

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

**ANÁLISE MACROSCÓPICA DO EFEITO DA ADIÇÃO DE
NANOCERÂMICA AO CONCRETO**

Rodrigo Perfeito Marques de Castro

**Belo Horizonte
Fevereiro, 2009**

RODRIGO PERFEITO MARQUES DE CASTRO

**ANÁLISE MACROSCÓPICA DO EFEITO DA ADIÇÃO DE
NANOCERÂMICA AO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Linha de pesquisa: Materiais cimentícios.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Guerra Gumieri

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Ferreira Ávila

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Fevereiro, 2009

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

**ANÁLISE MACROSCÓPICA DO EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA AO
CONCRETO**

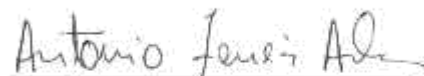
Rodrigo Perfeito Marques de Castro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

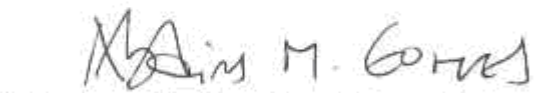
Comissão Examinadora:




Prof. Dra. Adriana Guerra Gumieri
DEMC / UFMG – (Orientadora)



Prof. Dr. Antônio Ferreira Ávila
DEMEC / UFMG – (Co-Orientador)



Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes
DEMC / UFMG



Prof. Dr. Eduardo Chahud
FEA / FUMEC

Belo Horizonte, 27 de Fevereiro de 2009.

Dedico este trabalho ao meu amado filho Caio,
à minha mãe, ao meu pai (In Memoriam),
aos meus irmãos, às minhas irmãs e
aos meus orientadores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Profa Adriana Gumieri, orientadora deste trabalho pelas longas e produtivas discussões técnicas.

Ao meu paciente co-orientador Prof. Antônio Ávila, que muito me acolheu em sua sala de trabalho.

A todos os professores do DEMC por todo o conhecimento compartilhado na pós-graduação.

Ao amigo Cândido, chefe de laboratório da Construtora Andrade Gutierrez S.A., pelas dicas e incentivo nesta pesquisa e pela execução dos ensaios durante toda a pesquisa.

A minha família, que sempre me apoiou e incentivou em qualquer árdua empreitada, em especial à minha irmã Cláudia que sempre acredita nas infinitas possibilidades que o SENHOR tem para todos nós.

Ao meu amado filho Caio, por ser fonte inspiradora de todos os meus passos.

Ao meu pai, que mesmo estando ausente, sempre manteve sua sabedoria ao meu lado.

À minha mãe, por preocupar com minha educação e não me deixar fraquejar em nenhum momento.

Aos amigos de trilha e chuteira, pelos relaxantes finais de semana de moto e futebol.

Aos amigos da Construtora Andrade Gutierrez S.A. que permitiram este sonho tornar-se realidade.

Aos colaboradores do Laboratório de Concreto da Construtora Andrade Gutierrez S.A., em especial aos laboratoristas Tim, Ronaldo, Ricardo, Raimundo e Zé Dilson, pelas concretagens e extrema paciência.

E por fim, às empresas que doaram materiais e equipamentos para a realização deste recompensador trabalho experimental desta dissertação, especialmente à Construtora Andrade Gutierrez S.A., pela possibilidade de realização de todos os ensaios em seus laboratórios das obras Sistema Rio das Velhas e Centro Administrativo de Minas Gerais.

“O iluminado sofre repressão veemente do medíocre.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
LISTA DE UNIDADES	xvi
LISTA DE EQUAÇÕES	xvii
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	22
3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	22
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
4.1. Definição de argila	23
4.2. Aplicação das argilas	24
4.3. Nanotecnologia e o concreto	24
4.4. Composição da nanocerâmica de montmorillonita	25
4.5. Utilização da nanocerâmica no concreto	27
4.6. Vantagens da utilização de nanopartículas	30
4.7. Últimos avanços sobre a natureza da coesão do C-S-H	33
4.8. Efeitos de aditivos químicos na nanoestrutura do C-S-H	34

4.9. Histórico dos materiais componentes do concreto	34
4.9.1. Pozolanas	35
4.9.1.1. Definição	35
4.9.1.2. Produção de cimento com base em pozolanas	36
4.9.1.3. Formação de C-S-H	36
4.9.2. A nanociência e a nanotecnologia do cimento	37
4.9.3. Definição e estrutura do concreto	38
4.9.3.1. Agregado	39
4.9.3.2. Pasta de cimento	39
4.9.3.3. Água	41
4.9.3.4. Zona de transição	41
5. MATERIAIS E METODOLOGIA	43
5.1. Seleção dos materiais	43
5.1.1. Nanocerâmica	43
5.1.2. Cimento	44
5.1.3. Agregado miúdo	45
5.1.4. Agregado graúdo	45
5.1.5. Aditivo	45
5.2. Metodologia	46
5.2.1. Determinação da atividade pozolânica	46
5.2.2. Caracterização dos agregados utilizados na pesquisa	47
5.2.2.1. Agregado miúdo	47
5.2.2.2. Agregado graúdo	47
5.2.3. Dosagem dos traços de argamassa	48

5.2.4. Moldagem e cura dos corpos de prova de argamassa	49
5.2.5. Dosagem dos traços de concreto	50
5.2.6. Moldagem e cura dos corpos de prova de concreto	51
5.2.7. Ensaio físicos nos concretos endurecidos	52
5.2.7.1. Cálculo do fluxo de água passante	52
5.2.7.2. Compressão axial	56
5.2.7.3. Tração por compressão diametral	59
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
6.1. Determinação de atividade pozolânica – método químico	62
6.2. Caracterização dos agregados	63
6.2.1. Agregado miúdo	63
6.2.2. Agregado graúdo	64
6.2.3. Argamassa	65
6.3. Trabalhabilidade do concreto no estado fresco	69
6.4. Ensaio realizados nos concretos endurecidos	70
6.4.1. Cálculo do fluxo de água passante	70
6.4.2. Resistência à compressão axial	73
6.4.3. Resistência à tração por compressão diametral	80
7. CONCLUSÕES	87
8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	90
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	98
Anexo A – Modelo de ruptura do CP na compressão axial aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,45 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.	98

Anexo B – Modelo de ruptura do CP na compressão axial aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,50 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.	98
Anexo C – Modelo de ruptura do CP na compressão axial aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,55 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.	99
Anexo D – Modelo de ruptura do CP na tração por compressão diametral aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,45, 0,50 e 0,55 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.	99
Anexo E – Amostras de concreto utilizadas para ensaio de fluxo de água passante aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,45 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.	100
Anexo F – Amostras de concreto utilizadas para ensaio de fluxo de água passante aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,50 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.	100
Anexo G – Amostras de concreto utilizadas para ensaio de fluxo de água passante aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,55 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Uma amostra de Montmorilonita	26
Figura 4.2: Estrutura dos C-S-H em diferentes escalas de observação	28
Figura 4.3: Modelo de Feldman e Sereba	29
Figura 4.4: Tipos de ligação entre as folhas de C-S-H	30
Figura 4.5: Exemplos de monumentos que já utilizavam cimento	35
Figura 4.6. Formação de etringita	40
Figura 4.7. Cristal de etringita	42
Figura 5.1. Mistura de argamassa para moldagem	49
Figura 5.2. Corpos de prova de argamassa	49
Figura 5.3. Moldagem dos corpos de prova de concreto	51
Figura 5.4. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	52
Figura 5.5. Corpo de prova para determinação da permeabilidade	53
Figura 5.6. Permeabilímetro preso à pastilha por dois alicates	54
Figura 5.7. Pêndulo enroscado pronto para a água ser adicionada	54
Figura 5.8. Manômetro indicando pressão no sistema	55
Figura 5.9. Disco de neoprene	56
Figura 5.10. Regularização de face com disco de neoprene	57
Figura 5.11. Prensa digital	57
Figura 5.12. Disposição do corpo de prova	59
Figura 5.13. Corpo de prova ajustado na prensa	60
Figura 5.14. Corpo de prova rompido por tração diametral	60
Figura 6.1. Resultados dos ensaios de atividade pozolânica	62

Figura 6.2. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 3 dias	67
Figura 6.3. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 7 dias	67
Figura 6.4. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias	68
Figura 6.5. Curva de Abrams - Compressão axial aos 3 dias	76
Figura 6.6. Curva de Abrams - Compressão axial aos 7 dias	77
Figura 6.7. Curva de Abrams - Compressão axial aos 28 dias	77
Figura 6.8. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias	78
Figura 6.9. Resultados dos ensaios de tração aos 3 dias	83
Figura 6.10. Resultados dos ensaios de tração aos 7 dias	84
Figura 6.11. Resultados dos ensaios de tração aos 28 dias	84
Figura 6.12. Resultados dos ensaios de tração aos 28 dias	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Características da nanocerâmica	43
Tabela 5.2: Características do cimento CPV – ARI	44
Tabela 5.3: Características do aditivo	45
Tabela 5.4: Traços de argamassa	48
Tabela 5.5: Traços de concreto com nanocerâmica	51
Tabela 5.6: Quantidades de ensaios realizados para permeabilidade	55
Tabela 5.7: Quantidades de ensaios realizados para compressão axial	58
Tabela 5.8: Quantidades de ensaios realizados para tração diametral	61
Tabela 6.1: Características do agregado miúdo	63
Tabela 6.2: Características do agregado graúdo	64
Tabela 6.3: Resultado da compressão axial das argamassas – 3 dias	65
Tabela 6.4: Resultado da compressão axial das argamassas – 7 dias	66
Tabela 6.5: Resultado da compressão axial das argamassas – 28 dias	66
Tabela 6.6: Traços utilizados nos concretos	69
Tabela 6.7: Resultados dos ensaios de permeabilidade	70
Tabela 6.8: Resultados dos ensaios de permeabilidade	71
Tabela 6.9: Resultados dos ensaios de permeabilidade	72
Tabela 6.10: Resultados da compressão axial dos concretos – 3 dias	73
Tabela 6.11: Resultados da compressão axial dos concretos – 7 dias	74
Tabela 6.12: Resultados da compressão axial dos concretos – 28 dias	74
Tabela 6.13: Resistência média à compressão axial dos concretos	75

Tabela 6.14: Análise estatística dos resultados de compressão axial	79
Tabela 6.15: Resultados da tração dos concretos – 3 dias	80
Tabela 6.16: Resultados da tração dos concretos – 7 dias	81
Tabela 6.17: Resultados da tração dos concretos – 28 dias	81
Tabela 6.18: Resistência média à tração dos concretos	82
Tabela 6.19: Análise estatística dos resultados de tração	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	Relação Água/Cimento
ACI	American Concrete Institute
AFM	Atomic Force Microscope
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ANOVA	On-Way Analysis of Variance
ARI	Alta Resistência Inicial
ASE	Área Superficial Específica
ASTM	American Society for Testing and Materials
2CaSO ₄ .H ₂ O	Sulfato de Cálcio Hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CBC	Congresso Brasileiro de Cimento
CC	Concreto convencional
CH	Cristais de Hidróxido de Cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONSAG	Construtora Andrade Gutierrez S.A.
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratado
DEMC	Departamento de Engenharia de Materiais e Construção
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
DNS	Diferença não significativa
DS	Diferença significativa
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
f_c	Resistência à compressão axial
$f_{t,D}$	Resistência à tração por compressão diametral
GDL	Grau de liberdade
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IRC	Institut de Recherche em Construction
MPa	Mega Pascal
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQ	Médias quadradas
NBR	Norma Brasileira Registrada
NBR NM	Norma MERCOSUL
OH	Hidróxido
q	Fluxo passante
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
SiO ₂	Dióxido de Silício

Si-O-Si	Siloxano
Si-O-Ca-O-Si	Ligação Cálcio - Silício
SiO ₄	Sílica
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
Slump	Abatimento do tronco de cone de Abrams
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE UNIDADES

#	mesh (malha de peneira)
μm	micrometro
μ	mícron
Å	Ångström
kN	quiloNewtons
kgf/cm^2	quilograma força por centímetro quadrado
g/cm^3	gramas por centímetros cúbicos
Mega	1×10^6
Micro	1×10^{-6}
Mili	1×10^{-3}
Nano	1×10^{-9}
MPa	mega Pascal
MPa/s	mega Pascal por segundo
mmol	milimol
mm	milímetros
min	minutos
m^2/g	metros quadrados por grama
nm	nanômetro
rpm	Rotações por minuto
N	Newtons
t	tonelada
L	Altura do corpo de prova (mm)
d	Diâmetro do corpo de prova (mm)
F	Força máxima alcançada (kN ou N)
G1	Leitura no micrômetro (Inicial)
G2	Leitura no micrômetro (Final)
t	Intervalo de tempo entre leituras
π	PI (Constante)

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1: Equação da precipitação de silicatos de cálcio hidratados	35
Equação 5.1: Equação do fluxo passante	55
Equação 5.2: Equação da resistência à compressão axial	58
Equação 5.3: Equação da resistência à tração por compressão diametral	61

RESUMO

A nanociência e a nanotecnologia são áreas que apresentam grande potencial para o desenvolvimento de novos materiais e novas aplicações. Recentemente inúmeros pesquisadores estão utilizando o conceito de nanotecnologia para criação de compósitos de cimento Portland, na qual se busca a compreensão da hidratação das partículas de cimento e a adição de partículas nanométricas (nm), seja nanosílica ou nanofibras. A maioria dos avanços no desempenho dos materiais cimentícios conseguidos nas últimas décadas foram realizados através da otimização dos empacotamentos granulares e, sobretudo, pela redução da porosidade capilar com a utilização racional de aditivos químicos cada vez mais eficientes. Neste estudo foi investigado o efeito da adição de nanopartícula cerâmica de montmorillonita ao concreto de cimento Portland. Para tal foram escolhidas duas condições de trabalho, relação água/cimento (0,45 / 0,50 / 0,55), e as seguintes quantidades de nanocerâmica 0%, 2% e 4%. Foram analisados os seguintes parâmetros: trabalhabilidade, fluxo de água passante, resistência à compressão e tração. A adição da nanocerâmica causou uma redução na trabalhabilidade, o que já era esperado. Os resultados de compressão axial para 28 dias mostraram uma melhora de 11% e 14% dependendo da relação água/cimento. Já no caso da resistência à tração por compressão diametral, a melhor opção foi a de 4% de nanocerâmica. Neste caso, a melhora foi de 6% para a relação água/cimento igual a 0,55 e de 18% e 21% para 0,45 e 0,50, respectivamente. A adição de nanocerâmica parece ser uma ótima opção para preparação de concretos de cimento Portland. A nanocerâmica apresentou atividade pozolânica.

Palavras-chave: construção civil, nanotecnologia, cimento, concretos, adições minerais.

ABSTRACT

Nanoscience and nanotechnology are areas that have a great potential for new materials and new applications development. Recently many researches are using the nanotechnology concept to create Portland concrete composites, where they look for the comprehension of the hydration of cement particles and addition of nanometric (nm) particles, either nano-silica or nanofibres. In the last decades, the majority of the progress in the performance of cementitious materials had been carried through the optimization of the grain stacking and, over all, through the reduction of the capillary porosity with the rational use of chemical additives more and more efficient. This study investigated the effect of the addition of nanoparticles of ceramic montmorillonite at Portland cement concrete. For such, two working conditions were chosen, ratio water / cement (0.45 / 0.50 / 0.55), and the following quantities of nanoceramic 0%, 2% and 4%. We analyzed the following parameters: workability, flux of the water flowing, compressive strength and tensile strength. The addition of nanoceramic caused a reduction in workability, which was expected. The results of axial compression for 28 days showed an improvement of 11% and 14% depending on the ratio water / cement. In the case of tensile strength by diametrical compression, the best option was to 4% of nanoceramic. In this case, the improvement was 6% for the ratio water / cement equal to 0.55 and 18% and 21% for 0.45 and 0.50, respectively. The addition of nanoceramic seems to be an excellent option for the preparation of Portland cement concrete. The nanoceramic presented pozzolanic activity.

Key-words: civil construction, nanotechnology, cement, concrete, mineral admixtures.

1. INTRODUÇÃO

A palavra “Nanotecnologia” foi utilizada pela primeira vez pelo professor Norio Taniguchi em 1974 para descrever tecnologias que permitam a construção de materiais a uma escala de 1 nanometro. Nos anos 80, o conceito de Nanotecnologia foi popularizado por Eric Drexler através do livro “Engines of Creation”. Este livro, embora contendo algumas especulações próximas da ficção científica baseou-se no trabalho sério desenvolvido por Drexler enquanto cientista (DREXLER, 1982).

A nanotecnologia está associada a diversas áreas (como a medicina, eletrônica, ciência da computação, física, química, biologia e engenharia dos materiais) de pesquisa e produção na escala nano (escala atômica). O princípio básico da nanotecnologia é a construção de estruturas e novos materiais a partir dos átomos (os tijolos básicos da natureza). É uma área promissora, mas que dá apenas seus primeiros passos, mostrando, contudo, resultados surpreendentes (na produção de semicondutores, nanocompósitos, biomateriais, chips, entre outros).

A nanotecnologia é um termo abrangente que engloba muitas áreas de pesquisa que tratam de objetos mensurados em nanômetros. Um nanometro (nm) é um bilionésimo de metro, ou um milionésimo de milímetro. Pode-se tentar saber como as nanopartículas influenciaram na fabricação de concretos e que impacto a nanotecnologia terá sobre o setor da construção civil nas próximas décadas.

“A nanotecnologia é a engenharia dos materiais e das estruturas com tamanho variando de 1 a 100 nanômetros (10^{-9} a 10^{-7} m). Para termos de comparação, um nanômetro representa quatro átomos de silício colocados um ao lado do outro e o diâmetro de um fio de cabelo humano mede cerca de 30.000 nanômetros” (GLEIZE, 2007).

“O refino da estrutura dos materiais ou a incorporação de nano objetos permite o aumento das superfícies de contato e a reatividade, o que gera várias vantagens em termos de reforço e de eficiência. Isso abre grandes perspectivas a respeito da fabricação de materiais de síntese com propriedades atípicas” (GLEIZE, 2007).

“A nanociência/nanotecnologia é intrinsecamente multidisciplinar, e sua aplicação abrange todas as áreas de ciência com interações fortes e múltiplas entre elas (química, física, ciências da vida, materiais e várias engenharias)” (GLEIZE, 2007).

“Na indústria da construção, a nanotecnologia tem potencial para melhorar muitos materiais de construção, tais como: aços estruturais, polímeros, materiais cerâmicos e materiais cimentícios. O desenvolvimento de materiais nanomodificados poderia, por exemplo, tornar as estruturas mais resistentes, leves e seguras; os sistemas de fechamento e vedação mais isolantes, térmicos e acústicos com várias funcionalidades adicionais, como captação e armazenamento de energia, auto-reparo, autolimpeza, proteção contra o fogo, aquecimento/resfriamento” (GLEIZE, 2007).

Os nanomateriais e materiais nanomodificados são classificados em três famílias (LE MAROIS, 2004 *apud* GLEIZE, 2007):

a – “Materiais nanoreforçados ou nanocarregados nos quais os nano objetos podem ser incorporados na matriz por mistura ou produzidos *in situ*, proporcionando reforço e redução de massa (nanocompósitos), criando novas funções (ópticas, eletromagnéticas, térmicas). Os nano objetos podem também ser usados tais quais (catalisadores, marcadores fluorescentes, etc.);”

b – “Materiais nanoestruturados em superfícies com propriedades de superfície previamente estabelecidas (resistentes à abrasão, à oxidação, etc.), novas funcionalidades (aspectos, aderência, funções ópticas, etc.);”

c – “Materiais nanoestruturados em volume com modificação da nanoestrutura, porosidade, podendo ser produzidos por automontagem molecular, usando os conceitos da síntese biomimética.”

No Brasil, a nanotecnologia ainda está começando. Mas, já há resultados importantes. Por exemplo, um grupo de pesquisadores da EMBRAPA, liderados pelo Dr. L. H. Mattoso, desenvolveu uma “língua eletrônica”, um dispositivo que combina sensores químicos de espessura nanométrica, com um sofisticado programa de computador para detectar sabores. A língua eletrônica da EMBRAPA, que ganhou prêmios e está patenteada, é mais sensível do que a própria língua humana. Ela é um produto nanotecnológico, pois depende para seu funcionamento da capacidade dos cientistas de sintetizar novos materiais e de organizá-los, camada molecular por camada molecular, em um sensor que reage eletricamente a diferentes produtos químicos. Não é só na EMBRAPA, entretanto, que se faz nanotecnologia no Brasil. O mesmo acontece nas principais universidades e centros de pesquisa do país. (SANTOS, 2005)

Aplicações em catálise, isto é, na química e na petroquímica, em entrega de medicamentos, sensores, materiais magnéticos, computação quântica, são alguns exemplos da nanotecnologia sendo desenvolvidos no Brasil. O que precisamos agora é aprender a transformar todo este conhecimento em riquezas para o país.

A nanotecnologia é extremamente importante para o Brasil, por que a indústria brasileira terá de competir internacionalmente com novos produtos para que a economia do país se recupere e retome o crescimento econômico. Esta competição somente será bem sucedida com produtos e processos inovadores, que se comparem aos melhores que a indústria internacional oferece. Isto significa que o conteúdo tecnológico dos produtos ofertados pela indústria brasileira terá de crescer substancialmente nos próximos anos e que a força de trabalho do país terá de receber um nível de educação em ciência e tecnologia muito mais elevado que o de hoje. Este é um grande desafio para todos nós.

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade da nanocerâmica na construção civil, especificamente sua adição em concreto para avaliação do desempenho do mesmo. Além disso, tem-se o interesse em abordar algumas propriedades do produto, fornecendo características do material já adicionado ao concreto, tais como: resistência à compressão, resistência à tração e fluxo de água passante do concreto fabricado.

Como objetivos secundários pretendem-se:

a) Avaliação do desempenho de concretos no estrado fresco, medidas de trabalhabilidade e plasticidade;

b) Avaliação do desempenho de concretos no estado endurecido, por meio de ensaios de propriedades mecânicas;

c) Avaliação da durabilidade do concreto sob o aspecto do fluxo de água passante.

3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A abordagem por nanocerâmica como material para utilização na indústria da construção foi devido à nanotecnologia ter potencial para melhorar muitos materiais de construção, tais como: aços estruturais, polímeros, materiais cerâmicos e materiais cimentícios.

O desenvolvimento de materiais nanomodificados poderia, por exemplo, tornar as estruturas mais resistentes, leves e seguras; provocar modificações significativas nas propriedades dos concretos, tais como: resistência à compressão e melhoria na matriz cimentícia.

Com a utilização adequada, o setor de construção pode ter ganhos técnicos e econômicos expressivos. O estudo das características da nanocerâmica e a proporção adequada para sua utilização no concreto visam contribuir para futura regulamentação tecnológica.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. DEFINIÇÃO DE ARGILA

Argila é um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilominerais, podendo conter outros minerais que não são argilominerais (quartzo, mica, pirita, hematita, etc), matéria orgânica e outras impurezas. Os argilominerais são os minerais característicos das argilas; quimicamente são silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, contendo em certos tipos outros elementos como ferro, potássio, lítio e outros (ABC, 2000).

Graças aos argilominerais, as argilas na presença de água desenvolvem uma série de propriedades tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas que explicam sua grande variedade de aplicações tecnológicas. Os principais grupos de argilominerais são caulinita, illita e esmectitas ou **montmorillonita** (ABC, 2000).

O que diferencia estes argilominerais são basicamente o tipo de estrutura e as substituições que podem ocorrer, dentro da estrutura, do alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro, principalmente, e conseqüente neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions. Dessa forma, na caulinita praticamente não ocorre substituição, na illita ocorre substituição e o cátion neutralizante é o potássio; na montmorillonita também ocorrem substituições e os cátions neutralizantes podem ser sódio, cálcio, potássio e outros. Isto implica em diferenças nas características de interesse para as diversas aplicações tecnológicas (ABC, 2000).

Como exemplo, argilas constituídas essencialmente pelo argilomineral caulinita são as mais refratárias, pois são constituídas essencialmente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), enquanto que os outros, devido à presença de potássio, ferro e outros elementos, têm a refratariedade sensivelmente reduzida. A presença de outros minerais, muitas vezes considerados como impurezas, pode afetar substancialmente as características de uma argila para uma dada aplicação; daí a razão, para muitas aplicações, de se eliminar por processos físicos os minerais indesejáveis. Processo este chamado de beneficiamento, em função principalmente das possibilidades de emprego tecnológico, que são influenciadas pela gênese e pela composição mineralógica do material, em muitos casos as argilas recebem designações como: caulins, bentonitas, argilas refratárias, flint-clays e ball-clays (ABC, 2000).

4.2. APLICAÇÕES DAS ARGILAS

As argilas apresentam uma enorme gama de aplicações, tanto na área de cerâmica como em outras áreas tecnológicas. Pode-se dizer que em quase todos os segmentos de cerâmica tradicional a argila constitui total ou parcialmente a composição das massas. De um modo geral, as argilas que são mais adequadas à fabricação dos produtos de cerâmica vermelha apresentam em sua constituição os argilominerais illita, de camadas mistas illita-montmorilonita e clorita-montmorilonita, além de caulinita, pequenos teores de montmorilonita e compostos de ferro. As argilas para materiais refratários são essencialmente caulíníficas, devendo apresentar baixos teores de compostos alcalinos, alcalino-terrosos e de ferro; podendo conter ainda em alguns tipos a gipsita ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) que é o sulfato de cálcio hidratado. As argilas para cerâmica branca são semelhantes às empregadas na indústria de refratários; sendo que para algumas aplicações a maior restrição é a presença de ferro e para outras, dependendo do tipo de massa, além do ferro a gipsita. No caso de materiais de revestimento são empregadas argilas semelhantes às utilizadas para a produção de cerâmica vermelha ou as empregadas para cerâmica branca e materiais refratários (ABC, 2000).

4.3. NANOTECNOLOGIA E O CONCRETO

A ASTM C 150 define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição, demonstrada por MEHTA (1994), “[...] o tamanho das partículas de cimento é normalmente menor do que 50 microns sendo que para micro cimentos as partículas são de no máximo 5 microns [...]”.

O concreto de cimento Portland é o material mais usado na construção civil mundial, basicamente constituído de cimento Portland com agregado miúdo, agregado graúdo e água. Suas vantagens técnicas e econômicas são sem dúvida sua marca registrada, pois a maioria das aplicações oferece propriedades adequadas a um baixo custo. Portanto saber mais sobre o concreto torna-se de extrema importância, principalmente em escalas menores onde a nanotecnologia já está sendo usada para melhorar o seu desempenho. (BALAGURU,2005).

Segundo BALAGURU (2005), “[...] o nanoconcreto é definido como o concreto feito com partículas de cimento Portland que são menores de 500 nanômetros como agente de cimentação, portanto o tamanho das partículas de cimento tem de ser reduzido [...]”.

Algumas pesquisas estão buscando compreender e contribuir com o estudo do concreto em nanoescala, por exemplo, estudos sobre a nanoestrutura da pasta de cimento e sua porosidade, a adição de nano-sílica (SiO_2) ao cimento Portland, o comportamento das propriedades mecânicas do cimento Portland com a adição dos

nanotubos de carbono, a resistência à abrasão com a adição de nanopartículas ao concreto, entre outros. (BEAUDOIN,2005)

A nanotecnologia poderia ajudar inclusive a diminuir as emissões de CO₂ produzidas pela indústria de cimento global, uma vez que a produção de cimento está atualmente próxima de 1,6 bilhões de toneladas por ano e através da calcinação da pedra calcária se produz o óxido de cálcio e dióxido de carbono numa proporção de 0,97 toneladas de CO₂ para cada tonelada de clínquer produzido. Cerca de 900 kg de clínquer é usado em cada 1000 kg de cimento produzido, portanto a indústria de cimento global produz cerca de 1,4 toneladas de CO₂ por ano. Isto representa aproximadamente 6% da produção total de CO₂ no mundo produzido pelo homem (REPORT ON NANOTECHNOLOGY AND CONSTRUCTION, 2006).

4.4. COMPOSIÇÃO DA NANOCERÂMICA DE MONTMORILLONITA

A **Montmorillonita** é um mineral do grupo dos silicatos, subgrupo filosilicatos e dentro deles pertence a chamadas argilas. É um hidroxissilicato de magnésio e alumínio, com outros possíveis elementos. Recebe seu nome da localidade francesa de Montmorillon. Se caracteriza por uma composição química inconstante. É solúvel em ácidos e se expande ao contato com água. Estruturalmente se compõe por uma capa central que contém alumínio e magnésio coordenados octaédricamente em forma de óxidos e hidróxidos. Tal capa central está rodeada por outras duas capas. As capas externas estão formadas por óxidos de silício coordenados tetraédricamente. Para fundação de construções é um dos terrenos que se devem ter mais precaução devido a seu caráter expansivo (ATLAS DE MINERAIS DE ROCHAS – UNESP, 1998).

Caracterização da Montmorillonita:

- Fórmula Química: $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$;
- Composição: Silicato de alumínio, magnésio e cálcio hidratado;
- Cristalografia: Monoclínico;
- Classe: Prismática;
- Propriedades Ópticas: Biaxial negativo;
- Hábito: Massas micro e criptocristalino;
- Clivagem: Perfeita {001};
- Dureza: 1 – 2;
- Tamanho das partículas secas por volume:

10% < 2 μm

50% < 6 μm

90% < 13 μm

- Densidade relativa: 2,0 g/cm³ - 2,7 g/cm³;
- Fratura: Conchoidal (no agregado);
- Brilho: Lustroso (no agregado);
- Cor: Branco, cinza, rosa, azul;
- Associação: Associada à zeólitas, quartzo e outros minerais de argila;
- Propriedades diagnósticas: Associação mineral, hábito, cor, propriedades ópticas e mecânicas;
- Ocorrência - Produto de alteração de rochas ígneas efusivas, metamórficas e sedimentares em ambiente mal drenado.

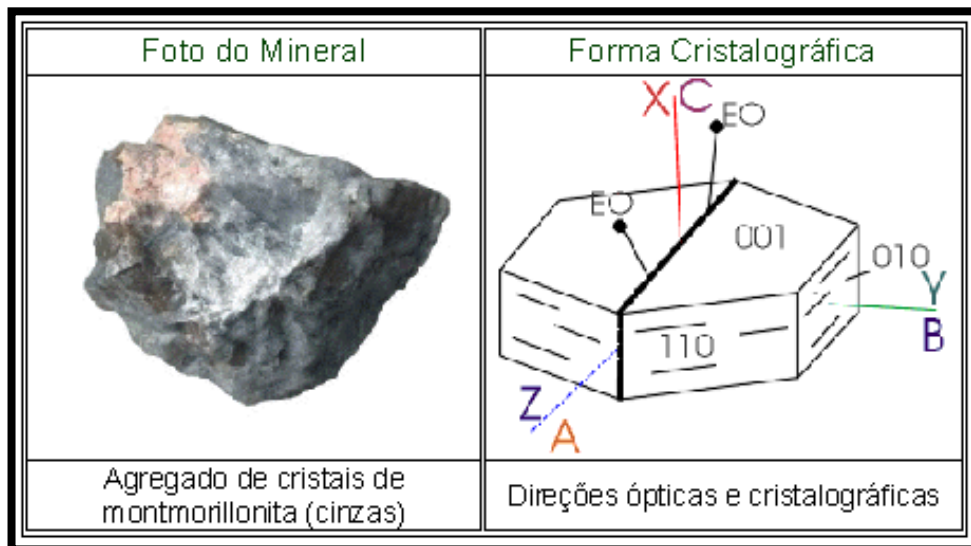


Fig 4.1. Uma amostra de Montmorillonita.

Fonte: ATLAS DE MINERAIS DE ROCHAS – UNESP, 1998.

4.5. UTILIZAÇÃO DA NANOCERÂMICA NO CONCRETO

“O cimento é o material de construção mais usado; conseqüentemente, a nanotecnologia do cimento e seus produtos é de grande importância para essa indústria. O consumo de cimento no Brasil é de, aproximadamente, 40 milhões toneladas/ano” (SNIC, 2007 *apud* GLEIZE, 2007)

“Concretos, argamassas e derivados, que possuem as nanoestruturas complexas do cimento e seus hidratos, são excelentes candidatos para a manipulação e o controle de suas propriedades através da nanotecnologia.” (GLEIZE, 2007)

“A adição de nanopartículas ao concreto, por exemplo, permitirá um melhor controle da sua microestrutura, o que não permitem as tecnologias atuais, e permitirá produzir materiais mais resistentes e mais duráveis. A capacidade de programar a difusão progressiva dos aditivos químicos em concretos e argamassas permitirá tornar mais eficientes as operações no canteiro, e a utilização de ligantes reforçados com fibras e armaduras de diâmetro nanométrico permitirá produzir produtos cimentícios mais resistentes, impedindo a formação e a propagação de fissuras” (IRC, 2002 *apud* GLEIZE, 2007).

“O cimento hidratado é composto majoritariamente por um silicato de cálcio hidratado comumente chamado C-S-H. Durante a hidratação, o C-S-H recobre progressivamente os grãos de cimento anidros e preenche, aos poucos, o espaço intergranular. Essa fase hidratada é considerada como o verdadeiro ligante da pasta de cimento endurecida e é o principal responsável por grande parte das propriedades da pasta de cimento endurecida” (GLEIZE, 2007).

“O C-S-H é um material frágil com baixa resistência à tração. É também responsável pela instabilidade dimensional dos produtos à base de cimento. A natureza e o teor do C-S-H controlam aspectos como retração total e retração reversível devido à perda de água e também fluência (deformação lenta, sob carga permanente). Esses aspectos são extremamente importantes em projetos de engenharia, pois podem ocasionar o surgimento de tensões que podem levar a fissuras e até à ruína de peças ou ao surgimento de deformações que impedem a utilização correta da estrutura” (GLEIZE, 2007).

O C-S-H apresenta modo de organização estrutural multi-escala, conforme descrito a seguir e indicado na Figura 4.2 (CONG; KIRKPATRICK, 1996; PLASSAIS, 2003; MINET, 2003) *apud* GLEIZE e PELISSER (2007):

- “Em nível macroscópico, o C-S-H é formado por aglomerados”
- “Estes aglomerados são formados por partículas ou nanocristalitas, que podem ser assemelhadas a um empilhamento desordenado de tijolos” (MINET, 2003 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007);
- “Cada partícula ou nanocristalita é composta por um empilhamento de folhas (uma dezena, nas condições mais favoráveis de síntese);”
- “Cada folha é composta por uma dupla camada central de octaedros de CaO inserida entre duas camadas de tetraedros de SiO₄, similar à tobermorita”.

“A tobermorita é geralmente considerada como o modelo estrutural do C-S-H. O modelo estrutural é de folhas constituídas por uma estrutura de um plano duplo de octaedros de cálcio ligados entre eles por suas arestas. Fixados em cada face, há cadeias de tetraedros de sílica de comprimentos variáveis. As moléculas de água separam estas folhas. O C-S-H é então modelado por uma estrutura em folhas similar a da tobermorita, mas com numerosas imperfeições e irregularidades, de fato uma estrutura quase amorfa” (PLASSAIS, 2003 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007).

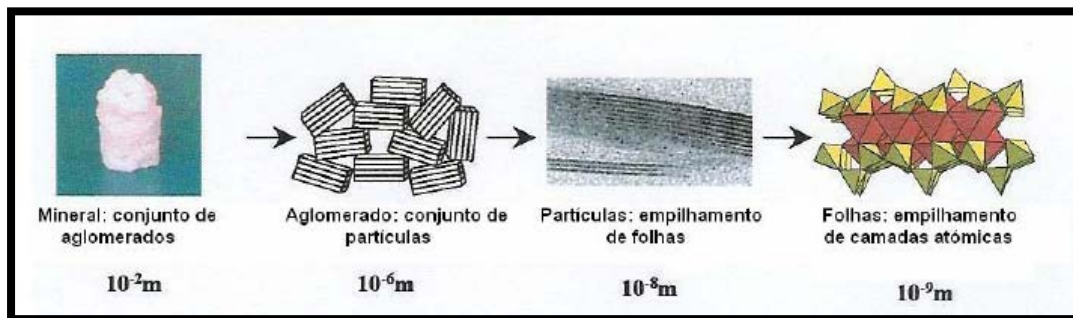


Fig 4.2. Estrutura do C-S-H em diferentes escalas de observação.
Fonte: MINET, 2003 *apud* GLEIZE, 2007.

“A sucessão destas folhas forma um cristalito lamelar. Esta estrutura foi colocada em evidência por microscopia eletrônica de transmissão de C-S-H de síntese...” como mostra a figura 4.3 (PELLENQ; VAN DAMME, 2004 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007). “Estudos por microscopia de força atômica (AFM) permitiram demonstrar que as dimensões destas lamelas são de cerca de $50 \times 50 \times 6 \text{ nm}$ ” (GAUFFINET et al., 1998 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007). Vários trabalhos (JOHANSSON et al., 1999; PORTENEUVE et al. 2001; ANDERSON et al. , 2000; WANG; SCRIVENER, 2002; GRUTZECK, 1999; CHENA et al. 2004; RICHARDSON, 1999, 2000, 2004) *apud* (GLEIZE e PELISSER, 2007) “realizados com base em espectroscopia por ressonância magnética nuclear (RMN), especialmente o ^{29}Si , colocam em evidência a existência de diferentes ambientes segundo a coordenação dos tetraedros de sílica (a denominação comum é Q_n , no qual n é o número de ligações com um outro tetraedro). Nos espectros de RMN de ^{29}Si nas pastas de cimentos hidratados, os picos Q^1 e Q^2 são dominantes, e sua intensidade cresce com o grau de hidratação, sendo associados à presença de C-S-H. Estes resultados são compatíveis com um modelo de C-S-H que consiste em cadeias curtas de tetraedros de SiO_4 . O método tem demonstrado, também, que a taxa de polimerização diminui com aumento da relação Ca/Si ”. (PLASSAIS, 2003; MINET, 2003; CONG e KIRKPATRICK, 1996) *apud* (GLEIZE e PELISSER, 2007).

“Há consenso, também, de que existem pelo menos dois tipos diferentes de C-S-H, que se formam por mecanismos diferentes, apresentam densidades diferentes e, também, estruturas distintas. Esses dois tipos de C-S-H contribuiriam, de diferentes formas, para as propriedades dos materiais à base de cimento.” (GLEIZE e PELISSER, 2007). CONSTANTINIDES e ULM (2004) *apud* GLEIZE e PELISSER (2007) “tentaram... identificar o papel dos diferentes tipos de C-S-H nas propriedades de pastas de cimento hidratadas, e constataram que o que as define são as proporções das misturas, por modificarem as relações de volume de vazios e fases hidratadas nos materiais.

“De um ponto de vista morfológico, o C-S-H pode ser imaginado como um sólido mal definido, parcialmente cristalino e formado por partículas finas (diâmetro entre 100 a 200 Å) com alta área interna. Uma partícula elementar seria então um cristalito lamelar, esta lamela sendo composta por duas ou três folhas com água ocupando o espaço entre as folhas, caracterizando-se, assim, em um gel”. (JUENGER, 1999 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007)

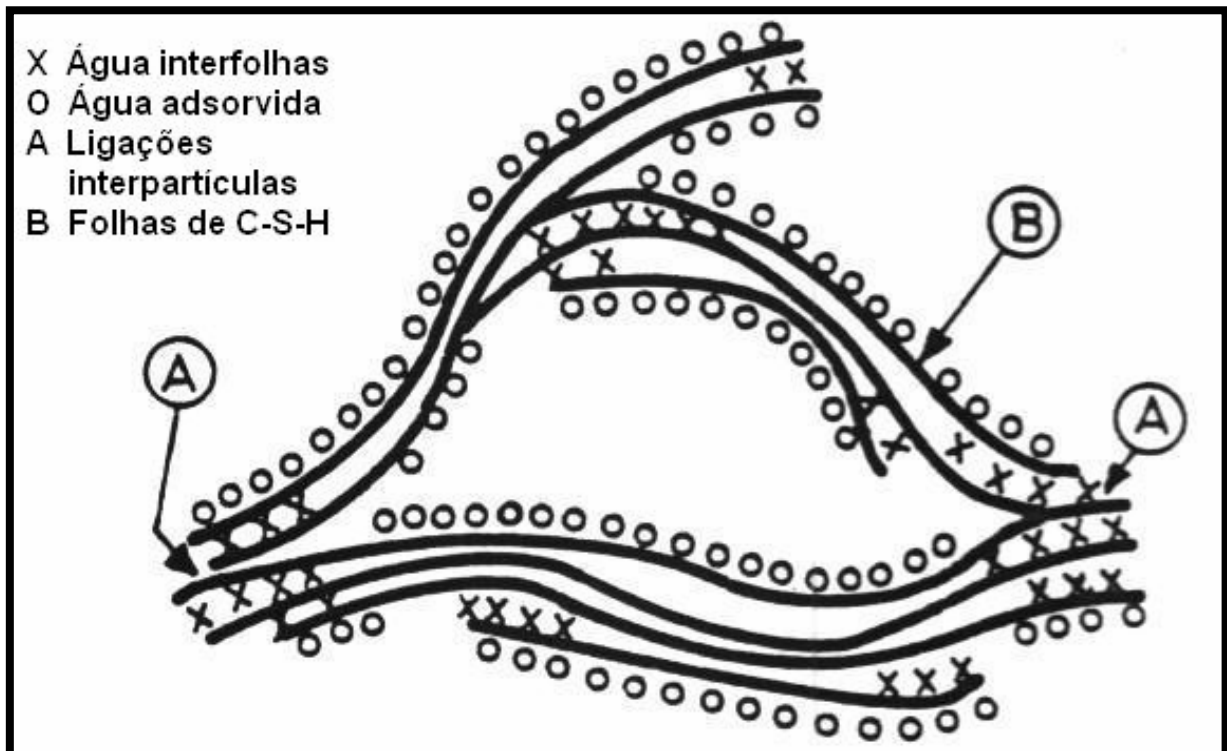


Fig 4.3. Modelo de Feldman e Sereda, que representa a estrutura do C-S-H como sendo composta por um arranjo aleatório, irregular e dobrado de folhas, de modo a formar espaços intersticiais de forma e tamanho diferentes (50 nm a 250nm).

Fonte: REGOURD, 1982 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007.

“Sierra, completou o modelo de Feldman e Sereda, considerando que a coesão é assegurada (REGOURD, 1982 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007):

1) “Por uma texturização da espécie sólida: ligações entre as folhas do tipo solda (ligações químicas fortes do tipo siloxano (Si-O-Si) e/ou cálcio-sílica (Si-O-Ca-O-Si), mas que cobrem apenas uma pequena parte da superfície das partículas do gel) e ligações interpartículas (atração física do tipo Van Der Waals); isto permite manter a coesão mesmo quando a pasta é saturada em água; sem esta texturização, quando saturada, a pasta perderia a coesão, como é o caso, das argilas” (Fig. 4.4).

2) “Por uma estruturação da água intersticial”.

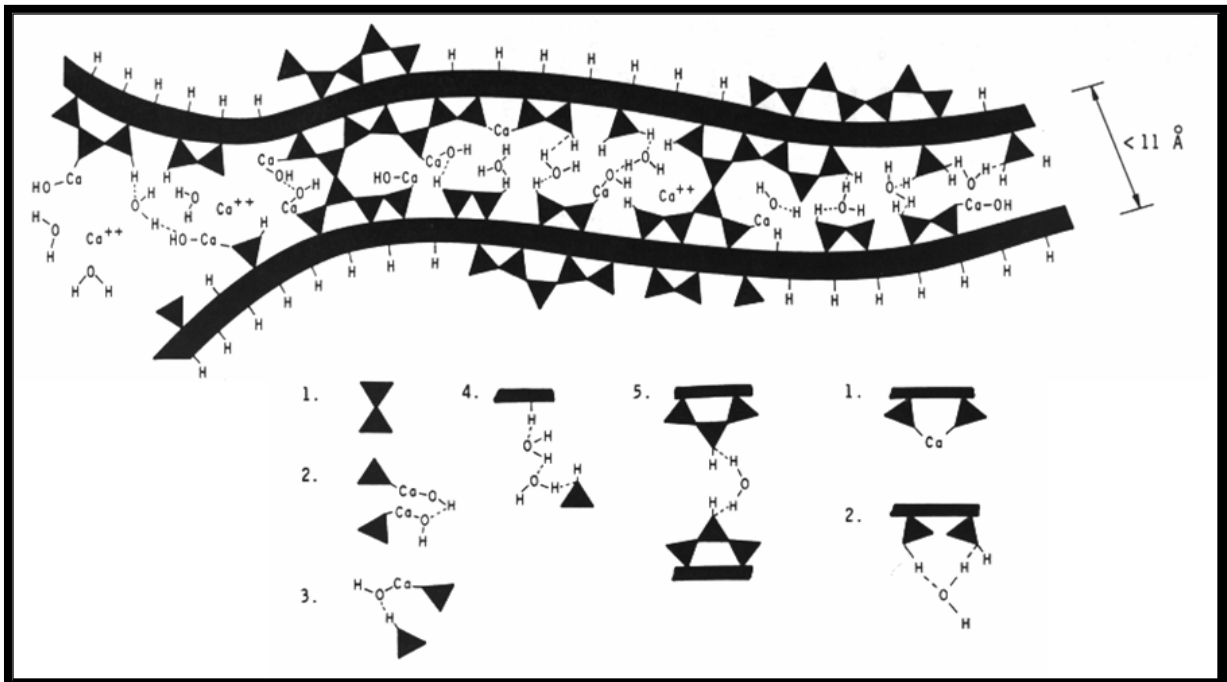


Fig 4.4. Tipos de ligação entre as folhas de C-S-H.

Fonte: SIERRA *apud* RAMACHANDRAN, 1984 *apud* GLEIZE e PELISSER, 2007.

4.6. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

“Alguns exemplos a seguir ilustram o papel crítico que a nanotecnologia pode ter em áreas que foram identificadas como limitantes do uso de materiais cimentícios” (GLEIZE, 2007):

- **“Melhorando a coesão e dominando a fluência:** quase todos os avanços nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios conseguidos nas últimas décadas foram realizados através da redução da porosidade capilar e pela otimização dos empacotamentos granulares. No entanto, em termos de desempenho, chegou-se próximo de uma assíntota, o que sugere que a melhoria das propriedades mecânicas só pode vir a partir de modificações nas escalas mais finas do material” (GLEIZE, 2007).

- **“Evitando a fissuração nas primeiras idades:** a fissuração nas primeiras idades pode ocorrer através da perda de água por secagem, ou sob condições endógenas (sem trocas de água com o ambiente) no caso de materiais de alto desempenho com baixas relações água/aglomerante ($< 0,3$). A fissuração é altamente prejudicial à durabilidade, porque facilita o ingresso de agentes agressivos do ambiente e diminui o desempenho potencial do elemento. Sabe-se que as forças que conduzem a tal fissuração são as forças capilares geradas nos poros que, geralmente, são parcialmente preenchido com água. As forças capilares tornam-se significativas quando o tamanho dos poros parcialmente preenchidos é menor que

aproximadamente 50 nm. A incorporação de pequenas quantidades de nanofibras, atuando como pontes de transferência das tensões de tração geradas, por tais forças capilares pode ser uma solução para diminuir a ocorrência de fissuração nas primeiras idades e para melhorar o desempenho destes materiais” (GLEIZE, 2007).

- **“Aumentando a resistência e a ductilidade ao mesmo tempo:** o cimento hidratado, composto majoritariamente por C-S-H, é um material frágil com baixa resistência a tração. Sabe-se também que a adição de sílica ativa, que é um pó fino pulverizado decorrente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício, ao concreto torna-o mais resistente e, conseqüentemente, mais durável, mas, em contrapartida, mais frágil”. (GLEIZE, 2007)

“O reforço da estrutura do C-S-H com fibras e armaduras de diâmetro nanométrico permitirá produzir produtos cimentícios mais resistentes e também mais dúcteis, permitindo dispensar-se ou reduzir o uso da armadura de aço. A incorporação de 0,5% (em relação à massa de cimento) de nanotubos de carbono em argamassas aumentou as resistências à compressão e à flexão, assim como a deformação na ruptura em respectivamente 19%, 25% e 17%”. (LI, WANG e ZHAO, 2005 *apud* GLEIZE, 2007).

- **“Aumentando a velocidade de ganho de resistência:** a possibilidade de aumento da relativa baixa velocidade de ganho de resistência em construções baseadas em cimento Portland seria uma contribuição significativa em termos de produtividade no canteiro, permitindo desfôrma e carregamento dos elementos estruturais mais rápidos. Os produtos da hidratação do cimento formados nas primeiras horas se depositam, em parte, em volta dos grãos não hidratados, formando, assim, uma barreira de difusão que progressivamente diminui a velocidade de reação. A ativação térmica, conseguida através do aumento da temperatura de cura e pela conservação do calor de hidratação da reação, é usada para acelerar a velocidade de ganho de resistência...”. (GLEIZE, 2007).

- **“Melhorando o rendimento do cimento:** para contribuir com a redução das emissões do CO₂ e diminuir o consumo de matérias fósseis e de energia, tornou-se cada mais vez necessário reduzir-se a quantidade de clínquer usado em produtos de cimento. Isso se consegue pelo aumento dos níveis de substituição do cimento por produtos industriais que têm um papel ativo em materiais cimentícios, tais como cinzas volantes, escórias de alto forno e sílica ativa” (GLEIZE, 2007).

- **“Entendendo e controlando as reações deletérias do cimento no concreto:** o mecanismo da expansão gerada pelo gel formado a partir da reação de alguns tipos de agregados com os álcalis do cimento parece envolver uma transformação de fase de um gel amorfo para uma estrutura em camada. No caso da formação de etringita expansiva, sabe-se que, sob certas condições, o C-S-H pode adsorver os íons sulfatos e soltá-los sob outras condições. No entanto, pouco se sabe sobre o estado e a localização desses íons sulfatos adsorvidos. Uma melhor compreensão desses mecanismos na nanoescala e da maneira em que a nanoestrutura está influenciada

pela química do sistema, temperatura e umidade relativa pode permitir o controle e a minimização desses fenômenos deletérios” (GLEIZE, 2007).

- **“Materiais a base de cimento Portland com nanopartículas:** A substituição de até 10% em massa de cimento por nanopartículas de sílica – SiO_2 ou de trióxido de ferro – Fe_2O_3 em argamassas aumentou, segundo Li.H. et al. (2004) *apud* GLEIZE (2007). as resistências à compressão e à flexão em mais de 20%. Os autores comentam que as nanopartículas não agem somente como filler, mas também como promotoras de hidratação. Qian et al (2005) *apud* GLEIZE (2007) obtiveram resultados similares em pastas de cimento com até 3% de nanosílica. Com incorporação de 5% de nanoalumina em argamassas de cimento, Li, Z.et al. (2006) *apud* GLEIZE (2007) registraram um aumento de 143% do módulo de elasticidade; porém, a resistência à compressão não foi afetada. Li,G. (2004) *apud* GLEIZE (2007) constatou que a atividade pozolânica das cinzas volantes pode ser melhorada quando em contato com nanosílica”.

SOBOLEV e GUTIERREZ (2005) *apud* GLEIZE (2007) “consideram que os efeitos positivos das nanopartículas na microestrutura e propriedades de materiais cimentícios podem ser explicados pelos seguintes fatores:

- Aumento da viscosidade da fase líquida, reduzindo a segregação e aumentando a trabalhabilidade;
- Efeito filler: as nanopartículas preenchem os vazios entre os grãos de cimento;
- As nanopartículas aceleram a hidratação do cimento e favorecem a formação de pequenos cristais de hidróxido de cálcio e aglomerados de C-S-H;
- A nanosílica participa na reação pozolânica, consumindo o hidróxido de cálcio produzindo um C-S-H adicional;
- As nanopartículas melhoram a microestrutura da zona interfacial de transição, resultando numa melhor ligação entre agregados e pasta de cimento;
- A melhoria geral da microestrutura aumenta a tenacidade, resistência ao cisalhamento, tração e flexão.”

4.7. ÚLTIMOS AVANÇOS SOBRE A NATUREZA DA COESÃO DO C-S-H

De acordo com Pellenq e Van Damme (2004) *apud* GLEIZE e PELISSER (2007), “estudos de simulação molecular e medidas diretas de força por microscopia de força atômica (AFM) parecem confirmar a idéia segundo a qual as forças superficiais de curto e médio alcance mediadas parcialmente ou totalmente por íons cálcio hidratados são componentes essenciais para a resistência do cimento, com contribuições adicionais das forças de Van der Waals e forças capilares. Eles citam que há, provavelmente, dois níveis de escala em que a origem da coesão tem que ser buscada: 1) na sub-nanoescala que é ao nível dos empilhamentos das folhas e seus pontos de contato; e 2) na mesoescala, onde se considera as interações entre as superfícies do C-S-H dentro de poros preenchidos por água”.

No nível da sub-nanoescala, os cálculos realizados pelos mesmos autores, usando os conceitos de química quântica, indicam que ... “a contribuição das forças de Van Der Waals representa em torno de 20% da energia de coesão. Além disso, o cálculo mostra que a distância entre os íons cálcio interfolhas e os átomos de oxigênio da folha é muito perto da distância Ca-O dentro da folha. Isso indica que os íons cálcio interfolhas estão ligados à folha por uma ligação iôno-covalente” (GLEIZE e PELISSER, 2007).

Para Lesko et al. (2001) *apud* GLEIZE e PELISSER (2007), “a coesão de uma pasta de cimento hidratado resulta das interações entre as superfícies de C-S-H em uma solução iônica intersticial. Por medidas diretas de força atômica por AFM (microscópio de força atômica), Lesko et al. (2001) mostraram que, quando o C-S-H é imerso numa solução de cloreto ou hidróxido de sódio (cátion monovalente), somente forças repulsivas de longo alcance foram medidas. Mas quando a amostra é imersa numa solução de hidróxido de cálcio (cátion divalente) em equilíbrio químico com o C-S-H, uma alta força atrativa, muito maior do que o esperado para forças de Van der Waals, é detectada para distâncias de 2-5 nm. Estes dados confirmam que forças de natureza iônica e eletrostática contribuem na coesão do cimento” .

LESKO et al (2001) *apud* GLEIZE e PELISSER (2007), “salienta que a pasta de cimento pode ser apresentada como um multicomposto de grãos que são altamente carregados na sua superfície, e desenvolve interações através de uma solução intersticial eletrolítica composta, na sua maior parte, de íons cálcio e hidroxilas. As reações químicas entre os grãos de cimento e a solução eletrolítica irão principalmente aumentar a precipitação do C-S-H na superfície dos grãos anidros; assim, as interações entre os grãos de cimento são progressivamente trocadas por interações entre o C-S-H”

4.8. EFEITO DE ADITIVOS QUÍMICOS NA NANOESTRUTURA DO C-S-H

“Na presença de aditivos químicos, a nanoestrutura dos diferentes tipos de C-S-H pode sofrer alteração. Há poucos artigos publicados a respeito deste assunto na literatura consultada”. JUENGER et al. (2003) e SILVA e MONTEIRO (2005a, 2005b) *apud* GLEIZE e PELISSER (2007), “observaram que há uma tendência de formação de pequeno volume de C-S-H externo ao grão de cimento, e formação de, principalmente, produtos internos de hidratação, na presença da maioria dos aditivos químicos usados em argamassas e concretos (retardadores e aceleradores de pega, e modificadores de viscosidade). As imagens obtidas pelos autores indicam que a densidade do C-S-H parece sofrer alteração na presença de aditivos, pelo menos nas primeiras horas de hidratação do cimento”.

4.9. HISTÓRICO DOS MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO

O material, conhecido dos antigos egípcios, ganhou o nome atual no século XIX graças à semelhança com as rochas da ilha britânica de Portland. A palavra CIMENTO é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água (ABCP, 2008).

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto às pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (ABCP, 2008).

No Brasil, a primeira tentativa de aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreu aparentemente em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica na fazenda Santo Antônio, de sua propriedade, situada em Sorocaba-SP. Posteriormente, várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas. Assim, chegou a funcionar durante três meses em 1892 uma pequena instalação produtora na ilha de Tiriri, na Paraíba. A usina de Rodovalho operou de 1897 a 1904, voltando em 1907 e

extinguindo-se definitivamente em 1918. Em Cachoeiro do Itapemirim, o governo do Espírito Santo fundou, em 1912, uma fábrica que funcionou até 1924, sendo então paralisada, voltando a funcionar em 1936, após modernização (ABCP, 2008).



Fig 4.5. Exemplos de monumentos que já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado (Cimento).
Fonte: ABCP, 2001.

Todas essas etapas não passaram de meras tentativas que culminaram, em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje (ABCP, 2008).

4.9.1. POZOLANAS

4.9.1.1. DEFINIÇÃO

Uma categoria de aglomerantes potenciais são as pozolanas, definidas como produtos silicosos ou sílico-aluminosos, que, estando predominantemente na forma vítrea, se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com íons Ca^{2+} , levando à precipitação de silicatos de cálcio hidratados. Essa reação pode ser simplificada pela equação:



O resultado final da reação é o silicato de cálcio hidratado, principal produto de hidratação dos cimentos tipo Portland. Sendo as pozolanas materiais sílico-aluminosos, podem ser formados também aluminatos e sílico-aluminatos.

As pozolanas, isoladamente, não possuem capacidade aglomerante e necessitam de uma fonte de cálcio. No entanto, o cálcio pode estar presente nas pozolanas, existindo em alguns países pozolanas com mais de 25% de cálcio. Nesse sentido, a diferenciação entre pozolanas e escórias de alto forno, do ponto de vista da sua composição química, é tênue, uma vez que existem escórias ditas ácidas, que contêm baixo teor de Ca, embora apresentem morfologia muito diferente. (TAYLOR, 1992)

4.9.1.2. PRODUÇÃO DE CIMENTO COM BASE EM POZOLANAS

A produção de cimentos com base em pozolanas implica a sua mistura com uma fonte de cálcio. Em termos práticos, as pozolanas são misturadas com cimento Portland ou cal hidratada. As misturas com cimento Portland propiciam maior resistência inicial, uma vez que a hidratação da fração clínquer fornece resistência nas primeiras idades. Com cal hidratada, o crescimento da resistência é mais lento, exigindo cura mais longa e levando a menores resistências, inclusive devido à área específica elevada da cal hidratada, que exige maior quantidade de água de amassamento. (TAYLOR, 1992)

4.9.1.3. FORMAÇÃO DE C-S-H

A identificação da fase C-S-H formada com base em misturas cal-pozolana através da análise por difração de raios X é um indicativo claro de atividade pozolânica. Essa fase é identificada por pico difuso característico, com distâncias interplanares entre 0,27 e 0,31 nm, centrado em torno de $29,3^\circ 2\theta$. (TAYLOR, 1992)

4.9.2. A NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA DO CIMENTO

“O objetivo da nanotecnologia é o de criar novos materiais e desenvolver novos produtos e processos baseados na crescente capacidade da tecnologia moderna de ver e manipular átomos e moléculas. Os países desenvolvidos investem muito dinheiro na nanotecnologia, esta que não é uma tecnologia específica, mas todo um conjunto de técnicas, baseadas na Física, na Química, na Biologia, na Ciência e Engenharia de Materiais, que visam estender a capacidade humana de manipular a matéria até os limites do átomo. Economia de energia, proteção do meio ambiente, menor uso de matérias primas escassas, são possibilidades de aplicação da nanotecnologia. Há quem defenda a nanotecnologia como a garantia de que o mundo atingirá, enfim, o desenvolvimento sustentável” (GLEIZE e PELISSER, 2007).

“Na indústria da construção, a nanotecnologia tem potencial para melhorar muitos materiais, tais como aços estruturais, polímeros e materiais cimentícios. Os materiais cimentícios, que possuem as nanoestruturas complexas do cimento e seus hidratos, são excelentes candidatos para a manipulação e o controle de suas propriedades através da nanotecnologia” (GLEIZE e PELISSER, 2007).

“O cimento é o material de construção mais usado e, conseqüentemente, a nanotecnologia do cimento e seus produtos são de grande importância para esta indústria” (GLEIZE e PELISSER, 2007).

“A aplicação dos conceitos da nanociência em matérias a base de cimento levará a um melhor controle da microestrutura, e poderá, por exemplo, melhorar a coesão e dominar a fluência, evitar os problemas de fissuração nas primeiras idades, aumentar a velocidade de ganho de resistência, aumentar resistência e ductilidade ao mesmo tempo, e melhorar o rendimento do cimento”. (GLEIZE e PELISSER, 2007).

“A adição de nanopartículas ao concreto, por exemplo, permitirá um melhor controle da sua microestrutura, o que não permitem as tecnologias atuais, e permitirá produzir materiais mais resistentes e mais duráveis. A capacidade de programar a difusão progressiva dos aditivos químicos no concreto permitirá tornar mais eficientes as operações no canteiro, e a utilização de ligantes reforçados com fibras e armaduras de diâmetro nanométrico permitirá produzir produtos cimentícios mais resistentes, impedindo a formação e a propagação de fissuras”. (GLEIZE e PELISSER, 2007).

“O avanço nessa área passa, necessariamente, pelo aprofundamento do conhecimento do C-S-H (o principal produto da hidratação dos cimentos), pelos efeitos de aditivos e adições na sua nanoestrutura, e pelo controle desses efeitos”. (GLEIZE e PELISSER, 2007)

4.9.3. DEFINIÇÃO E ESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto é um aglomerado constituído, principalmente, de agregados e cimento como aglutinante; é, portanto, uma rocha artificial. A fabricação do concreto é feita pela mistura dos agregados com cimento e água, à qual, conforme a necessidade são acrescentados aditivos que influenciam as características do concreto. As propriedades do concreto que interessam ao estudo do concreto armado são a resistência à ruptura e à deformabilidade, quer sob a ação de variações das condições ambientes, quer sob a ação de cargas externas. Por exemplo, Mehta e Monteiro (1994), “[...] considera o que o concreto é o material estrutural mais empregado e que a sua estrutura heterogênea é altamente complexa. As relações entre a estrutura e as propriedades ainda não estão completamente esclarecidas. Possuir uma boa familiaridade de alguns elementos da estrutura é essencial para se discutir as propriedades importantes do concreto, como a retração [...]”.

Ao se examinar uma seção transversal de concreto, duas fases podem ser facilmente distinguidas. Pode-se perceber que a peça é composta de uma massa contínua da pasta endurecida e de agregados de tamanho e formas variadas. Ou seja, a nível macroscópico, “o concreto pode ser considerado um material bifásico, consistindo de partículas de agregado dispersas em uma matriz de cimento” (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Somente a nível microscópico as complexidades da estrutura do concreto aparecem. As duas fases que compõem o concreto não estão distribuídas homogêneas em relação a elas mesmas. Em geral o volume de vazios capilares na pasta decresce com a diminuição da relação água/cimento ou com o avanço da idade de hidratação (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Além das fases (partículas de agregado e meio ligante), há também uma terceira fase denominada zona de transição. Ela é uma fina camada situada na região interfacial entre as partículas de agregado gráudo e a pasta. A zona de transição é o elo mais fraco dos componentes do concreto e, apesar de sua pouca espessura, exerce grande influência no comportamento mecânico do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

É importante destacar também que cada uma das fases do concreto é de natureza multifásica. O agregado pode conter vários minerais, microfissuras e vazios. A matriz de pasta de cimento e a zona de transição, na maioria das vezes, possuem diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, o que as torna heterogêneas (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A estrutura do concreto, diferentemente de outros materiais de engenharia, não se mantém estável. Isso acontece porque dois constituintes do concreto, a matriz de pasta de cimento e a zona de transição, estão sujeitos a mudanças em suas propriedades ao longo do tempo, devido a mudanças climáticas (i.e. mudança de temperatura, umidade ambiente, pressão atmosférica e etc.) (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

4.9.3.1. AGREGADO

O agregado é o responsável primordial pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Estas são propriedades que dependem da resistência e da densidade do agregado. As características físicas tais como volume, tamanho e distribuição dos poros do agregado são mais importantes do que a composição química ou mineralógica do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Geralmente o agregado constitui a fase mais resistente do concreto, com exceção de agregados altamente porosos e fracos. O tamanho do agregado pode influenciar a resistência do concreto de forma indireta. Quanto maior o tamanho do agregado do concreto e mais elevada a parcela de partículas chatas e alongadas, maiores são as chances de ocorrer o acúmulo de água na superfície destes agregados, e assim, enfraquecendo a zona de transição pasta-agregado. A este fenômeno dá-se o nome de exsudação interna (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

4.9.3.2. PASTA DE CIMENTO

O cimento Portland anidro é um pó cinza que consiste de partículas angulares de tamanho comumente entre 1 e 50 μm . Ele é conseguido através da moagem do clínquer com uma porção de sulfato de cálcio. “O clínquer é uma mistura heterogênea de vários minerais produzidos em reações a alta temperatura, entre óxido de cálcio e sílica, alumina e óxido de ferro” (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Neville (1997), “[...] o cimento Portland é composto principalmente de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. A interação destes compostos resulta em uma série de produtos mais complexos e que apesar de um pequeno resíduo de cal não ter reagido por causa do curto espaço de tempo, o equilíbrio químico é atingido [...]”.

A hidratação do cimento Portland ocorre com reação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila e resulta na formação de cristais aciculares de um sulfoaluminato de cálcio hidratados, também chamados de etringita (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A figura 5.1 mostra uma formação de etringita e hidróxido de cálcio por meio de microscopia ótica.

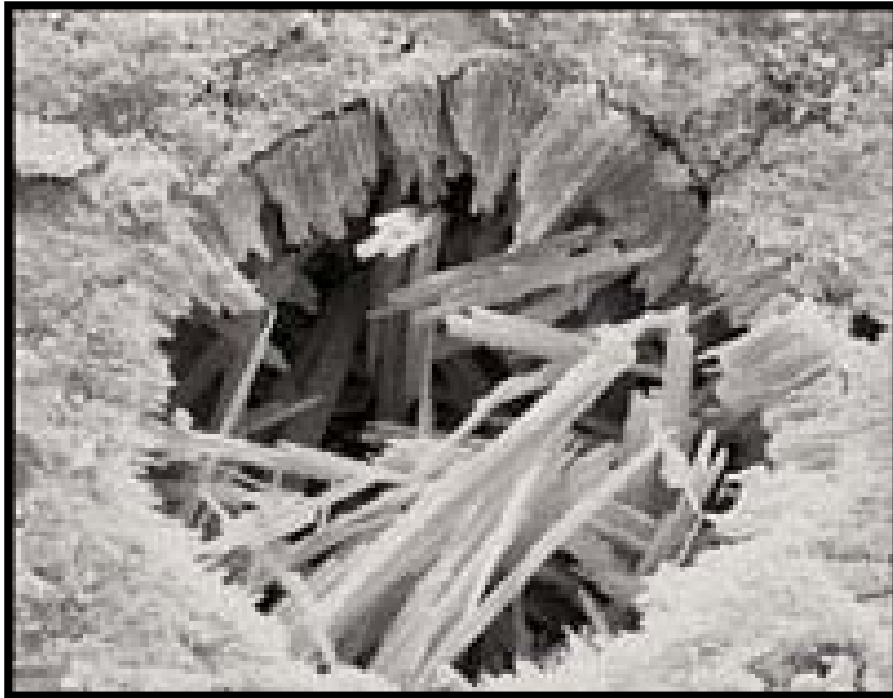


Fig 4.6. Formação de etringita.

Fonte: Portland Cement Association, 2007, apud Mehta e Monteiro, 1994.

As partículas anidras de cimento tendem a atrair umas as outras e formarem flocos. Estes flocos aprisionam grande quantidade de água na mistura. Ao aprisionarem água, estes flocos causam variações no equilíbrio água-cimento e são fontes potenciais para a formação de uma estrutura porosa e heterogênea (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A pasta de cimento é composta por quatro fases sólidas. São elas: O silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratados. O silicato de cálcio hidratado constitui de 50% - 60% e portanto ele é fator determinante para as propriedades da pasta. (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

O C-S-H não é um composto bem definido. “A relação C/S varia entre 1,5/2,0 e o teor de água estrutural varia ainda mais. A morfologia do C-S-H varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. Devido às suas dimensões coloidais e à tendência a aglomerar, os cristais de C-S-H puderam ser observados somente com o advento do microscópio eletrônico” (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Espaços interlamelares no C-S-H, vazios capilares e ar incorporado também estão presentes na pasta de cimento. Estes compõem os vazios na pasta endurecida. A porosidade total não interfere tanto na resistência e na permeabilidade do concreto. A distribuição do tamanho dos poros e as variações de volume têm papel muito mais importante nestes aspectos. Enquanto a distribuição do tamanho dos poros é afetada pela relação água/cimento e pela idade (grau) de hidratação do cimento. Os poros grandes influenciam principalmente a resistência à compressão e a permeabilidade. Os poros pequenos influenciam mais a retração por secagem e a fluência (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

4.9.3.3. ÁGUA

Além de vazios e sólidos, a pasta de cimento também conta com água. Notadas pelo microscópio, os poros de água na pasta parecem vazios. Assim como as fases sólidas e os vazios, a água pode estar presente na pasta em várias formas. Estas formas estão divididas através do grau de dificuldade ou de facilidade com que elas podem ser retiradas da pasta. A água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada são as formas em que a água pode ser encontrada na pasta (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A água capilar pode ser entendida como o volume de água que está livre de influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. Esta pode ser dividida em água em vazios grandes (i.e. $d > 50\text{nm}$, água livre) que não causa qualquer variação volumétrica e em água retida por tensão capilar, retida em capilares pequenos (5nm a 50nm) os quais causariam retração se fossem removidos do sistema (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A água adsorvida está presente na pasta sob influência de forças de atração. Sugere-se que elas estão retidas fisicamente por pontes de hidrogênio. A perda de água adsorvida é a principal causa da retração da pasta na secagem (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A água interlamelar está associada à estrutura do C-S-H. Ela só é perdida quando há uma secagem forte (menos que 11% de umidade relativa). A estrutura do gel C-S-H apresenta uma retração considerável quando a água interlamelar é perdida (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A água quimicamente combinada é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Ao contrário dos outros tipos de água, esta só é liberada quando ocorre a decomposição por aquecimento da estrutura. Só a secagem não é suficiente para que esta água seja perdida (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

4.9.3.4. ZONA DE TRANSIÇÃO DO CONCRETO

Apesar de ser constituída dos mesmos elementos da pasta de cimento, as suas propriedades e a sua estrutura são diferentes da pasta. Isso porque durante o processo de hidratação do concreto, uma fina camada de água se acumula ao redor do agregado graúdo, o que faz com que haja uma relação água/cimento maior nas proximidades do agregado. Por causa da relação água/cimento elevada, cristais relativamente grandes de etringita e hidróxido de cálcio são formados, que por sua vez, formam uma estrutura mais porosa do que na matriz da pasta. Após isso, com o aumento da hidratação, ocorre a formação de cristais menores de etringita e hidróxido de cálcio entre os espaços vazios, que ajudam a melhorar a resistência da zona de transição (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Mesmo nos concretos com baixa relação água/cimento, tanto o volume quanto o tamanho de vazios serão maiores na zona de transição do que na matriz da pasta nas primeiras idades. Apesar disso, ela pode adquirir resistência igual ou até mesmo maior do que a da matriz da pasta com o passar do tempo. Esse fenômeno acontece por causa da formação de novos cristais que preenchem os vazios da zona de transição através de reações químicas lentas entre os componentes da pasta de cimento e agregados. Além disso, a redução dos grandes cristais de hidróxido de cálcio, que possuem menor adesão contribuem para o aumento da resistência na zona de transição (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

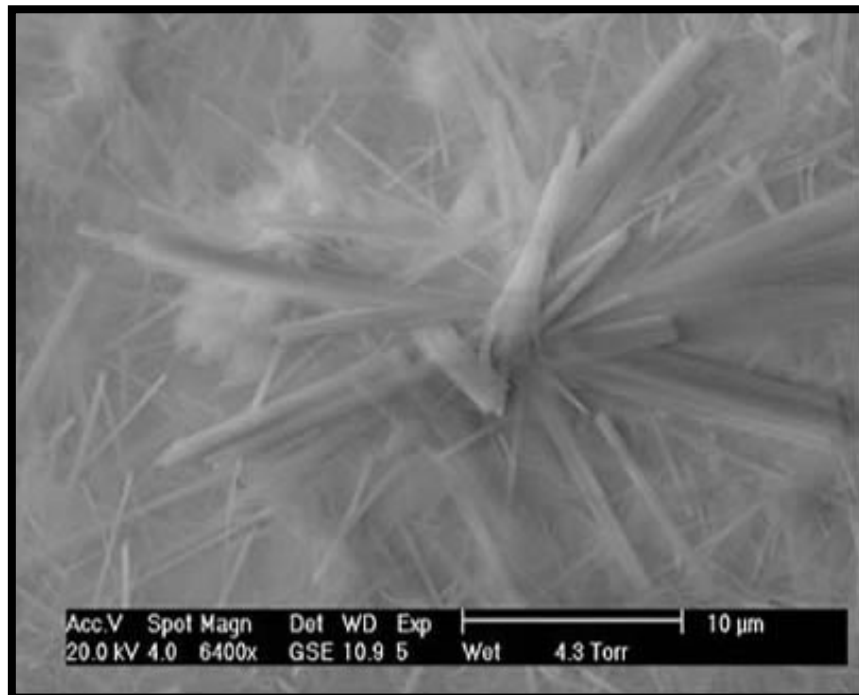


Fig 4.7. Cristal de etringita.

Fonte: Sheffield Hallam University. Materials and Engineering Research Institute, 2007, apud Mehta e Monteiro, 1994.

A presença de microfissuras é outro fator decisivo para que a zona de transição apresente baixa resistência. As fissuras podem ser resultado das mais variadas causas, como por exemplo, o teor de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto e umidade ambiente. A zona de transição está sujeita a fissuração quando tensões de tração causadas por movimentos diferenciais agem entre o agregado e a pasta. Essas movimentações são comumente provenientes de variações térmicas e de umidade do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

5. MATERIAIS E METODOLOGIA

5.1. SELEÇÃO DOS MATERIAIS

A seleção dos materiais utilizados nos experimentos que subsidiaram esta pesquisa envolveu mais critérios práticos do que critérios técnicos. Houve o cuidado de se trabalhar com materiais comumente disponíveis no mercado, para que os métodos e procedimentos envolvidos no estudo não se tornassem apenas possíveis de se praticar em laboratórios bem equipados.

Por isso, todos os materiais envolvidos nos experimentos foram adquiridos em empresas de Belo Horizonte, sem envolver qualquer matéria-prima especial e difícil de ser encontrada. O único material incomum que, ainda não é encontrado nos comércios de materiais de construção é a nanocerâmica, objeto de estudo deste trabalho.

5.1.1. NANOCERÂMICA

A nanocerâmica estudada neste trabalho é procedente da SOUTHERN CLAY PRODUCTS uma subsidiária da ROCKWOOD SPECIALTIES, localizada no estado do Texas nos Estados Unidos da América.

Esta nanocerâmica é uma argila proveniente da Montmorillonita, que apresenta elevada razão de aspecto, boa capacidade de delaminação, partículas resistentes a solventes, às temperaturas empregadas em polimerização e às temperaturas e atrito do processo de extrusão, no entanto, em seu estado natural tende a ser hidrofílica. Como os polímeros são organofílicos, é necessária a modificação superficial da argila com surfactantes catiônicos, como alquilamônio ou alquilfosfônio, onde ocorre a substituição dos cátions trocáveis, geralmente Na⁺ presentes em lacunas existentes entre as camadas estruturais por cátions orgânicos de cadeias longas, o que torna a argila organofílica, além de proporcionar a expansão entre as galerias, facilitando assim a incorporação das cadeias poliméricas. (ATLAS DE MINERAIS DE ROCHAS – UNESP, 1998).

As características da nanocerâmica utilizada neste trabalho apresentadas na Tabela 5.1 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5.1 - Características da nanocerâmica utilizada no estudo

Cloisite Na⁺		
Massa Específica		2,86 g/cm ³
Área Superficial Específica – BET		505,05 m ² /g
Granulometria a laser	D ₁₀	2,00 µm
	D ₅₀	6,00 µm
	D ₉₀	13,00 µm

5.1.2. CIMENTO

Foi utilizado neste estudo o cimento CP V – ARI, podendo conter até 5% de adição mineral. O cimento não ficou estocado por longos períodos, sendo consumido no prazo de até quatro dias após sua chegada no laboratório de concreto do DEMC / UFMG. Dessa forma, procurou-se evitar perda das propriedades do cimento, por consequência de más condições de armazenamento ou vencimento do prazo de validade. As características do cimento utilizado neste trabalho estão apresentadas na Tabela 5.2 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5.2 - Características do cimento CP V – ARI

Massa Específica		3,07 g/cm ³
Área Superficial Específica – Blaine		4700 cm ² /g
Granulometria a laser	D ₁₀	1,12 µm
	D ₅₀	9,74 µm
	D ₉₀	23,40 µm
Início de Pega		80 min
Fim de Pega		245 min

Resistência à Compressão (MPa)

1 dia	32,5
3 dias	41,1
7 dias	47,0
28 dias	54,7

5.1.3. AGREGADO MIÚDO

A areia utilizada na produção dos concretos envolvidos no estudo foi uma areia natural lavada, composta por sílica, adquirida em um comércio varejista de materiais de construção na Região de Lagoa Santa / MG, procedente da Mineração PC. O agregado possui módulo de finura igual a 2,60, massa específica aparente correspondente a 2,59 g/cm³ e granulometria bem graduada.

5.1.4. AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado nos concretos envolvidos nesta pesquisa foi uma brita de gnaíse, procedente da Mineração PC, extraída na Região de Lagoa Santa / MG. Suas principais características apresentadas foram: dimensão máxima característica igual a 19 mm e massa específica de 2,71 g/cm³.

5.1.5. ADITIVO

O aditivo usado foi o TEC-MULT 416 LF que é um plastificante e redutor de água multifuncional para concreto. Este aditivo é líquido pronto para uso, isento de cloretos, destinado a plastificar o concreto. Este aditivo é a base de lignosulfonato, sendo a lignina celulósica de Cálcio, o mesmo atende aos requisitos da NBR 11.768 (Tipo P) e ASTM C 494 (Tipo A e F) e é compatível com a maioria dos tipos de cimento disponíveis no mercado. Este aditivo, quando usado, proporciona ao concreto os seguintes benefícios:

- Grande redução do teor de ar incorporado;
- Manutenção da plasticidade por períodos mais longos;
- Melhora no bombeamento;
- Aumento das resistências finais;
- Melhora a impermeabilidade;
- Aumenta a durabilidade.

As características do aditivo utilizado neste trabalho estão apresentadas na Tabela 5.3 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5.3 - Características técnicas do TEC-MULT 416 LF

Função principal	Plastificante
Aspecto	Líquido de cor castanho escuro
pH	9,0±1,0
Massa específica	1,180 ±0,02 g/cm ³
Teor de sólidos	37,19% ±1,86

5.2. METODOLOGIA

Este item apresenta os métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. A moldagem de corpos de prova sem a adição de nanocerâmica, chamados de padrão e moldagem de corpos de prova com a adição de nanocerâmica, as proporções utilizadas e os ensaios destrutivos e não destrutivos realizados nos corpos de prova de argamassa e corpos de prova de concreto confeccionados para o estudo.

5.2.1. DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA – MÉTODO QUÍMICO

Visando avaliar a influência dos materiais sugeridos, optou-se por utilizar, exclusivamente a nanocerâmica proveniente da Montmorillonita. O material foi previamente misturado com o cimento em um misturador mecânico TEC 103 fabricado pela TECNAL LTDA com velocidade de rotação de 1200 rpm por 30 minutos e capacidade do misturador de 5 litros, na quantidade de 35% do volume de cimento necessário para a realização do ensaio de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico. A mistura da nanocerâmica com cimento Portland foi acondicionada em saco plástico resistente, e enviada à área de tecnologia da Associação Brasileira de Cimento Portland.

Para verificar se o material em estudo possui características pozolânicas foi realizado o ensaio de pozolanicidade, de acordo com a Norma Brasileira NBR 5753 (1992) – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica em cimento Portland Pozolânico.

Este método consiste em relacionar o teor de óxido de cálcio na solução, com a alcalinidade total da solução em contato com a pasta de cimento. Neste método a atividade pozolânica é avaliada comparando a quantidade Ca(OH)_2 presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com a quantidade de Ca(OH)_2 que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade. O material analisado pode ou não reagir com a solução utilizada no ensaio. De acordo com as reações ocorridas na mistura e com o auxílio de uma isoterma de solubilidade de Ca(OH)_2 , determina-se, portanto, se o material é ou não pozolânico. O ensaio foi realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, em São Paulo.

5.2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Os agregados gráudo e miúdo, utilizados nas argamassa e nos concretos envolvidos neste estudo, foram caracterizados no Laboratório de Concreto da Construtora Andrade Gutierrez S.A.

5.2.2.1. AGREGADO MIÚDO

A caracterização da areia envolveu os seguintes ensaios:

- Granulometria, de acordo com a norma NBR NM 248 (2003) Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- Massa unitária, de acordo com a norma NBR NM 45 (2006) - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- Massa específica, de acordo com a norma NBR NM 52 (2006) - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente;
- Torrões de argila, de acordo com a norma NBR NM 44 (2006) - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis;
- Materiais pulverulentos, de acordo com a norma NBR NM 46 (2006) - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem.

5.2.2.2. AGREGADO GRAÚDO

A caracterização do agregado gráudo, utilizado nos concretos preparados e avaliados neste estudo, envolveu os seguintes ensaios:

- Granulometria, de acordo com a norma NBR NM 248 (2003) - Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- Massa unitária, de acordo com a norma NBR NM 45 (2006) - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- Massa específica, de acordo com a norma NBR NM 53 (2006) - Agregado gráudo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- Torrões de argila, de acordo com a norma NBR NM 44 (2006) - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

5.2.3. DOSAGEM DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA

Após o ensaio de determinação de atividade pozolânica da nanocerâmica com o cimento Portland pozolânico e caracterização dos materiais a serem empregados nos concretos, foram realizados ensaios preliminares em argamassas e definidos traços de argamassa padrão, ou seja, sem adição de nanocerâmica e outros traços de argamassa com adição de nanocerâmica para definição da porcentagem a serem utilizadas no concreto.

Os traços das argamassas avaliados no estudo foram moldados de acordo com a NBR 5738 (2003) - Argamassa - Moldagem de corpo de prova de argamassa. Foi estabelecido o fator água/cimento (A/C) de 0,48, com base na resistência dos cimentos aos 28 dias, para este fator A/C, foi utilizado o traço de 1:3. Os traços estão apresentados na tabela 5.4.

Para a relação água/cimento (A/C) de 0,48, a nanocerâmica foi adicionada as argamassas nas proporções de 0%, 2%, 4%, 6% e 8% do peso do cimento, sem nenhuma alteração nas proporções dos outros materiais. Este procedimento foi adotado para que a única variável fosse o percentual de adição de nanocerâmica contida nas argamassas. Isto facilita a avaliação da influência da adição de nanocerâmica no desempenho final das argamassas analisadas.

Vale ressaltar que, nesta parte do trabalho, não foi adicionado qualquer tipo de aditivo químico, visando avaliar somente a influência da adição mineral (nanocerâmica) nas propriedades das argamassas. O material foi previamente misturado com o cimento em um misturador mecânico TEC 103 fabricado pela TECNAL LTDA com velocidade de rotação de 1200 rpm por 30 minutos e capacidade do misturador de 5 litros.

Tabela 5.4 - Traços de argamassa

Cimento:	650,00 g
Relação A/C:	0,48
Água:	312,00 g
Areia:	1950,00 g
Traço:	1:3
Nano cerâmica em %:	2% 13 g
	4% 26 g
	6% 39 g
	8% 52 g

5.2.4. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA

Foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para cada traço de argamassa, para serem submetidos aos ensaios de compressão simples avaliada nas idades de 3, 7 e 28 dias, segundo a NBR 7215 (1996). (Figura 5.3)



Fig 5.1. Mistura de argamassa para moldagem.
Fonte: CONSAG, 2008.

Como são cinco traços diferentes, foram moldados um total de 60 corpos de prova com essas dimensões.

Após moldagem, os corpos de prova foram mantidos à sombra por 24 horas e, após este período, foram removidos da forma e mantidos em câmara úmida até a data dos ensaios. A moldagem e a cura dos corpos-de-prova foram realizadas de acordo com a NBR 5738 (2003) – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos. (Figura 5.4)



Fig 5.2. Corpos de prova de argamassa.
Fonte: CONSAG, 2008.

A influência da nanocerâmica nos parâmetros de trabalhabilidade da argamassa no estado fresco foi avaliada visualmente durante a moldagem dos corpos de prova, ou seja, não foram executados nenhuns ensaios segundo a norma para determinação da consistência ou qualquer outra propriedade da argamassa.

5.2.5. DOSAGEM DOS TRAÇOS DE CONCRETO

Após a moldagem e rompimento dos corpos de prova de argamassa e de posse dos resultados obtidos dos ensaios de compressão simples avaliada nas idades de 3, 7 e 28 dias, segundo a NBR 7215 (1996), foram definidas as porcentagens de nanocerâmica a ser adicionada ao cimento para moldagem de corpos de prova de concreto.

Após a obtenção dos resultados à compressão simples dos corpos de prova de argamassa, foram definidos os traços a serem utilizados nos concretos. Os traços dos concretos avaliados no estudo foram obtidos de acordo com o método de dosagem do ACI (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Foram estabelecidos três fatores água/cimento (A/C) de 0,45, 0,50 e 0,55 e, com base na resistência dos cimentos aos 28 dias, para cada fator a/c, foram calculados os traços e os consumos de cada material por metro cúbico de concreto adensado.

Para cada uma das três relações A/C, a nanocerâmica foi adicionada aos concretos nas proporções de 0%, 2% e 4% da massa do cimento, sem nenhuma alteração nas proporções dos outros materiais. As proporções de 6% e 8% não foram utilizadas devido aos baixos resultados obtidos no ensaio de compressão axial aos 28 dias para os traços feitos para argamassa. Este procedimento foi adotado para que a única variável fosse o percentual de adição de nanocerâmica contida nos concretos. Isto facilita a avaliação da influência da adição de nanocerâmica no desempenho final dos concretos analisados. Os traços estão apresentados na tabela 5.5.

Vale ressaltar que, nesta parte da pesquisa, foi adicionado um tipo de aditivo químico, visando melhorar as propriedades dos concretos, com percentual fixo de 0,5% do peso do cimento. O material foi previamente misturado com o cimento em um misturador mecânico TEC 103 fabricado pela TECNAL LTDA com velocidade de rotação de 1200 rpm por 30 minutos e capacidade do misturador de 5 litros, para melhor homogeneização.

O abatimento de tronco de cone (slump) não foi tomado como referência em nenhum momento, ou seja, não se teve nenhuma preocupação em mantê-lo constante enquanto se variava o percentual de adição de nanocerâmica. Porém, os cálculos dos traços foram desenvolvidos de forma a se obter abatimentos para obter concretos com boa trabalhabilidade. Como a única variável nos concretos é o percentual de adição de nanocerâmica, espera-se que o abatimento de tronco de cone diminua gradativamente à medida que se aumenta o percentual de adição de nanocerâmica.

Tabela 5.5 - Traços de concreto com nanocerâmica

%	A/C	TRAÇO	CIMENTO	AREIA	BRITA	ÁGUA	ADITIVO	NANOCERÂMICA
			Kg	Kg	Kg	Lts	Lts	Kg
0								0,000
2	0,45	1:1,29:2,36	15,68	20,23	37,00	7,06	0,08	0,314
4								0,627
0								0,000
2	0,50	1:1,53:2,62	14,11	21,59	36,97	7,06	0,07	0,282
4								0,564
0								0,000
2	0,55	1:1,77:2,88	12,83	22,71	36,95	7,06	0,06	0,257
4								0,513

Traços calculados para o volume de 0,0336 m³ de concreto.

5.2.6. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Foram moldados 18 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada traço de concreto, para serem submetidos aos ensaios de compressão axial e ensaios de tração diametral avaliadas nas idades de 3, 7 e 28 dias. O adensamento foi realizado com a utilização de uma haste de adensamento, em duas camadas e doze golpes em cada uma. Como são nove traços diferentes, foram moldados um total de 108 corpos de prova com essas dimensões. (Figura 5.3)

Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada traço de concreto para cálculo do fluxo de água passante. O adensamento foi realizado com a utilização de uma haste de adensamento, em duas camadas e doze golpes em cada uma. Foi moldado um total de 9 corpos de prova para realização do referido ensaio.



Fig 5.3. Moldagem dos corpos de prova de concreto.
Fonte: CONSAG, 2008.

Após moldagem, os corpos de prova foram mantidos à sombra por 24 horas e, após este período, foram removidos da forma e mantidos em câmara úmida até a data dos ensaios. A moldagem e a cura dos corpos-de-prova foram realizadas de acordo com a NBR 5738 (2003) – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos.

A influência da nanocerâmica nos parâmetros de trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi avaliada pela medida de sua consistência, através da norma NBR 7223 (1992) – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. (Figura 5.4)



Fig. 5.4. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
Fonte: CONSAG, 2008.

5.2.7. ENSAIOS FÍSICOS NOS CONCRETOS ENDURECIDOS

5.2.7.1. CÁLCULO DO FLUXO DE ÁGUA PASSANTE

A permeabilidade de um concreto, ou de um material qualquer, se caracteriza pela capacidade de percolação de um fluido em sua massa, em uma unidade de área por unidade de espessura, quando este fluido é submetido a uma determinada pressão.

O fluxo de água que percola em um concreto é fortemente influenciado pelos poros capilares da pasta de cimento, causados, sobretudo, pelo fator água/cimento, pelo nível de hidratação do cimento, pelos agregados utilizados, pelo método de adensamento e pelo processo de cura daquele concreto.

Para calcular o fluxo de água passante, foi utilizado um permeabilímetro da German Instrument, capaz de efetuar a medição em peças com áreas relativamente grandes, por exemplo, em corpos de prova cilíndricos de diâmetros iguais ou superiores a 10 cm.

Para atender às exigências de dimensões do equipamento, foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, exclusivamente para cálculo do fluxo de água passante.

O fluxo de água passante nos corpos de prova foi avaliada medindo-se os índices de fluxo no topo e na base do elemento. Para isso, todos os corpos de prova foram serrados em pastilhas cilíndricas de 10 cm de diâmetro e 3 cm de espessura, sendo extraída, de cada um, uma pastilha do topo e outra da base do corpo de prova. Para evitar influências da segregação e da exsudação nos resultados, as pastilhas da base e do topo dos CP's foram retiradas a partir de 2 cm das extremidades dos elementos. (Figura 5.5)



Fig. 5.5. Corpo de prova para determinação da permeabilidade.

Após a serragem, as pastilhas foram expostas ao ar, na sombra, para secagem das suas superfícies. Após a secagem, passou-se para a execução do ensaio. Em uma base metálica, com dois alicates de pressão, o instrumento de medição (com um reservatório de água) foi pressionado contra a pastilha a ser ensaiada, com um anel de neoprene entre eles, capaz de selar o contato entre o equipamento e a pastilha de concreto, e evitar a perda de pressão durante o contato, conforme Figura 5.6. Em seguida, enrosca-se a tampa com o reservatório superior, que possui uma válvula e uma graduação em milímetros. Adiciona-se água no equipamento, fecha-se a válvula do reservatório, e ao enroscar a tampa, o aparelho vai aplicando pressão gradativamente sobre a pastilha até alcançar uma pressão no sistema de 0,4 Bares no sistema, conforme Figuras 5.6 e 5.7. A perda da pressão indica que a água está percolando pela pastilha. Ao perceber qualquer diminuição da pressão, ajusta-se o mecanismo de rosca, a fim de manter uma pressão constante no sistema de 0,4 Bar

conforme figura 5.8. Mantendo-se a pressão constante, faz-se a leitura (em mm), no reservatório graduado, a cada minuto e anotam-se valores.



Fig 5.6. Permeabilímetro preso à pastilha por dois alicates de pressão



Fig 5.7. Pêndulo enroscado pronto para a água ser adicionada.



Fig 5.8. Manômetro indicando pressão no sistema igual a 0,4 Bar.

O fluxo de água que passa pela pastilha de concreto foi calculado pela vazão de água, ou seja, volume de água que passa pela área da superfície do elemento de concreto num determinado intervalo de tempo. Este fluxo foi obtido através da Equação 5.1:

$$q = 78,6 \times (g1 - g2) / 3018 \times t \quad (5.1)$$

onde:

q = Fluxo (mm/s)

$g1, g2$ = Leitura no micrômetro (mm)

t = Intervalo de tempo entre leituras (s)

Tabela 5.6 – Quantidades de ensaios realizados.

PERMEABILIDADE	A/C	IDADE	0%	2%	4%
	0,45	28	1	1	1
	0,50	28	1	1	1
	0,55	28	1	1	1
TOTAL			3	3	3
TOTAL DE ENSAIOS					9

5.2.7.2. COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de compressão axial é um ensaio destrutivo e tem o objetivo de avaliar a resistência à compressão suportada pelo concreto a ser avaliado. Vale ressaltar que os critérios de mistura e moldagem influenciam fortemente o resultado, visto que, se o concreto não estiver homogêneo ou a moldagem e adensamento não forem realizados adequadamente, provavelmente, a massa dos corpos de prova também não será homogênea e compacta, contendo nichos que comprometem a resistência do elemento a ser avaliado.

Neste estudo foram ensaiados 2 corpos de prova para cada traço de concreto produzido aos 3, 7 e 28 dias, num total de 54 corpos de prova, submetidos ao rompimento por compressão axial.

Os corpos de prova ensaiados não sofreram capeamento com enxofre no topo e na base. Foram utilizados discos de neoprene de alta densidade, confinados em um aro metálico, conforme Figura 5.9, para regularização das superfícies da base e do topo dos corpos de prova, para distribuição uniforme da carga na área circular do elemento ensaiado. Os discos de neoprene são inseridos diretamente na prensa, um sob e outro sobre o corpo de prova no momento do ensaio, conforme Figura 5.10. A escala de força escolhida para o ensaio deve ser tal que a força de ruptura do corpo de prova ocorra no intervalo em que a máquina foi calibrada. O carregamento de ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, a velocidade de carregamento deve ser mantida constante durante todo o ensaio. O equipamento utilizado foi uma prensa digital PAVITEST – Modelo 10/95 com capacidade de carga de 120 Ton, mostrada na Figura 5.11.



Fig 5.9. Disco de neoprene – Substitui capeamento com enxofre.
Fonte: ALVES, 2008.



Fig 5.10. Regularização de face com disco de neoprene.
Fonte: CONSAG, 2008.



Fig 5.11. Prensa digital.
Fonte: CONSAG, 2008.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Concreto da Construtora Andrade Gutierrez S.A. na obra do Centro Administrativo de Minas Gerais, segundo as recomendações da norma NBR 5739 (1994) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto.

A resistência à compressão deve ser calculada através da Equação 5.2:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times d^2} \quad (5.2)$$

onde:

f_c = Resistência à compressão, em MegaPascals;

F = Força máxima alcançada, em Newtons;

d = Diâmetro do corpo de prova, em milímetros.

Tabela 5.7 – Quantidades de ensaios realizados.

COMPRESSÃO	A/C	IDADE	0%	2%	4%
	0,45		3	2	2
		7	2	2	2
		28	2	2	2
0,50		3	2	2	2
		7	2	2	2
		28	2	2	2
0,55		3	2	2	2
		7	2	2	2
		28	2	2	2
TOTAL			18	18	18
TOTAL DE ENSAIOS					54

5.2.7.3. TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de tração por compressão diametral é um ensaio destrutivo e tem o objetivo de avaliar a resistência à tração suportada pelo concreto a ser avaliado. Vale ressaltar que os critérios de mistura e moldagem influenciam fortemente o resultado, visto que, se o concreto não estiver homogêneo ou a moldagem e adensamento não forem realizados adequadamente, provavelmente, a massa dos corpos de prova também não será homogênea e compacta, contendo nichos que comprometem a resistência do elemento a ser avaliado.

Neste estudo foram ensaiados 2 corpos de prova para cada traço de concreto produzido aos 3, 7 e 28 dias, num total de 54 corpos de prova, submetidos ao rompimento por tração por compressão diametral.

O contato entre os corpos de prova ensaiados e os pratos da máquina de ensaio deve dar-se somente ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas do corpo de prova. Deve-se colocar entre os pratos e o corpo de prova em ensaio, duas tiras de chapa dura de fibra de madeira conforme especificado na NBR 10024 de comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova e seção transversal com as dimensões da figura 5.12. Deve-se ajustar os pratos da máquina até que seja obtida uma compressão capaz de manter em posição o corpo de prova conforme figura 5.13. A carga deve ser aplicada continuamente, sem choque, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, até a ruptura do corpo de prova, conforme figura 5.14. O equipamento utilizado foi prensa digital PAVITEST – Modelo 10/95 com capacidade de carga de 120 Ton, mostrada na Figura 5.13.

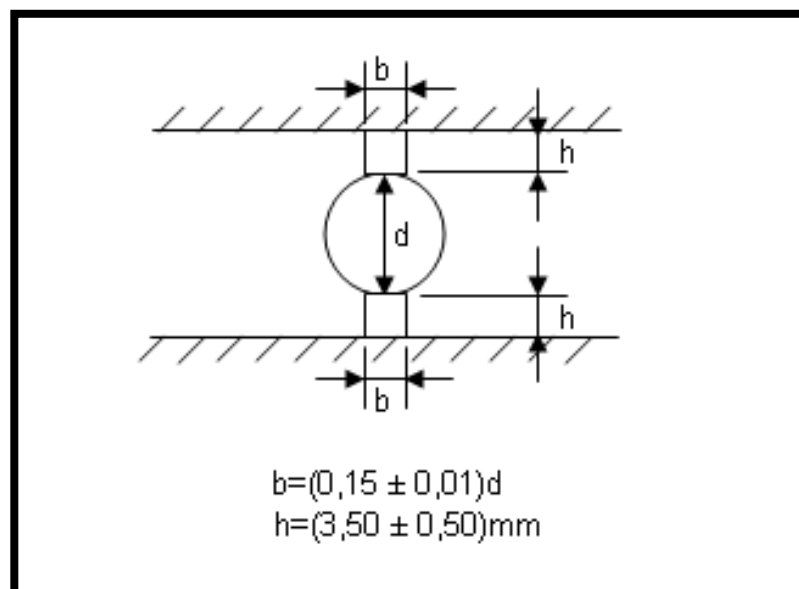


Fig 5.12. Disposição do corpo de prova.
 Fonte: NBR 7222, 1994.



Fig 5.13. Corpo de prova ajustado na máquina.
Fonte: CONSAG, 2008.



Fig 5.14. Corpo de prova rompido por tração diametral.
Fonte: CONSAG, 2008.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Concreto da Construtora Andrade Gutierrez S.A. na obra do Centro Administrativo de Minas Gerais, segundo as recomendações da norma NBR 7222 (1994) – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

A resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada através da Equação 5.3:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi \times d \times L} \quad (5.3)$$

onde:

$f_{t,D}$ = Resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F = Carga máxima obtida no ensaio , em (kN);

d = Diâmetro do corpo de prova, em (mm);

L = Altura do corpo de prova, em (mm).

Tabela 5.7 – Quantidades de ensaios realizados.

TRAÇÃO	A/C	IDADE	0%	2%	4%
	0,45		3	2	2
		7	2	2	2
		28	2	2	2
0,50		3	2	2	2
		7	2	2	2
		28	2	2	2
0,55		3	2	2	2
		7	2	2	2
		28	2	2	2
TOTAL			18	18	18
TOTAL DE ENSAIOS					54

Foram realizados 117 ensaios em corpos de provas de concreto para determinação do fluxo de água passante, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral e 60 ensaios em corpos de provas de argamassa para determinação da resistência à compressão axial, nesta quantidade de ensaios realizados não foram incluídos os ensaios feitos para caracterização dos agregados que compuseram os traços dos concretos e os traços de argamassas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA - MÉTODO QUÍMICO

O ensaio para determinação de atividade pozolânica, realizado pelo método químico, confirmou que a nanocerâmica é um material pozolânico. O resultado proporciona maior confiabilidade de que, com esta granulometria, a nanocerâmica possui uma estrutura monoclinica, apresentando óxido de silício SiO_2 reativo. Isto, porém, significa que a adição de nanocerâmica é capaz de melhorar o desempenho de concretos, tendo em vista que é possível sua atuação como efeito filler ou material pozolânico.

As reações ocorridas na solução, contendo amostra da nanocerâmica, utilizada no ensaio foram suficientes para que o material fosse considerado pozolânico, pois obteve-se um baixo teor de cálcio após um determinado período de possíveis reações, ocasionando uma alcalinidade suficientemente elevada, de modo que a plotagem do resultado do ensaio no gráfico, “teor de óxido de cálcio na solução em contato com a pasta de cimento versus a alcalinidade total da solução em contato com a pasta de cimento” (Figura 6.1), ficasse abaixo da isoterma de solubilidade, indicando que o material é pozolânico.

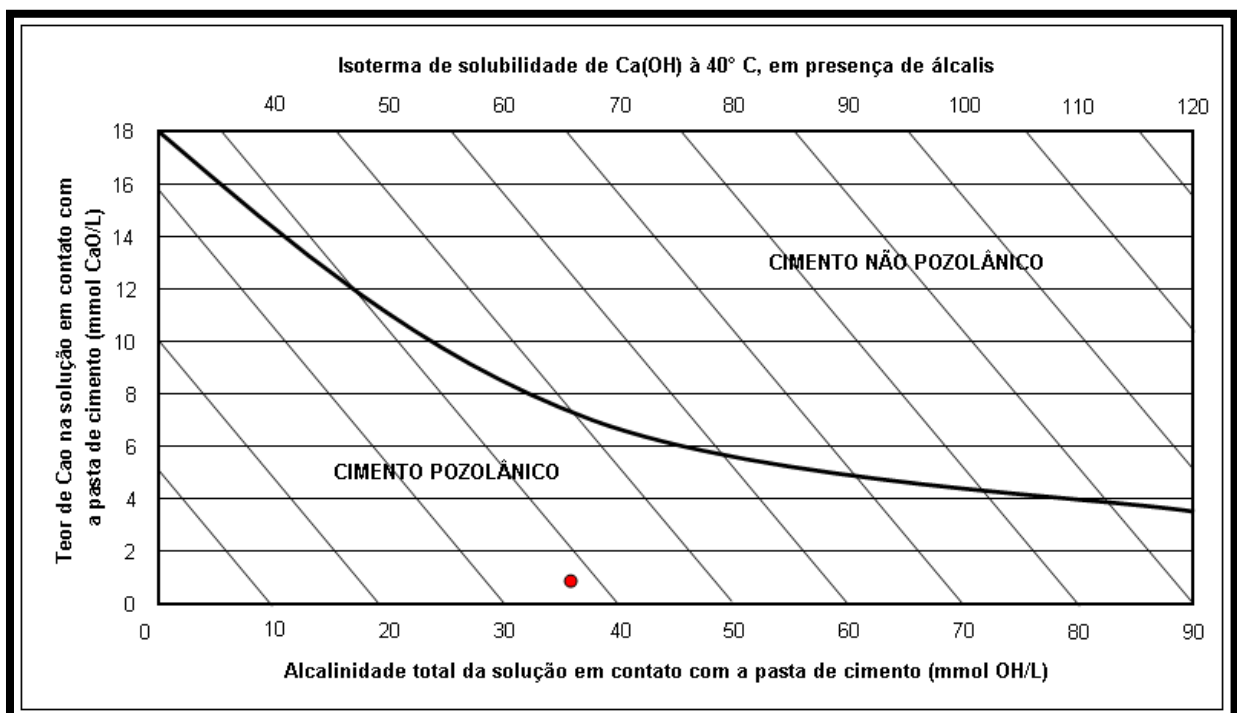


Fig 6.1. Resultado do ensaio de atividade pozolânica – Método químico.

Fonte: ABCP, 2008.

A figura 6.1 apresenta o diagrama de pozolanicidade aos 7 dias, ilustrando o teor de CaO em função da alcalinidade total, o resultado indica que a nanocerâmica com esta idade de 7 dias já se mostrou pozolânica, com isso, não foi necessário levar o ensaio até aos 14 dias.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

6.2.1. AGREGADO MIÚDO

A caracterização da areia utilizada nos concretos envolvidos neste estudo pode ser verificada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Caracterização do agregado miúdo utilizado no estudo.

Agregado Miúdo	
Areia Natural Lavada	
Módulo de finura (NBR NM 248)	2,60
Massa unitária (NBR NM 45)	1,45 g/cm ³
Massa específica (NBR NM 52)	2,59 g/cm ³
Torrões de argila (NBR NM 44)	Sem presença
Material fino passante através da peneira # 75 µm (NBR NM 46)	0,80 %

A areia utilizada possui uma distribuição granulométrica bem graduada, com um percentual de finos bastante reduzido, fator importante na fabricação de concretos, pois um alto percentual de materiais argilosos proporciona um grande consumo de água e, conseqüentemente, maior consumo de cimento, o que aumenta significativamente os custos de produção de concretos. Esta pureza do agregado é um fator importante para o bom desempenho de concretos.

6.2.2. AGREGADO GRAÚDO

As características da brita utilizada nos concretos envolvidos neste estudo está apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Caracterização do agregado graúdo utilizado no estudo.

Agregado Graúdo	
Brita Gnaisse	
Módulo de finura (NBR NM 248)	6,92
Dimensão Máxima Característica (NBR NM 248)	19 mm
Massa unitária (NBR NM 45)	1,41 g/cm ³
Massa específica (NBR NM 52)	2,71 g/cm ³
Torrões de argila (NBR NM 44)	Sem presença

O agregado utilizado no estudo é proveniente de rochas gnáissicas e possui formas bastante irregulares, sem nenhuma predominância marcante de formas cúbicas ou lamelares, além de ser um material bastante limpo, com pouca presença de partículas finas na forma de pó. O material é, também, totalmente isento de presença de argilas na forma de torrões.

É importante ressaltar que as dimensões dos grãos do agregado são compatíveis com as dimensões das formas utilizadas para moldar os corpos de prova de concretos.

6.2.3. ARGAMASSA

Foi observado que para o teor único de água/cimento (A/C) = 0,48, à medida que se adicionou a nanocerâmica, houve melhora considerável na resistência para determinadas porcentagens e gradativa redução na tensão de ruptura para outras porcentagens, como mostram as Tabelas 6.3, 6.4 e 6.5.

Tabela 6.3 – Resultados da compressão axial das argamassas – 3 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,48	3	1	0	4,76	24,20	24,40
		2		4,48	22,80	
		3		4,86	24,80	
		4		5,04	25,80	
		1	2	5,74	29,20	28,03
		2		5,26	26,80	
		3		5,48	27,90	
		4		5,54	28,20	
		1	4	4,04	20,60	22,18
		2		4,42	22,50	
		3		4,32	22,00	
		4		4,64	23,60	
		1	6	3,52	17,90	18,20
		2		3,32	16,90	
		3		3,58	18,20	
		4		3,88	19,80	
		1	8	2,24	11,40	11,33
		2		2,24	11,40	
		3		2,22	11,30	
		4		2,20	11,20	

Tabela 6.4 – Resultados da compressão axial das argamassas – 7 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,48	7	1	0	5,28	26,90	28,00
		2		5,80	29,50	
		3		5,28	26,90	
		4		5,64	28,70	
		1	2	7,08	36,10	37,95
		2		7,40	37,70	
		3		7,68	39,10	
		4		7,64	38,90	
		1	4	6,12	31,20	30,05
		2		5,60	28,50	
		3		5,80	29,50	
		4		6,08	31,00	
		1	6	4,24	21,60	21,33
		2		4,00	20,40	
		3		4,24	21,60	
		4		4,26	21,70	
		1	8	2,88	14,70	15,10
		2		2,88	14,70	
		3		3,00	15,30	
		4		3,08	15,70	

Tabela 6.5 – Resultados da compressão axial das argamassas - 28 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,48	28	1	0	9,92	50,50	51,75
		2		10,62	54,10	
		3		10,00	50,90	
		4		10,12	51,50	
		1	2	10,32	52,60	53,13
		2		10,52	53,60	
		3		10,34	52,70	
		4		10,52	53,60	
		1	4	9,92	50,50	50,35
		2		9,92	50,50	
		3		9,88	50,30	
		4		9,84	50,10	
		1	6	7,48	38,10	37,65
		2		7,40	37,70	
		3		7,36	37,50	
		4		7,32	37,30	
		1	8	5,96	30,40	30,95
		2		6,00	30,60	
		3		6,08	31,00	
		4		6,24	31,80	

O resumo das resistências médias à compressão axial das argamassas está apresentado nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4.

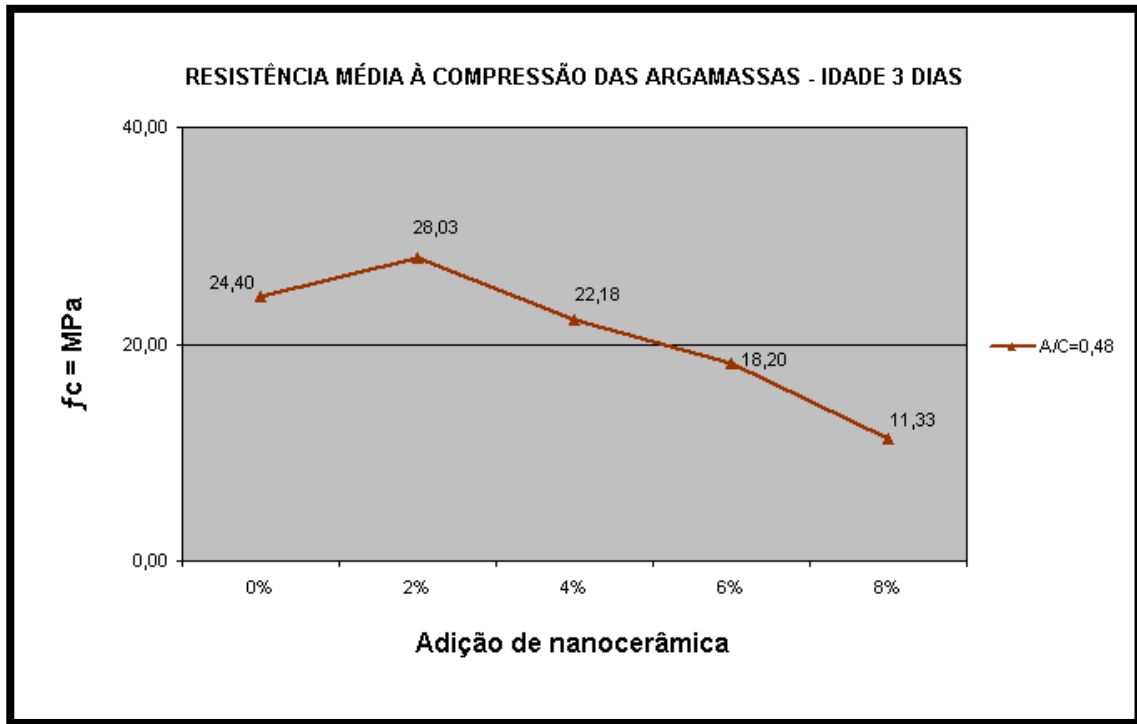


Fig 6.2. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 3 dias.

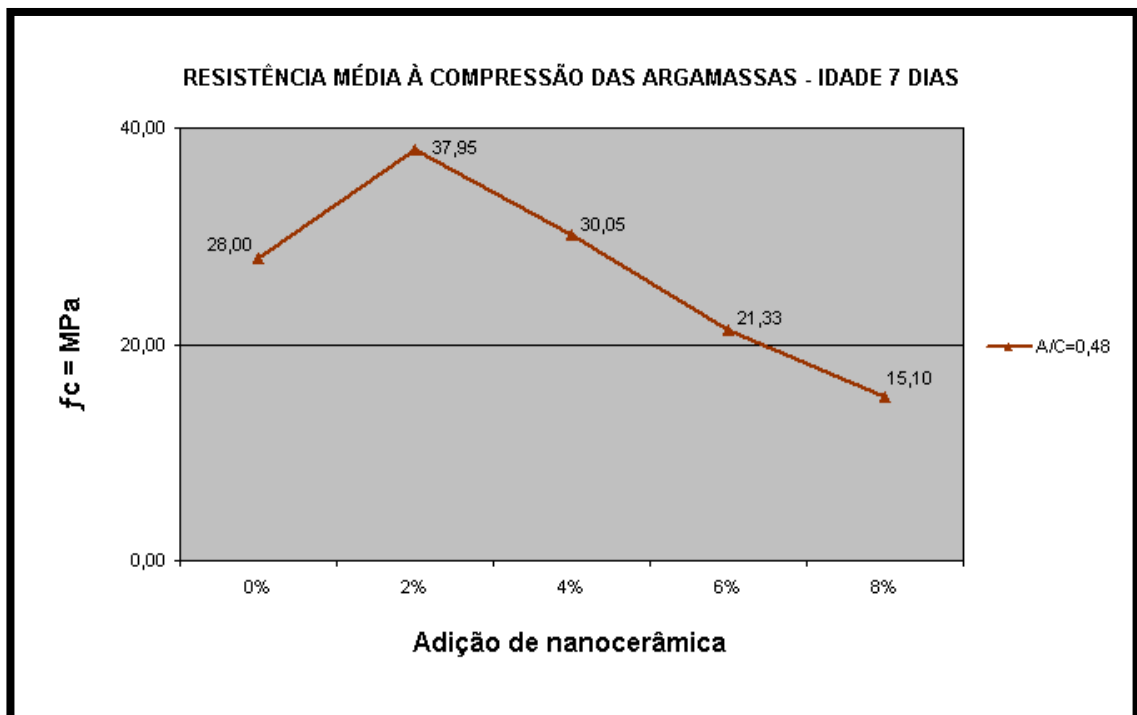


Fig 6.3. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 7 dias.

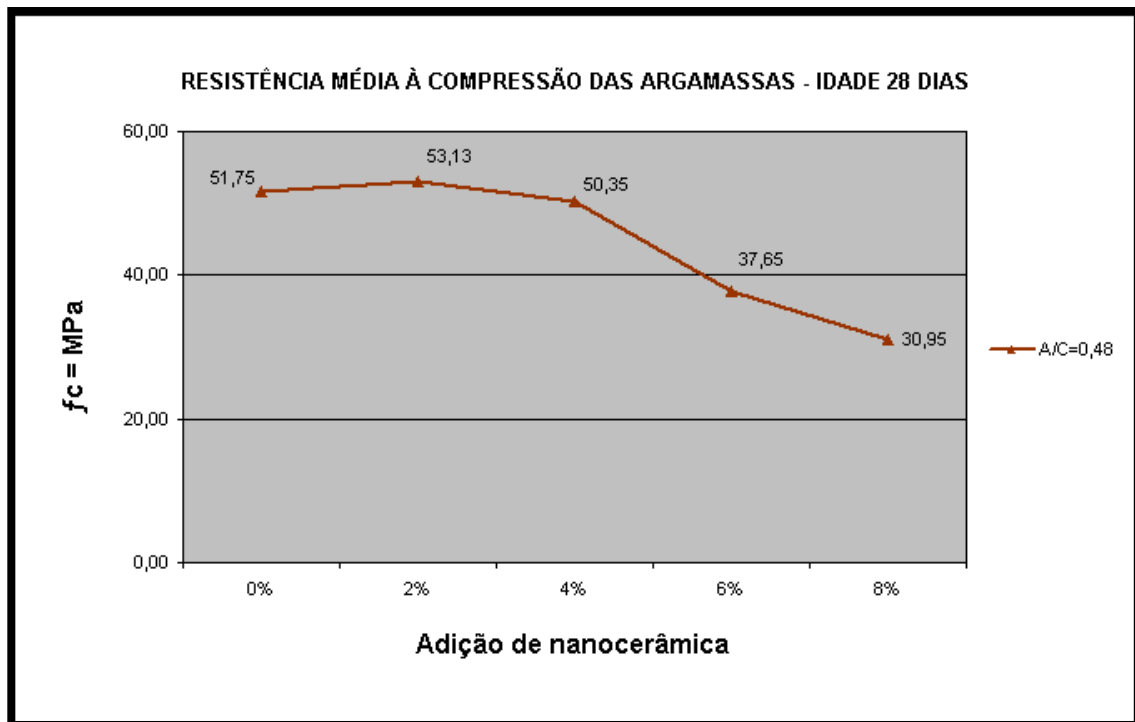


Fig 6.4. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias.

No geral, para valores acima de 2% houve uma tendência de redução da resistência a compressão das argamassas. Esses resultados podem estar relacionados à fixação da relação A/C, reduzindo, assim, a trabalhabilidade das argamassas à medida que os teores de nanocerâmica foram aumentados. Esta perda de trabalhabilidade foi observada visivelmente durante a moldagem dos corpos de prova.

As argamassas com fator A/C de 0,48 e com 2% e 4% de adição de nanocerâmica, apresentaram valores elevados de tensão média de ruptura aos 28 dias. Com a adição de nanocerâmica em 2% na argamassa ocorreu melhoria na tensão média de ruptura de 14,87%, 35,54% e 2,67% aos 3, 7 e 28 dias respectivamente, comparando-as com o traço sem adição de nanocerâmica e tensão de média ruptura de 24,40, 28,00 e 51,75 MPa aos 3, 7 e 28 dias respectivamente, conforme os gráficos das figuras 6.2, 6.3 e 6.4. Com a adição de nanocerâmica em 4% na argamassa tivemos melhoria na tensão média de ruptura de 7,32% somente aos 7 dias de idade, sendo que para 3 e 28 dias as tensões médias ficaram 10,01% e 2,78% abaixo, comparando-as com o traço padrão sem adição de nanocerâmica, conforme os gráficos das figuras 6.2 e 6.4.

A figura 6.3 mostra que a adição em 2% e 4% de nanocerâmica obteve melhora considerável na resistência a compressão da argamassa. A partir, destes resultados, adotou-se que estas seriam as porcentagens de nanocerâmica a ser adicionada aos traços dos concretos, já que as adições de 6% e 8% de nanocerâmica tiveram decréscimo nos valores da tensão média de ruptura.

6.3. TRABALHABILIDADE DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Como já era esperado, para todos os teores água/cimento (A/C), à medida que se aumentou a adição de nanocerâmica, houve gradativa redução no abatimento do tronco de cone (Slump), como mostra a Tabela 6.6. Essa redução está relacionada à elevada finura das partículas da nanocerâmica e de suas propriedades higroscópicas.

Tabela 6.6 – Traços utilizados nos concretos.

RELAÇÃO A/C	TEOR DE ADIÇÃO (%)	TRAÇO Cimento:Areia:Brita (massa)	ABATIMENTO TRONCO DE CONE (mm)	TEOR DE ARGAMASSA (%)	TEOR DE AGREGADO MIÚDO (%)
0,45	0		50	49,25	35,34
	2	1:1,29:2,36	5	49,72	35,34
	4		5	49,87	35,34
0,50	0		30	49,03	36,87
	2	1:1,53:2,62	10	49,62	36,87
	4		0	49,68	36,87
0,55	0		10	49,03	38,07
	2	1:1,77:2,88	0	49,37	38,07
	4		0	49,51	38,07

Foi observado que, no geral, com o aumento da adição de nanocerâmica, houve redução na trabalhabilidade durante a moldagem dos CP'S, onde a adição da nanocerâmica provocou redução no abatimento do tronco de cone. O concreto com fator A/C de 0,45 e com 2% e 4% de adição de nanocerâmica, a trabalhabilidade foi comprometida, devido o concreto possuir grande quantidade de finos, resultado da baixa relação A/C e da adição de nanocerâmica. Com essa grande quantidade de finos, o concreto tornou-se muito coeso, apresentando maior dificuldade de adensamento e manuseio. Um fato relevante foi a utilização do aditivo químico aos concretos, o aditivo usado foi o TEC-MULT 416 LF que é um plastificante e redutor de água multifuncional para concreto. Este aditivo é líquido pronto para uso, isento de cloretos, destinado a plastificar o concreto. Este aditivo quando é usado proporciona ao concreto grande redução do teor de ar incorporado e manutenção da plasticidade por períodos mais longos, além de outras melhorias.

A Tabela 6.6 mostra que o teor de argamassa, para a mesma relação A/C, apresenta ligeiro aumento à medida que o teor de nanocerâmica cresce. Para relação A/C = 0,45 apresentou maior perda de trabalhabilidade (50 – 5 mm) em comparação a relação A/C = 0,50 (30 – 10 e 0 m), ou seja, um efeito com maior transição (intermediário) e mais suave em A/C = 0,55 (10 – 0 mm).

6.4. ENSAIOS FÍSICOS REALIZADOS NOS CONCRETOS ENDURECIDOS

6.4.1. CÁLCULO DO FLUXO DE ÁGUA PASSANTE

Os resultados do ensaio de cálculo do fluxo de água passante realizados nos concretos envolvidos no estudo estão apresentados nas Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9.

Tabela 6.7 – Resultados de fluxo de água passante.

CP	A/C	ADIÇÃO %		INTERVALO DE LEITURA (min)	LEITURA DO MICRÔMETRO (mm)	FLUXO DE ÁGUA PASSANTE (mm/s)	q MÉDIO (mm/s)
1	0,45	0	TOPO	0	0,00	-	$1,29 \times 10^{-4}$
				1	1,13	$4,90 \times 10^{-4}$	
				2	1,28	$6,51 \times 10^{-5}$	
				3	1,36	$3,47 \times 10^{-5}$	
				4	1,40	$1,74 \times 10^{-5}$	
			5	1,49	$3,91 \times 10^{-5}$		
			BASE	0	0,00	-	$1,23 \times 10^{-4}$
				1	1,08	$4,69 \times 10^{-4}$	
				2	1,17	$3,91 \times 10^{-5}$	
				3	1,29	$5,21 \times 10^{-5}$	
4	1,36	$3,04 \times 10^{-5}$					
2	0,45	2	TOPO	0	0,00	-	$3,13 \times 10^{-4}$
				1	1,89	$8,20 \times 10^{-4}$	
				2	2,68	$3,43 \times 10^{-4}$	
				3	3,02	$1,48 \times 10^{-4}$	
				4	3,30	$1,22 \times 10^{-4}$	
			5	3,61	$1,35 \times 10^{-4}$		
			BASE	0	0,00	-	$3,05 \times 10^{-4}$
				1	1,77	$7,68 \times 10^{-4}$	
				2	2,20	$1,87 \times 10^{-4}$	
				3	2,79	$2,56 \times 10^{-4}$	
4	3,02	$9,98 \times 10^{-5}$					
5	3,51	$2,13 \times 10^{-4}$					
3	0,45	4	TOPO	0	0,00	-	$1,88 \times 10^{-4}$
				1	0,99	$4,30 \times 10^{-4}$	
				2	1,20	$9,12 \times 10^{-5}$	
				3	1,44	$1,04 \times 10^{-4}$	
				4	1,89	$1,95 \times 10^{-4}$	
			5	2,17	$1,22 \times 10^{-4}$		
			BASE	0	0,00	-	$1,91 \times 10^{-4}$
				1	1,01	$4,38 \times 10^{-4}$	
				2	1,16	$6,51 \times 10^{-4}$	
				3	1,40	$1,04 \times 10^{-4}$	
4	1,91	$2,21 \times 10^{-4}$					
5	2,20	$1,26 \times 10^{-4}$					

Tabela 6.8 – Continuação dos resultados de fluxo de água passante.

CP	A/C	ADIÇÃO %		INTERVALO DE LEITURA (min)	LEITURA DO MICRÔMETRO (mm)	FLUXO DE ÁGUA PASSANTE (mm/s)	q MÉDIO (mm/s)
1	0,50	0	TOPO	0	0,00	-	$1,14 \times 10^{-4}$
				1	1,01	$4,38 \times 10^{-4}$	
				2	1,10	$3,91 \times 10^{-5}$	
				3	1,17	$3,04 \times 10^{-5}$	
				4	1,25	$3,47 \times 10^{-5}$	
			5	1,31	$2,60 \times 10^{-5}$		
			BASE	0	0,00	-	$1,17 \times 10^{-4}$
				1	1,02	$4,43 \times 10^{-4}$	
				2	1,15	$5,64 \times 10^{-5}$	
				3	1,21	$2,60 \times 10^{-5}$	
4	1,30	$3,91 \times 10^{-5}$					
2	0,50	2	TOPO	0	0,00	-	$2,37 \times 10^{-4}$
				1	1,68	$7,29 \times 10^{-4}$	
				2	1,91	$9,98 \times 10^{-5}$	
				3	2,11	$8,68 \times 10^{-5}$	
				4	2,28	$7,38 \times 10^{-5}$	
			5	2,73	$1,95 \times 10^{-4}$		
			BASE	0	0,00	-	$1,94 \times 10^{-4}$
				1	1,59	$6,90 \times 10^{-4}$	
				2	1,88	$1,26 \times 10^{-4}$	
				3	1,98	$4,34 \times 10^{-5}$	
4	2,08	$4,34 \times 10^{-5}$					
5	2,23	$6,51 \times 10^{-5}$					
3	0,50	4	TOPO	0	0,00	-	$1,75 \times 10^{-4}$
				1	1,13	$4,90 \times 10^{-4}$	
				2	1,33	$8,68 \times 10^{-5}$	
				3	1,72	$1,69 \times 10^{-4}$	
				4	1,89	$7,38 \times 10^{-5}$	
			5	2,02	$5,64 \times 10^{-5}$		
			BASE	0	0,00	-	$1,81 \times 10^{-4}$
				1	1,17	$5,08 \times 10^{-4}$	
				2	1,40	$9,98 \times 10^{-5}$	
				3	1,70	$1,30 \times 10^{-4}$	
4	1,94	$1,04 \times 10^{-4}$					
5	2,09	$6,51 \times 10^{-5}$					

Tabela 6.9 – Continuação dos resultados de fluxo de água passante.

CP	A/C	ADIÇÃO %	INTERVALO DE LEITURA (min)	LEITURA DO MICRÔMETRO (mm)	FLUXO DE ÁGUA PASSANTE (mm/s)	q MÉDIO (mm/s)
1	0,55	0	0	0,00	-	$1,28 \times 10^{-4}$
			1	1,04	$4,51 \times 10^{-4}$	
			2	1,19	$6,51 \times 10^{-5}$	
			3	1,30	$4,77 \times 10^{-5}$	
			4	1,35	$2,17 \times 10^{-5}$	
			5	1,48	$5,64 \times 10^{-5}$	$1,31 \times 10^{-4}$
			0	0,00	-	
			1	1,08	$4,69 \times 10^{-4}$	
			2	1,24	$6,94 \times 10^{-5}$	
			3	1,33	$3,91 \times 10^{-5}$	
4	1,42	$3,91 \times 10^{-5}$	$2,64 \times 10^{-4}$			
5	1,51	$3,91 \times 10^{-5}$				
0	0,00	-				
1	1,89	$8,20 \times 10^{-4}$				
2	2,10	$9,12 \times 10^{-5}$				
2	0,55	2	3	2,71	$2,65 \times 10^{-5}$	$2,50 \times 10^{-4}$
			4	2,95	$1,04 \times 10^{-5}$	
			5	3,04	$3,91 \times 10^{-4}$	
			0	0,00	-	
			1	1,74	$7,55 \times 10^{-4}$	
			2	1,98	$1,04 \times 10^{-4}$	$3,30 \times 10^{-4}$
			3	2,09	$4,77 \times 10^{-5}$	
			4	2,37	$1,22 \times 10^{-5}$	
			5	2,88	$2,21 \times 10^{-5}$	
			0	0,00	-	
1	2,01	$8,72 \times 10^{-4}$	$2,86 \times 10^{-4}$			
2	3,02	$4,38 \times 10^{-5}$				
3	3,21	$8,25 \times 10^{-4}$				
4	3,44	$9,98 \times 10^{-5}$				
5	3,80	$1,56 \times 10^{-5}$				
3	0,55	4	0	0,00	-	$2,86 \times 10^{-4}$
			1	2,06	$8,94 \times 10^{-4}$	
			2	2,63	$2,47 \times 10^{-5}$	
			3	2,99	$1,56 \times 10^{-4}$	
			4	3,13	$6,08 \times 10^{-4}$	
			5	3,30	$7,38 \times 10^{-5}$	

O fluxo de água passante no topo e na base de cada corpo de prova (CP) não apresentou grandes diferenças, os valores dos fluxos de água nos concretos foram um tanto quanto semelhantes, demonstrando que não ocorreu segregação/exsudação dos corpos de prova na moldagem. A variação em porcentagem do q Médio foi de 2% a 6% quando comparado a relação A/C e as porcentagens de adição de nanocerâmica, com exceção para as relações de A/C = 0,50 e a/c = 0,55 e adição de nanocerâmica 2% e 4% respectivamente, onde os resultados tiveram variação da ordem de 22% e 15% respectivamente, quando comparados os resultados do topo e da base.

A relação A/C = 0,50 apresentou resultados de q Médio mais baixos, demonstrando que estes concretos se mostraram os menos permeáveis, tendo em vista que, todos os CP'S desta relação apresentaram valores mais baixos para o fluxo de água passante, para a pressão aplicada no ensaio.

6.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de compressão axial, realizado para avaliar as resistências dos concretos em estudo, apresentou cargas e tensões de ruptura, de acordo com as Tabelas 6.10, 6.11 e 6.12, para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 6.10 – Resultados da compressão axial dos concretos – 3 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,45	3	1	0	22,54	28,70	28,40
		2		22,09	28,10	
		1	2	16,66	21,20	20,95
		2		16,22	20,70	
		1	4	21,57	27,50	26,20
		2		19,56	24,90	
0,50	3	1	0	27,95	22,00	21,85
		2		27,70	21,70	
		1	2	26,89	18,40	18,15
		2		26,45	17,90	
		1	4	29,20	17,10	17,45
		2		28,50	17,80	
0,55	3	1	0	33,08	17,10	16,75
		2		35,34	16,40	
		1	2	35,07	17,40	16,60
		2		31,07	15,80	
		1	4	39,45	17,40	16,75
		2		36,53	16,10	

Tabela 6.11 – Resultados da compressão axial dos concretos – 7 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,45	7	1	0	27,95	35,60	35,45
		2		27,70	35,30	
		1	2	26,89	34,20	33,95
		2		26,45	33,70	
		1	4	29,28	37,30	36,85
		2		28,57	36,40	
0,50	7	1	0	20,06	25,50	25,30
		2		19,71	25,10	
		1	2	23,60	30,00	30,00
		2		23,59	30,00	
		1	4	20,84	26,50	27,10
		2		21,72	27,70	
0,55	7	1	0	16,47	21,00	21,00
		2		16,49	21,00	
		1	2	19,03	24,20	24,95
		2		20,19	25,70	
		1	4	19,01	24,20	23,70
		2		18,26	23,20	

Tabela 6.12 – Resultados da compressão axial dos concretos – 28 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,45	28	1	0	33,08	42,10	43,55
		2		35,34	45,00	
		1	2	35,07	44,70	42,15
		2		31,07	39,60	
		1	4	39,45	50,20	48,35
		2		36,53	46,50	
0,50	28	1	0	25,80	32,80	34,50
		2		28,45	36,20	
		1	2	30,55	38,90	38,30
		2		29,64	37,70	
		1	4	24,96	31,80	31,85
		2		25,05	31,90	
0,55	28	1	0	20,96	26,70	25,80
		2		19,55	24,90	
		1	2	23,52	29,90	29,35
		2		22,61	28,80	
		1	4	21,72	27,70	28,40
		2		22,84	29,10	

O resumo das resistências médias à compressão axial, os desvios padrões e os coeficientes de variação dos concretos, estão apresentados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Resistência média à compressão axial.

Resistência Média à Compressão Axial (MPa)										
A/C	Concreto	0% de adição			2% de adição			4% de adição		
		Idade	3dias	7dias	28dias	3dias	7dias	28dias	3dias	7dias
0,45	Média	28,40	35,45	43,55	20,95	33,95	42,15	26,20	36,85	48,35
0,50	Média	21,85	25,30	34,50	18,15	30,00	38,30	17,45	27,10	31,85
0,55	Média	16,75	21,00	25,80	16,60	24,95	29,35	16,75	23,70	28,40

Obs.: A/C = relação água/cimento.

Com base nos valores das resistências mecânicas dos concretos, à idade de 28 dias, apresentadas na Tabela 6.13, pode-se dizer que, para a relação A/C de 0,55, o teor ideal de adição de nanocerâmica é de 2%, tendo em vista o aumento da resistência que passou de 25,80 MPa (para 0% de adição), para 29,35 MPa. Esta melhoria de resistência se deve ao fato de que o concreto possui alta relação a/c e, conseqüentemente uma alta porosidade. Com isso, a nanocerâmica atuou como efeito pozolânico e filler nestes concretos, diminuindo os espaços vazios da pasta de cimento, e, conseqüentemente, proporcionando ganho de resistência e melhoria na do seu desempenho.

Os concretos com relação A/C de 0,50 apresentaram um teor ideal de adição de nanocerâmica de 2% para a idade de 28 dias, passando de 34,50 MPa para 38,30 MPa.

Já os concretos com relação A/C de 0,45, apresentaram uma ligeira perda de resistência com a adição de 2% de nanocerâmica, enquanto que aqueles com 4% de adição tiveram um aumento da resistência que passou de 43,55 MPa (para 0% de adição), para 48,35 MPa, representando 11,02% de ganho no valor da resistência final. Porém, 4% de adição tornou o concreto com um excesso de finos e comprometeu a sua trabalhabilidade, devido à grande coesão das partículas.

Portanto, os resultados mostram que são adequadas as adições da nanocerâmica nos percentuais de 2% e 4%, sendo necessário o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes e um ajuste nos traços dependendo do A/C analisado.

As curvas de Abrams, geradas pelas plotagens dos resultados de compressão axial, em gráficos de tensão versus teor A/C, aos 3, 7 e 28 dias de idade, podem ser observadas nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7.

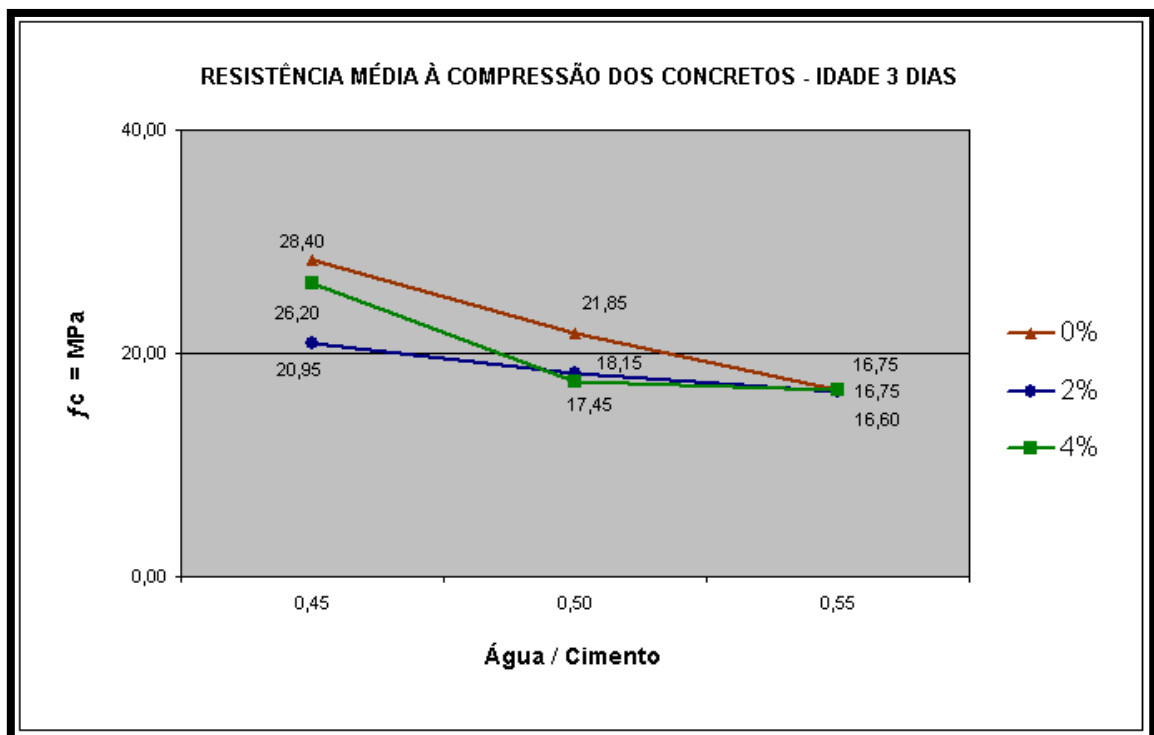


Fig 6.5. Curva de Abrams - Compressão axial aos 3 dias.

Para idade aos 3 dias a nanocerâmica possivelmente não havia ainda desenvolvido a atividade pozolânica e os resultados dos concretos de referência foram maiores. Já nas idades de 7 e 28 dias os concretos com adição da nanocerâmica já apresentaram melhor desempenho devido ao efeito filler e a pozolanicidade, principalmente para concretos de menor relação A/C. Este melhor desempenho pode ser observado nas figuras 6.6 e 6.7.

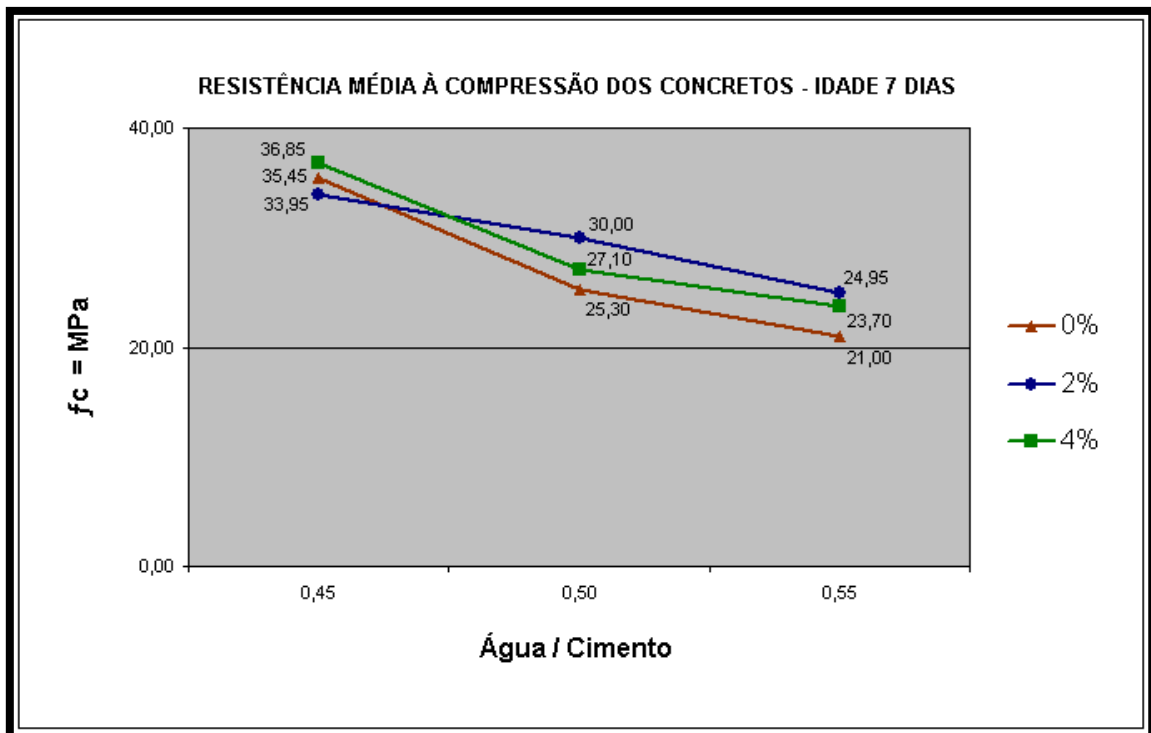


Fig 6.6. Curva de Abrams - Compressão axial aos 7 dias.

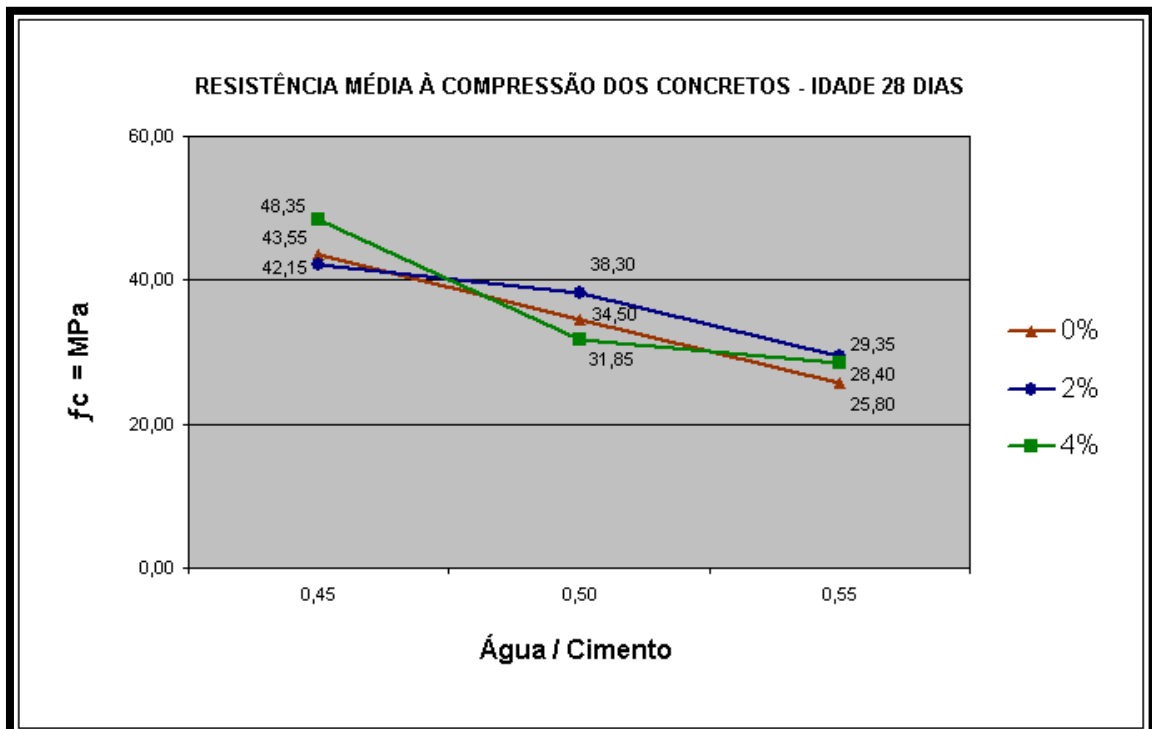


Fig 6.7. Curva de Abrams - Compressão axial aos 28 dias.

Os gráficos apresentados nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam resultados já esperados para as curvas de Abrams dos concretos, onde os resultados de tensões à compressão diminuíram com o aumento da relação A/C dos concretos.

Observa-se também que os valores dos concretos com a mesma relação a/c sofreram variações, à medida que se aumentou o percentual de adição de nanocerâmica. Esta observação pode ser mais bem visualizada na Figura 6.8, a qual apresenta um gráfico que correlaciona às tensões de compressão axial com a variação dos percentuais de adição de nanocerâmica aos 28 dias.

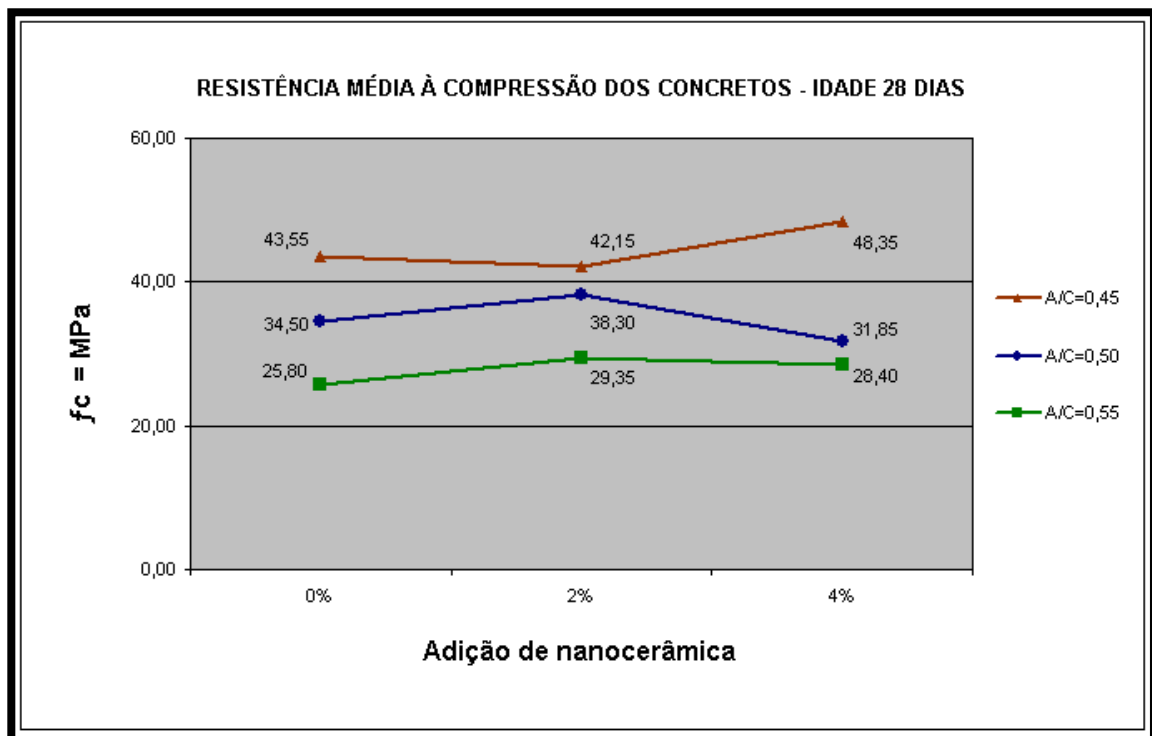


Fig 6.8. Resultados dos ensaios de compressão axial aos 28 dias

Este gráfico possibilita visualizar os teores ideais de adição de nanocerâmica, sendo 2% para os concretos com relação A/C de 0,55, pois obteve 13,76% de acréscimo no valor da resistência final e 4% para aqueles com relação A/C de 0,45, pois obteve 11,02% de acréscimo no valor da resistência final, comparando-os com o traço padrão, ou seja, sem adição de nanocerâmica.

Foi realizada uma análise estatística para verificar a variância dos resultados obtidos neste ensaio, a fim de comparar a influência das variáveis investigadas, ou seja, o teor de adição de nanocerâmica, a relação A/C, a idade dos concretos, bem como a interação entre essas variáveis, sobre a resistência mecânica dos concretos, avaliada pela compressão axial. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, por meio da análise de variância (ANOVA). Esta técnica permite

comparar grupos de observações, pela comparação da variabilidade das médias entre os grupos e a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI e RIBEIRO, 1992).

O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta analisada é determinado por um teste de comparação entre valores calculados (F calculado) e os tabelados (F tabelado) de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer. Os valores F tabelado são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o F calculado for maior do que o F tabelado. O nível de significância adotado nas análises foi de 5%, que é um nível comumente utilizado na área de engenharia civil. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Análise estatística dos resultados de compressão axial

Fator	GDL	MQ	F calculado	F tabelado	Significância
Teor de adição	2	0,46	0,28	4,46	DNS
A/C	2	360,29	219,69	4,46	DS
Idade concreto	2	539,03	328,68	4,46	DS
Teor adição x A/C	4	15,52	9,46	3,84	DS
Teor adição x Idade concreto	4	9,22	5,62	3,84	DS
A/C x Idade do concreto	4	13,19	8,04	3,84	DS
Teor adição x A/C x Idade concreto	8	1,64			
TOTAL	26				

Obs.: GDL = grau de liberdade; MQ = médias quadradas; DS = diferença significativa; DNS = diferença não significativa

A Tabela 6.14 mostra que, tanto a relação A/C quanto a idade dos concretos, quando avaliados isoladamente, apresentaram influência significativa nos resultados da resistência à compressão axial dos concretos, para um nível de confiabilidade de 95%, o que confirma as grandes variações de resistência apresentadas nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7. Já o teor de adição de Nanocerâmica não apresentou influência significativa nos resultados de resistências mecânicas. No entanto quando analisadas as interações entre os fatores controlados, as interações teor de adição X relação água/cimento, teor de adição X idade e relação água/cimento X idade apresentaram influência significativa nos resultados da compressão axial dos concretos.

Esses resultados mostram que, a nanocerâmica apresenta melhor desempenho quando a relação A/C e a idade do concreto interagem com o teor de adição, refletindo o comportamento do desenvolvimento das reações pozolânicas, do empacotamento das partículas e dos produtos de hidratação dos aglomerantes, considerando-se os concretos estudados.

6.4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de tração por compressão diametral, realizado para avaliar as resistências dos concretos em estudo, apresentou cargas e tensões de ruptura, de acordo com as Tabelas 6.15, 6.16 e 6.17, para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 6.15 – Resultados da tração dos concretos – 3 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,45	3	1	0	10,74	3,42	3,31
		2		10,06	3,20	
		1	2	7,71	2,45	2,53
		2		8,19	2,61	
		1	4	10,02	3,19	3,09
		2		9,35	2,98	
0,50	3	1	0	8,54	2,72	2,63
		2		7,95	2,53	
		1	2	7,21	2,30	2,25
		2		6,91	2,20	
		1	4	6,90	2,20	2,21
		2		6,96	2,22	
0,55	3	1	0	6,43	2,05	1,94
		2		5,74	1,83	
		1	2	5,94	1,89	1,90
		2		6,00	1,91	
		1	4	6,00	1,91	1,94
		2		6,20	1,97	

Tabela 6.16 – Resultados da tração dos concretos – 7 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,45	7	1	0	12,80	4,07	4,03
		2		12,54	3,99	
		1	2	10,24	3,26	3,15
		2		9,52	3,03	
		1	4	13,80	4,39	4,22
		2		12,68	4,04	
0,50	7	1	0	10,02	3,19	3,16
		2		9,80	3,12	
		1	2	12,55	3,99	3,82
		2		11,47	3,65	
		1	4	7,82	2,49	2,51
		2		7,94	2,53	
0,55	7	1	0	7,75	2,47	2,30
		2		6,70	2,13	
		1	2	8,17	2,60	2,70
		2		8,75	2,79	
		1	4	7,23	2,30	2,39
		2		7,76	2,47	

Tabela 6.17 – Resultados da tração dos concretos – 28 dias.

A/C	IDADE (dias)	CP	ADIÇÃO DE NANOCERÂMICA (%)	CARGA DE RUPTURA (ton)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)
0,45	28	1	0	13,08	4,16	4,15
		2		13,00	4,14	
		1	2	13,04	4,15	3,97
		2		11,87	3,78	
		1	4	15,04	4,79	4,71
		2		14,55	4,63	
0,50	28	1	0	10,28	3,27	3,24
		2		10,04	3,20	
		1	2	12,78	4,07	3,94
		2		11,98	3,81	
		1	4	8,08	2,57	2,69
		2		8,80	2,80	
0,55	28	1	0	8,87	2,82	2,84
		2		9,00	2,86	
		1	2	8,31	2,65	2,90
		2		9,85	3,14	
		1	4	9,02	2,87	2,87
		2		9,02	2,87	

O resumo das resistências médias à tração por compressão diametral, os desvios padrões e os coeficientes de variação dos concretos, estão apresentados na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Resistência média à tração por compressão diametral.

Resistência Média à Tração por Compressão Diametral (MPa)										
A/C	Concreto	0% de adição			2% de adição			4% de adição		
		Idade	3dias	7dias	28dias	3dias	7dias	28dias	3dias	7dias
0,45	Média	3,31	4,03	4,15	2,53	3,15	3,97	3,09	4,22	4,71
0,50	Média	2,63	3,16	3,24	2,25	3,82	3,94	2,21	2,51	2,69
0,55	Média	1,94	2,30	2,84	1,90	2,70	2,90	1,94	2,39	2,87

Obs.: A/C = relação água/cimento.

Com base nos valores das resistências mecânicas à tração dos concretos, à idade de 28 dias, apresentadas na Tabela 6.18, pode-se dizer que, para a relação A/C de 0,55, o teor ideal de adição de nanocerâmica é de 2%, tendo em vista o aumento da resistência que passou de 2,84 MPa (para 0% de adição), para 2,90 MPa.

Os concretos com relação a/c de 0,50 apresentaram um teor ideal de adição de nanocerâmica de 2% para a idade de 28 dias, passando de 3,24 MPa para 3,94 MPa.

Já os concretos com relação A/C de 0,45, apresentaram uma ligeira perda de resistência com a adição de 2% de nanocerâmica, enquanto que aqueles com 4% de adição tiveram um aumento da resistência que passou de 4,15 MPa (para 0% de adição), para 4,71 MPa, representando 13,49% de ganho no valor da resistência final.

Portanto, os resultados mostram que são adequadas as adições da nanocerâmica nos percentuais de 2% e 4%, sendo necessário o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes, como utilizado nos traços estudados. Os resultados obtidos com a resistência à tração por compressão diametral corroboraram com os resultados já obtidos pelas resistências à compressão axial.

Foram geradas curvas seguindo o modelo das curvas de Abrams, tais curvas foram plotadas dos resultados de tração por compressão diametral, em gráficos de tensão versus teor A/C, aos 3, 7 e 28 dias de idade, podendo ser observadas nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11.

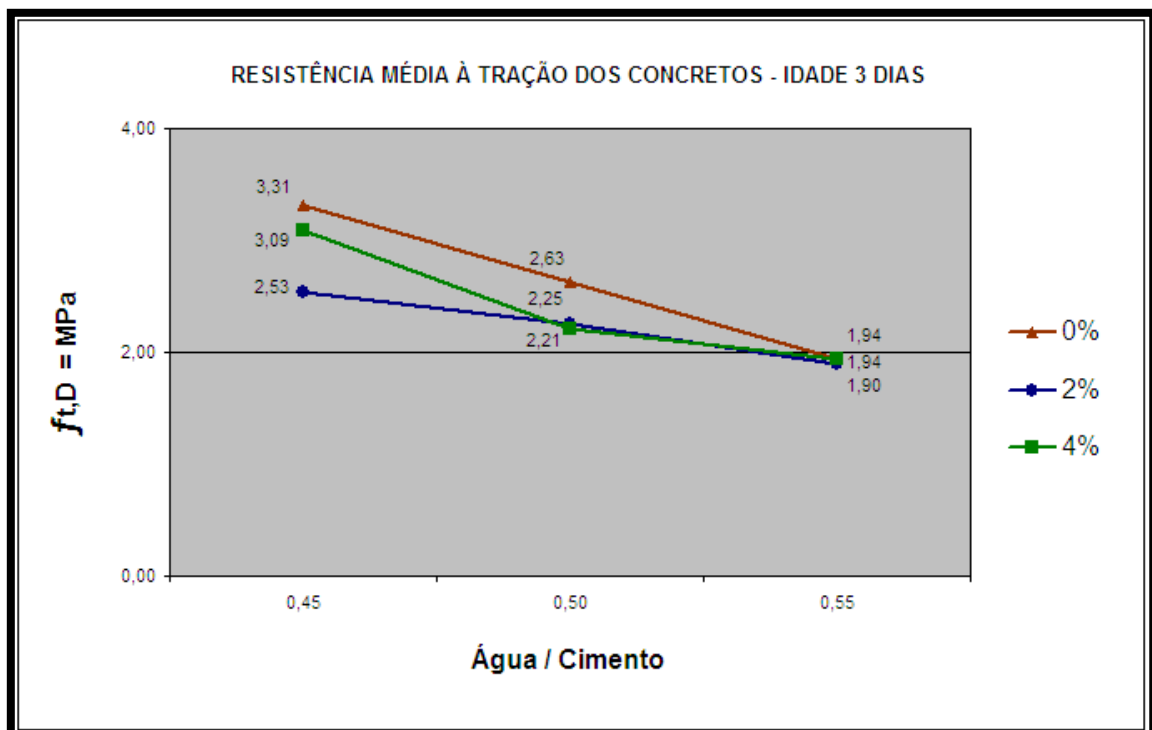


Fig 6.9. Resultados de tração por compressão diametral aos 3 dias.

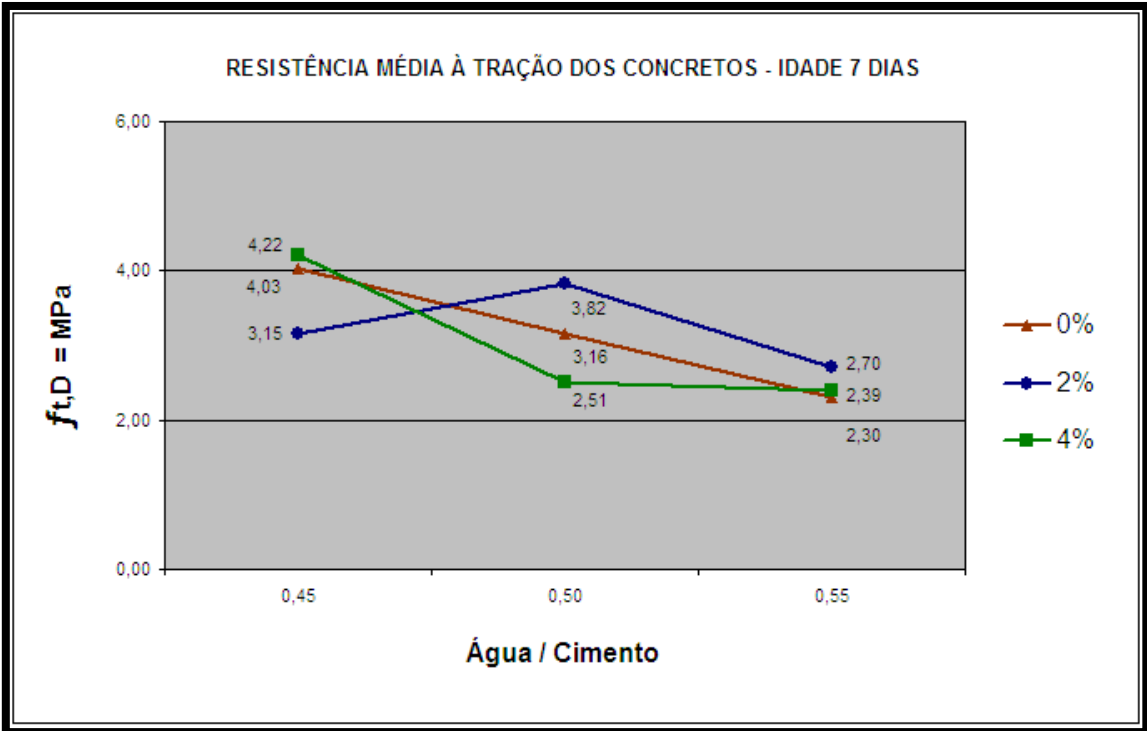


Fig 6.10. Resultados de tração por compressão diametral aos 7 dias.

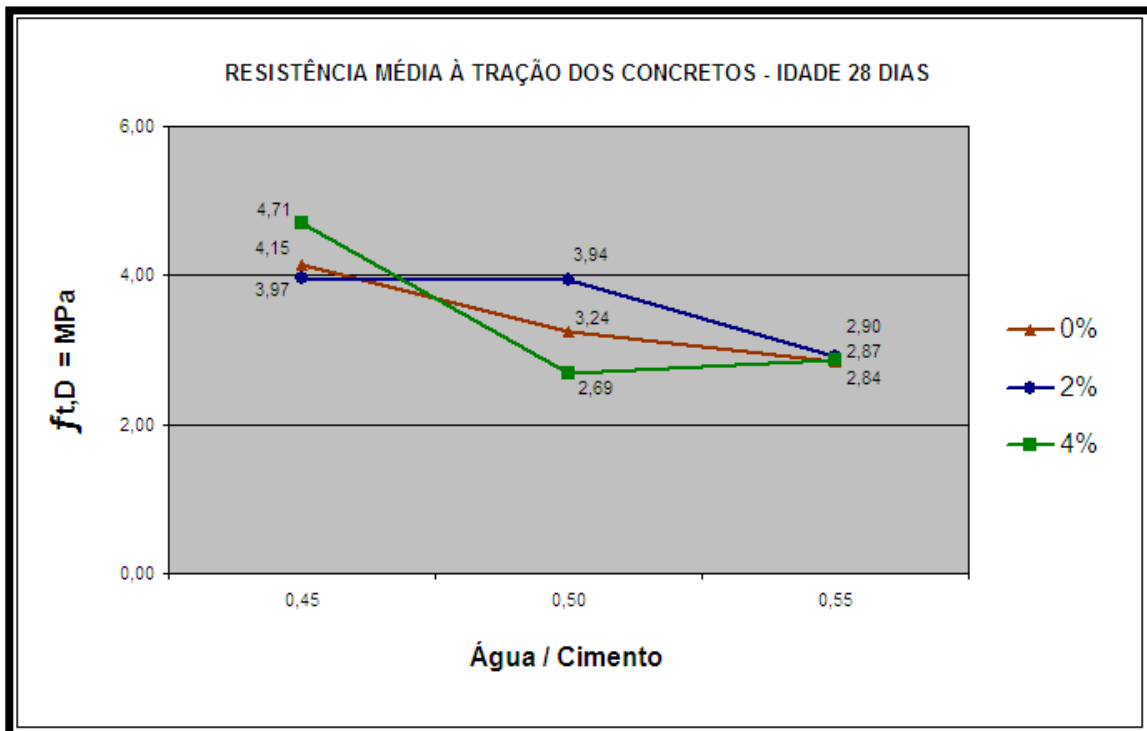


Fig 6.11. Resultados de tração por compressão diametral aos 28 dias.

Os gráficos apresentados nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 apresentam resultados de acordo aos obtidos na resistência à compressão axial, onde os resultados de tensões à tração diminuiriam com o aumento da relação A/C dos concretos, conforme ocorrido nos resultados da compressão axial.

Observa-se também que os valores dos concretos com a mesma relação A/C sofreram variações, à medida que se aumentou o percentual de adição de nanocerâmica. Esta observação pode ser melhor visualizada na Figura 6.12, a qual apresenta um gráfico que correlaciona às tensões de tração por compressão diametral com a variação dos percentuais de adição de nanocerâmica.

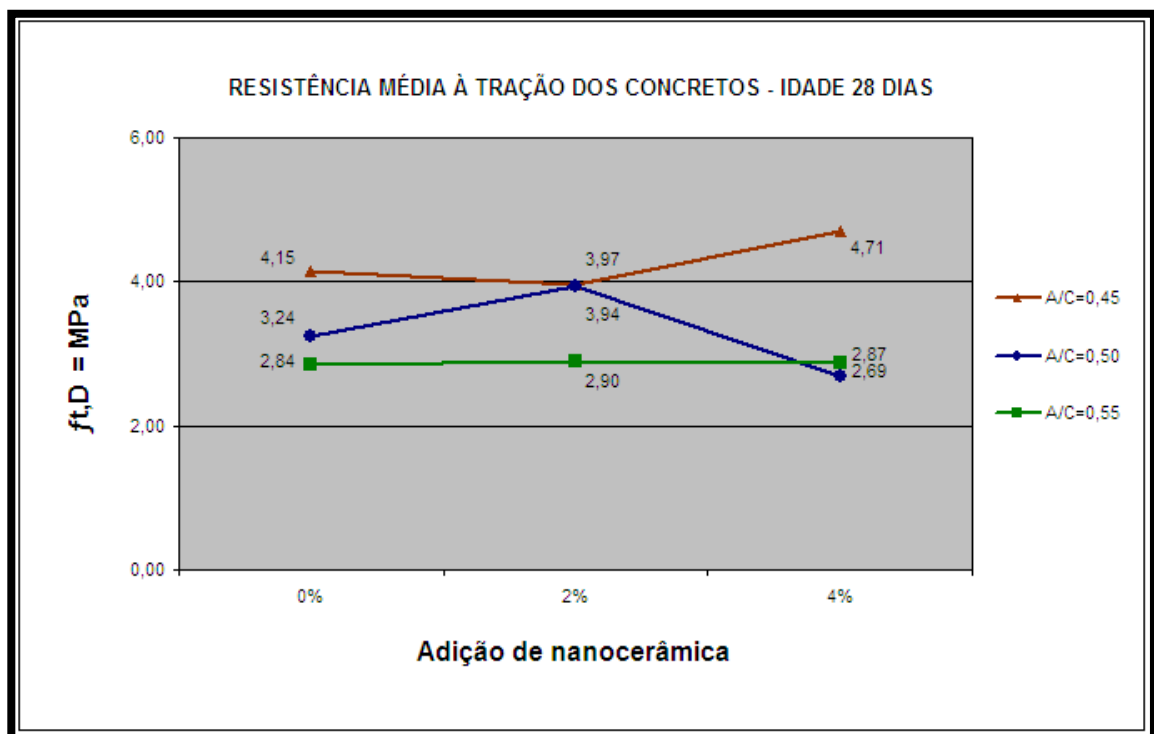


Fig 6.12. Resultados de tração por compressão diametral aos 28 dias.

O gráfico da Figura 6.12 mostra as variações ocorridas nas tensões à tração por compressão diametral, à medida que se aumentaram os percentuais de adição de nanocerâmica. Este gráfico possibilita visualizar os teores ideais de adição de nanocerâmica, sendo 2% para os concretos com relação A/C de 0,50 e 4% para aqueles com relação a/c de 0,45. Estas porcentagens de adição de nanocerâmica em confirmam os resultados obtidos com as resistências à compressão axial.

Também foi realizada uma análise estatística para verificar a variância dos resultados obtidos neste ensaio, a fim de comparar a influência das variáveis investigadas, bem como a interação entre essas variáveis, sobre a resistência mecânica dos concretos, avaliada pela tração por compressão diametral. Também foi verificada a significância

estatística do efeito de cada uma das variáveis, por meio da análise de variância, onde foi utilizada a mesma técnica (ANOVA) aplicada na análise dos resultados das resistências à compressão axial apresentada na tabela 6.18. Os resultados da análise da resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 6.19.

Tabela 6.19 – Análise estatística dos resultados de tração

Fator	GDL	MQ	F calculado	F tabelado	Significância
Teor de adição	2	0,03	0,43	4,46	DNS
A/C	2	3,64	52,00	4,46	DS
Idade concreto	2	2,62	37,43	4,46	DS
Teor adição x A/C	4	0,54	7,71	3,84	DS
Teor adição x Idade concreto	4	0,08	1,14	3,84	DNS
A/C x Idade do concreto	4	0,05	0,71	3,84	DNS
Teor adição x A/C x Idade concreto	8	0,07			
TOTAL	26				

Obs.: GDL = grau de liberdade; MQ = médias quadradas; DS = diferença significativa; DNS = diferença não significativa

A Tabela 6.19 mostra que, tanto a relação A/C quanto a idade dos concretos, quando avaliados isoladamente, apresentaram influência significativa nos resultados da resistência à tração por compressão diametral dos concretos, para um nível de confiabilidade de 95%, o que confirma as variações de resistência apresentadas nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11. Já o teor de adição de Nanocerâmica não apresentou influência significativa nos resultados de resistências mecânicas. No entanto quando analisadas as interações entre os fatores controlados, as interações teor de adição X relação água/cimento apresentaram influência significativa nos resultados da tração por compressão diametral dos concretos. Já para as interações teor de adição X idade e relação água/cimento X idade apresentaram influência não significativa nos resultados da tração por compressão diametral dos concretos. Refletindo que normalmente, para concretos ocorre menor aumento dos resultados de resistência à tração em relação à compressão, considerando-se a evolução da idade e a variação da relação A/C.

7 – CONCLUSÕES

Apesar da nanocerâmica, apresentar, visualmente, uma granulometria semelhante à dos cimentos devido à aglutinação de suas partículas, os dados do ensaio de granulometria a laser fornecido pela SOUTHERN CLAY PRODUCTS mostrou que a nanocerâmica possui uma granulometria muito mais fina que a do cimento CP V, apresentando um diâmetro médio das partículas $D_{50} = 6 \mu\text{m}$, enquanto que o cimento possui um $D_{50} = 9,74 \mu\text{m}$.

O D_{50} da nanocerâmica é inferior ao do cimento utilizado no estudo (CP V), a nanocerâmica apresentou área superficial específica de $505,05 \text{ m}^2/\text{g}$, valor este bem superior ao valor da área superficial deste cimento. Fato este ocorrido pelas diferenças de formas e tamanho das partículas dos dois materiais. A nanocerâmica foi originada com a modificação superficial da argila com surfactantes catiônicos, o que proporcionar a expansão entre as galerias, facilitando assim a incorporação das cadeias poliméricas. Enquanto que o cimento foi originado da moagem do clínquer, formando partículas mais regulares e arredondadas. A superfície porosa das partículas da nanocerâmica proporcionou a sua elevada área superficial específica em relação ao cimento.

A massa específica da nanocerâmica apresentou valor correspondente aos valores obtidos para massas específicas de materiais argilosos finos/cerâmicos, comprovando que a nanocerâmica pode atuar como filler nos traços de concreto.

O ensaio de determinação de atividade pozolânica, realizados pelo método químico, comprovou que a nanocerâmica estudada é um material pozolânico, podendo melhorar o desempenho dos concretos.

As argamassas com fator A/C de 0,48 e com a adição de nanocerâmica em 2% ocorreu melhoria na tensão média de ruptura de 14,87%, 35,54% e 2,67% aos 3, 7 e 28 dias respectivamente, comparando-as com o traço sem adição de nanocerâmica. Com a adição de nanocerâmica em 4% na argamassa tivemos melhoria na tensão média de ruptura de 7,32% somente aos 7 dias de idade comparando-a com o traço padrão sem adição de nanocerâmica.

Os resultados do ensaio de cálculo de fluxo passante mostram que o fluxo de água passante no topo e na base de cada corpo de prova (CP) não apresentou grandes diferenças, os valores dos fluxos de água nos concretos foram um tanto quanto semelhantes, refletindo que nos concretos não ocorreu a segregação/ exsudação durante a moldagem dos corpos de prova.

A variação em porcentagem do q Médio foi de 2% a 6% quando comparado a relação A/C e as porcentagens de adição de nanocerâmica, com exceção para as relações de A/C = 0,50 e 0,55 e adição de nanocerâmica 2% e 4% respectivamente, onde os resultados tiveram variação da ordem de 22% e 15% respectivamente, quando comparados os resultados do topo e da base. A relação A/C = 0,50 apresentou

resultados de q Médio mais baixo, demonstrando que estes concretos se mostraram os menos permeáveis, tendo em vista que, todos os CP's desta relação apresentaram valores mais baixos para o fluxo de água passante, para a pressão aplicada no ensaio. A relação $A/C = 0,45$ deveria apresentar menor fluxo passante, porém, sofreu maior perda do abatimento dificultando o adensamento.

Durante a execução dos concretos, foi observado que os concretos com relação A/C de 0,45, 0,50 e 0,55, obtiveram redução em suas trabalhabilidades com a adição de nanocerâmica, como comprovado na redução do slump com o aumento dessas adições de nanocerâmica. Este fato já era esperado, devido ao aumento de partículas finas nas composições dos concretos. Esta redução na trabalhabilidade é um fator importante, pois indica a necessidade da utilização de um plastificante ou superplastificante para facilitar a mistura e o adensamento dos concretos, resultando em concretos mais homogêneos, mais bem adensados e, conseqüentemente, de melhor qualidade. Esta redução no fator da trabalhabilidade ficou nítida para concretos com relação A/C de 0,55 e com 2% e 4% de adição de nanocerâmica e para os concretos com relação A/C de 0,50 e com 4% de adição de nanocerâmica, apresentando um slump igual a (0 mm). A trabalhabilidade foi fortemente comprometida, para o concreto $A/C = 0,45$ devido o concreto possuir excesso de materiais finos, resultado da baixa relação A/C de 0,45 e da adição de nanocerâmica. Com essa grande quantidade de finos, mesmo com a utilização de aditivos químicos, o concreto ficou muito coeso, com grande dificuldade de adensamento e manuseio.

Para a relação A/C de 0,45, tendo em vista o ganho de resistência do concreto com teor de adição de nanocerâmica de 4%, em relação aos de referência, pode-se concluir que 4% é um teor de adição ideal para esta relação A/C .

Para os concretos com relação A/C de 0,50, pode-se concluir que o teor ideal de adição de nanocerâmica é de 2%. Isto provavelmente devido ao fluxo passante ser um pouco menor que a dos concretos com relação A/C de 0,55, demandando uma quantidade menor de partículas finas para atuar como efeito filler. Utilizando a porcentagem de 4% ocorreu um decréscimo no valor da resistência à compressão axial.

Já, para os concretos com relação A/C de 0,55, conclui-se que a adição de nanocerâmica 2%, é indicada.

As formas de ruptura (Compressão axial) nos concretos independentes da relação A/C e adição de nanocerâmica tiveram fissuras na matriz e na zona de transição (fissuras de cisalhamento) iguais, ou seja, no formato cônico desenvolvendo uma superfície de ruptura aproximadamente 20 a 30 graus a partir da direção da carga, como mostrado nos anexos A, B e C.

As formas de ruptura (tração por compressão diametral) nos concretos independentes da relação A/C e adição de nanocerâmica tiveram fissuras na matriz e na zona de transição iguais, ou seja, transversal à direção da tensão e uniforme ao longo do diâmetro vertical, como mostrado no anexo D.

Avaliando o resultado da análise de variância realizada nas resistências à compressão axial dos concretos aos 28 dias, concluiu-se que, tanto a relação A/C quanto a idade dos concretos, quando avaliados isoladamente, apresentaram influência significativa nos resultados da resistência à compressão axial dos concretos, o que confirma as variações de resistência. Já o teor de adição de Nanocerâmica não apresentou influência significativa nos resultados de resistências mecânicas. No entanto quando analisadas as interações entre os fatores controlados, as interações teor de adição X relação água/cimento, teor de adição X idade e relação água/cimento X idade apresentaram influência significativa nos resultados da compressão axial dos concretos. As influências não significativas apontadas pela análise estatística não indica que os resultados não foram satisfatórios. O teor de adição, por exemplo, apresentou influência não significativa, porém, com a adição de nanocerâmica, as resistências tiveram um aumento de 11%, 11% e 14% para 4%, 2% e 2% de adição de nanocerâmica e com relação água/cimento de 0,45, 0,50 e 0,55 respectivamente.

Avaliando o resultado da análise de variância realizada nas resistências à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias, concluiu-se que, tanto a relação A/C quanto a idade dos concretos, quando avaliados isoladamente, apresentaram influência significativa nos resultados da resistência à tração por compressão diametral dos concretos, o que confirma as grandes variações de resistência. Já o teor de adição de Nanocerâmica não apresentou influência significativa nos resultados de resistências mecânicas. No entanto quando analisadas as interações entre os fatores controlados, as interações teor de adição X relação água/cimento apresentaram influência significativa nos resultados da tração por compressão diametral dos concretos. Já para as interações teor de adição X idade e relação água/cimento X idade apresentaram influência não significativa nos resultados da tração por compressão diametral dos concretos. As influências não significativas apontadas pela análise estatística não indica que os resultados não foram satisfatórios. O teor de adição, por exemplo, apresentou influência não significativa, porém, com a adição de nanocerâmica, as resistências tiveram um aumento de 13%, 21% e 6% para 4%, 2% e 2% de adição de nanocerâmica e com relação água/cimento de 0,45, 0,50 e 0,55 respectivamente.

8 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Considerando que a nanocerâmica apresentou atividade pozolânica, e que apresentou efeito filler, fazer uma análise microscópica da adição de nanocerâmica aos concretos.
- Estudar a durabilidade dos concretos com adição de nanocerâmica, tendo em vista a diminuição das porosidades destes concretos, pois essa diminuição gera uma expectativa de melhoria do desempenho e durabilidade dos mesmos.
- Estudar a influência da adição da nanocerâmica no módulo de elasticidade do concreto.
- Estudar o comportamento do concreto, não só com a adição de plastificantes, mas conjuntamente com a adição de superplastificantes nos traços, pois tais ajustes com aditivos devem melhorar consideravelmente a trabalhabilidade destes concretos.
- Realizar estudos comparativos entre a adição de nanocerâmica e outros tipos de adições minerais, tais como, sílica ativa e metacaulim já empregados em larga escala no mercado da construção civil.
- Estudar o comportamento de outras nanopartículas para adição ao cimento, concretos e argamassas, por exemplo, nanofloco de grafite.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738 – **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739 – **Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5753 – **Cimento Portland pozolânico: determinação da pozolanicidade**. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211 – **Agregado para Concreto**. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215 – **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248 – **Agregados: determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 44 – **Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 46 – **Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7223 – **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45 – **Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53 – **Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52 – **Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10024 - **Chapa de fibras de madeira prensadas**. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653 – **Materiais Pozolânicos – Especificação**. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222 - **Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

ABC – Associação Brasileira de Cerâmica - **CERÂMICA NO BRASIL - PANORAMAS SETORIAIS - MATÉRIAS-PRIMAS NATURAIS**. (Disponível – http://www.abceram.org.br/asp/abc_2614.asp), 2000.

ABCP – **Associação Brasileira de Cimento Portland**. Disponível em: http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/historia.shtml. Acesso em 04/05/2008.

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos Ensaios de Durabilidade do Concreto Armado, a Partir de Estruturas Duráveis**. 2006. 173p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução Geraldo G. Serra. São Paulo, Pini, 200.

AJAYAN, P. **Nanocomposites Science and Technology**. Weinheim: Wiley – VCH, 2003. p. 1-75.

ANDERSON, D.; ROY, A.; SEALS, R.K.; CARTLEDGE, F.K.; AKHTER, H.; JONES, S.C. A preliminary assesment of the use of an amorphous sílica residual as a supplementary cementing material, **Cement and Concrete Research**, 30 (2000) 437- 445 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

ATLAS DE MINERAIS DE ROCHAS – UNESP, 1998 – **Banco de dados de rochas e minerais**. (Disponível – <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/index.html>), 2000.

BALAGURU, P. N. Nano-concrete: **Possibilities and challenges**. NICOM2: International Symposium on nanotechnonology in Construction, p. 233-243, Bilbao, Spain, 2005.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e Científicos Ed., 1994, 435 p.

BEAUDOIN J.J. Nanotechnology and concrete: **Small Science for big changes**. National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2005.

BRANDÃO, P. R. G. **Métodos de Instrumentação e Análise. Apostila do curso de pós graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, 2004. 127 p.

CBC – ANAIS DO 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – **CBC 2007**-Setembro, 2007.

CHENA, J.J; THOMAS, J.J.; TAYLOR, H.F.W.; JENNINGS, H.M. Solubility and structure of calcium silicate hydrate, **Cement and Concrete Research**, 34 (2004) 1499-1519 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

CONG, X.; KIRKPATRICK, R.J. ²⁹Si MAS NMR study of the structure of calcium silicate hydrate, **Adv. Cem. Bas. Mat**, 3, 1996. p.144-156. *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F.J. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling, **Cement and Concrete Research**, 34 (2004) p. 67-80 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

DREXLER, E. **Motores da criação**. Estados Unidos, 1982.

EMBRI, **Development of a framework for environmental assesement of building materials and components**. Mimeo, 1994.

GAUFFINET, S. ; FINOT, E.; LESNIEWSKA, R.; NONAT, A. Direct observation of the growth of calcium silicate hydrate on alite and silica surfaces by atomic force microscopy. **Comptes Rendus de l' Academie des Serie II-A**, 327(4)(1998) 231-236 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

GRUTZEK, M.W. A new model for the formation of calcium silicate hydrate (C-S-H), **Mat. Res. Innovat.**, 3 (1999) 160-170 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

IRC - INSTITUT DE RECHERCHE EN CONSTRUCTION (IRC). **Innovations em Construction**. Conseil National de Recherche du Canada. v. 7, n. 4, p.8, dec. 2002 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

JOHANSSON, K. et al. Kinetics of the hydration reactions in the cement paste with mechanochemically modified cement ²⁹ Si magic-angle-spinning NMR study, **Cement and Concrete Research** 29 (1999) 1575-1581 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

JUENGER, M. C. G. **Quantifying microstructural variations in cement pastes: implications on drying shrinkage**. Ph.D. Northwestern University, Illinois, Estados Unidos, 1999 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

LE MAROIS, G. **Enjeux et Perspectives Economiques des Nano-Materiaux. Seminaire Observatoire des Micro e Nano Technologies** – OMNT/Nanomateriaux. 20 p. 29/01/2004. Disponível em: <http://www.industrie.gouv.fr/enjeux/nanomateriaux-tr.pdf> *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

LESKO, S.; LESNIEWSKA, E.; NONAT, A.; MUTIN, J-C; GOUDONNET, J-P. Investigation by atomic force microscopy of forces at the origin of cement cohesion, **Ultramicroscopy**, 86, (2001) 11-21 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

LI, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 1043-1049, 2004 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

LI, G. Y.; WANG, P.M.; ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. **Carbon**, v. 43, p. 1239-1245, 2005 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

LI, H. et al. Microstructure of cement mortar with nano-particles. **Composites: Part B**, v. 35, p. 185-189, 2004 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

Li, Z. et al. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. **Materials Letters**, v.60, p. 356-359, 2006 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G.C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

MATSUYAMA. H.; YOUNG J. F. Intercalation of Polymers in Calcium Silicate Hydrate: A New Synthetic Approach to Biocomposites. **Chemistry of Materials**. V. 11, p. 16-19, 1999.

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MINET, J. **Synthèse caractérisation de silicates de calcium hydratés hybrides**. Paris: Paris XI, 2003. Thèse (Doctorat em chimie organique), Université Paris-sud 11, França, 2003 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G.C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

MINET, J. **Synthèse caractérisation de silicates de calcium hydratés hybrides**. Tese de Doutorado, Université Paris-sud 11, França, 2003 *apud* GLEIZE, P. J. P. PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e Avaliação de Experimentos**. 2. ed. Porto Alegre, 1992. 213p. (Caderno de Engenharia. CPGEC - UFRGS).

PETRUCCI, E.G. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre Globo, 1975, 237pg.

PELLENQ, R.J. M.; VAN DAMME, H. Why does concrete set? The nature of cohesion forces in hardened cement-based material. **MRS Bulletin/** May 2004, p. 319-323 *apud* GLEIZE, P. J. P. PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

PLASSAIS, A. Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de patês de ciments, Tese de Doutorado, Université Paris 6, França, 2003 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

PORTENEUVE, C; KORB, J-P; PETIT, D.; ZANNI, H. Structure-texture correlation in ultra-high-performance concrete. A nuclear magnetic resonance study, **Cement and Concrete Research**, 32 (2002) 97-101 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

QIAN, D. et al. Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites. **Applied Physics Letters**, v. 76, n. 20, p. 2868-2870, 2000 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G.C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

RAMACHANDRAN, V.S. **Concrete Admixtures Handbook**, Noyes Publications, Park Ridge – NJ, USA, 1984 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

REGOURD, M. **L'hydratation du ciment Portland**, em Le Béton Hydraulique, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Ed. BARON J. E SAUTEREY R., p. 193-221, Paris *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

Report Nanotechnology and Construction – Nanotechnology and Construction on Surinder Mann Institute of nanotechnonology. (available – www.nanoforum.org), 2006.

RICHARDSON, I.G. The nature of C-S-H in hardened cements, **Cement and Concrete Research**, 29 (1999) 1131-1147 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

RICHARDSON, I.G. The nature of the hydration products in hardened cement pastes, **Cement & Concrete Composites**, 22 (2000) 97-113 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

RICHARDSON, I.G. Tobermorite/jennite and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, β -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnance slag, metakaolin, or sílica fume, **Cement and Concrete Research**, 34 (2004) 1733-1777 *apud* GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

SANTOS, R – **Jornalismo científico**. Disponível em: <http://jornalismocientificord.blogspot.com/>. Acesso em 04/05/2008.

SILVA, D.A.; MONTEIRO, P.J.M. Analysis of C_3A hydration using soft x-rays microscopy: Effect of EVA copolymer, **Cement and Concrete Research**, 35 (2005) 2026-2032 *apud* GLEIZE, P. J. P. PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

SILVA, D.A.; MONTEIRO, P.J.M. Hydration evolution of C_3S -EVA composite analyzed by soft X-rays microscopy, **Cement and Concrete Research**, 35 (2005) 351-357 *apud* GLEIZE, P. J. P. PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

SNIC – Sindicato Nacional da indústria do Cimento. Disponível em <http://www.snica.org.br>. *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

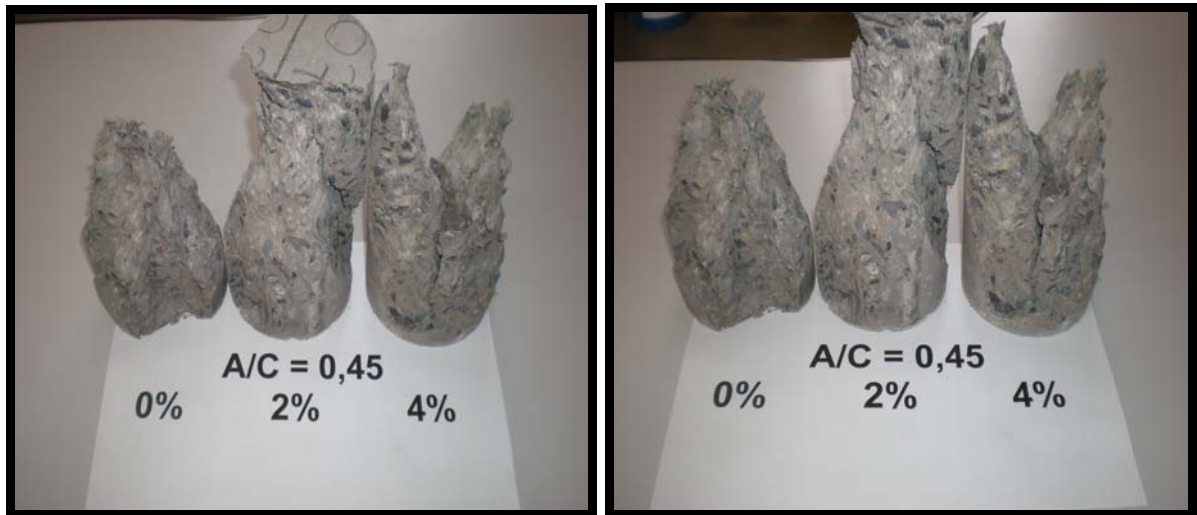
SOBOLEV, K.; GUTIERREZ, M.F. How nanotechnology can change the concrete world. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 84, n. 11, 2005 *apud* GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: G. C. ISAIA (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v2. p. 1659-1685. ISBN 978-85-98576-19-0.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**, Academic Press, 1992.

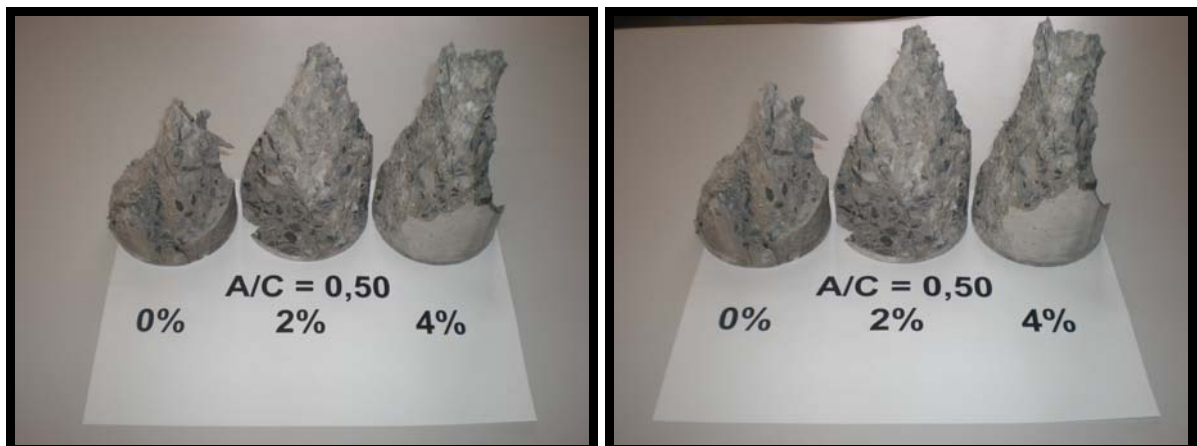
WANG, S-D.; SCRIVENER, K.L. ^{29}Si and ^{27}Al NMR study of alkali-activated slag, **Cement and Concrete Research**, 33 (2003) 769-774 *apud* GLEIZE, P. J. P. PELISSER, F. Natureza da coesão do C-S-H e efeito de aditivos orgânicos na sua nanoestrutura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2007, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. CD-ROM.

ANEXOS

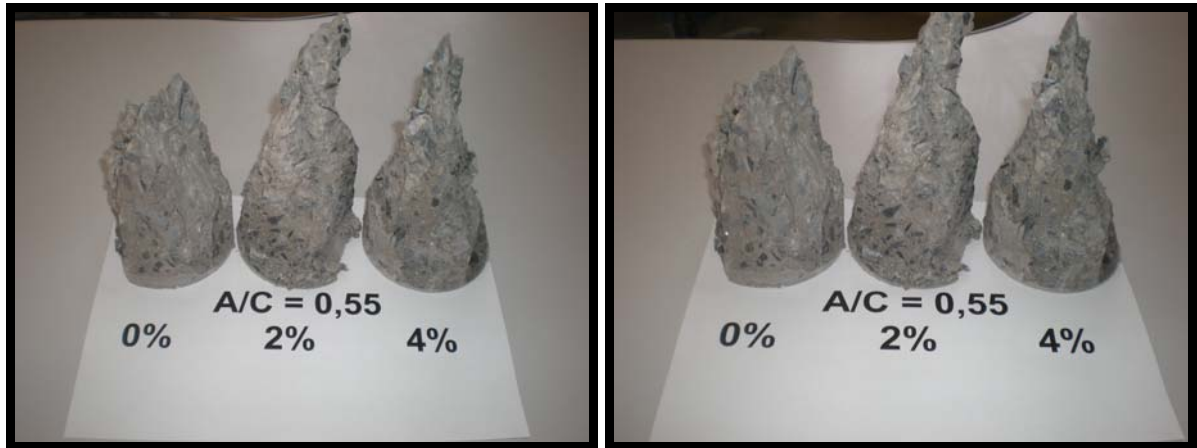
Anexo A – Modelo de ruptura do CP na compressão axial aos 28 dias – Concreto com relação $a/c = 0,45$ e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.



Anexo B – Modelo de ruptura do CP na compressão axial aos 28 dias – Concreto com relação $a/c = 0,50$ e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.



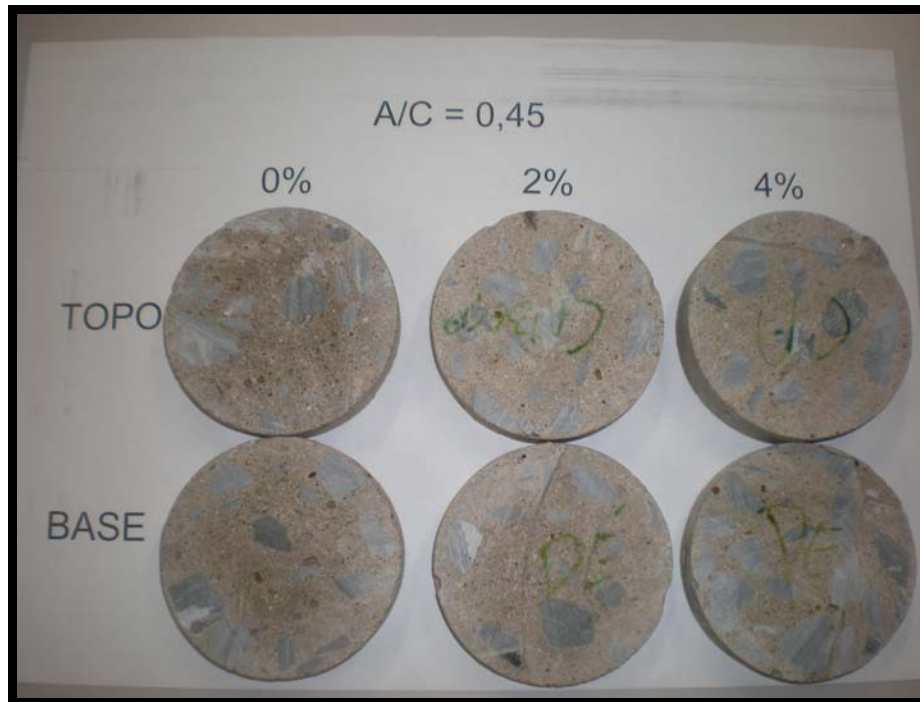
Anexo C – Modelo de ruptura do CP na compressão axial aos 28 dias – Concreto com relação $a/c = 0,55$ e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.



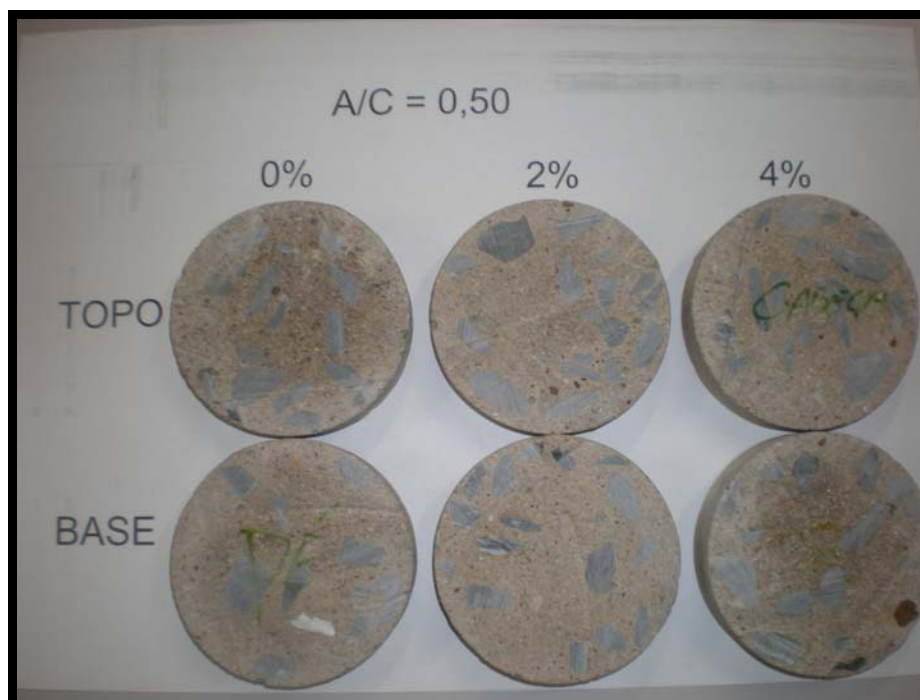
Anexo D – Modelo de ruptura do CP na tração por compressão diametral aos 28 dias – Concreto com relação $a/c = 0,45, 0,50$ e $0,55$ e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.



Anexo E – Amostras de concreto utilizadas para ensaio de fluxo de água passante aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,45 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.



Anexo F – Amostras de concreto utilizadas para ensaio de fluxo de água passante aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,50 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.



Anexo G – Amostras de concreto utilizadas para ensaio de fluxo de água passante aos 28 dias – Concreto com relação a/c = 0,55 e com 0%, 2% e 4% de Adição de nanocerâmica.

