreto aos j dias .....	27
Equação 2 – Resistência à tração por compressão diametral .....	27
Equação 3 – Módulo de elasticidade inicial .....	29
Equação 4 – Módulo de elasticidade inicial.....	29
Equação 5 – Módulo de elasticidade inicial.....	30
Equação 6 – Tensão de compressão do concreto.....	50
Equação 7 – Resistência à compressão média .....	56
Equação 8 – Fator $\beta_1$ .....	56
Equação 9 – Resistência média à tração direta .....	60
Equação 10 – Resistência média à tração direta .....	60
Equação 11 – Resistência à tração indireta de cálculo .....	60
Equação 12 – Módulo de elasticidade Inicial.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CP	Cimento Portland
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
ZTI	Zona de transição à interface agregado-pasta de cimento

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da seção transversal do corpo de prova
a/agl	relação água / aglomerantes
a/c	relação água / cimento
Ca(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de cálcio
C <sub>2</sub> S	silicato dicálcico
C <sub>3</sub> A	aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	ferro aluminato tetracálcico
CCA	cinza de casca de arroz
CH	hidróxido de cálcio
C-S-H	silicato de cálcio hidratado (gel CSH)
cm	centímetro
d	diâmetro do corpo de prova
$E_{ci}$	módulo de elasticidade inicial
$E_{cs}$	módulo de elasticidade secante
$F$	força máxima obtida no ensaio
$f_c$	resistência à compressão simples
$f_{cef}$	resistência efetiva à compressão do corpo-de-prova
$f_{cj}$	resistência à compressão aos j dias
$f_{ck}$	resistência característica à compressão aos 28 dias
$f_{cm}$	resistência média à compressão média
$f_{cmj}$	resistência à compressão média aos j dias
$f_{ct,f}$	resistência à tração na flexão
$f_{ct,m}$	resistência média à tração do concreto
$f_{ct,sp}$	resistência à tração medida no ensaio de compressão diametral
H	água
kg	kilograma
l	comprimento do corpo de prova
L	comprimento do pilar
mm	milímetro

MPa	megapascal
$N_{rup}$	carga de ruptura do corpo de prova
P	carga aplicada
R\$	real (moeda corrente no Brasil)
s	parâmetro em função do tipo de cimento que influencia a resistência à compressão
SiO <sub>2</sub>	Sílica Ativa
n	nano
t	tempo em dias
μ	micro
$\Delta\sigma$	variação de tensão
$\Delta\varepsilon$	variação da deformação específica
$\sigma_a$	tensão básica (ensaio do módulo de elasticidade inicial)
$\sigma_b$	maior tensão (ensaio do módulo de elasticidade inicial)
$\sigma_c$	tensão de compressão do concreto
$\varepsilon_a$	deformação específica média dos corpos de prova sob tensão básica
$\varepsilon_b$	deformação específica média dos corpos de prova sob tensão maior
$\pi$	constante matemática obtida pela divisão entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro
$\alpha_E$	parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade
$\beta_1$	coeficiente obtido pela relação entre a resistência à compressão do concreto aos j dias e a resistência à compressão aos 28 dias

# 1. INTRODUÇÃO

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) surgiu em meados dos anos 1960, quando um pequeno grupo de projetistas e produtores de concreto em Chicago desenvolveram um concreto de alta resistência (AİTCIN, 2000). Desde então, vários estudos já foram realizados a respeito do CAD, e sabe-se de suas principais propriedades mecânicas.

Segundo AİTCIN (2000), a resistência à compressão do concreto depende não apenas de qualidade, quantidade e eficiência dos materiais cimentícios usados, mas também do grau de adensamento e da porosidade limite da matriz sólida formada depois de completado o processo de endurecimento.

Conforme BASTOS (2006), a nanotecnologia, com a crescente capacidade de analisar e manipular átomos e moléculas, é capaz de criar e desenvolver produtos e processos, inclusive os derivados de materiais cimentícios. Atualmente, diante desses avanços tecnológicos, busca-se compreender os fatores e a forma detalhada de como as nanopartículas melhoram as propriedades do concreto. Sabe-se que a influência das nanopartículas na fabricação de concretos e argamassas é promissora e vantajosa, e que poderá ter grandes impactos na construção civil nas próximas décadas, principalmente por ser ambientalmente sustentável.

AİTCIN (2000) afirma que a utilização de nanomateriais pode aumentar o grau de adensamento do concreto, e diminuir a porosidade da matriz sólida, melhorando suas propriedades mecânicas.

Dentre estes produtos criados, encontra-se a nanosílica. A adição de nanosílica, juntamente com Sílica Ativa no concreto tem por objetivo melhorar suas qualidades e desempenho, como por exemplo: melhorar as propriedades da zona de transição à interface agregado-pasta de cimento (ZTI), diminuir a porosidade da matriz, aumentar sua resistência mecânica e durabilidade, dentre outras (TECNOSIL, 2013).

Segundo MEHTA (1984), algumas adições como a Sílica Ativa, possuem microesferas que, ao serem adicionadas na mistura do concreto, consomem mais

água para molhagem devido à sua grande área superficial específica; porém, atuam como “rolamentos”, facilitando o bombeamento e lançamento do concreto, compensando possíveis perdas de abatimento resultantes da mudança do comportamento reológico da mistura.

Quando se adicionam partículas da ordem de grandeza nanométrica (como partículas de nanosílica) ao concreto, o consumo de água é muito maior, visto que há um aumento na área superficial específica das partículas. Conseqüentemente, há maior dificuldade na dispersão destas partículas. Para facilitar a dispersão destas é necessária a utilização de aditivos plastificantes, de forma a reduzir a quantidade de água para uma determinada consistência do concreto. Conforme HARTMANN *et al.* (2011), a função dos aditivos redutores de água é dispersar partículas de cimento em hidratação, liberando a água retida entre os grãos de cimento, aumentando, assim, a fluidez da mistura. Os redutores de água podem reduzir a tensão superficial da água, aumentando o efeito de lubrificação das partículas de cimento. Segundo ADRIOLO (1984), os aditivos plastificantes permitem a redução do consumo de aglomerante para uma dada resistência do concreto, melhoram a qualidade da mistura fresca (facilitando a trabalhabilidade) e reduzem o consumo de água para uma dada plasticidade.

Desta forma, a justificativa para este trabalho encontra-se no tipo de nanosílica adicionada ao CAD, ou seja, a nanosílica estabilizada. A nanosílica estabilizada se diferencia da nanosílica coloidal e da nanosílica precipitada. A nanosílica desta pesquisa se encontra estabilizada no aditivo químico superplastificante, estando suas partículas homogeneamente dispersas nesse aditivo, permitindo sua homogeneização na massa do concreto fresco e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas do concreto endurecido.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho mecânico do CAD com adição de nanosílica estabilizada.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos foram:

- a. Avaliar as propriedades do concreto no estado fresco por ensaios de trabalhabilidade;
- b. Avaliar as propriedades do concreto no estado endurecido por ensaios de resistência à compressão;
- c. Avaliar as propriedades do concreto no estado endurecido por ensaios de resistência à tração por compressão diametral;
- d. Avaliar as propriedades do concreto no estado endurecido por ensaios de módulo de elasticidade;
- e. Investigar a combinação de nanosílica estabilizada e Sílica Ativa no desempenho mecânico do concreto;
- f. Avaliar o custo do concreto com a adição de nanosílica estabilizada.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

#### 3.1.1 Introdução

Segundo TUTIKIAN *et al.* (2011), o CAD é um material que apresenta propriedades em patamar mais elevado que o concreto comum. O CAD possui – além da elevada resistência mecânica – boa trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade e, principalmente, a durabilidade. Um concreto de alta resistência (CAR) não é, necessariamente, um CAD. O CAD deve apresentar, simultaneamente, elevadas trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

*“(...) a definição de concreto de alta resistência não contempla a de concreto de alto desempenho, porque o primeiro enfoca resistência mecânica como elemento básico da sua constituição, enquanto o segundo abrange todas as propriedades do concreto de modo holístico, focado no resultado final: o máximo desempenho global” (TUTIKIAN et al., 2011)*

A resistência à compressão máxima do concreto usado na década de 1960 em edifícios estruturais na área de Chicago aumentou, lenta e progressivamente, de 15 MPa para 60 MPa. Conforme AÏTCIN (2000), nesta época, o fator principal para produzir o grande aumento na resistência à compressão foi a diminuição da relação água/aglomerante, possibilitada pelo uso adequado de eficientes aditivos redutores de água. A escolha do cimento também era importante. Para reduzir a perda de abatimento, certa quantidade de cimento Portland era substituída por cinzas volantes de alta qualidade. Isso reduzia a demanda de água devido à forma esférica das cinzas, diminuindo a relação água/aglomerante para compensar as perdas de resistência inicial causadas pela substituição do cimento.

De acordo com AÏTCIN (2000), no final dos anos 1960, os aditivos superplastificantes foram utilizados no concreto pela primeira vez. As primeiras aplicações de superplastificantes foram como fluidificantes, mais do que como redutores de água. A razão de utilizá-los dessa forma era facilitar o lançamento do concreto sem riscos de segregação e perda de resistência mecânica que ocorriam quando se adicionava mais água ao concreto.

À medida que maiores teores de superplastificantes começaram a ser usados nos concretos, a relação água/aglomerante era reduzida e o problema de perda de abatimento tornava-se cada vez maior. Para solucionar este problema foram desenvolvidas fórmulas de superplastificantes incorporando também aditivos retardadores de pega (AİTCIN, 2000).

Os superplastificantes eram usados de tal forma que a relação água/aglomerantes não era reduzida abaixo de 0,30, pois este era o valor consagrado na época (AİTCIN, 2000). Posteriormente, H. H. BACHE (1981) *apud* AİTCIN (2000) relatou que a redução da relação água/aglomerantes de um particular microconcreto a 0,16, usando um teor muito elevado de superplastificante e substituição do cimento por Sílica Ativa, o concreto atingiria uma resistência à compressão de 280 MPa (AİTCIN, 2000). Dessa forma, provou-se que a resistência à compressão máxima do concreto depende não apenas de qualidade, quantidade e eficiência dos materiais cimentícios usados, mas também do grau de adensamento e da porosidade limite da matriz sólida formada após completado o processo de endurecimento.

NEVILLE (2000) afirma que é possível produzir concretos com elevadas propriedades mecânicas e durabilidade, utilizando os conhecimentos já existentes, sem necessidade de pesquisas extensivas e onerosas e sem a utilização de métodos modernos de alta tecnologia. Para produzir este concreto, é necessário compreender os fatores que influenciam suas propriedades e seu comportamento estrutural. Para isso, deve-se utilizar aditivos plastificantes ou superplastificantes compatíveis com o cimento Portland, de forma a não produzirem reações químicas indesejáveis. Não deve-se utilizar cimento com alto teor de alumina, visto que este possui propriedades estruturais inferiores ao do concreto produzido com cimento Portland. Deve-se garantir o adequado cobrimento das armaduras, mistura e adensamento do concreto, de forma que esse possua elevadas propriedades mecânicas e também durabilidade.

### *3.1.2 Fundamentos do Concreto de Alto Desempenho*

Segundo AİTCIN (2000), pode-se explicar o melhor desempenho do CAD com base em princípios que podem ser cientificamente comprovados; entretanto, ainda não é possível explicar cada aspecto desse tipo de concreto em todos os detalhes.

AİTCIN (2000) cita que o CAD é mais complexo de ser produzido quando comparado ao concreto usual, pois à medida em que a resistência à compressão cresce, suas propriedades mecânicas (como módulo de elasticidade) não são mais relacionadas apenas com a relação água/aglomerantes (parâmetro fundamental que governa as propriedades do concreto usual) em virtude da porosidade da pasta hidratada de cimento. A maioria das propriedades de resistência mecânica do CAD está relacionada à hidratação de silicatos, enquanto o comportamento reológico é controlado pela hidratação na fase intersticial na presença de íons de enxofre e de cálcio. Em ambos os casos, é crítica a quantidade de água disponível no início do processo de hidratação do cimento.

O concreto convencional pode ser considerado como um material heterogêneo composto de três fases distintas: agregados, pasta de cimento hidratada; e zona de transição à interface agregado-pasta de cimento (ZTI). A ZTI é considerada o elo mais fraco do concreto. Segundo MEHTA e AİTCIN (1990) a ruptura, especialmente à compressão, é um processo do tipo elo mais fraco. Dessa forma, além da quantidade, tamanho e forma dos poros, sua distribuição espacial ou concentração local é um fator principal na ruptura.

MEHTA e AİTCIN (1990) mencionam que ZTI forte é essencial para produzir concretos de elevadas propriedades: resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade. Microfissuras interconectadas na ZTI implicam no aumento da permeabilidade e em problemas associados à durabilidade do concreto exposto a meios agressivos. Para se produzir CAD com elevadas propriedades mecânicas, tenta-se diminuir as heterogeneidades, utilizar agregados com grãos de menores tamanhos, produzir uma pasta muito bem adensada, reduzir o tamanho de poros e a porosidade.

MALHOTRA e MEHTA (1996) citam que a resistência da pasta hidratada de cimento pode ser melhorada trabalhando-se sobre a microestrutura da pasta, atentando aos seguintes parâmetros:

- Porosidade: tamanho e quantidade de poros, especialmente concentrados em um local, reduzem a resistência mecânica;
- Tamanho dos grãos de cimento: a resistência de uma fase cristalina geralmente aumenta com a diminuição do tamanho dos grãos;
- Heterogeneidades: em materiais multifases, as heterogeneidades são as causas da perda de resistência mecânica.

As heterogeneidades na microestrutura da pasta do cimento, especialmente a existência de grandes poros e grandes produtos cristalinos na ZTI, podem ser amplamente reduzidas pela introdução de partículas finas de adições pozolânicas ou cimentícias. Com o progresso das reações pozolânicas e cimentícias, há um decréscimo gradual no tamanho dos poros e produtos cristalinos de hidratação (MALHOTRA e MEHTA, 1996). Estes dois efeitos podem resultar num melhor empacotamento das partículas. A combinação dos dois efeitos (físico e químico), aumenta a resistência da ZTI dos concretos contendo adições minerais.

### *3.1.2.1 Porosidade*

Segundo AÏTCIN (2000), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) têm mostrado que os produtos iniciais de hidratação, formados quando existe muita água e espaço vazio no sistema, consistem em flocos de grandes cristais que geram um considerável volume de vazios.

De acordo com esse autor, quanto mais compactos e menos cristalinos os produtos de hidratação, maior será a resistência à compressão do concreto. Os principais fatores que afetam a porosidade do cimento hidratado são a relação do volume de água disponível, o volume da fase do silicato não hidratado e da quantidade de ar incorporado durante a mistura. Para reduzir a porosidade da pasta de cimento deve-se reduzir a quantidade de ar incorporado e a relação água/cimento na pasta fresca de cimento.

As bolhas de ar aprisionadas podem ser consideradas como heterogeneidades microestruturais que podem ser minimizadas no CAD quando os objetivos finais são a resistência mecânica e durabilidade. Pode-se conseguir este efeito por meio do adensamento adequado do concreto (AİTCIN, 2000). Deve-se eliminar também a tendência natural das partículas do cimento flocularem de modo disperso.

### *3.1.2.2 Zona de transição à interface agregado pasta de cimento (ZTI)*

De acordo com NEVILLE (1995), durante o adensamento, as partículas do agregado graúdo, dependendo do tamanho, forma e textura superficial, impedem uma distribuição homogênea da água no concreto fresco. Devido ao “efeito parede” localizado, uma quantidade de água tende a se acumular na superfície das partículas do agregado graúdo. A relação água/aglomerantes localizada na pasta de cimento nas proximidades dos agregados graúdos (ZTI), torna-se substancialmente mais elevada. Comparada com a pasta de cimento como um todo, a microestrutura da ZTI possui grandes poros e grandes produtos cristalinos de hidratação, responsáveis pela heterogeneidade estrutural, resultando em implicações sérias para a resistência mecânica e durabilidade do concreto.

### *3.1.2.3 Tamanho e forma dos grãos dos materiais cimentícios*

AİTCIN (2000) cita que algumas pesquisas foram realizadas para esclarecer a necessidade de otimizar a granulometria dos materiais cimentícios para melhorar a trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto.

*“Bache foi um dos primeiros a apontar as vantagens de adicionar Sílica Ativa nos traços de relação água/aglomerante muito baixa para melhorar a trabalhabilidade” (BACHE, 1981 apud AİTCIN, 2000)*

O efeito benéfico de adicionar um pó tão fino nesses concretos se deve ao fato destas minúsculas partículas esféricas de Sílica Ativa estarem bem dispersas no sistema cimento-água podendo deslocar moléculas de água da vizinhança dos grãos de cimento. Dessa forma, moléculas de água retidas entre as partículas floculadas de cimento podem ser liberadas, e assim, contribuir para fluidificar a mistura (AİTCIN, 2000).

AİTCIN (2000) também descreve que desde que os agregados graúdos sejam resistentes, à medida que a porosidade da pasta diminui, a resistência do concreto aumenta. Dessa forma, para se produzir um CAD, deve-se reduzir sua porosidade, utilizando menos água de mistura que no concreto usual.

No concreto usual, a ZTI representa o “elo mais fraco” do concreto, sendo o primeiro componente a se romper quando sujeito à esforços mecânicos. No CAD, busca-se alterar as propriedades mecânicas da pasta de cimento na ZTI, fazendo com que ocorra uma mudança neste “elo mais fraco”, visando reforçá-la de forma que sob crescente tensão, a ZTI não seja o primeiro componente a romper-se (MEHTA e AİTCIN, 1990),.

### *3.1.3 Materiais componentes do CAD*

#### *3.1.3.1 Cimento Portland*

De acordo com AİTCIN (2000), em relação às propriedades mecânicas de resistência, é importante que o cimento Portland desenvolva o gel CSH, visto que os silicatos de cálcio são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do concreto. O aumento da resistência mecânica pode ser obtido reduzindo-se a relação água/aglomerante.

Para se obter um certo nível de trabalhabilidade do concreto quando somente cimento e água são utilizados, há necessidade de mais água para hidratar todas as partículas de cimento por completo. Dessa forma, para melhorar a hidratação é necessária a utilização de aditivos químicos capazes de reduzir a quantidade de água de mistura exigida (AİTCIN, 2000).

Segundo RIBEIRO (2002), os cimentos se diferenciam quanto às suas propriedades, devido a variações na composição química do clínquer e das adições (como escória de alto forno, pozolana, materiais carbonáticos) que definem características a serem consideradas quando do seu emprego. O cimento CP V ARI possui maiores proporções de silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), que lhe confere alta resistência inicial. O CP V ARI pode ter em sua composição 5% de materiais

carbonáticos, que são materiais moídos, que tornam argamassas e concretos mais trabalháveis.

TUTIKIAN *et al.* (2011), descrevem que deve-se escolher cimentos o mais puro possíveis para a produção de concreto. Segundo esses autores, caso não seja levado em consideração o tamanho das partículas, os cimentos CP I e CP V ARI são os mais recomendados para a produção de CAD. Os cimentos com partículas muito finas, apesar de reagirem rapidamente e formarem compostos resistentes em maior número, demandam maior quantidade de água (devido à maior superfície específica). Ainda conforme esses autores, deve-se ter maiores teores de  $C_2S$  e  $C_3S$  contidos nesses cimentos, visto que estes são responsáveis pelas resistências mecânicas do concreto. A reação do  $C_3S$  com água, além de formar o gel CSH (principal composto responsável pela resistência mecânica do concreto), produz o CH, que é consumido na reação pozolânica pelas adições pozolânicas contidas no CAD. O CH da reação pozolânica é transformado em gel CSH, que aumenta a resistência mecânica do CAD.

O cimento não deve causar reações indesejáveis quando da produção do concreto, dessa forma, para a produção do CAD deve ser avaliada a não ocorrência de reações indesejáveis do cimento com os aditivos e/ou adições pozolânicas.

### 3.1.3.2 Agregados

AÏTCIN (2000) relata que nos concretos usuais a seleção dos agregados particularmente resistentes não é necessária para a sua produção. No CAD, a pasta hidratada de cimento e a ZTI podem ser resistentes. Entretanto, se os agregados graúdos não forem resistentes, podem se tornar o elo mais fraco do concreto. Os agregados usados para fazer o CAD são areia natural e cascalho ou rocha britada. As rochas selecionadas devem ser rochas finamente texturadas que possam ser cominuídas em partículas contendo uma quantidade mínima de microfissuras. Rochas contendo planos de clivagem fracos ou partículas que sofreram a ação severa de intempéries devem ser evitadas.

Ainda segundo esse autor, para se produzir CAR (na faixa de 100 MPa), deve-se utilizar agregados graúdos de dimensão máxima entre 10 mm e 20 mm. Para

concretos com resistência à compressão de mais de 125 MPa deve-se utilizar dimensão máxima de 10 mm a 14 mm. Para agregado miúdo, a granulometria da areia deve crescer proporcionalmente à resistência à compressão e ao consumo de cimento, usando preferencialmente areias com módulo de finura na faixa de 2,70 a 3,00.

### 3.1.3.3 Aditivos plastificantes e superplastificantes

De acordo com HARTMANN *et al.* (2011), os aditivos redutores de água são conhecidos como plastificantes ou superplastificantes, dependendo da redução da quantidade de água de amassamento para uma determinada consistência (trabalhabilidade). Os superplastificantes são conhecidos também como redutores de água de alta eficiência. Enquanto os aditivos plastificantes permitem uma redução de água de cerca de 5%, os aditivos superplastificantes podem reduzir a água da mistura em até 40%. Estes, além de reduzirem o consumo de água, conferem um aumento de fluidez da mistura mesmo se a quantidade original de água da mistura for mantida constante. Os aditivos plastificantes e superplastificantes são utilizados com as seguintes finalidades:

- Reduzir consumo de água (para uma mesma consistência) – aumentando a durabilidade e resistência mecânica do concreto;
- Aumentar a fluidez do concreto sem alterar o consumo de água;
- Reduzir a quantidade de cimento do concreto;
- Reduzir a retração, fluência e tensões térmicas.

HARTMANN *et al.* (2011) afirmam ainda que os aditivos redutores de água dispersam as partículas de cimento em hidratação, liberando a água retida entre os grãos de cimento, aumentando a fluidez da mistura. Os redutores de água adsorvem na superfície das partículas de cimento em hidratação, produzindo repulsão devido a forças eletrostáticas, resultando em defloculação. Dessa forma, a água aprisionada dentro dos flocos é liberada, reduzindo a viscosidade da mistura.

YAZDANBAKHSY e GRASLEY (2012) descrevem que o maior desafio para o sucesso da adição de nanomateriais na pasta de cimento é obter uma uniforme distribuição das nanopartículas. As partículas de cimento possuem maiores diâmetros que os espaços médios entre as nanopartículas quando estas se encontram totalmente dispersas na pasta. A presença de partículas de cimento na pasta fresca diminui a máxima dispersão possível das nanopartículas na pasta endurecida. Garantir uma melhor dispersão de nanopartículas requer simultaneamente alcançar a dispersão de partículas de cimento (mas não requer um cimento ultra-fino).

A nanosílica estabilizada em aditivo superplastificante, permite melhor dispersão das nanopartículas no concreto, além de dispersarem as partículas de cimento em hidratação, aumentando a fluidez da mistura (TECNOSIL, 2013). Com isso, espera-se melhor desempenho das propriedades mecânicas e reológicas do CAD com a adição de nanosílica estabilizada.

#### *3.1.3.4 Adições minerais*

A utilização de adições minerais, como por exemplo materiais pozolânicos, é necessária para a produção de CAD. Segundo AITCIN (2000), o uso de materiais cimentícios suplementares não apenas reduz o custo de produção do concreto, mas contribui para sua trabalhabilidade. Para exceder o valor de resistência à compressão de 100 MPa, deve-se utilizar Sílica Ativa no CAD.

Conforme MALHOTRA e MEHTA (1996), o uso de adições minerais na construção civil é anterior à invenção do cimento, tendo iniciado, no período de 1500 a.C., na Grécia, onde se adotava um material de origem vulcânica, originado de erupções ocorridas na ilha Santorini.

Nos dias atuais, as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de indústrias. Esses resíduos seriam normalmente descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando o risco de contaminação do solo e fontes de água (DAL MOLIN, 2011).

DAL MOLIN (2011) ressalta que:

*“o uso de adições minerais na indústria do cimento e do concreto, substituindo parcialmente clínquer ou cimento, não só reduz o impacto ambiental causado pelos resíduos de outras indústrias quando jogados em depósitos sem destino adequado, mas também reduz o volume de extração de matérias-primas por parte da indústria da construção civil, preservando os recursos naturais limitados.(...) A incorporação de adições minerais na produção de cimentos ou concretos pode reduzir ainda o consumo de energia (...) No caso das escórias e pozolanas, esse nível de energia permite a produção de cimentos sem a calcinação da matéria prima, permitindo uma redução do consumo energético em até 80%”*

De acordo com SCRIVENER *et al.* (2010), os materiais cimentícios suplementares (MCS) são amplamente utilizados no cimento ou adicionados separadamente na betoneira. A mistura de MSC com o cimento Portland leva à um sistema mais complexo onde as reações de hidratações do cimento e dos MSC ocorrem simultaneamente e podem também influenciar as reações um do outro. As reações da maioria dos MSC ocorrem de forma mais lenta que as reações das fases do clínquer. Em geral, a composição química dos MCS é caracterizada por teores de cálcio inferiores ao do cimento Portland. Portanto, existem diferenças nos hidratos formados durante a hidratação. O uso de MCS ricos em sílica modifica a quantidade e o tipo de hidratos formados, assim como volume, porosidade e durabilidade destes materiais. Nas idades iniciais, o efeito fíler leva a um aumento das reações das fases do clínquer. As reações dos MCS iniciam depois, e são aumentadas com o aumento do pH (entre 12 e 14) e da temperatura (acima de 27° C). A composição, a finura e a quantidade de fase vítrea também desenvolvem um papel importante. Devido à diversa gama de MCS utilizados, relações genéricas entre composição, tamanho das partículas, condições de exposição (como temperatura ou umidade relativa do ar) tornam-se cada vez mais importantes.

Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), a utilização de adições minerais no concreto pode influenciar favoravelmente suas propriedades. O efeito físico é associado à presença de partículas muito finas das adições, preenchendo os poros do concreto (efeito fíler) e o efeito químico é associado às reações pozolânicas ou cimentícias. Esses efeitos resultam na redução do tamanho dos poros do concreto e no adensamento dos grãos. Dentre as propriedades que são favoravelmente afetadas estão o comportamento reológico da mistura do concreto fresco, a

resistência mecânica e durabilidade do concreto endurecido (resistência a ataques químicos e fissuras térmicas).

Em geral, devido ao melhor empacotamento das partículas e menor demanda de água, o concreto fresco contendo adições minerais apresenta redução da tendência de segregação e exsudação, resultando em melhor coesão, trabalhabilidade, bombeamento e acabamento (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

A substituição de parte do cimento Portland por algumas adições minerais em argamassas ou concretos reduz a demanda de água para obter certa consistência, devido ao formato esférico e superfície regular das partículas dessas adições. Alguns autores, como HELMUTH *apud* MEHTA (1996) citam que a redução de água se deve ao mecanismo de adsorção e dispersão das adições minerais que é similar a ação de aditivos químicos redutores de água. As adições impedem a floculação do cimento ao se adsorverem à superfície das partículas de cimento carregadas eletricamente com cargas opostas. Além deste efeito, ocorre também o empacotamento das partículas que também é responsável pela redução da demanda de água, devido à redução dos espaços vazios e da água requerida para plastificar o sistema.

FUSCO (2008) descreve que as reações de hidratação dos compostos do cimento são exotérmicas, o que provoca aquecimento do concreto durante o processo de endurecimento, podendo trazer graves problemas para a concretagem de grandes massas. Durante a fase inicial de endurecimento do concreto, particularmente nas primeiras idades, a liberação de calor é mais intensa, expandindo o concreto. Como a rigidez do concreto é baixa nesta etapa, permite-se a acomodação da massa que se expande termicamente às eventuais heterogeneidades da distribuição de temperaturas. Conforme esse autor, as fissuras provocadas pelas heterogeneidades são colmatadas pelo prosseguimento das reações de hidratação.

Para reduzir o calor de hidratação pode-se utilizar cimentos com baixo teor de  $C_3A$  e com aumento de  $C_2S$  em relação ao  $C_3S$ . Normalmente o calor de hidratação (gerado por unidade de tempo) é reduzido pela substituição do cimento por adições

minerais, já que a quantidade de clínquer diminui, resultando em menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação (DAL MOLIN, 2011).

Ainda segundo essa autora, como a reação pozolânica, em geral, é lenta e ocorre somente após a formação do hidróxido de cálcio a partir da hidratação do cimento, o calor de hidratação da reação pozolânica só será liberado após o pico de calor de hidratação do clínquer, não se somando a este, pois ocorrerá em um período de tempo defasado.

Para as adições mais reativas (superpozolanas), como a Sílica Ativa, a redução do calor de hidratação do clínquer pode ser contrabalançada pela capacidade das pequenas partículas dessa adição em atuar como pontos de nucleação, acelerando a hidratação inicial (DAL MOLIN, 2011).

De acordo com DAL MOLIN (2011), as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em três grandes grupos:

- Material pozolânico;
- Material cimentante;
- Fíler.

### 3.1.3.5 Materiais pozolânicos

De acordo com ISAIA *et al.* (2011), o uso das pozolanas ganha importância na atualidade como substituição ao clínquer, em cimentos e concretos, pelo compromisso da indústria em diminuir a emissão do gás carbônico para a atmosfera.

A norma NBR 12653 (ABNT, 2012) define os materiais pozolânicos como:

*“materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente moídos e na presença de água, reagem com  $\text{Ca(OH)}_2$  à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades aglomerantes.”*

O CAD pode ser feito substituindo parte do cimento Portland por um tipo de material cimentícios ou a combinação de dois ou três. A maioria dos MCS contêm alguma

forma de sílica vítrea reativa que, na presença de água, pode combinar com a cal, à temperatura ambiente, para formar silicato de cálcio hidratado, o mesmo formado na hidratação do cimento Portland (AÏTCIN, 2000).

CINCOTTO (2011) cita que os materiais pozolânicos em contato com solução fortemente alcalina, contendo íons cálcio, reagem formando produtos hidratados hidráulicos, característica denominada atividade pozolânica. Apresentam essa atividade os materiais de composição silicosa ou sílico-aluminosa com estrutura amorfa ou vítrea, que contribuem para as resistências mecânicas do cimento e materiais cimentícios.

A ação da pozolana decorre de dois fenômenos. Inicialmente ela exerce uma ação física, impermeabilizando os capilares do gel rígido formado pelos produtos de hidratação do cimento. Ao longo do tempo ocorre um efeito químico, com a formação do gel CSH, que produz um novo efeito impermeabilizante, pois ele se dá dentro dos poros do gel formado inicialmente pela hidratação do cimento (FUSCO, 2008).

O emprego das pozolanas é recomendado quando da presença de agentes quimicamente agressivos, quando houver suspeita da presença de agregados reativos ao concreto e também quando se quer reduzir o calor de hidratação do cimento (FUSCO, 2008).

A maioria das pozolanas usadas em CAD são subprodutos industriais (MALHOTRA, 1987 *apud* AÏTCIN, 2000). Dentre aqueles usados em larga escala estão a cinza volante e a Sílica Ativa. A escória de alto forno, que não é propriamente um material pozolânico, também tem sido usada para produção de CAD.

#### *3.1.3.6 Reação pozolânica e seu significado*

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), a fase silicato de cálcio hidratado, conhecida como gel CSH, constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado e é a fase mais importante na determinação da propriedade mecânica da pasta. A estrutura exata do gel CSH não

é conhecida, entretanto alguns modelos foram propostos para explicar as propriedades do material.

A largura do espaço interlamelar na estrutura do gel CSH é de 18 Å, sendo responsável por 28% da porosidade capilar no gel CSH sólido (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Este tamanho de vazio é muito pequeno para se ter um efeito desfavorável sobre a resistência mecânica e a permeabilidade da pasta porque segundo esses autores, a concentração de tensões e subsequente ruptura sob a ação de cargas começam nos grandes vazios capilares e nas microfissuras invariavelmente presentes (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

*“A fonte principal de resistência nos produtos sólidos da pasta é a existência de forças de atração de van der Waals. Os pequenos cristais de C-S-H possuem área específica e capacidade de adesão elevadas. Estes produtos de hidratação do cimento Portland tendem a aderir fortemente, não somente uns aos outros, mas também a sólidos de área específica baixa, tais como hidróxido de cálcio, grãos de clínquer anidro, e partículas de agregado miúdo e graúdo”. (MEHTA e MONTEIRO, 2008)*

Do ponto de vista de resistência mecânica, é importante que o cimento Portland desenvolva tanto quanto possível o gel CSH, pois os silicatos de cálcio são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do concreto (AÏTCIN, 2000).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) a reação de formação do gel CSH do C<sub>3</sub>S e do C<sub>2</sub>S presentes no cimento Portland liberam o hidróxido de cálcio (CH). Dessa forma, se houver maior teor de CH disponível dessa reação, será possível com que ocorra a reação de formação do gel CSH pozolânico.

Segundo esses autores, a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada reação pozolânica. Com relação à principal reação de formação do gel CSH, a diferença entre o cimento Portland e cimento pozolânico é demonstrada na Figura 1:

Cimento Portland	Cimento Portland Pozolânico
<b>RÁPIDA</b> $C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH$	<b>LENTA</b> $Pozolana + CH + H \rightarrow C-S-H$

**Figura 1** - Diferença das reações de formação do gel CSH nos cimentos Portland e Pozolânico

**Fonte:** MEHTA e MONTEIRO (1994)

De acordo com SCRIVENER *et al.* (2010), há diferença entre o gel CSH da hidratação do cimento Portland e do gel CSH pozolânico, como se fossem produtos distinguíveis. Entretanto, as evidências indicam que a composição do gel CSH tendem a se igualar. Conforme CINCOTTO (2011), as pozolanas são capazes de participar da reação de formação do gel rígido dos silicatos de cálcio hidratados.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), a reação pozolânica é lenta, com menor taxa de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência. Ela consome o hidróxido de cálcio (CH), contribuindo para durabilidade da pasta endurecida de cimento frente a meios ácidos. De acordo com esses autores, estudos sobre a distribuição do tamanho dos poros do cimento hidratado mostraram que os produtos da reação pozolânica são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando a resistência mecânica e a impermeabilidade do sistema.

Ainda segundo esses autores, o processo de transformação de um sistema contendo grandes vazios capilares em um produto microporoso contendo muitos vazios pequenos é chamado de “refinamento do tamanho de poros”, e o processo de transformação de um sistema contendo grãos grandes de um componente em um produto contendo grãos menores é referido como “refinamento do tamanho do grão”. Ambos os processos aumentam a resistência da pasta de cimento, e ambos são efeitos físicos da reação entre as partículas da pozolana e do CH. Estes dois processos aumentam a resistência da ZTI, reduzindo, assim, a microfissuração e a permeabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo DAL MOLIN (2011), a área superficial específica e a taxa da reação pozolânica, e seus efeitos nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais cimentícios, são parâmetros fundamentais na caracterização de qualquer material que se pretenda empregar como pozolânico.

De acordo com MALHOTRA e MEHTA (1996), as adições minerais de ativação moderada, como pozolanas naturais e cinzas volantes com baixo teor de cálcio, não demonstram uma significativa interação química com os produtos da hidratação do cimento durante a primeira semana de hidratação. As lentas reações pozolânicas e cimentícias geralmente começam depois disso.

O gel CSH da reação pozolânica apresenta as mesmas propriedades do gel CSH da reação de hidratação do cimento Portland, promovendo o aumento da resistência mecânica do CAD (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

### 3.1.3.7 *Sílica Ativa*

De acordo com AÏTCIN (2000), antigamente a indústria produtora de silício e ferro-silício permitia que a Sílica Ativa escapasse para a atmosfera. Após serem sujeitas a fortes regulamentações ambientais a indústria passou a coletar esse material, minimizando a emissão dessas finíssimas partículas no meio ambiente.

O emprego da sílica ativa em CAD como material pozolânico foi reconhecido por esse material apresentar melhoria nas propriedades desse tipo de concreto (AÏTCIN, 2000).

A Sílica Ativa é um pó fino pulverizado decorrente do processo de fabricação industrial do silício metálico e de ligas de ferro-silício. Por ser um produto resultante de processos da indústria metalúrgica, possui maior uniformidade quanto à sua composição química e física (TECNOSIL, 2013).

De acordo com DAL MOLIN (2011), na redução do quartzo a silício é produzido o monóxido de silício gasoso ( $\text{SiO}$ ) que é transportado a zonas de temperaturas mais baixas, onde oxida ao entrar em contato com o ar, formando óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), que se condensa em forma de partículas esféricas, extremamente pequenas e amorfas.

As partículas de Sílica Ativa são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que  $1 \mu\text{m}$ , área específica da ordem de 20 a  $25 \text{ m}^2/\text{kg}$  e massa específica aparente baixa. O elevado teor de  $\text{SiO}_2$  no formato amorfo (não cristalino), aliado a uma elevada finura, proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes

da hidratação do cimento, conferindo melhor desempenho em concretos e argamassa (TECNOSIL, 2013). A Tabela 1 apresenta o comparativo de finura da Sílica Ativa com outros materiais.

**Tabela 1** - Comparativo de finura da Sílica Ativa com outros materiais

Sílica Ativa	~19.000 m <sup>2</sup> /kg
Fumaça do cigarro	~10.000 m <sup>2</sup> /kg
Fly ash (pozolana)	400 a 700 m <sup>2</sup> /kg
Cimento Portland	300 a 500 m <sup>2</sup> /kg

Fonte: TECNOSIL (2013).

A Sílica Ativa pertence à categoria de materiais altamente pozolânicos porque consiste essencialmente de sílica em sua forma não-cristalina com alta superfície específica, exibindo assim alta atividade pozolânica (NILI *et al.*, 2010).

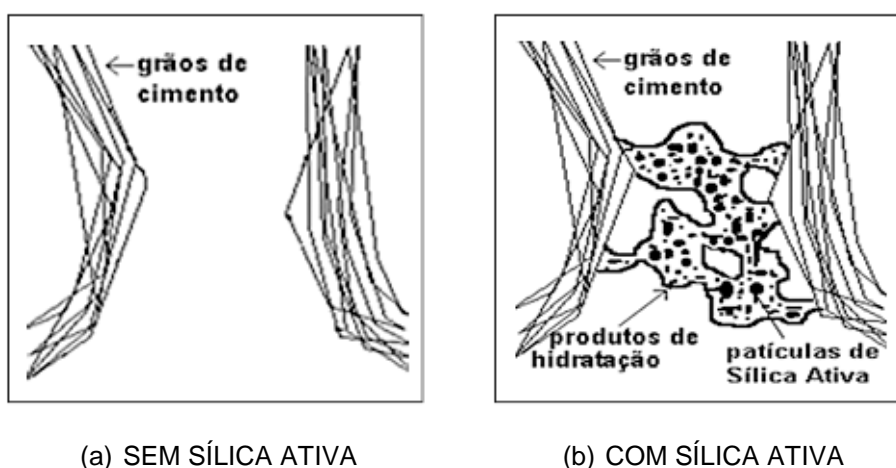
SOUZA e RIPPER (1998) afirmam que, comparado aos concretos comuns, os concretos com Sílica Ativa apresentam as seguintes vantagens:

- a) Maiores resistências à compressão e à tração;
- b) Menor permeabilidade, porosidade e absorvidade;
- c) Maiores resistências à abrasão e à erosão;
- d) Maior resistência a ataques químicos, como de sulfatos e cloretos;
- e) Maior aderência concreto novo – concreto velho;
- f) Menor índice de reflexão no concreto projetado.

*“Comparado ao cimento Portland comum (...) a Sílica Ativa apresenta distribuição granulométrica das partículas duas ordens de grandeza mais finas. É por isso que o material, por um lado, é altamente pozolânico, mas por outro cria problemas de manuseio e aumenta apreciavelmente o consumo de água do concreto, a menos que se acrescente aditivo redutor de água” (MEHTA e MONTEIRO, 2008).*

A Sílica Ativa promove importantes mudanças no comportamento reológico do concreto, tais como: aumento da coesão, redução da exsudação, redução da segregação. No estado endurecido, as partículas de Sílica Ativa ajudam a colmatar vazios, ajudando no empacotamento das micropartículas, contribuindo no fechamento granulométrico da pasta de cimento (TECNOSIL, 2013).

Ainda segundo a TECNOSIL (2013), estas características se devem à ação pozolânica da Sílica Ativa aliada ao seu efeito de micro *filler*. A Sílica Ativa reage com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , cristal fraco e solúvel formado no processo de hidratação do cimento, transformando-o em gel CSH. O efeito micro *filler* ocorre devido à elevada finura. A Sílica Ativa refina os poros do concreto e colmata os vazios, melhorando as propriedades tanto no estado fresco quanto no endurecido. A Figura 2 ilustra concretos com e sem Sílica Ativa demonstrando como a Sílica Ativa se introduz entre os grãos de cimento, alojando nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação dos produtos de hidratação.



(a) SEM SÍLICA ATIVA

(b) COM SÍLICA ATIVA

**Figura 2** – Diferença entre o concreto sem e com Sílica Ativa

Fonte: TECNOSIL (2013)

DAL MOLIN *et al.* (1996) mencionam que as reações pozolânicas da Sílica Ativa com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  são rápidas e pouco variáveis, o que possibilita períodos de cura mais curtos para atingir resistências mecânicas e estrutura de poros desejada. Segundo os autores, este mesmo comportamento não ocorre com pozolanas naturais, escórias e cinzas volantes.

*“Devido ao tamanho extremamente reduzido de suas partículas, a adição de Sílica Ativa reduz drasticamente tanto a exsudação interna quanto superficial da mistura. Essa exsudação reduzida é muito importante (...) porque transforma radicalmente as características microestruturais da zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados e entre a pasta de cimento e o aço da armadura” (GOLDMAN e BENTUR, 1989 apud AÏTCIN, 2000).*

WOLF (1991) *apud* KULAKOWSKI (1997) afirma que a adição de Sílica Ativa reduz a penetração de água (redução de absorção), diminui a permeabilidade e aumenta a resistência à carbonatação.

A durabilidade de argamassas com adição de Sílica Ativa para reparos estruturais foi avaliada por KULAKOWSKI e DAL MOLIN (1994), empregado-se o método de penetração acelerada de íons cloreto. Os autores verificaram que a carga total passante através dos corpos de prova, que indica maior ou menor resistência dos materiais frente à penetração de cloretos, foi menor nos corpos de prova quanto menor a relação água/aglomerantes e maior teor de adição de Sílica Ativa, aumentando até 6 vezes a resistência à penetração de íons de cloreto.

O mesmo ensaio de penetração acelerado foi realizado por FORNASIER (1995, *apud* KULAKOWSKI, 1997) para avaliar a durabilidade de concreto com adição de Sílica Ativa. Este autor utilizou também o ensaio de penetração de água sobre pressão e de absorção por imersão, com secagem a 50 e 105 °C. Os resultados de FORNASIER (1995) foram semelhantes aos obtidos por KULAKOWSKI e DAL MOLIN (1994).

DAL MOLIN *et al.* (1996) realizaram ensaios de desempenho de concretos empregando substâncias químicas agressivas utilizadas na indústria de alimentos, bebidas, produtos químicos e de higiene, entre outros. Como forma de acelerar os ataques químicos, foram realizados ciclos de agressão em concretos de referência e com 6% de Sílica Ativa, medindo-se a perda de massa comparativa entre ambos. A adição de 6% de Sílica Ativa ao concreto aumentou, em média, 25% e 30% a resistência à agentes agressivos para concretos com relação água/aglomerantes de 0,37 e 0,59, respectivamente.

KULAKOWSKI *et al.* (1997) realizaram um estudo com o ensaio de ciclos de agressão para medir a deterioração do concreto por ácido fórmico. A adição de 6% de Sílica Ativa diminuiu, em média, 20% e 50% a perda de massa para os concretos com relação água/aglomerantes 0,37 e 0,59, respectivamente.

A primeira utilização prática da Sílica Ativa, foi relatada em 1952, mas somente no final dos anos 1970 foi utilizada como MCS em um concreto na Escandinávia (AÏTCIN, 2000).

VIEIRA (2003) avaliou o efeito da Sílica Ativa na corrosão das armaduras desencadeada tanto por íons cloreto como por carbonatação, pela técnica de resistência de polarização. Foi avaliada também a influência da Sílica Ativa na absorvidade, resistência à compressão, profundidade de carbonatação e no teor de cloretos. Verificou-se que no caso da corrosão por carbonatação, o efeito da Sílica Ativa depende do teor utilizado. Até 10% de adição, a Sílica Ativa não altera a resistência à corrosão, podendo apresentar um efeito favorável quando utilizada em teor inferior a esse limite. Para teores maiores que 10%, ocorre o aumento do risco de corrosão da armadura por carbonatação do concreto. Independente do teor utilizado, a Sílica Ativa apresenta-se favorável na resistência à corrosão por íons cloreto e nos demais parâmetros utilizados.

SILVA (2006) avaliou o comportamento do CAD com sílica ativa e cinza da casca de arroz, quanto à eficiência na proteção do aço contra a corrosão induzida por íons cloreto. Foram realizados ensaios de absorção de água, resistência à penetração de cloretos, frente de penetração, teor total de cloretos e resistividade elétrica dos concretos. Os resultados obtidos no controle da corrosão pelo ataque de íons cloreto foram favoráveis ao uso das adições em substituição ao cimento Portland, uma vez que os concretos com essas adições melhoraram a capacidade dos CAD na proteção do aço frente à ação dos íons cloreto.

#### 3.1.3.8 Cinzas volantes

As cinzas volantes são partículas pequenas coletadas pelos sistemas antipó das usinas de energia que queimam carvão. Podem ter composição química e fases diferentes, pois estão relacionadas com a quantidade de impurezas contidas na queima do carvão (AITCIN, 2000). De acordo com SCRIVENER *et al.* (2010), as cinzas volantes são constituídas principalmente de  $\text{SiO}_2$ . A quantidade de  $\text{CaO}$  é limitada mas altamente variável, dependendo da origem da cinza volante. Segundo DAL MOLIN (2011), as cinzas volantes com alto teor de cálcio são provenientes da queima de carvão pulverizado em termoelétricas. Possuem teores de sílica amorfa acima de 60%, com partículas são tipicamente esféricas, com diâmetros de 1 a 150  $\mu\text{m}$ .

### *3.1.3.9 Metacaulim*

Segundo DAL MOLIN (2011), o metacaulim é uma adição mineral aluminossilicosa obtida da calcinação, entre 600 °C e 900 °C, de alguns tipos de argila, como as caulínicas e os caulins de alta pureza. Quanto menor a quantidade de sílica e alumínio, menores a reatividade e brancura do material. A argila caulínica possui grande porcentagem de fases pozolanicamente inertes. Existem dois tipos de pozolanas: a procedente da calcinação de argilas e a proveniente de argilas extremamente finas com elevado teores de caulinita e material amorfo. Esta última é chamada de metacaulim de alta reatividade (MCAR). Ao serem submetidas a altas temperaturas, ocorre a remoção dos íons hidroxila da estrutura cristalina da argila, formando um componente amorfo e de grande instabilidade química, denominado metacaulinita ( $Al_2Si_2O_7$ ), responsável pela atividade pozolânica.

### *3.1.3.10 Materiais cimentantes*

O material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como gel CSH. Sua hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, a presença de hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação, segundo DAL MOLIN (2011).

### *3.1.3.11 Escória de alto-forno*

A escória de alto forno é subproduto da manufatura do ferro-gusa num alto forno. AITCIN (2000) cita que a escória pode ser resfriada de duas maneiras diferentes: rápida ou lenta. Se resfriada lentamente, torna-se cristalina, podendo ser usada como agregados em concretos, asfaltos, lastro de cobertura de vias, estradas e embarcadouros, mas não pode ser usada como material cimentício suplementar, mesmo quando finamente moída. Ao ser resfriada rapidamente, solidifica-se na forma vítrea, desenvolvendo propriedades cimentícias, se adequadamente moída e ativada. De acordo com DAL MOLIN (2011), as reações de hidratação das escórias são lentas, o que limitaria sua aplicação prática se agentes ativadores não

acelerassem o processo de hidratação. O hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando adicionada ao cimento.

#### 3.1.3.12 Fíler

De acordo com DAL MOLIN (2011), o fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química (sua ação se resume ao efeito de empacotamento granulométrico e como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento). Esta autora cita como exemplos de resíduos utilizados como fíler as cinzas da combustão de eucalipto sem controle de temperatura, os de corte de granito e calcário. SCRIVENER *et al.* (2010) afirma que materiais inertes podem ter efeito significativo na hidratação das fases do clínquer. Este é conhecido usualmente como “efeito fíler”. Entretanto, a reatividade dos materiais cimentícios suplementares é confundida com este efeito. A reatividade da maioria dos materiais cimentícios suplementares é altamente dependente da alcalinidade da solução dos poros do concreto. Dois mecanismos principais contribuem para o efeito fíler:

1. Espaço extra: como o fíler não produz hidratos, para a mesma taxa de água/sólidos, a relação a/c é maior e há mais espaço para a hidratação dos produtos da fase do clínquer.
2. Nucleação aumentada: particularmente, para materiais mais finos, a superfície extra fornecida pelos MCS atuam como pontos de nucleação para hidratação dos produtos da fase do clínquer.

### 3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Dentre as principais características mecânicas de interesse no concreto, destacam-se as resistência à tração e à compressão. Segundo CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2013), não existe uma lei única para determinar a resistência dos materiais que seja válida para todo tipo de solicitações possíveis. No caso do concreto, não se pode deduzir diretamente a resistência que se tenha encontrado em um ensaio relativo à uma determinada solicitação. Entretanto, considera-se como

aproximação razoável que a resistência do concreto para diversos tipos de solicitações seja função de sua resistência à compressão. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta uma série de expressões a partir das quais se obtêm, em função da resistência à compressão, as resistências do concreto para diversos tipos de solicitações.

De acordo com MEHTA (2008), a deformação decorrente de cargas aplicadas é expressa em deformação específica, definida como a mudança de comprimento por unidade de comprimento; a carga é expressa em tensão, definida como força por unidade de área. Dependendo de como as tensões agem sobre o material, essas tensões poderão ser distinguidas umas das outras: por exemplo, compressão, tração, flexão, cisalhamento e torção. As relações tensão-deformação dos materiais são geralmente expressas em termos de resistência à compressão, módulo de elasticidade, ductilidade e tenacidade.

De acordo com MEHTA (2008), para muitos materiais de engenharia, tal como o aço, o comportamento tensão-deformação observado quando um corpo de prova é submetido a incrementos de carga pode ser dividido em duas partes: a primeira quando a deformação é proporcional à tensão aplicada e é reversível quando o corpo de prova é descarregado – deformação elástica. O módulo de elasticidade é definido neste intervalo de deformação reversível. A segunda parte, a um alto nível de tensão, a deformação não é mais proporcional à tensão aplicada, tornando-se também permanente – chamada deformação plástica. A quantidade de deformação permanente que pode ocorrer antes do rompimento é uma medida da utilidade do material. A energia necessária para romper o material é representada pela área sob a curva tensão-deformação – produto da tensão vezes a deformação.

### *3.2.1 Resistência à compressão*

Para estimar a resistência à compressão simples ( $f_c$ ) de um lote de concreto, são moldados e preparados corpos-de-prova para ensaio segundo a norma NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015), os quais são ensaiados segundo a NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007).

CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2013) citam que a resistência dos corpos de provas submetidos à compressão centrada permite a obtenção de outras características, tal como o módulo de elasticidade. A norma NBR 5739 (ABNT, 2007), prescreve que a resistência à compressão (equação 1), é dada pela razão da carga da ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, devendo o resultado ser expresso com aproximação de 0,1 MPa.

$$f_{cj} = \frac{N_{rup}}{A} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:  $f_{cj}$  = resistência à compressão do concreto aos j dias;  
 $N_{rup}$  = carga de ruptura do corpo de prova;  
 $A$  = área da seção transversal do corpo de prova

A resistência à compressão do concreto deve ser relacionada à idade de 28 dias, quando a idade não é especificada, e estimada a partir do ensaio de determinada quantidade de corpos de prova.

### 3.2.2 Resistência à tração

Segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) a resistência à tração indireta  $f_{ct,sp}$  deve ser obtida segundo ensaio especificado pela norma NBR 7222 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011). Essa norma prescreve que a resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada segundo a equação 2.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d l} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:  $f_{ct,sp}$  = resistência à tração medida no ensaio de compressão diametral (MPa)  
 $F$  = força máxima obtida no ensaio (N)  
 $d$  = diâmetro do corpo de prova (mm)  
 $l$  = comprimento do corpo de prova (mm)

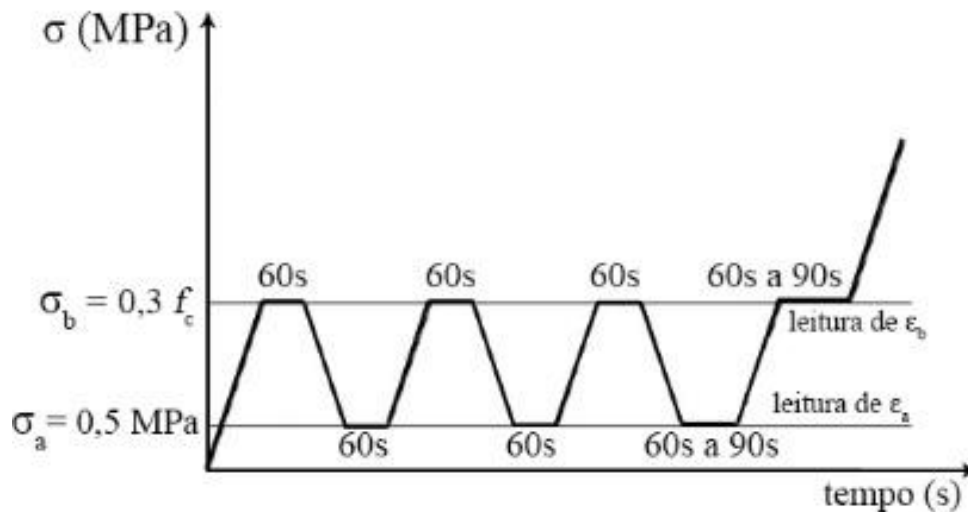
### 3.2.3 Módulo de elasticidade

Segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), o módulo de elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ) deve ser obtido conforme estabelecido na norma NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão (ABNT, 2008), sendo considerado o módulo de deformação tangente inicial igual a 30% da resistência à compressão.

A norma NBR 8522 (ABNT, 2008) cita que o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, deve ser considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre 0,5 MPa e 30%  $f_c$ , para o carregamento estabelecido neste método de ensaio. A resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ) deve ser determinada em dois corpos-de-prova similares, de mesmo tamanho e forma dos que serão utilizados para determinar o módulo de elasticidade, provenientes da mesma betonada, preparados e curados sob as mesmas condições. A partir do valor médio da resistência à compressão obtida ou estimada ( $f_c$ ), determinam-se os níveis de carregamento a serem aplicados.

A norma NBR 8522 (ABNT, 2008) também cita que para determinar o módulo de elasticidade, deve-se aumentar a tensão de forma regular à velocidade de  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s, até que seja alcançada uma tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto ( $\sigma_b$ ). Este nível de tensão deve ser mantido por 60 segundos. Em seguida, a carga é reduzida à mesma velocidade do processo de carregamento até o nível da tensão básica ( $\sigma_a = 0,5$  MPa). São realizados mais dois ciclos de pré-carga adicionais, obedecendo-se às mesmas velocidades de carga e descarga e mantendo as tensões extremas ( $\sigma_a$  e  $\sigma_b$ ) constantes, alternadamente, durante períodos de 60 segundos cada. Depois do último ciclo de pré-carga e do período de 60 segundos sob a tensão  $\sigma_a$ , são registradas as deformações específicas lidas,  $\epsilon_a$ , tomadas em no máximo 30 segundos. O corpo-de-prova é carregado novamente com a tensão  $\sigma_b$  à velocidade especificada e registradas as deformações lidas,  $\epsilon_b$ , tomadas em no máximo 30 segundos, após uma espera de 60 segundos, como mostra a Figura 3. Após todas as leituras de deformação serem efetuadas, a carga no corpo de prova é aumentada à velocidade especificada até que se produza a ruptura. Se a resistência efetiva ( $f_{cef}$ ) à

compressão do corpo-de-prova diferir de  $f_c$  em mais de 20%, os resultados do corpo-de-prova devem ser descartados.



**Figura 3** - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade conforme NBR 8522

Fonte: ABNT (2008).

O módulo de elasticidade inicial,  $E_{ci}$ , em gigapascals, é dado pela fórmula:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:  $E_{ci}$  = módulo de elasticidade inicial (GPa)

$\sigma_b$  = tensão maior (MPa) [  $\sigma_b = 0,3 f_c$  ];

$\sigma_a$  = tensão básica (MPa) [  $\sigma_a = 0,5 \text{ MPa}$  ];

$\varepsilon_b$  = deformação específica média dos CP's ensaiados sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  = deformação específica média dos CP's ensaiados sob a tensão básica.

Os resultados devem ser arredondados para a primeira casa decimal e expressos em gigapascals.

Quando não forem realizados ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, pode-se estimar seu valor. Para concretos com  $f_{ck}$  entre 20 MPa e 50 MPa utiliza-se a equação 4:

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{eq. 4})$$

Para  $f_{ck}$  de 55 MPa a 90 MPa utiliza-se a equação 5:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:  $E_{ci}$  = módulo de elasticidade inicial;

$\alpha_E$  = parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade, igual a 1,0 para agregados granito e gnaisse;

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão;

Segundo o item 8.2.8 da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou de uma seção transversal pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo secante  $E_{cs}$ .

### 3.3 NANOTECNOLOGIA E NANOPARTÍCULAS

#### 3.3.1 Introdução

Segundo GLEIZE (2007), a nanotecnologia é a engenharia dos materiais e das estruturas com tamanho variando de 1 a 100 nanômetros ( $10^{-9}$  a  $10^{-7}$  m).

*“a nanotecnologia explora as propriedades e os fenômenos que ocorrem na nanoescala. Nessa escala, a matéria apresenta um comportamento especial devido aos efeitos quânticos que prevalecem até 10 nm (...) e na qual predominam os efeitos das altíssimas superfícies e interfaces. O refino da estrutura dos materiais ou a incorporação de nanoobjetos permite o aumento das superfícies de contato e a reatividade, o que gera várias vantagens em termos de reforço e eficiência.” (GLEIZE, 2007)*

Segundo GLEIZE (2007), esta definição reflete o fato de que os efeitos da mecânica quântica são importantes na escala do reino quântico, e assim, a definição passou de um objetivo tecnológico específico para uma categoria de pesquisa, incluindo todo tipo de pesquisas e tecnologias que lidam com as propriedades especiais de matéria que ocorrem abaixo do limite de tamanho especificado.

Ainda segundo esse autor, a faixa de grandeza de tamanho das moléculas como definida pela nanotecnologia é muito ampla, incluindo campos diversos da ciência diversos como a ciência da superfície, química orgânica, biologia molecular, física de semicondutores, microfabricação, etc. As pesquisas associadas e aplicações também são diversas, que vão desde dispositivos físicos convencionais às aproximações baseadas em arranjos moleculares, ao desenvolvimento de novos materiais com dimensões na escala nano para o controle da matéria na escala atômica.

GLEIZE (2007) menciona que há duas maneiras de se produzir nanomateriais, nanocomponentes e nanosistemas. Uma delas é via descendente (*top-down*): o material é dividido (cortado) para atingir as menores dimensões possíveis. A outra forma é via ascendente (*bottom-up*): os átomos são ligados um a um para construir as moléculas que são integradas em sistemas maiores.

### 3.3.2 Aplicações

GLEIZE (2007) cita que o setor de produção de eletrônicos foi o que mais avançou graças à nanotecnologia (sensores, memórias, telas flexíveis) e as aplicações potenciais da nanotecnologia cobrem quase todas as áreas: automotivas, cosmética, remédios, têxteis e construção.

Ainda segundo esse autor, a nanotecnologia tem potencial para melhorar muitos materiais de construção, tais como: aços estruturais, polímeros, materiais cerâmicos e materiais cimentícios.

NILI *et al.* (2010) descrevem que o princípio do desenvolvimento sustentável e construções sustentáveis atingiram profundamente a indústria da construção em uma taxa acelerada nos últimos anos. Como a produção de cimento emite gás carbônico na atmosfera, a redução do consumo de cimento no concreto é considerada benéfica ao meio ambiente. Dessa forma, utilização de adições como a Sílica Ativa e nanosílica coloidal como substituição parcial do cimento na produção de concreto é considerada benéfica ambientalmente, além de melhorarem as propriedades mecânicas do concreto. Ainda segundo esses autores, a nanosílica - assim como a Sílica Ativa - pode ser utilizada como adição

para substituição parcial do cimento na produção de concreto. Além do seu efeito benéfico ambiental, a nanosílica aprimora as propriedades mecânicas do concreto. Dessa forma, pode-se projetar peças de concreto mais esbeltas, diminuindo o consumo de todos os materiais para sua produção.

### 3.3.3 Nanosílica aplicada em concretos

NILI *et al.* (2010) citam que um novo material pozolânico produzido sinteticamente, na forma de emulsão de água de sílica coloidal amorfa ultrafina está disponível no mercado e apresenta-se potencialmente melhor que a Sílica Ativa devido ao alto teor de sílica amorfa (< 99%) e ao tamanho reduzido de suas partículas esféricas (1 a 50 nm).

Segundo QUERCIA *et al.* (2011), ainda não foi determinado se a rápida hidratação do cimento contendo nanosílica é causada pela reatividade química por dissolução (atividade pozolânica) ou está relacionada à sua considerável atividade superficial.

A nanosílica possui a mesma composição química que o quartzo ou que a Sílica Ativa ( $\text{SiO}_2$ ). Entretanto, o quartzo é cristalino, enquanto a Sílica Ativa e a nanosílica são amorfas ( $\text{SiO}_2^r$ ). Em relação à Sílica Ativa, a principal diferença é o tamanho da partícula. O tamanho típico das partículas de Sílica Ativa está compreendido entre 200 e 1000 nm, enquanto o da nanosílica está entre 3 e 200 nm (TECNOSIL, 2013).

*“A combinação entre o estado amorfo e o tamanho tão pequeno da partícula da nanosílica faz com que este material se comporte como uma adição ao cimento extremamente ativa na elaboração da pasta de cimento, argamassa e concreto” (TECNOSIL, 2013).*

A reação da nanosílica com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento é rápida, produzindo gel CSH. O gel CSH de origem do cimento é diferente do gel de origem da nanosílica, visto que esse último apresenta baixa densidade de defeitos nos cristais, permitindo o aumento de novas quantidades de gel CSH sobre o cimento com baixa densidade de defeitos e excelentes propriedades mecânicas (TECNOSIL, 2013).

Em geral, o pequeno tamanho das partículas da nanosílica contribui para o preenchimento dos vazios e para a melhoria de diversas propriedades de argamassas e concretos. A adição de 1 kg de Sílica Ativa permite a redução de cerca de 4 kg de cimento na produção de concretos com relação a/c menor que 0,55, e este efeito pode ser ainda maior com a adição de nanosílica (TECNOSIL, 2013).

LI (2003) analisou a influência da adição de nanosílica em CAR com elevados teores de adição de cinzas volantes (maiores que 40%). O objetivo foi verificar o efeito da nanosílica na melhoria das propriedades das cinzas volantes. O estudo mostrou que a nanosílica pode ativar as reações pozolânicas das cinzas volantes quando existe cal no sistema, aumentando a resistência mecânica inicial e final do concreto. Além disso, o tamanho dos poros do concreto tornaram-se menores e a porosidade diminuiu mesmo com curas de curto período (1 dia de cura).

KHAZADI *et al.* (2010) avaliaram a influência das partículas da nanosílica em solução de água (15% em suspensão) nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto por ensaios de resistência à compressão e à tração, absorção de água e a profundidade da penetração de cloreto. Os resultados demonstraram que essas propriedades no concreto com adição de nanosílica foram melhores que no concreto de referência. Este estudo contribuiu para comprovar que a nanosílica se comporta como fíler e também como material pozolânico. Os autores concluíram que a nanosílica consome os cristais de hidróxido de cálcio, reduz o tamanho dos cristais na ZTI, modifica também os hidróxidos de cálcio fracos para os cristais de gel CSH, e melhora a ZTI do concreto e a estrutura da pasta de cimento. A permeabilidade do concreto com nanosílica diminuiu, demonstrando que a nanosílica permite maior homogeneidade e densidade do que o concreto de referência.

MAGHSOUDI *et al.* (2010) investigaram o efeito da adição de nanosílica coloidal em suspensão e Sílica Ativa como adição em concretos auto-adensável convencional e de alta resistência. Os resultados mostraram que a utilização da nanosílica e Sílica Ativa podem melhorar as propriedades mecânicas (resistência à compressão simples, resistência à flexão e módulo de elasticidade) do concreto auto-adensável no estado endurecido.

SADRMOMTAZI *et al.* (2010) avaliaram os benefícios da adição de nanosílica em pó em concreto com adição de cinzas de casca de arroz. O processo de queima da cinza afeta fortemente sua atividade pozolânica. Foi adicionado 3% de nanosílica e 20% de cinza de casca de arroz por peso de cimento. As resistências à compressão e à flexão do concreto melhoraram com a adição de nanosílica. O efeito da nanosílica na absorção de água do concreto com cinza de casca de arroz foi insignificante. Os testes de retração demonstraram que a nanosílica contribuiu positivamente para controlar a retração térmica.

SADRMOMTAZI e FASIHI (2010) analisaram a influência da adição de nanosílica em argamassas contendo adição de resíduos de fibra de polipropileno. As fibras sintéticas possuíam vantagens características como redução na retração plástica e aumento na capacidade de energia de absorção da matriz de cimento. Entretanto, sua fraca ligação com a matriz de cimento, como resultado de sua superfície lisa e sua química inerte, limitavam seu uso. Devido à reação pozolânica da nanosílica possuir alta ligação com a matriz de cimento, a efetividade da adição de fibra foi aumentada, melhorando as propriedades mecânicas da argamassa.

GHASEMI *et al.* (2010) estudaram o efeito da adição de nanosílica coloidal substituindo a Sílica Ativa em concretos. Ensaio de resistência à compressão, permeabilidade de cloretos, profundidade da penetração de água e testes padrão de cloretos foram realizados. A sílica coloidal significa pequenas partículas de um núcleo de sílica amorfa com uma superfície hidroxilada, que é insolúvel em água. O tamanho das partículas variou entre 1 e 500 nm, sendo as mesmas pequenas o suficiente para permanecerem suspensas em um meio fluido sem se decantarem. Os resultados mostraram que o uso de 0,75% de nanosílica e 3% de Sílica Ativa (em massa) melhoraram a resistência à compressão e a profundidade da penetração de água. No ensaio de permeabilidade rápida de cloretos, o uso de 0,75% de nanosílica coloidal e 6% de Sílica Ativa diminuíram a permeabilidade de cloretos. A influência da nanosílica coloidal sozinha não teve efeito significativo na penetração de água e nos testes de permeabilidade de cloretos.

NILI *et al.* (2010) avaliaram a influência da nanosílica e Sílica Ativa no desempenho do concreto convencional, com relação água/cimento de 0,50. Concluíram que a adição simultânea de 6% de Sílica Ativa e 1,5% de nanosílica como substituição

parcial do cimento melhorou a resistência à compressão, resistência elétrica e também diminuiu bastante a absorção capilar do concreto.

QUERCIA *et al.* (2011) avaliaram a demanda de água e o impacto da trabalhabilidade da adição de diferentes sílicas amorfas (dois diferentes tipos de nanosílica coloidal e 4 tipos de Sílica Ativa em pó) na pasta de cimento. As diferenças são em relação à densidade específica, pH, teor de sólidos e tamanho de partículas. Em geral, a pasta de cimento e a argamassa com adição de nanosílica coloidal (até 5%) apresentam menor demanda de água, devido às partículas esféricas da nanosílica, resultando em um efeito de rolamento que reduz a viscosidade da pasta. Este efeito, segundo os autores, é similar ao das cinzas volantes. Acima de 5% de teor de nanosílica a pasta e a argamassa necessitam de maior quantidade de água para manter a trabalhabilidade da mistura constante, pois a área específica das nanopartículas é muito grande sendo necessária mais água para lubrificá-las. À medida que o teor de nanosílica aumentou, maior foi a demanda de água. Além disso, em escala nanométrica, outras forças interpartículas influenciam no empacotamento das partículas, como forças de van der Waals, de repulsão eletrostática e de atração. Ainda segundo os autores, a nanosílica apresentou maior tendência para absorção de espécies iônicas no meio aquoso e a formação de aglomerados. Concluiu-se que a água tem grande influência na trabalhabilidade da pasta hidratada contendo nanosílica com grande área superficial específica.

MADANI *et al.* (2012) estudaram a reatividade pozolânica da nanosílica coloidal em suspensão e sua influência na reação pozolânica do cimento Portland. A rápida taxa de reação pozolânica da nanosílica, comparada a outros materiais pozolânicos, deve-se a alta pureza da sílica e a alta área superficial específica, sendo considerada a maior vantagem deste material.

Os materiais da nanosílica são produzidos de diferentes maneiras. Cada método produz um material com diferentes propriedades. Vários estudos devem ser realizados para cada tipo de nanosílica para caracterizar sua influência nas propriedades dos concretos. MADANI *et al.* (2012) avaliaram a nanosílica em suspensão coloidal, e revelaram que quanto maior a área superficial específica dessa maior o consumo de cal, especialmente em idades iniciais. O tempo de pega

para a nanosílica coloidal em suspensão foi menor que o para o concreto de referência devido à aceleração da conversão do primeiro estágio do gel CSH, ao redor das partículas de cimento também devido à sua forma estável, através da rápida reação pozolânica. O tempo final de pega também foi menor devido à maior superfície específica da sílica para precipitação dos produtos hidratados. O baixo grau de hidratação do cimento deste estudo foi atribuído à retenção de água de mistura dos aglomerados de nanosílica formada no ambiente da pasta de cimento, fazendo com que menos água ficasse disponível para o progresso da hidratação do cimento. Pastas contendo nanosílica apresentaram menor trabalhabilidade comparada à pasta contendo Sílica Ativa. Isso, segundo os autores, é devido à considerável absorção de água nos aglomerados de nanosílica.

IBRAHIM *et al.* (2014) estudaram o efeito de altas temperaturas em argamassas com adição da nanosílica. Os estudos mostraram que a incorporação de nanosílica coloidal em suspensão aumentou as resistências à compressão e flexão significativamente tanto na temperatura ambiente quanto à exposição de uma temperatura de 400 °C durante 2 horas (como em casos de situações de incêndio). A resistência mecânica aumentou concomitantemente com o teor de nanosílica. A nanosílica melhorou a microestrutura do cimento hidratado da argamassa através de sua contribuição na aceleração da reação pozolânica na formação do gel CSH.

BOLHASSANI e SAMANI (2015) estudaram o efeito do tipo, tamanho e teores de nanosílica coloidal em suspensão e Sílica Ativa nas propriedades da pasta de cimento e argamassa. Foram feitos traços individuais de nanosílica coloidal em suspensão e Sílica Ativa, e posteriormente a ação conjunta das duas adições. Os estudos mostraram uma redução substancial na trabalhabilidade das misturas com nanopartículas. A resistência à compressão foi aumentada nos traços com nanosílica em pó e coloidal, aos 7 e 28 dias. A resistência à compressão alcançou um valor máximo para nanosílica com área superficial específica de 90 m<sup>2</sup>/g. Acima deste valor a resistência a compressão diminuiu. A resistência à compressão não foi afetada pela forma das partículas da nanosílica (em pó ou coloidal em suspensão), mas foi afetada pela área específica das partículas. Uma pequena porcentagem de vários tipos de nanosílica (coloidal ou em pó) não afetou a resistência à compressão das argamassas. Entretanto, ao se adicionar elevados

teores de partículas de nanosílica criou-se o mesmo efeito de se adicionar Sílica Ativa.

BELKOWITZ *et al.* (2015) avaliaram o impacto do tamanho e da área específica das partículas de nanosílica coloidal nas seguintes propriedades do concreto: temperatura da hidratação do cimento, resistência à compressão, módulo de elasticidade, permeabilidade e resistividade elétrica. A nanosílica com área superficial maior apresentou melhorias nas propriedades dos compostos, aumentando a resistência a compressão e módulo de elasticidade em mais de 20% em relação ao traço de referência. A nanosílica com partículas menores aumentou em 20% a resistência à compressão. Já a nanosílica com partículas maiores, o aumento da resistência foi de 14%. A resistividade elétrica do concreto aumentou em 30% para concretos com adição de nanosílica com partículas de menor tamanho, e aumentou em 700% para partículas de maior tamanho.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

#### 4.1.1 Cimento

Para fabricação dos concretos foi utilizado o cimento CPV ARI - Plus. A Tabela 2 apresenta a caracterização física e química do cimento empregado e as prescrições segundo a NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial (ABNT, 1991). As características do cimento utilizado foram fornecidas pelo fabricante.

**Tabela 2** – Características físicas, químicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI – PLUS

ANÁLISE QUÍMICA		
ENSAIOS	RESULTADOS	LIMITES NBR 5733
Resíduo Insolúvel (%)	0,73	≤ 1,0
Perda ao Fogo – 1000 °C (%)	3,63	≤ 4,5
Perda ao Fogo – 500 °C (%)	0,76	-
SiO <sub>2</sub> (%)	19,37	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,73	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,98	-
CaO (%)	63,58	-
MgO (%)	0,7	≤ 6,5
SO <sub>3</sub> (%)	2,98	≤ 4,5
CO <sub>2</sub> (%)	2,65	≤ 3,0
K <sub>2</sub> O (%)	0,82	-
ENSAIOS FÍSICOS		
Área Específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4.742	≥ 3.000
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,07	-
Finura Peneira #400 (%)	2,5	-
Início de Pega (min)	131	≥ 60
Fim de Pega (min)	188	≤ 600
ENSAIOS MECÂNICOS		
Resistência à Compressão (MPa)		
1 dia	28,7	≥ 14,0
3 dias	40,5	≥ 24,0
7 dias	44,8	≥ 34,0
28 dias	54	-

Conforme a análise química do cimento Portland, a composição potencial, obtida pelo cálculo Bogue (BOGUE R.H. 1929, 1947; ASTM C150; EN 196-4), resultou em: C<sub>3</sub>S = 69,3%, C<sub>2</sub>S = 11,6%, C<sub>3</sub>A = 8,6%, C<sub>4</sub>AF = 10,4%.

#### 4.1.2 Agregados

Nessa pesquisa foram usados materiais que proporcionassem melhor arranjo, distribuição granulométrica e empacotamento dos agregados, afim de se obter concretos com boa compactidade.

Nesse sentido, como agregados miúdos foram utilizadas areia quartzosa natural lavada e areia artificial (originada de rocha gnaisse).

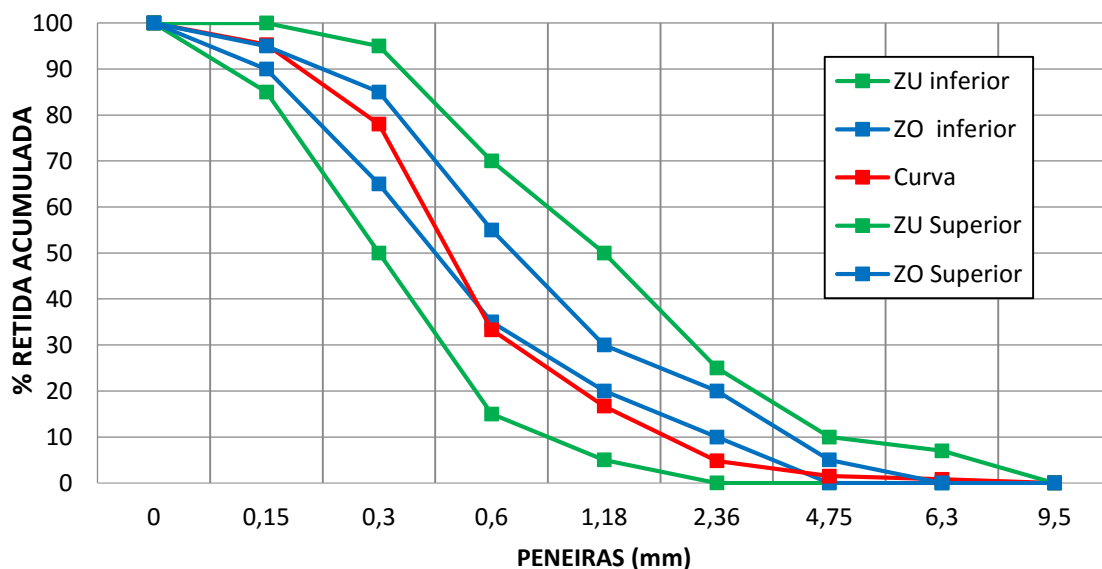
A areia natural quartzosa, possuía módulo de finura de 2,30, massa específica de 2,63 g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 1,35 kg/dm<sup>3</sup> e material pulverulento igual a 1,8%.

Já a areia artificial, apresentou módulo de finura de 2,20, massa específica de 2,70 g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 1,50 kg/dm<sup>3</sup> e material pulverulento igual a 3%.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as granulometrias das areias e as Figuras 4 e 5 ilustram essas granulometrias e também as faixas granulométricas conforme a especificação da norma NBR 7211 (ABNT, 2009) para os agregados miúdos.

**Tabela 3 - Granulometria da areia natural**

PENEIRA (mm)	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			RET. ACUM. (%)
	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	
6,3	7,4	9,4	0,7	1,0	0,8	0,8
4,75	4,0	10,0	0,4	1,0	0,7	1,5
2,36	32,5	34,8	3,0	3,6	3,3	4,8
1,18	125,2	116,2	11,7	12,0	11,8	16,7
0,6	180,0	158,2	16,9	16,3	16,6	33,3
0,3	482,2	430,2	45,2	44,3	44,7	78,0
0,15	186,7	166,4	17,5	17,1	17,3	95,3
Fundo	49,8	45,5	4,7	4,7	4,7	100,0
Total	1067,7	970,8	100,0	100,0	100,0	
Massa inicial (g):	1069,47	971,73				
Módulo de finura	2,30		Diâmetro máximo		2,36 mm	

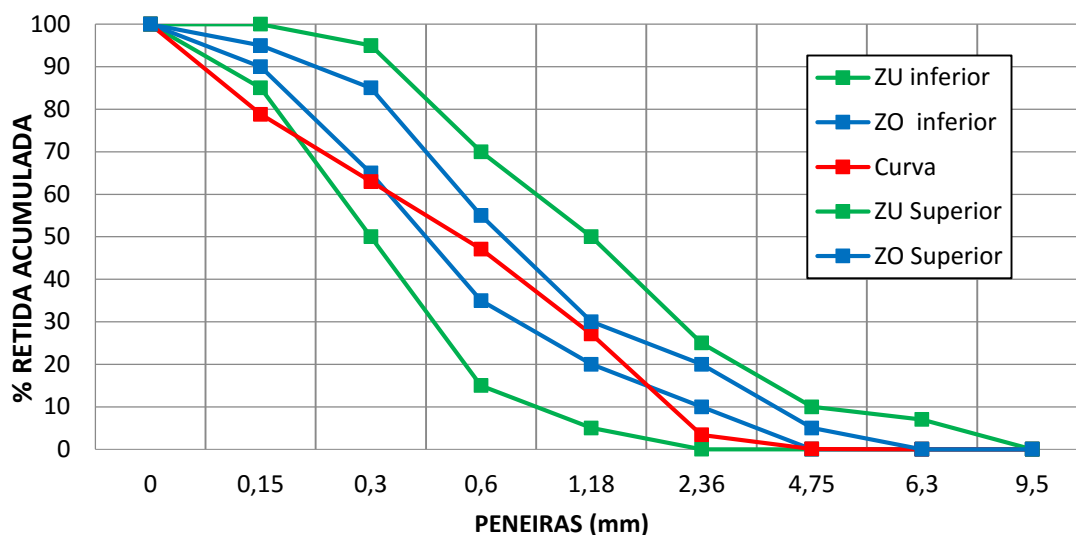


**Figura 4** - Curva granulométrica da areia natural e limites da norma NBR 7211

Segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) a granulometria dos agregados miúdos, determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), deve cumprir os limites das zonas inferior e superior indicadas na Figura 4. Pela curva granulométrica da areia natural utilizada neste trabalho, percebe-se que a mesma está parcialmente dentro dos limites da zona ótima prescritos pela norma. A areia se enquadra nos limites da zona utilizável da norma.

**Tabela 4** - Granulometria da areia artificial

PENEIRA (mm)	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			RET. ACUM. (%)
	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	
4,75	1,1	0,2	0,2%	0,0	0,1	0,1
2,36	18,2	11,6	3,9%	2,6	3,2	3,4
1,18	116,8	100,5	24,7%	22,7	23,7	27,1
0,6	93,5	89,4	19,8%	20,2	20,0	47,1
0,3	72,4	72,8	15,3%	16,4	15,9	63,0
0,15	72,1	72,7	15,3%	16,4	15,8	78,8
Fundo	98,0	95,6	20,8%	21,6	21,2	100,0
Total	472,1	442,7	100,0%	100,0	100,0	
Massa inicial (g)	473,16	443,53				
Módulo de finura		2,20	Diâmetro máximo		2,36 mm	



**Figura 5** - Curva granulométrica da areia artificial e limites da norma NBR 7211

Pela curva granulométrica da areia artificial (Figura 5) utilizada neste trabalho, a mesma encontra-se dentro dos limites da zona utilizável prescritos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Foram utilizados como agregados graúdos as britas “1”, “0” e britas “00”, todas de rocha gnaíse. A massa específica da brita é 2,70 g/cm<sup>3</sup>. As características das britas são apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7. As curvas granulométricas são apresentadas nas Figuras 5, 6 e 7.

**Tabela 5** - Granulometria da brita 1

PENEIRA (mm)	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			RET. ACUM. (%)
	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	
19	486	406	9,3	7,9	8,6	8,6
12,5	2662	2326	50,7	45,5	48,1	56,7
9,5	1676	1876	31,9	36,7	34,3	91,0
6,3	388	444	7,4	8,7	8,0	99,1
4,75	8	22	0,2	0,4	0,3	99,4
Fundo	26,0	40	0,5	0,8	0,6	100,0
Total	5246,0	5114	100,0	100,0	100,0	
Massa inicial (g)	5250	5122				
Módulo de finura	6,96		Diâmetro máximo		25 mm	

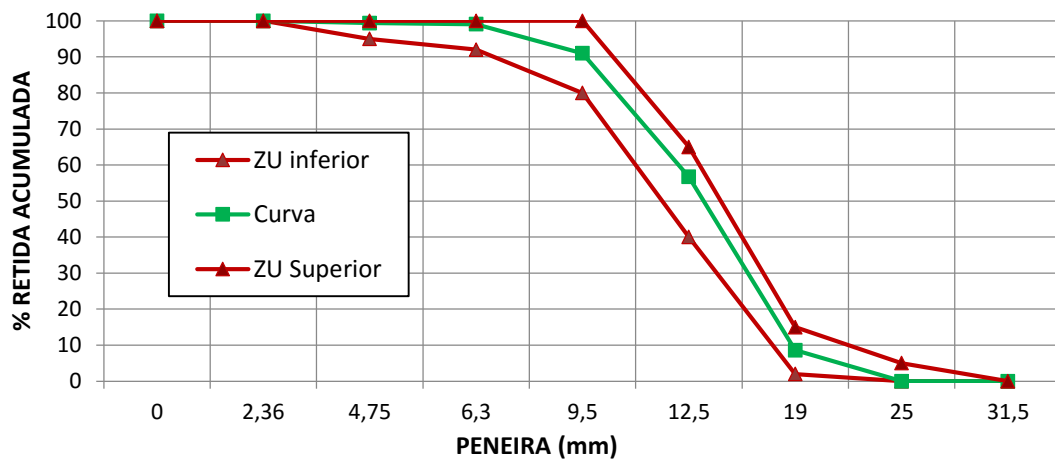


Figura 6 - Curva granulométrica da brita 1 e limites da norma NBR 7211

Tabela 6 - Granulometria da brita 0

PENEIRA (mm)	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			RET. ACUM. (%)
	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	
12,5	10,73	20,4	0,2	0,4	0,3	0,3
9,5	1740	2200	40,2	45,7	43,0	43,3
6,3	2260	2310	52,2	48,0	50,1	93,4
4,75	280	240	6,5	5,0	5,7	99,1
Fundo	37,7	42,7	0,9	0,9	0,9	100,0
Total	4328,4	4813,1	100,0	100,0	100,0	
Massa inicial (g)	4360	4820				
Módulo de finura	6,38		Diâmetro máximo	12,5 mm		

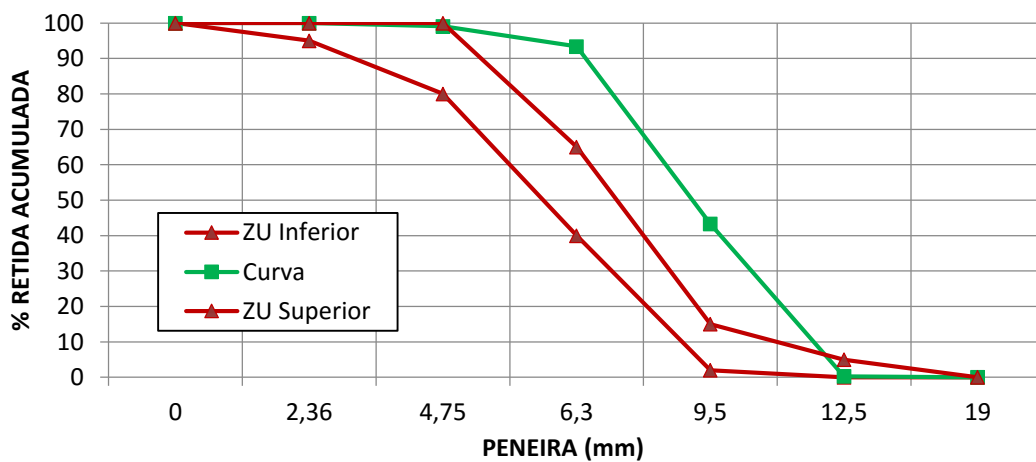


Figura 7 - Curva granulométrica da brita 0 e limites da norma NBR 7211

Tabela 7 - Granulometria da brita 00

PENEIRA (mm)	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			RET. ACUM.(%)
	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	
6,3	13,2	18,3	1,3	1,8	1,6	1,6
4,75	298,9	327,9	30,2	33,0	31,6	33,2
2,36	669,2	639,5	67,6	64,3	66,0	99,1
1,18	2,2	2,2	0,2	0,2	0,2	99,4
0,6	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	99,4
0,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	99,4
0,15	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	99,4
Fundo	5,7	5,5	0,6	0,6	0,6	100,0
Total	990,1	993,8	100,0	100,0	100,0	
Massa inicial (g)	990,8	995,4				
Módulo de finura		5,30	Diâmetro máximo		6,3 mm	

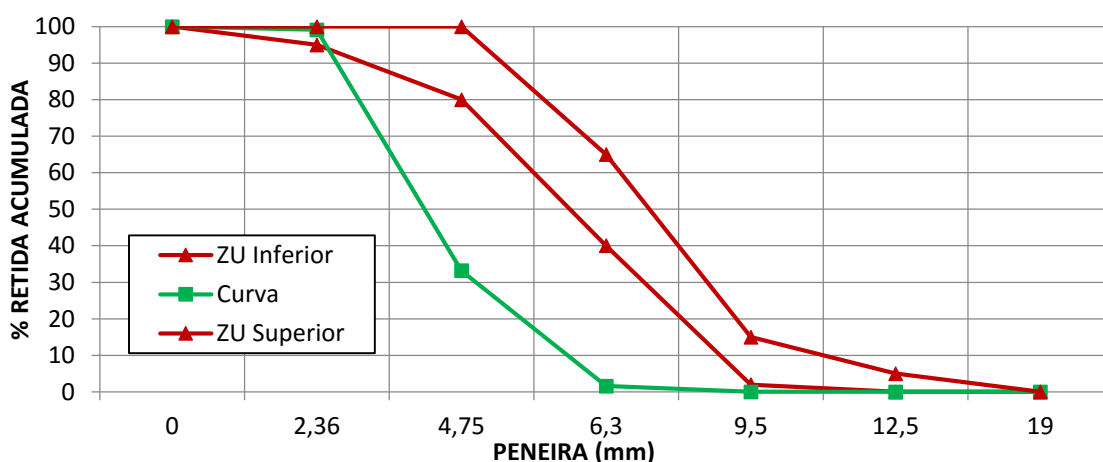


Figura 8 - Curva granulométrica da brita 00 e limites da NBR 7211

Segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) a granulometria dos agregados graúdos, determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), deve cumprir os limites indicados nas Figuras 6 e 7. Pela curva granulométrica das britas utilizadas neste trabalho, percebe-se que apenas a brita 1 encontra-se dentro do limite. Foi representado na curva granulométrica da brita 00 (Figura 8), o limite da composição granulométrica da brita 0, para efeito comparativo, uma vez que a norma não menciona a brita 00. Observa-se que o tamanho de grãos da brita 00 são inferiores aos da faixa para a brita 0, conforme esperado.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) prescreve, porém, no item 6.4 que para concretos com determinados requisitos específicos podem ser necessárias prescrições

especiais adicionais, ficando a critério do consumidor os limites e métodos de ensaio.

#### 4.1.3 Sílica Ativa

A Sílica Ativa utilizada apresenta, conforme o fabricante, teor de SiO<sub>2</sub> amorfo maior que 85%, superfície específica de 20.000 m<sup>2</sup>/kg, massa específica de 2,220 g/cm<sup>3</sup> e formato de partícula esférico. O tamanho típico das partículas de Sílica Ativa está compreendido entre 200 nm e 1 µm. A massa unitária não densificada é inferior a 350 kg/m<sup>3</sup> e a massa unitária densificada superior a esse valor. A Sílica Ativa utilizada encontrava-se na forma de suspensão em água, em proporção 50:50 em massa (TECNOSIL, 2013).

#### 4.1.4 Nanosílica

A nanosílica utilizada na pesquisa encontrava-se estabilizada ao aditivo químico superplastificante, sendo suas partículas dispersas homoganeamente no mesmo e, portanto, possibilitando sua perfeita homogeneidade na massa do concreto no momento da mistura. O tamanho típico das partículas de nanosílica está compreendido entre 3 e 200 nm. As características do aditivo foram fornecidas pelo fabricante, conforme descrito na Tabela 8.

**Tabela 8** - Características e propriedades do aditivo Silicon NS AD 200

<b>NOME DO PRODUTO</b>	<b>SILICON NS AD 200</b>
Identificação	Aditivo de alta redução de água / superplastificante Tipo II (SP-I N) / Aditivo neutro
Nome Químico	Policarboxilato modificado com nanosílica
Faixa de Concentração	30,0%
Aspecto	Líquido
Cor e Odor	Mel e odor característico
pH	3,0 ± 1,0
Densidade	1,06 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidade	Totalmente solúvel em água
Teor de Sólidos	30,0% ± 1,5
Teor de Cloretos	≤ 0,1%
Viscosidade	Não aplicável

Fonte: TECNOSIL/SILICON (2012)

#### 4.1.5 Aditivo plastificante

Nesta pesquisa foi utilizado o aditivo plastificante multifuncional MURAPLAST FK 93 (MC Bauchemie Brasil, 2015). Possui densidade igual a 1,18 g/cm<sup>3</sup>, e pode ser utilizado em conjunto com aditivos superplastificantes. Esse aditivo foi utilizado em todos os traços de concreto.

#### 4.1.6 Água

A água de amassamento do concreto utilizada foi a de abastecimento da COPASA, e satisfazia os requisitos da norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

### 4.2 TRAÇOS DOS CONCRETOS

Anteriormente à moldagem dos corpos de prova foram executados traços experimentais de forma a se alcançar um concreto com melhores propriedades reológicas. Somente após a obtenção de resultados satisfatórios, foram moldados os corpos de prova para os ensaios mecânicos.

Os três traços de concreto para os ensaios foram feitos considerando os consumos dos materiais para um metro cúbico de concreto adensado. Os traços foram calculados para concreto bombeável, com  $f_{ck}$  de 45 MPa (aos 28 dias de idade) e abatimento do Cone de Abrams de  $100 \pm 20$  mm. O abatimento do concreto foi medido de acordo com a norma ABNT NBR NM 67 - “Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”.

Os traços de concreto foram preparados em betoneira com capacidade máxima de 34 litros (eixo inclinado). Foi adotada a seguinte sequência de colocação dos materiais na betoneira:

1. Adição das britas
2. Adição de metade da água do traço
3. Mistura até que toda a brita ficasse molhada
4. Adição da areia natural e artificial
5. Adição do cimento

6. Adição do aditivo plastificante
7. Adição da nanosílica estabilizada (no aditivo superplastificante)
8. Adição da Sílica Ativa em suspensão
9. Adição do restante da água pouco a pouco, até a obtenção do abatimento

Durante o preparo do concreto para moldagem dos corpos de prova, a água foi adicionada aos poucos na betoneira, de forma a se obter uma boa consistência da mistura.

Os procedimentos de estudo de dosagem dos traços dos concretos, trabalhabilidade, moldagem e cura inicial (até 72 horas) dos corpos de prova foram realizados no laboratório da empresa Betonmix, em Santa Luzia.

1. **Traço de referência:** cimento CP V ARI PLUS, agregado miúdo (70% de areia natural e 30% de areia artificial), agregado graúdo (60% de brita 1, 30% de brita 0 e 10% de brita 00) e aditivo plastificante (0,90% da massa de cimento). Relação água/cimento de 0,41.
2. **Traço com nanosílica:** cimento CP V ARI PLUS, agregado miúdo (70% de areia natural e 30% de areia artificial), agregado graúdo (60% de brita 1, 30% de brita 0 e 10% de brita 00), aditivo plastificante (0,90% da massa de cimento) e aditivo superplastificante contendo nanosílica estabilizada (0,39% de aditivo Silicon NS AD 200 em relação à massa de cimento). Relação água/cimento de 0,41.
3. **Traço com nanosílica e Sílica Ativa:** cimento CP V ARI PLUS e a Sílica Ativa como materiais aglomerantes (96,5% de cimento e 3,5% de Sílica Ativa, ou seja, 7% de Sílica Ativa em suspensão), agregado miúdo (70% de areia natural e 30% de areia artificial), agregado graúdo (60% de brita 1, 30% de brita 0 e 10% de brita 00), aditivo plastificante (0,90% da massa de aglomerantes – cimento e Sílica Ativa) e aditivo superplastificante contendo nanosílica estabilizada (0,39% da massa de aglomerantes – cimento e Sílica Ativa). Relação água/cimento de 0,425 e relação água/aglomerantes de 0,41). No momento da colocação da água na betoneira, a quantidade de

água presente na Sílica Ativa em suspensão foi descontada da água do traço do concreto, mantendo-se, assim, a relação água/aglomerantes inalterada.

De forma resumida, os traços utilizados estão descritos na Tabela 9.

**Tabela 9 – Traços dos concretos**

CONCRETO	REFERÊNCIA	NANOSÍLICA	NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA
a/c	0,41	0,41	0,425
a/agl	0,41	0,41	0,41
Traço	1 : 1,135 : 2,124 <sup>1*</sup>	1 : 1,662 : 2,558 <sup>1*</sup>	1 : 1,650 : 2,557 <sup>2*</sup>
Cimento (kg)	503	424	409
Sílica Ativa em Suspensão (kg)	-	-	28,63 (7%) <sup>3*</sup>
Areia Natural (kg)	396	490	486
Areia Artificial (kg)	174	215	214
Brita 1 (kg)	640	651	650
Brita 0 (kg)	320	325	325
Brita 00 (kg)	107	108	108
Água (kg)	206	174	174
Aditivo Plastificante <sup>1</sup> (kg)	4,52 (0,90%) <sup>3*</sup>	3,82 (0,90) <sup>3*</sup>	3,82 (0,90) <sup>4*</sup>
Policarboxilato com Nanosílica Estabilizada (kg)	-	1,65 (0,39%) <sup>3*</sup>	1,65 (0,39%) <sup>4*</sup>
Abatimento (mm)	100	110	120

<sup>1\*</sup> Cimento: Areias (natural + artificial) : Britas (1 + 0 + 00)

<sup>2\*</sup> Cimento + Sílica Ativa : Areias (natural + artificial) : Britas (1 + 0 + 00)

<sup>3\*</sup> Percentual em relação à massa do cimento

<sup>4\*</sup> Percentual em relação à massa de aglomerantes (cimento + Sílica Ativa)

### 4.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Os corpos de prova de concreto foram moldados em fôrmas metálicas cilíndricas (10 x 20 cm) e adensados com haste metálica. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a norma NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015). Em seguida foram identificados por etiquetas de forma a separar os traços estudados. Foram moldados 19 corpos de prova para cada traço, sendo 4 para ensaio de tração por compressão diametral, 6 para ensaio de compressão simples e 9 para ensaio de módulo de elasticidade. Após os ensaios de módulo, os corpos de prova referentes a este ensaio também foram ensaiados à compressão simples. Os corpos de prova foram mantidos em ambiente à sombra.

Após 24 horas, os mesmos foram retirados das fôrmas e em seguida imersos em um tanque de água com cal para que fosse realizada a cura inicial durante 72 horas. Após este período, os corpos de prova foram retirados do tanque, enviados ao laboratório de concreto da empresa Solução Engenharia, em Ipatinga (MG), e mantidos em câmara úmida até a data dos ensaios mecânicos. A câmara úmida apresentava condições de temperatura e umidade conforme previstas pela norma NBR 9479 – Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova (ABNT, 2006).

Antes da realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova foram retificados de forma a regularizar as superfícies superior e inferior dos mesmos. Os ensaios mecânicos foram realizados no laboratório da Solução Engenharia, em Ipatinga (MG).

#### **4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS**

As propriedades mecânicas dos concretos foram avaliadas por ensaios de compressão simples, e módulo de elasticidade para as idades de 7, 14 e 28 dias. A tração por compressão diametral foi avaliada para as idades de 7 e 28 dias. Para todos os ensaios foi utilizada uma prensa hidráulica elétrica digital, auto-controlável da marca SOLOCAP, com capacidade de carregamento até 200 tf.

Para o ensaio de compressão simples foram seguidas as prescrições da norma NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007). Foram utilizados 5 corpos de prova para cada traço por idade, sendo essas 7, 14 e 28 dias, totalizando 15 corpos de prova por traço. Destes 5 corpos de prova para cada traço e idade, 2 corpos de prova foram rompidos para a obtenção dos carregamentos dos ensaios módulo de elasticidade e 3 corpos de prova restantes foram rompidos após esse ensaio.

Para o ensaio do módulo de elasticidade foram seguidas as prescrições da norma NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão (ABNT, 2008), referentes ao ensaio do módulo de elasticidade inicial. Foram rompidos 2 corpos de prova no ensaio de compressão simples, e utilizada uma carga equivalente a 30% da resistência à compressão média desses 2 corpos

de prova. Foi utilizado o compressômetro para medição de deformação axial da marca SOLOTEST, contendo dois extensômetros analógicos com resolução de 0,001 mm, construído em ferro fundido, para corpos de prova cilíndricos 10x20 cm. O compressômetro foi ligado à prensa que automaticamente realizava a leitura das deformações. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada traço, nas idades de 7, 14 e 28 dias. Dessa forma foram utilizados 9 corpos de prova para cada traço.

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram seguidas as prescrições da norma NBR 7222 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011). Foram utilizados 2 corpos de prova para cada traço para 7 e 28 dias. Para esse ensaio utilizou-se um aparato metálico adaptado ao corpo de prova, garantindo, desta forma, o alinhamento das cargas aplicadas.

#### 4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a realização da análise econômica foram cotados todos os materiais utilizados para a execução dos traços de CAD utilizados nesta pesquisa, conforme a Tabela 10. Todos os materiais foram cotados com frete para a cidade de Belo Horizonte, e já estão com impostos inclusos.

**Tabela 10** - Preço dos materiais utilizados para produção dos traços de concreto

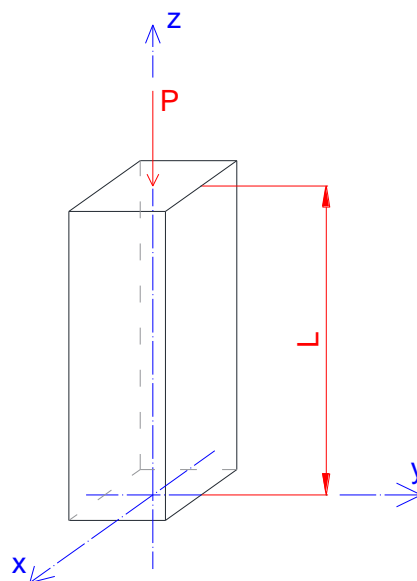
MATERIAL	UNIDADE	QUANTIDADE	PREÇO (R\$)
Cimento CP V ARI	kg	40	19,00
Areia Natural	m <sup>3</sup>	6	422,00
Areia Artificial	m <sup>3</sup>	6	422,00
Brita 1	m <sup>3</sup>	6	388,00
Brita 0	m <sup>3</sup>	6	448,00
Brita 00	m <sup>3</sup>	6	388,00
Sílica Ativa em Suspensão	kg	1	1,30
Nanosílica Estabilizada	kg	1	7,88
Aditivo Plastificante	kg	1	3,05
Água	L	1000	2,66

Para o cálculo do custo de cada traço, foi considerado o quantitativo de materiais para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto, e utilizado como referência o preço por kilo de cada material conforme a Tabela 11.

**Tabela 11** - Preço dos materiais constituintes do CAD por kg

MATERIAL	R\$/kg
Cimento CP V ARI	R\$ 0,475
Areia Natural	R\$ 0,052
Areia Artificial	R\$ 0,047
Brita 1	R\$ 0,047
Brita 0	R\$ 0,054
Brita 00	R\$ 0,047
Sílica Ativa em Suspensão	R\$ 1,300
Nanosílica Estabilizada	R\$ 7,880
Aditivo Plastificante	R\$ 3,045
Água	R\$ 0,003

Para cada traço, foi calculada a seção transversal quadrada mínima de um pilar que deverá resistir a uma carga concentrada  $P$  aplicada no centro da seção transversal (Figura 9). Foi considerado o mesmo comprimento do pilar ( $L$ ) para todos os cálculos.



**Figura 9** - Representação esquemática de um pilar com uma carga  $P$  aplicada no centro da sua seção transversal

A tensão de compressão do concreto utilizada foi a resistência à compressão multiplicada por 0,85, considerando o Efeito Rüsçh (redução de sua resistência sob carga de longa duração), apresentada pela seguinte equação:

$$\sigma_c = 0,85 \cdot f_c \quad (\text{eq. 6})$$

Onde:  $\sigma_c$  = tensão de compressão (MPa);

$f_c$  = resistência à compressão do concreto (MPa);

Para o cálculo da seção transversal foi considerada a tensão de compressão como sendo a razão da carga  $P$  aplicada pela área da seção transversal do pilar ( $\sigma_c = P/A_c$ ). Foi calculado o volume de concreto dos pilares para os respectivos traços e, em seguida, comparados em relação ao seu custo total. Não foi considerada, neste trabalho, a armadura dos pilares.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de consistência obtidos pelo abatimento do tronco de cone para os traços de concreto.

**Tabela 12** – Abatimento do Cone de Abrams dos concretos analisados

REFERÊNCIA	NANOSÍLICA	NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA
100 mm	110 mm	120 mm

O abatimento pelo ensaio de consistência do traço com nanosílica estabilizada foi maior que o traço de referência, e o traço com a mistura de nanosílica estabilizada e Sílica Ativa apresentou abatimento maior que os outros dois traços.

O aditivo superplastificante no qual a nanosílica estava inserida melhorou a trabalhabilidade e a consistência dos traços no qual a mesma foi adicionada. Verificou-se que em relação ao traço de referência, nos traços em que foram adicionados nanosílica estabilizada apresentaram, além de melhor trabalhabilidade e consistência, uma melhora também na coesão e segregação dos concretos.

O fato da nanosílica estar incorporada em um aditivo policarboxilato melhorou a aplicação e eficácia desta no concreto. Isso ocorre devido à maior facilidade de homogeneização da nanosílica quando em solução no aditivo de policarboxilato em comparação com a nanosílica em pó.

Obteve-se um ganho de trabalhabilidade dos concretos com nanosílica estabilizada apesar da redução do consumo de água, conforme indicado na Tabela 12. O uso de 0,39% de nanosílica estabilizada conferiu uma redução de 32 litros de água por metro cúbico de concreto, representando uma redução de 15,5% de água e aumento de 20 mm de abatimento. Os resultados confirmam os dados apresentados por HARTMANN et al. (2011).

A forma esférica da Sílica Ativa também contribuiu para a melhoria da trabalhabilidade do concreto, de forma que o traço com adição dessa pozolana apresentou maior abatimento. A melhora na trabalhabilidade e nas propriedades

reológicas do concreto com a pozolana estão de acordo com as observações de MALHOTRA e MEHTA (1996) e AİTCIN (2000).

## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13** – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (MPa)

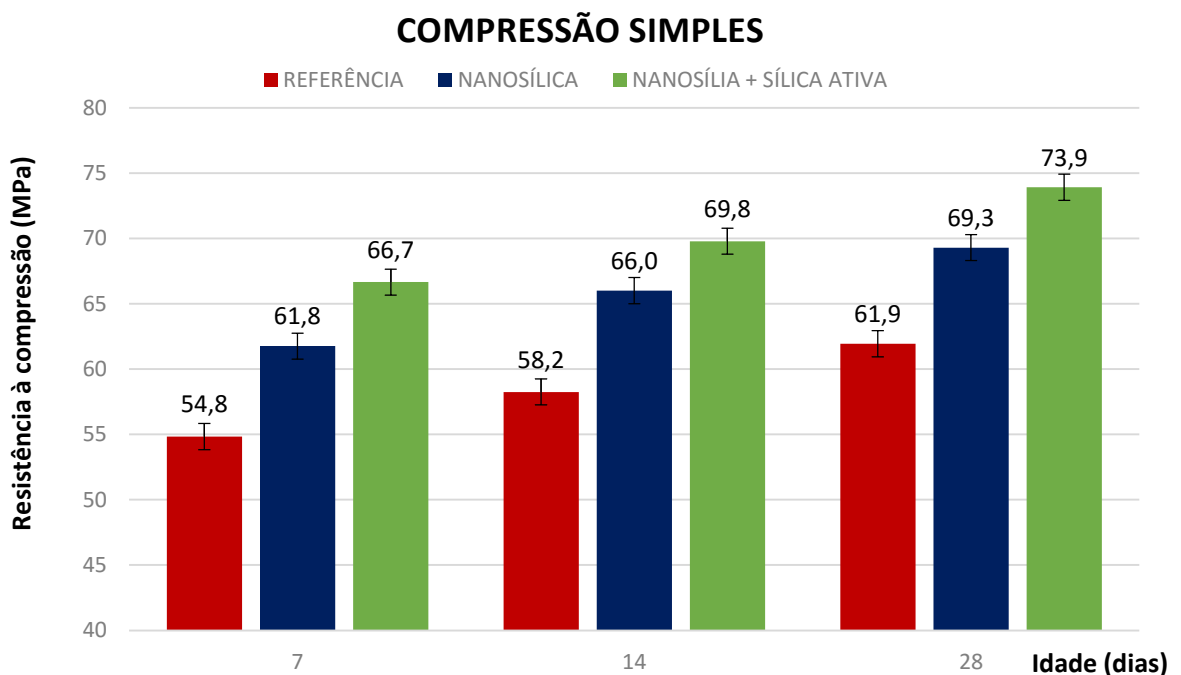
IDADE (DIAS)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CADA CORPO DE PROVA (MPa)		
	REFERÊNCIA	NANOSÍLICA	NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA
7	54,4	61,8	65,6
	54,0	61,6	68,8
	59,1	62,2	65,4
	58,1	60,3	64,4
	48,7	62,9	69,1
14	59,3	68,6	69,8
	56,6	63,6	70,6
	57,0	68,9	70,8
	60,0	65,8	71,4
	58,4	63,2	66,3
28	64,1	69,8	73,9
	63,0	68,5	77,7
	61,5	69,3	74,7
	59,5	68,9	71,8
	61,6	70,0	71,4

A Tabela 14 apresenta os resultados de resistência média à compressão dos corpos de prova de concreto em cada uma das idades com seus respectivos desvios-padrão; a Figura 10 ilustra esses resultados. Os valores dos desvios-padrão foram, para todos os concretos em todas as idades menores que 5% da resistência medida na respectiva idade. Observou-se, também, que os resultados obtidos para a resistência à compressão são bastante superiores a resistência característica à compressão estipulada ( $f_{ck}$  de 45 MPa aos 28 dias) ou a resistência de dosagem ( $f_{cj}$ ) considerando-se o desvio padrão para essa idade.

As melhorias nas propriedades mecânicas quando da adição de nanosílica estabilizada confirmam o informado por DAL MOLIN (2011).

**Tabela 14** – Média e desvio-padrão do ensaio de resistência à compressão (MPa)

RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO (MPa)			
CONCRETO	IDADE = 7 DIAS	IDADE = 14 DIAS	IDADE = 28 DIAS
REFERÊNCIA	54,8 ± 3,0	58,3 ± 1,2	62,0 ± 1,3
NANOSÍLICA	61,8 ± 0,6	66,0 ± 2,2	69,3 ± 0,5
NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA	66,7 ± 1,8	69,8 ± 1,4	73,9 ± 1,8



**Figura 10** - Média e desvio-padrão dos resultados do ensaio de resistência à compressão (MPa)

Com relação à resistência à compressão dos traços analisados, nota-se que o concreto com nanosílica estabilizada apresentou resultados superiores ao concreto de referência para todas as idades. Esse concreto apresentou um acréscimo na resistência de 12,6% aos 7 dias; 13,3% aos 14 dias e 11,9% aos 28 dias, em relação ao traço de referência.

Já o concreto contendo a mistura de nanosílica e Sílica Ativa apresentou resultados superiores aos demais traços para todas as idades. Esse concreto apresentou um acréscimo na resistência de 21,6% aos 7 dias; 19,8% aos 14 dias e 19,3% aos 28 dias, em relação ao traço de referência. Já em relação ao concreto contendo somente a nanosílica, o concreto com a mistura de nanosílica e Sílica Ativa obteve um acréscimo na resistência de 7,9% aos 7 dias; 5,7% aos 14 dias e 6,7% aos 28 dias.

A partir desses resultados nota-se que há um efeito benéfico da adição da nanosílica, devido aos seus efeitos físico e químico (reações pozolânicas), aumentando a resistência à compressão do concreto. Os resultados evidenciam que há um efeito sinérgico entre a nanosílica e a Sílica Ativa, visto que a resistência à compressão dos traços com as duas adições foram superiores em todas as idades, conforme já comentado na revisão bibliográfica. A mistura de partículas de tamanho micro e nanométrico melhoram o fator de empacotamento granulométrico do concreto, podendo contribuir para a diminuição da porosidade, melhorando as propriedades físicas. A ação pozolânica da nanosílica é mais rápida, devido à sua maior superfície específica, apesar de ser incorporada ao concreto em uma proporção bastante inferior quando comparada à Sílica Ativa.

Além do aumento da resistência à compressão, o traço com nanosílica apresentou uma redução no consumo de cimento de cerca de 15,7%. O traço com nanosílica e Sílica Ativa apresentou uma redução no consumo de cimento de cerca de 18,7%. A melhoria na resistência à compressão quando da adição da nanosílica confirmam os resultados obtidos por KHAZADI *et al.* (2010), MAGHSOUDI *et al.* (2010), SADRMOMTAZI *et al.* (2010) e NILI *et al.* (2010).

Para o traço com adição de nanosílica estabilizada e Sílica Ativa, obteve-se a redução de 6,56 kg de cimento para cada quilo de Sílica Ativa adicionado, confirmando os dados de TECNOSIL (2013). Para esse traço de concreto foi possível reduzir o consumo de cimento em 18,8%. Considerando que CAD possui alto teor de cimento (na faixa 500 kg/m<sup>3</sup>), a adição de MCS como a nanosílica e a Sílica Ativa têm efeitos benéficos do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

O aumento da resistência à compressão do concreto (melhorando suas propriedades mecânicas), promove um ganho econômico quando do projeto por permitir o dimensionamento de peças com menores dimensões estruturais, exigindo assim menores volumes de concreto e consumo de materiais. O benefício ambiental, além de oriundo da redução de volume de concreto, também ocorre devido à redução da quantidade de cimento utilizada por metro cúbico de concreto possibilitando a diminuição da produção de cimento e, conseqüentemente, a diminuição de emissão de gás carbônico para o meio ambiente, reduzindo o impacto ambiental. Por outro lado, a produção de concretos com redução do consumo de cimento também pode melhorar a durabilidade dos mesmos reduzindo o calor de hidratação, e conseqüentemente, as fissuras por retração dos concretos.

À medida que a resistência à compressão do CAD cresce, suas propriedades mecânicas relacionam-se não somente à relação água/aglomerantes, mas também à relação de hidratação dos compostos do cimento. Ao se adicionar Sílica Ativa e nanosílica estabilizada, as reações pozolânicas geradas formam gel CSH que aumentam significativamente a resistência à compressão. Além disso, a utilização de agregados graúdos resistentes podem reduzir as microfissuras responsáveis pela ruptura através dos elos mais fracos do concreto.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) prescreve que quando se faz a verificação da resistência à compressão de cálculo em idade inferior a 28 dias, pode-se adotar a seguinte expressão:

$$f_{cmj} = \beta_1 \cdot f_{cm} \quad (\text{eq. 7})$$

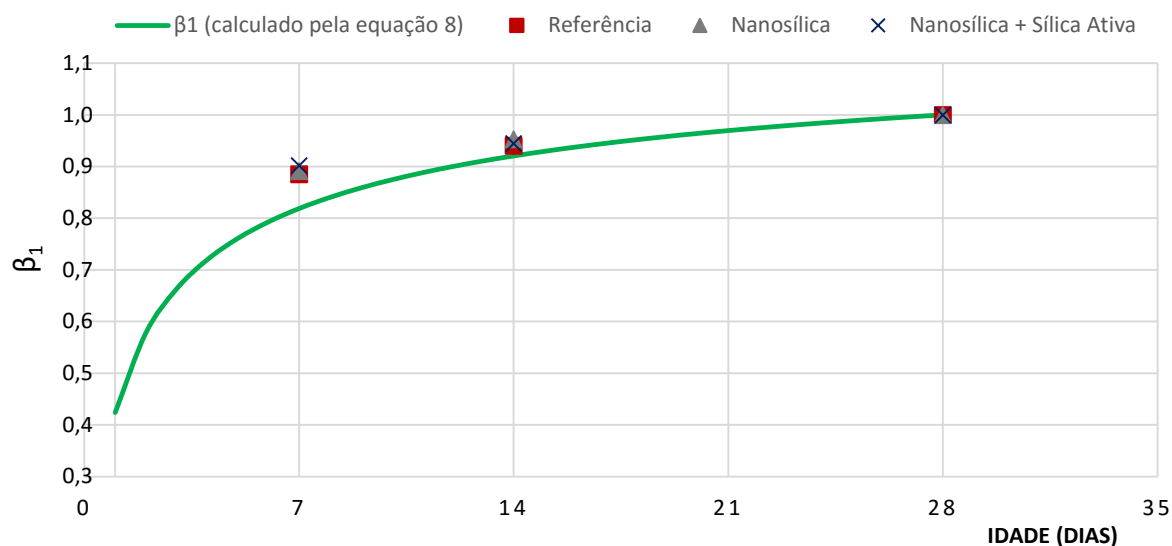
Onde:  $f_{cmj}$  = resistência média na idade de j dias;  
 $f_{cm}$  = resistência média aos 28 dias;

Sendo  $\beta_1$  um coeficiente igual a:

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (\text{eq. 8})$$

Onde:  $s = 0,20$  para CP V ARI  
 $t$  = idade efetiva do concreto expressa em dias.

Para verificar a influência da Sílica Ativa e da nanosilica estabilizada na taxa de crescimento da resistência à compressão do concreto, foram combinadas as eq. 7 e 8 de forma que  $\beta_1 = f_{cmj} / f_{cm} = \exp \left\{ s \left[ 1 - (28/t)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$ . Assim, a Figura 11 apresenta um estudo comparativo dos resultados experimentais com os obtidos empregando-se as equações 7 e 8.



**Figura 11** – Efeito da presença de Sílica Ativa e da nanosilica estabilizada na taxa de crescimento da resistência à compressão - Comparação com a equação prescrita na norma NBR 6118 (ABNT, 2014)

A Figura 11 demonstra que a relação normativa é precisa. Para todos os traços analisados, em todas as idades, os critérios de resistência à compressão da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) foram atendidos, visto que os corpos de prova apresentaram valores de resistência superiores aos valores de referência estabelecidos. Entretanto, nota-se que ao se comparar para um mesmo traço as relações entre resistência à compressão a j dias (obtidas nos ensaios de 7, 14 e 28 dias) e a resistência à compressão a 28 dias, ou seja,  $f_{cj}/f_{c28}$ , tem-se que a taxa de crescimento da resistência à compressão de todos os traços foram praticamente coincidentes.

Dessa forma, é possível concluir que os traços em que a nanosilica estabilizada foi adicionada apresentaram resultados de resistência à compressão superiores em relação ao traço de referência, porém a proporção com que a resistência à compressão do traço com nanosilica cresceu com o tempo, foi a mesma proporção

com que o traço de referência (sem adições) cresceu no mesmo período. Ou seja, as adições aumentam a resistência à compressão, mas não afetaram a taxa de crescimento da resistência com o tempo.

### 5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

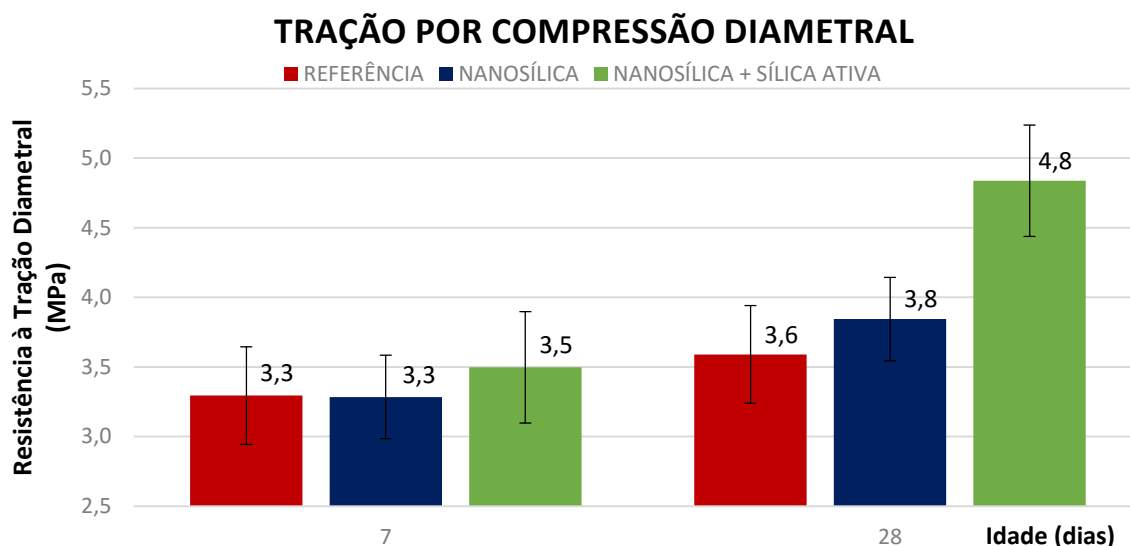
Os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral são apresentados na Tabela 15, para as idades de 7 e 28 dias. A Tabela 16 e Figura 12 apresentam a média e o desvio-padrão desses resultados, nas respectivas idades.

**Tabela 15** - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

IDADE (DIAS)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)		
	REFERÊNCIA	NANOSÍLICA	NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA
7	2,9	3,6	3,6
	3,7	3,0	3,4
28	3,7	3,7	4,3
	3,5	4,0	5,4

**Tabela 16** – Média e desvio-padrão dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)		
CONCRETO	IDADE = 7 DIAS	IDADE = 28 DIAS
REFERÊNCIA	3,3 ± 0,6	3,6 ± 0,2
NANOSÍLICA	3,3 ± 0,4	3,8 ± 0,2
NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA	3,5 ± 0,2	4,8 ± 0,7



**Figura 12** – Média e desvio-padrão dos resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Os resultados apresentados na Figura 12 demonstram um aumento na resistência à tração dos três traços analisados. Porém, o aumento da resistência à tração do concreto com a mistura da nanosílica e Sílica Ativa foi o mais significativo. Novamente o efeito sinérgico das duas adições apresentou melhoria nas propriedades mecânicas do concreto.

Aos 7 dias de idade, os traços de referência e com adição de nanosílica apresentaram valores de resistência à tração próximos de 3,3 MPa. O traço com adição da mistura de nanosílica e Sílica Ativa apresentou um acréscimo de resistência de 6,2% superior ao traço de referência. Alterações na resistência a tração não foram significativas para idade de 7 dias do concreto somente com adição de nanosílica.

Já aos 28 dias de idade, o traço com nanosílica apresentou um acréscimo de resistência 7,1% superior ao traço de referência. O traço com adição da mistura das duas pozolanas apresentou um acréscimo de resistência de 34,7%.

A melhoria na resistência à tração por compressão diametral quando da adição da nanosílica confirmam os resultados obtidos por MAGHSOUDI *et al.* (2010).

As adições de Sílica Ativa e nanosílica podem ter reduzido o tamanho dos poros do concreto (os vazios capilares grandes são transformados em vazios menores).

Além disso, há o processo de refinamento dos grãos – processo de transformação de um sistema contendo grãos grandes em um produto contendo grãos menores. Estes dois efeitos reduzem a porosidade da pasta de cimento, aumentando a sua resistência mecânica. Estes efeitos também melhoram a ZTI. Com uma ZTI mais resistente, há conseqüentemente, o aumento na resistência à tração do concreto. O aumento da resistência à tração foi mais evidente para o traço com a mistura das duas pozolanas, evidenciando o efeito sinérgico dessas duas adições aos 28 dias.

Segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), a resistência à tração indireta  $f_{ct,sp}$  e a resistência à tração na flexão  $f_{ct,f}$  devem ser obtidas em ensaios realizados segundo às normas NBR 7222 (ABNT, 2011) e NBR 12142 (ABNT, 2010), respectivamente. A resistência média à tração direta  $f_{ct}$  pode ser considerada igual a  $0,9 f_{ct,sp}$  ou  $0,7 f_{ct,f}$ . Na falta de ensaios para obtenção destes, a resistência média à tração direta  $f_{ct,m}$  pode ser avaliada por meio das equações 9 e 10:

$$f_{ct,m} = 0,3 (f_{ck})^{2/3} \text{ para concretos de classes até C50} \quad (\text{eq. 9})$$

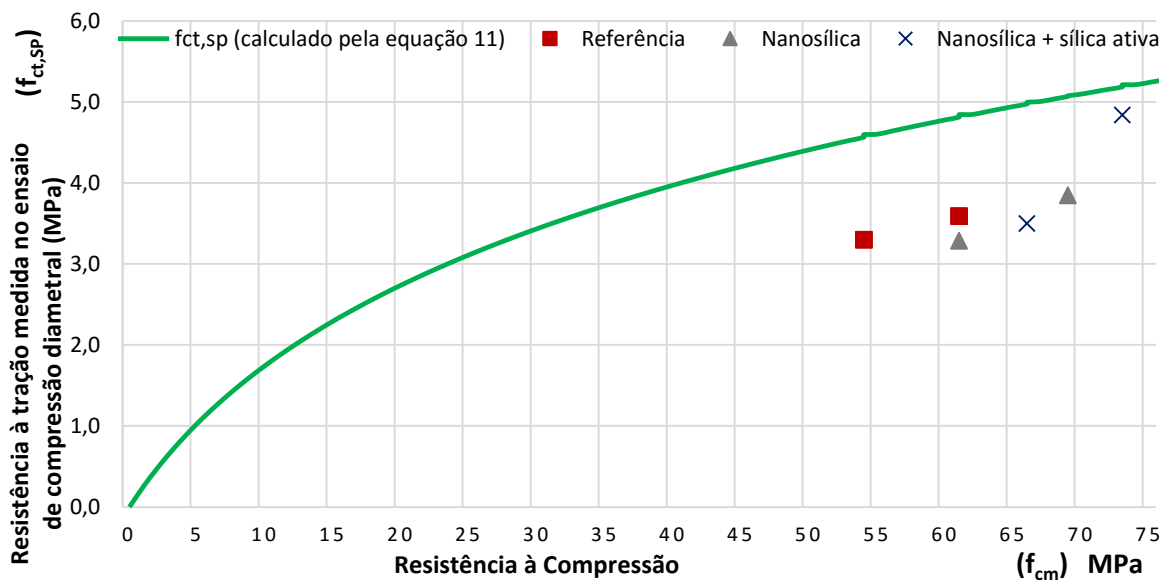
$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11f_{ck}) \text{ para concretos de classes até C55 à C90} \quad (\text{eq. 10})$$

Com base nestas equações da norma, foi estabelecida uma equação (eq. 11) para relacionar a resistência à compressão com a resistência à tração indireta para os traços de concreto desta pesquisa (C55 à C90).

$$f_{ct,sp} = \frac{2,12}{0,9} \ln(1 + 0,11f_{cm}) \quad (\text{eq. 11})$$

Onde:  $f_{cm}$  = resistência à compressão média.

Com base nesta equação, é possível comparar os valores obtidos de resistência à tração por compressão diametral com os prescritos pela norma através da equação 11, conforme ilustra a Figura 13.



**Figura 13** – Relação  $f_{ct,sp}$  versus  $f_{cm}$  - Comparação com equação prescrita pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014)

A análise dos resultados apresentados na Figura 13 mostra que os valores medidos de resistência à tração por compressão diametral de todos os traços analisados a 7 e 28 dias foram menores que os previstos pela equação da NBR 6118 (ABNT, 2014), ou seja, a norma superestima os valores da resistência à tração. Este fato sugere precaução na utilização da referida equação.

#### 5.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE INICIAL

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade tangente inicial são apresentados na Tabela 17.

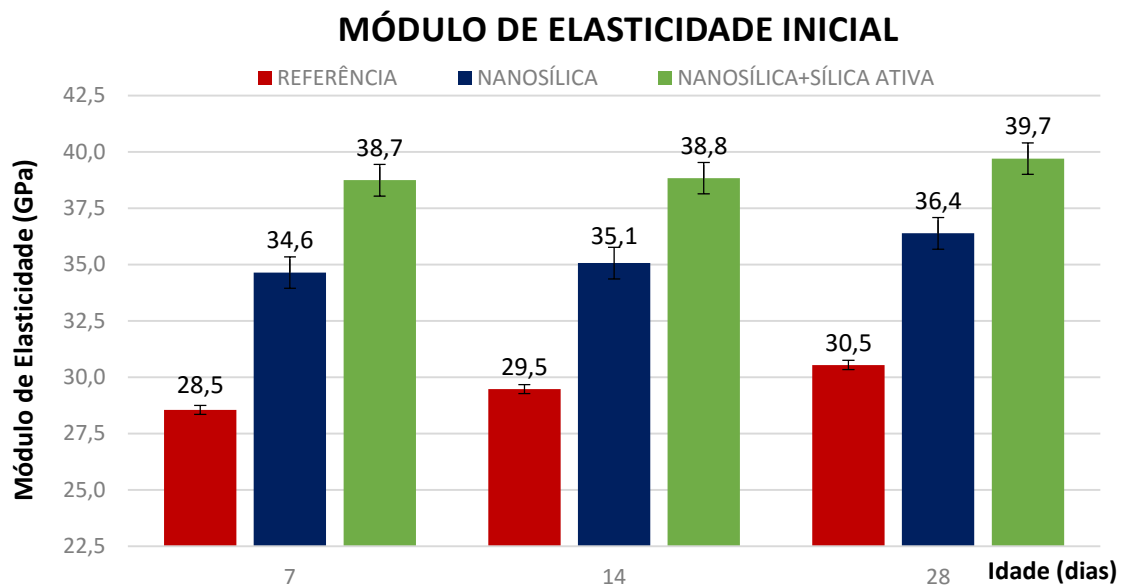
**Tabela 17** - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial

IDADE (DIAS)	MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE INICIAL (GPa)		
	REFERÊNCIA	NANOSÍLICA	NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA
7	28,2	35,6	37,8
	28,4	35,0	37,8
	29,0	33,3	40,5
14	29,3	36,1	38,2
	29,7	35,2	38,4
	29,4	34,0	40,0
28	30,2	37,3	39,5
	30,7	35,7	39,5
	30,7	36,2	40,2

A Tabela 18 apresenta os resultados médios do módulo de elasticidade tangente inicial dos corpos de prova de concreto em cada uma das idades com seus respectivos desvios-padrão; a Figura 14 ilustra esses resultados. Os valores dos desvios-padrão foram, para todos os concretos e em todas as idades menores que 2% da resistência medida na respectiva idade.

**Tabela 18** – Média e desvio-padrão dos resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade Inicial

MÓDULO DE ELASTICIDADE INICIAL (GPa)			
CONCRETO	IDADE = 7 DIAS	IDADE = 14 DIAS	IDADE = 28 DIAS
REFERÊNCIA	28,6 ± 0,3	29,5 ± 0,1	30,5 ± 0,2
NANOSÍLICA	34,6 ± 0,9	35,1 ± 0,7	36,4 ± 0,6
NANOSÍLICA + SÍLICA ATIVA	38,7 ± 1,2	38,8 ± 0,8	39,7 ± 0,3



**Figura 14** – Média e desvio-padrão dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade inicial (GPa)

Em relação ao módulo de elasticidade dos traços analisados, notou-se que o concreto com nanosílica estabilizada apresentou resultados superiores ao concreto de referência para todas as idades. Esse concreto apresentou um acréscimo no módulo de elasticidade de 21,3% aos 7 dias; 19,0% aos 14 dias e 19,2% aos 28 dias, em relação ao traço de referência.

Já o concreto contendo a mistura de nanosílica e Sílica Ativa apresentou resultados superiores aos demais traços para todas as idades. Esse concreto apresentou um acréscimo no módulo de elasticidade de 35,7% aos 7 dias; 31,8% aos 14 dias e 30,0% aos 28 dias em relação ao traço de referência. Já em comparação ao concreto contendo somente a nanosílica, o concreto com a mistura de nanosílica e Sílica Ativa obteve um acréscimo no módulo de elasticidade de 11,8% aos 7 dias; 10,7% aos 14 dias e 9,1% aos 28 dias.

Aos 7 dias, o traço com nanosílica estabilizada e o traço com a mistura das duas pozolanas apresentaram valores superiores ao do traço de referência. Proporcionalmente, o acréscimo de módulo de deformação entre os três traços foram mantidos desde os 7 dias.

Verificou-se que para o módulo de elasticidade inicial, as mesmas tendências apresentadas nos ensaios de tração por compressão diametral e compressão

simples se mantiveram, ou seja, o traço com a mistura das duas pozolanas apresentou melhor desempenho. A melhoria no módulo de elasticidade inicial quando da adição da nanosílica estabilizada confirmam os resultados obtidos por MAGHSOUDI *et al.* (2010).

O módulo de elasticidade do concreto é influenciado pelos materiais utilizados e por sua resistência mecânica. Para todos os traços, foram utilizados os mesmos agregados. Não verificou-se grandes variações dos resultados aos 28 dias entre os corpos de prova de mesmo traço. Entretanto, ao se comparar os resultados de traços diferentes, o traço com nanosílica e Sílica Ativa apresentou um resultado de cerca de 30% superior ao traço de referência.

A microestrutura da zona de transição (pasta-agregado) pode ter melhorado o módulo de elasticidade, visto que houve redução da deformação. As reações pozolânicas dos traços com a mistura das duas pozolanas melhoraram as propriedades do CAD, por atuarem como ponto de nucleação dos produtos de hidratação, permitindo melhor hidratação dos grãos de cimento e preenchendo os vazios do concreto (reduzindo a porosidade da matriz sólida). O pequeno tamanho das partículas da nanosílica contribui para o preenchimento dos vazios e também para a melhoria de diversas propriedades dos concretos. Conforme TECNOSIL (2013), a baixa densidade de defeitos nos cristais do gel CSH de origem da nanosílica possibilita a melhoria nas propriedades mecânicas. Em geral, o pequeno tamanho das partículas da nanosílica contribui para o preenchimento dos vazios e também para a melhoria de diversas propriedades dos concretos.

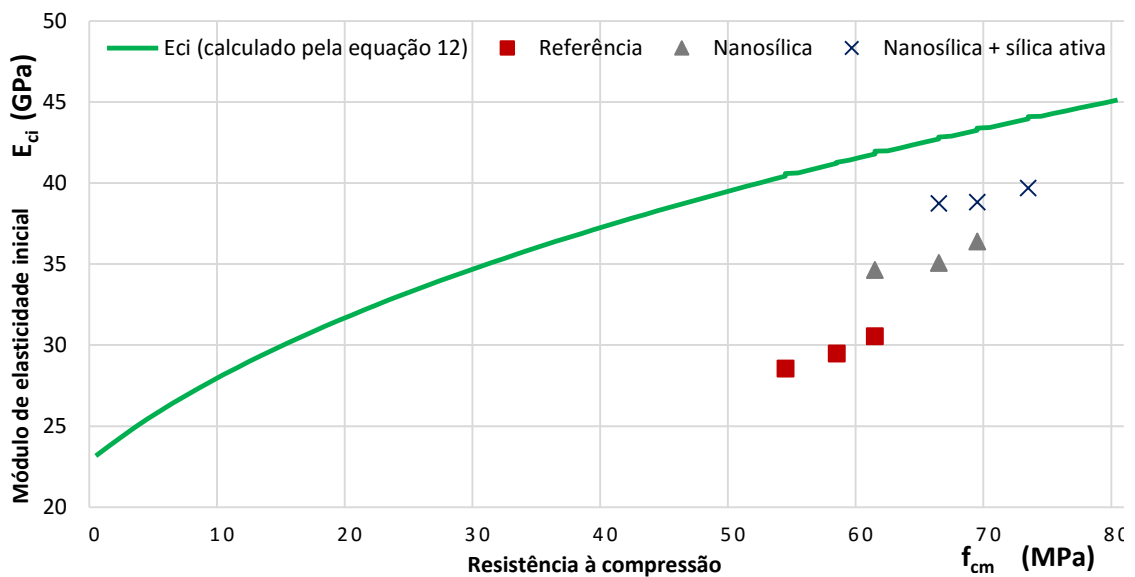
O aumento do módulo de elasticidade é importante do ponto de vista do projeto, quando busca-se delimitar as deformações das estruturas. Quanto maior o módulo de elasticidade do concreto, menores são as suas deformações.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) prescreve que, quando não forem realizados ensaios, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) pela equação 12:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} + 1,25\right)^{1/3} \quad (\text{eq. 12})$$

Onde:  $\alpha_E = 1$  para agregado graúdo de gnaise;  
 $f_{cm}$  = resistência média à compressão.

Com base nesta equação, é possível comparar os valores medidos do módulo de elasticidade tangente inicial com os prescritos pela Equação 12, conforme ilustra a Figura 15.



**Figura 15 -** Relação  $E_{ci} \times f_{cm}$  - Comparação com equação prescrita pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014)

A análise dos resultados mostrados na Fig. 15 revela que a equação prescrita pela NBR 6118 superestima os valores medidos para o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto de referência independentemente da idade. Este fato sugere cautela na utilização da referida equação. O mesmo fato ocorreu para os concretos contendo nanosílica e a combinação de nanosílica e Sílica Ativa.

## 5.5 VIABILIDADE ECONÔMICA

Os custos por metro cúbico dos respectivos traços são apresentados nas Tabelas 19 a 21.

**Tabela 19** - Custo do m<sup>3</sup> do traço de referência

<b>TRAÇO DE REFERÊNCIA</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>R\$/kg</b>	<b>CONSUMO (kg)</b>	<b>SUB-TOTAL (R\$)</b>
Cimento	0,475	503	238,93
Areia Natural	0,052	396	20,63
Areia Artificial	0,047	174	8,16
Brita 1	0,047	640	29,99
Brita 0	0,054	320	17,31
Brita 00	0,047	107	5,01
Água	0,003	206	0,55
Aditivo Plastificante	3,045	4,52	13,76
Total =			334,34

**Tabela 20** - Custo do m<sup>3</sup> do traço com adição de nanosílica estabilizada

<b>TRAÇO COM NANOSÍLICA ESTABILIZADA</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>R\$/kg</b>	<b>CONSUMO (kg)</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Cimento	0,475	424	201,40
Areia Natural	0,052	490	25,53
Areia Artificial	0,047	215	10,08
Brita 1	0,047	651	30,51
Brita 0	0,054	325	17,58
Brita 00	0,047	108	5,06
Água	0,003	174	0,46
Nanosílica Estabilizada	7,880	1,65	13,00
Aditivo Plastificante	3,045	3,82	11,63
Total =			315,26

Comparando o preço por metro cúbico, percebe-se que o traço com apenas a adição da nanosílica estabilizada apresenta uma economia de 5,7% em relação ao traço de referência. Já o traço com nanosílica estabilizada e Sílica Ativa apresenta acréscimo de custo de 3,2% . A Tabela 22 apresenta o comparativo de custo dos traços.

**Tabela 21** - Custo do m<sup>3</sup> do traço com adição de nanosílica estabilizada e Sílica Ativa

<b>TRAÇO COM NANOSÍLICA ESTABILIZADA + SÍLICA ATIVA</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>R\$/kg</b>	<b>CONSUMO (kg)</b>	<b>TOTAL (R\$)</b>
Cimento	0,475	409	194,28
Areia Natural	0,052	486	25,32
Areia Artificial	0,047	214	10,03
Brita 1	0,047	650	30,46
Brita 0	0,054	325	17,58
Brita 00	0,047	108	5,06
Água	0,003	160	0,43
Sílica Ativa em Suspensão	1,300	28,63	37,22
Nanosílica Estabilizada	7,880	1,65	13,00
Aditivo Plastificante	3,045	3,82	11,63
Total =			345,01

**Tabela 22** - Comparativo dos custos por m<sup>3</sup> dos três traços analisados

<b>TRAÇO</b>	<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	<b>ECONOMIA</b>
Referência	334,34	-
Nanosílica Estabilizada	315,26	5,7%
Nanosílica Estabilizada + Sílica Ativa	345,01	-3,2%

Para o cálculo da seção transversal do pilar, considerou-se uma carga concentrada de  $P = 7500$  kN, um comprimento de  $L = 3,00$  m, e a resistência à compressão dos respectivos traços referentes aos resultados dos ensaios de resistência à compressão a 28 dias. Determinados estes parâmetros, foram obtidas as seções transversais, volumes de concreto e respectivos custos, conforme demonstrado na Tabela 23.

**Tabela 23** - Comparativo das seções transversais, volume, custo e economia dos respectivos traços

<b>TRAÇO</b>	<b>SEÇÃO TRANSVERSAL (cm)</b>	<b>VOLUME (m<sup>3</sup>)</b>	<b>CUSTO (R\$)</b>	<b>ECONOMIA (%)</b>
Referência	38 x 38	0,433	144,84	-
Nanosílica Estabilizada	36 x 36	0,388	122,57	15,4
Nanosílica Estabilizada + Sílica Ativa	35 x 35	0,368	126,79	12,5

Dessa forma, conclui-se que a adição de nanosílica estabilizada é vantajosa economicamente, pois além do concreto apresentar menor custo por metro cúbico

quando comparado ao traço de referência, também torna possível o dimensionamento de estruturas de concreto mais esbeltas devido à melhoria nas propriedades mecânicas deste, gerando uma economia também no consumo dos materiais utilizados. Apesar do traço com a mistura de nanosílica estabilizada e Sílica Ativa apresentar um acréscimo de 3,2% no custo por metro cúbico, este traço de concreto é economicamente vantajoso por tornar possível o dimensionamento de uma estrutura esbelta com uma economia de 12,5% quando do cálculo do volume total de concreto, além de apresentar melhor desempenho mecânico.

## **6. CONCLUSÕES**

### **6.1 CONCLUSÃO GERAL**

A adição de nanosílica estabilizada melhorou as propriedades do CAD no estado fresco e no estado endurecido.

Em relação ao estado fresco, notou-se que o concreto apresentou melhor trabalhabilidade, coesão e compacidade.

Em relação ao estado endurecido, verificou-se que a adição de nanosílica estabilizada melhorou as propriedades mecânicas do CAD analisadas (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade inicial).

A adição de nanosílica estabilizada mostrou-se vantajosa economicamente, visto que apresenta um menor custo/m<sup>3</sup> de concreto, reduz o consumo de água e de cimento, além de possibilitar o dimensionamento de peças mais esbeltas devido às melhorias nas propriedades mecânicas do traço ao qual foi adicionada.

A mistura das duas pozolanas também reduz o consumo de água e de cimento, sendo vantajosa economicamente pois, mesmo apresentando um pequeno acréscimo no custo/m<sup>3</sup> de concreto, foi possível dimensionar uma estrutura mais esbelta devido às melhorias nas propriedades mecânicas. Desta forma, o volume de concreto e o custo da estrutura será menor, sendo o custo x benefício desse concreto vantajoso.

### **6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS**

Em relação às propriedades do concreto no estado fresco, foi possível concluir que:

- A adição da nanosílica estabilizada em aditivo superplastificante melhorou a trabalhabilidade e a compacidade dos concretos com nanosílica estabilizada em relação ao concreto de referência, resultando em maior abatimento do CAD sem perder coesão e sem ocorrer segregação de seus materiais constituintes. Como consequência, os traços em que foram adicionados nanosílica estabilizada apresentaram melhores propriedades mecânicas. Foi

possível reduzir o consumo de água e cimento, aumentar o abatimento do tronco de cone.

Em relação às propriedades do concreto no estado endurecido, foi possível concluir que:

a) Baseado nos experimentos realizados com os corpos-de-prova do CAD referentes ao traço com adição de nanosílica estabilizada:

- A partir da adição de nanosílica foi possível reduzir o consumo de cimento para a produção do CAD em 15,7% - de 503 kg/m<sup>3</sup> para 404 kg/m<sup>3</sup> - e ainda obter propriedades mecânicas superiores às do concreto de referência;
- Foi possível reduzir o consumo de água para a produção de concreto em 15,5% - de 206 kg/m<sup>3</sup> para 174 kg/m<sup>3</sup>;
- O fato da nanosílica estar incorporada em um aditivo superplastificantes à base de policarboxilato melhorou sua aplicação e eficácia nos concretos, devido à sua maior facilidade de homogeneização;
- O traço elaborado apenas com adição da nanosílica estabilizada obteve, aos 28 dias, um acréscimo de resistência à compressão simples em 11,9%; acréscimo de 7,1% na resistência à tração e 19,2% no módulo de elasticidade em relação ao concreto de referência;
- A inclusão da nanosilica e/ou da nanosilica + sílica ativa não alterou a taxa de crescimento da resistência à compressão até a idade de 28 dias em relação ao concreto de referência. Verificou-se também que a expressão preconizada pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para avaliar a resistência à compressão de concretos em idades inferiores a 28 dias teve boa correlação com os resultados medidos em todos concretos produzidos inclusive aqueles com nanosílica e nanosílica mais sílica ativa.
- As expressões prescritas pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para o cálculo do módulo de elasticidade tangente inicial e da resistência à tração medida no ensaio de compressão diametral em função da resistência à compressão superestimaram os valores medidos para todos os concretos produzidos. Estes resultados sugerem cautela ao se utilizar as referidas expressões.

b) Quanto à adição da mistura de nanosílica estabilizada e Sílica Ativa no CAD, conclui-se que:

- Foi possível reduzir o consumo de cimento em 18,8% - de 503 kg/m<sup>3</sup> para 409 kg/m<sup>3</sup>. Para cada quilo de Sílica Ativa adicionada foi possível a redução de 6,6 kg de cimento, e ainda assim, obter melhores propriedades mecânicas no concreto;
- Foi possível reduzir o consumo de água para a produção de concreto em 15,5% - de 206 kg/m<sup>3</sup> para 174 kg/m<sup>3</sup>;
- O traço elaborado com adição da nanosílica estabilizada e Sílica Ativa obteve, aos 28 dias, um acréscimo de resistência à compressão simples de 19,3%; acréscimo de 34,7% na resistência à tração e 30,0% no módulo de elasticidade em relação ao concreto de referência;
- Os resultados sugerem que ao se adicionar Sílica Ativa e nanosílica, as reações pozolânicas geradas formam o gel CSH adicional que aumenta significativamente a resistência mecânica;
- Houve um efeito sinérgico positivo entre as duas adições, visto que a combinação destas adições melhorou as propriedades mecânicas do concreto para todas as idades avaliadas em relação ao concreto com apenas adição de nanosílica estabilizada;
- A sinergia dos materiais ampliou o efeito químico de cada adição, que demonstrou ser complementar, ocorrendo em estágios de endurecimento diferenciados. A nanosílica apresentou uma ação inicial rápida devido ao menor tamanho de suas partículas;
- Os resultados sugerem que a mistura de partículas de tamanho micro e nanométrico melhorou o fator de empacotamento do concreto, podendo contribuir para a diminuição da porosidade e melhoria das propriedades mecânicas.

Em relação à viabilidade econômica da adição de nanosílica estabilizada, foi possível concluir que:

- A adição de nanosílica estabilizada é vantajosa, tanto quando utilizada só ou conjuntamente com a Sílica Ativa, visto que obteve-se ganho econômico no

dimensionamento de peças mais esbeltas devido à melhoria nas propriedades mecânicas desses concretos.

Dessa forma, conclui-se que a adição de nanosílica estabilizada permite redução no consumo de cimento para a produção de CAD, melhora suas propriedades mecânicas, permitindo ganho econômico quando do projeto de peças de concreto com menores dimensões estruturas (por exigir menores volume de concreto e menor consumo de materiais).

A mistura da nanosílica com a Sílica Ativa mostrou-se vantajosa, uma vez que essa mistura melhora as propriedades mecânicas do concreto em relação ao concreto com apenas adição de nanosílica estabilizada. A ação complementar destas adições é uma alternativa para a produção de concretos com propriedades mecânicas superiores aos concretos de alto desempenho convencionais, com menos consumo de cimento e redução de impactos ambientais. A melhoria das propriedades mecânicas permite aos engenheiros dimensionarem peças mais esbeltas, reduzindo o consumo de materiais nas estruturas de concreto, gerando economia.

### **6.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

A seguir apresentam-se algumas propostas para trabalhos futuros, que podem ser desenvolvidos para complementar e dar continuidade à presente pesquisa, bem como ampliar e refinar o entendimento sobre o desempenho de CAD com adições de nanosílica estabilizada:

- Realizar ensaios de durabilidade no CAD com adição de nanosílica estabilizada;
- Realizar ensaios de mecânica da fratura no CAD com adições de nanosílica estabilizada;
- Realizar o estudo com outros tipos de agregados, tais como basaltos, granitos, entre outros;
- Realizar o estudo da microestrutura do CAD com adição de nanosílica estabilizada por meio de microscopia ;
- Realizar estudos de porosidade do CAD contendo nanosílica estabilizada.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR NM 67 – **Associação Brasileira de Normas Técnicas – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ABNT NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR 9479 - **Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR 5733 - **Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

ABNT NBR 5738 – **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR 5739 – **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR 6118 - **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT NBR 7211 - **Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR 7222 - **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

ABNT NBR 8522 – **Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.

ABNT NBR 12142 – **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 12653 - **Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 12655 - **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 15900 - **Água para amassamento do concreto – Parte 1.** Rio de Janeiro, 2009.

ADRIOLO, F. R., **Construções de concreto: manual de práticas para controle e execução** - São Paulo: Pini, 1984.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho.** São Paulo: Editora Pini, 2000, 667p.

AİTCIN, P. C; MEHTA, P. K. Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, Vol. 87, nº 2. March-April, 1990 p. 103-107.

ACI – American Concrete Institute. Guide to durable concrete: Reported by ACI Committee 201. **ACI Materials Journal**, v.88, n.5, p. 544-582, 1991.

BACHE, H.H. Densified cement/ultra-fine particle-based materials. Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, 1981, Canada, jun/1981, 12p. *apud* in: AİTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Editora Pini, 2000, 667p.

BASTOS, R. M. P. **Nanotecnologia: uma revolução no desenvolvimento de novos produtos**, 2006. 35 f. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2006.

BELKOWITZ, J. S.; BELKOWITZ, W. B.; NAWROCKI, K.; FISHER, F. T., Impact of nanosilica size and surface area on concrete properties. **ACI Materials Journal**, May-June, 2015, v. 112, n. 3, p. 419-428, 2015.

BOLHASSANI, M.; SAMANI, M., Effect of type, size, and dosage of nanosilica and microsilica on properties of cement paste and mortar. **ACI Materials Journal**, March-April, 2015, v.112, n. 2, p. 259 -266, 2015.

CARVALHO, R. C., FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003**. São Carlos: Ed. UFSCar, 2003, 368p.

CASTRO, P.; CASTILLO, R. M.; CARPIO, J.J.; GENESCÁ, J.; HELENE, P.; LÓPEZ, W.; PAZINI, E. J.; SANJUÁN, M. A.; **Corrosión em estruturas de concreto armado – Teoria, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones**. Instituto Mexicano Del Cemento y del Concreto, A. C., México, 1998.

CINCOTTO, M. A. **Reações de Hidratação e Pozolânicas**. In: ISAIA, G. C.; **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ª ed. Vol. 1 - São Paulo: Editora Ibracon, 2011. p. 381-413.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWSKI, M. P.; OLIVEIRA, A. P. M. **Estudo de concretos com adição de sílica ativa frente ao ataque de agentes agressivos para emprego em pisos especiais**. In: International Congress on High Performance Concrete, 1996, Florianópolis, 1996.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ª ed. Vol. 1 - São Paulo: Editora Ibracon, 2011. p. 261-309.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes da rocha: Uma introdução**. Londres: Editora: Longmans, Green and Co. Ltd., 1966, 557p.

FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. Disponível em: [www.fao.org.br](http://www.fao.org.br). Acesso em: 05 de maio de 2011.

FASIHI, A.; SADRMOHTAZI, A. Preliminary study on the mechanical behavior of mortar containing waste polypropylene fiber and nano-SiO<sub>2</sub>. **Sustainable Construction Materials and Technologies**. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, v.1, 2010, Ancona, **Anais**: Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 209-216.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 2008.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA; **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v.2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, v. 39, n.5, p. 1001-1013, 1997.

GHASEMI, A. M. R.; PARHIZKAR, T.; RAMEZANIANPOUR, A.A. Influence of colloidal nano-SiO<sub>2</sub> addition as silica fume replacement material on properties of concrete. **Sustainable Construction Materials and Technologies**. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, Proceedings of Special Technical Sessions, 2010, Ancona, **Anais**: Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 23-30.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H.; Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ª ed. Vol. 1 - São Paulo: Editora Ibracon, 2011. p. 261-309.

HELENE, P. e TERZIAN P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Ed. Pini, São Paulo, 1992, 349 p.

IBRAHIM, RAHEL K.; HAMID, R.; TAHA, M. R., Strength and microstructure of mortar containing nanosilica at high temperature. **ACI Materials Journal**, v.3, March-April, 2014, p. 163-170.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ª ed. Vol. 1 - São Paulo: Editora Ibracon, 2011.

KHAZADI, M.; TADAYON, M.; SEPEHRI, H.; SEPEHRI, M. Influence of nano-silica particles on mechanical properties and permeability of concrete. **Sustainable Construction Materials and Technologies**. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, 1., 2010, Ancona, **Anais**: Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 193-199.

KULAKOWSKI, M. P.; DAL MOLIN, D. C. C. **Estudo do teor de cloretos retido em argamassa com adição de Sílica Ativa para reparos estruturais**. Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto, 36, 1994, Porto Alegre. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1994. v.1. p. 145-155.

KULAKOWSKI, M. P.; VIEIRA, F. M. P.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C.F. **Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de Sílica**

**Ativa.** Workshop Durabilidade das Construções, 1997, São Leopoldo. **Anais.** São Leopoldo: UNISINOS - ANTAC, 1997. v. 1. p. 107-116.

LI, G. Y. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Research**, v. 43, 2004, Science Direct, nov/2003, p. 1043-1049.

MADANI, H.; BAGHERI, A.; PARHIZKAR, T. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1563-1570, dec/2012.

MAGHSOUDI, A. A.; MAGHSOUDI, M.; NOORI, M. Effect of nano particles on SCC. **Sustainable Construction Materials and Technologies.** In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, Proceedings of Special Technical Sessions, 2010, Ancona, **Anais:** Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 41-53.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials.** Australia: Editora Gordon and Breach, 1996, 191p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 3ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2008, 660p.

MEHTA, P., K.; AİTCIN, P. C. Principles underlying production for high strength performance concrete. **Cement, Concrete & Aggregates.** V.12, n.2, 1990. p. 70-78.

MC BAUCHEMIE. Disponível em: [www.mc-bauchemie.com.br](http://www.mc-bauchemie.com.br). Acesso em: 06 de dezembro de 2013.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete.** 4ª Ed. Pitman, Londres. ISBN 0-582-23070-5, 1995, 855p.

NEVILLE, A. M. The question of concrete durability: we can make good concrete today. **Concrete International**, V. 22, n. 7, p. 21–26, jul/2000.

NILI, M.; EHSANI, A.; SHABANI, K. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> and microsilica on concrete performance. **Sustainable Construction Materials and Technologies.** In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, Proceedings of Special Technical Sessions, 2010, Ancona, **Anais:** Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 67-73.

PROJECT ON EMERGING NANOTECHNOLOGIES. Disponível em: [www.nanotechproject.org](http://www.nanotechproject.org). Acesso em: 23 de novembro de 2013.

QUERCIA, G.; HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 2, p. 73-74, out/2011.

RHODIA – Salvay Group. Disponível em: [www.rhodia.com.br](http://www.rhodia.com.br). Acesso em: 23 de novembro de 2013.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2002, 102p.

SADRMOMTAZI, A.; KHEIRKHAH, F.; FASIHI, A.; HAGHI, A. K. Properties of rice husk ash concrete containing nano-SiO<sub>2</sub>. **Sustainable Construction Materials and Technologies**. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, 1. 2010, Ancona. **Anais**. Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 201-208.

SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D.; LOTHENBACH, B. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p.1244-1256, out/2010.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese de doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, USP, São Carlos – SP, 2006.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 1998. 257p

STUDART, A.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. ; VENDRASCO, S. L. **Efeito das características da Sílica Ativa no processamento e propriedades finais de concretos refratários auto-escoantes de ultra-baixo teor de cimento**. Cerâmica Industrial, SÃO PAULO, v. 3, n.3, p. 42-46, 1998.

TECNOSIL – Sílica ativa. Disponível em: [www.tecnosilbr.com.br](http://www.tecnosilbr.com.br). Acesso em: 20 de novembro de 2013.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e Ultra-alto desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ª ed. Vol. 2 - São Paulo: Editora Ibracon, 2011. p. 1283-1325.

WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica**. Porto Alegre, 1991. 145p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

YAZDANBAKHSH, A.; GRASLEY, Z. The theoretical maximum achievable dispersion of nano-inclusions in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 798-804, dec/2012.

VIEIRA, F. M.P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de Sílica Ativa**. Teste para obtenção do título de doutor em Engenharia, Programa de Pós Graduação Engenharia Civil UFRGS, Porto Alegre, 2003.

XIAO, H. G.; LI, H.; OU, J.P. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. **Cement and Concrete Research**. V. 43, 2004, Science Direct, nov/2003, p. 435–438.