

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL – PPGECC

DIEGO HENCHE

COMPOSTO CIMENTÍCIO DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE
NANOTUBOS DE CARBONO

CURITIBA

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL – PPGCEC

DIEGO HENCHE

COMPOSTO CIMENTÍCIO DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE
NANOTUBOS DE CARBONO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPEGCC, da Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

DIEGO HENCHE

COMPOSTO CIMENTÍCIO DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil pelo Curso de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Comissão avaliadora formada pelos professores:

Orientador: _____
Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Departamento de construção Civil, UFPR.

Convidado: _____
Prof. Dra. Maryangela Geimba de Lima
Instituto de Tecnologia Aeronáutica, ITA.

Membro banca: _____
Prof. Dr. José Marques Filho
Departamento de construção civil, UFPR.

Curitiba, 02 de maio de 2013.

DEDICATÓRIA

*A minha avó materna, Anézia pelo carinho
e apoio incondicional.*

*A minha noiva Fabi. Obrigado por fazer parte
da minha história.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador Professor Marcelo Medeiros, pelo entendimento de um dos meus principais objetivos de vida, a obtenção desta vivência. Meu orientador desde a iniciação científica e também nos concursos estudantis promovidos pelo IBRACON, auxiliou na publicação de artigos e apresentações em plenárias dos mesmos. Convidou-me a participar de bancas avaliadoras de alunos de graduação e sempre me orientou com conselhos e exemplos diversos ao longo destes anos de convivência.

Agradeço também ao colega de mestrado Gustavo Marcondes, por ter doado a principal matéria prima deste estudo, os nanotubos de carbono. Pela dificuldade de obtenção deste material, entendo que este foi um voto de confiança. Com este trabalho tentei aproveitar o material da melhor maneira possível.

Ao amigo Wellington Mazer, Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo empréstimo de equipamentos necessários a realização deste trabalho e por sempre manter as portas da UTFPR abertas para um egresso convicto, o meu muito obrigado.

Meu sincero agradecimento a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPR, em especial ao Professor José Marques Filho, pelos conselhos durante a realização deste trabalho. Ao pesquisador Kleber Franquilin Portela, pela orientação durante a avaliação da qualificação deste estudo, meu sincero agradecimento.

A aluna de iniciação científica Franciele Dranka, que me auxiliou com muita dedicação nos ensaios laboratoriais deste trabalho e aos técnicos Ricardo e Gustavo, dos laboratórios da UFPR e da UTFPR, respectivamente. Sem a ajuda de vocês três o meu trabalho teria sido ainda mais árduo. Aos técnicos do laboratório do Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR pelo auxílio durante os ensaios no microscópio eletrônico de varredura. Ao Zé da retífica e a mestranda Andressa Gobbi pelo apoio, muito obrigado.

Ao Eng. Luiz Carlos Volpato, da Voltoragui Engenharia, pelo apoio quando precisei comparecer as aulas na pós-graduação. Da mesma maneira, ao meu coordenador de engenharia na Construtora VCCON, Engenheiro Clayton Egberto de Freitas, pela liberação para apresentação de trabalhos em congressos e eventos científicos. A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para elaboração deste trabalho e não foram citados, meu mais sincero agradecimento.

EPÍGRAFE

Deveríamos ser como as águas dos riachos que, tranquilamente, contornam os obstáculos.

DeRose

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa e importância do tema	3
1.2 Objetivo da pesquisa	7
1.3 Delimitações da pesquisa	7
1.4 Estrutura do trabalho	8
2 CONCRETOS DE ULTRA-ALTA RESISTÊNCIA.....	9
2.1 Evolução dos concretos de ultra - alta resistência	9
2.1.1 Aplicações reais dos CUAR	17
2.1.2 Normas técnicas e diretrizes de projeto para os CUAR	33
2.2 Materiais constituintes dos concretos de ultra - alta resistência	38
2.2.1 A utilização do cimento	38
2.2.2 A importância da seleção e proporcionamento dos agregados.....	39
2.2.3 Utilização das fibras nos CUAR	40
2.3 Os concretos de ultra - alta resistência no estado endurecido	42
2.3.1 Resistência mecânica	42
2.3.2 Fluência e retração nos CUAR.....	43
2.4 Durabilidade dos concretos de ultra - alta resistência.....	46
2.4.1 Efeitos da exposição ao fogo nos CUAR	46
2.4.2 Ação do gelo e degelo em estruturas de CUAR.....	47
2.4.3 Resistência ao atrito – abrasão e cavitação	49
2.4.4 Reação álcali sílica.....	51

2.4.5	Ações dos íons cloretos	52
2.4.6	Efeitos da carbonatação.....	53
3.0	UTILIZAÇÃO DE NANO MATERIAIS EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS ..	55
3.1	Nanotubos de carbono.....	56
3.2	Nano carbonato de cálcio	59
3.3	Nano dióxido de silício	60
3.4	Nano dióxido de titânio	61
4.0	PROGRAMA EXPERIMENTAL	65
4.1	Planejamento do experimento	65
4.1.1	Variáveis independentes	67
4.1.2	Variáveis resposta	68
4.1.3	Itens fixados	68
4.2	Execução dos ensaios	69
4.2.1	Ensaio mecânicos	69
4.2.2	Ensaio de retração por secagem	73
4.2.3	Ensaio de caracterização reológica no estado fresco	77
4.2.3.1	Espalhamento na mesa de consistência	77
4.2.3.2	Método squeeze-flow	77
4.2.4	Microscopia Eletrônica de Varredura	79
4.3	Caracterização dos materiais.....	81
4.3.1	Cimento.....	81
4.3.2	Agregado miúdo.....	84
4.3.3	Adições	86
4.3.3.1	Pó de quartzo.....	86
4.3.3.2	Sílica ativa.....	88
4.3.3.3	Nanotubos de carbono	90
4.3.4	Comparação dos diâmetros dos materiais estudados	91

4.3.5	Aditivo	93
4.3.6	Água de Amassamento	93
4.4	Procedimentos para produção e preparo dos corpos de prova	94
4.4.1	Mistura dos materiais	94
4.4.2	Moldagem e adensamento	95
4.4.3	Desforma e cura	95
4.4.4	Metodologia para dispersão dos NTC	97
5	DOSAGEM DO CONCRETO	99
5.1	Dosagem do concreto de ultra - alta resistência de referência	99
5.1.1	Determinação do teor de aditivo redutor de água	102
5.1.2	Determinação do teor de aglomerante	106
5.1.3	Pesquisa do teor de pó de quartzo	113
5.1.4	Traço proposto para o concreto de ultra - alta resistência	116
5.2	Adaptação da dosagem do concreto de referência	117
6.0	RESULTADOS DA INCORPORAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO AO CONCRETO DE REFERÊNCIA	119
6.1	Resistência à compressão axial	119
6.2	Resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos	122
6.3	Módulo de elasticidade	123
6.4	Ensaio de retração	124
6.5	Análise estatística dos resultados obtidos	127
6.5.1	Análise da variância	127
6.5.2	Teste de Tukey	129
6.6	Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV	133
7.0	CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
7.1	Conclusões	143
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	146

REFERÊNCIAS.....	147
Anexo A - Resultados da dosagem do concreto	161
Anexo B - Resultados dos ensaios compressão axial	168
Anexo C - Resultados dos ensaios de tração na flexão	181
Anexo D - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade	193
Anexo E - Resultados do ensaio de retração	197
Anexo F - Testes estatísticos.....	202

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tecnologias associadas para a formação dos CUAR.	1
Figura 2. Primeira ponte em arco utilizando CUAR do mundo – Áustria.	20
Figura 3. Construção de ponte rodoviária em CUAR – Estados Unidos.	20
Figura 4. Vista aérea da construção da estrutura do aeroporto de Haneda – Japão.	21
Figura 5. Vista da cobertura do pedágio de acesso ao viaduto de Millau, França.	22
Figura 6. Forma diferenciada de um pilar estrutural em CUAR – França.	23
Figura 7. Reparo nos blocos de fundação e pilares de um viaduto em Valabres – França.	23
Figura 8. Teste de flexão realizado em elemento pré-moldado em CUAR – Alemanha.	24
Figura 9. Broca para perfuração de fundações profundas em CUAR – Alemanha.	26
Figura 10. Equipamento sofisticado de alta precisão em CUAR.	26
Figura 11. Placa de CUAR após ser alvejada por tiros de fuzil calibre 7.62mm.	27
Figura 12. Proteção em CUAR para a base de pilares metálicos – França.	27
Figura 13. Maquete eletrônica da Ponte Jobal – Coréia do Sul.	28
Figura 14. Novo Museu de Arte de Miami – Estados Unidos.	29
Figura 15. Acima a maquete da futura FLV e abaixo a confecção dos painéis em CUAR.	31
Figura 16. Futura fachada do Aeroporto de Rabat-Salé – Marrocos.	32
Figura 17. Exemplo de um projeto de ponte rodoviária em CUAR.	35
Figura 18. Construção da primeira ponte rodoviária da França em CUAR.	35
Figura 19. Viga de CUAR em escala real.	37
Figura 20. Viga de CUAR após ensaio de ruptura.	37
Figura 21. Visualização teórica do empacotamento de partículas.	40
Figura 22. Fibras metálicas tipo Dramix®.	41
Figura 23. Fibras metálicas aparentes após ruptura de uma viga de CUAR em escala real.	41
Figura 24. Coeficiente de fluência comparando um representante dos CUAR aos CC.	44
Figura 25. Imagem da ruptura de uma viga de CUAR após prova de carga.	44
Figura 26. Realização do ensaio e resultados comparativos de abrasão.	50
Figura 27. Resultado comparativo do ensaio de abrasão em um CUAR e outros dois materiais.	51
Figura 28. Acúmulo de sílica e fissuras causadas pela reação álcali sílica.	52
Figura 29. Nanotubos de carbono (esq.). Arranjo esquemático da molécula de grafeno (dir.).	56
Figura 30. Esquema de funcionamento da uma superfície contendo nano TiO ₂	61
Figura 31. Gotícula de água depositada sobre uma superfície onde foi aplicado o nano TiO ₂	62
Figura 32. Experiência envolvendo o nano TiO ₂	63
Figura 33. Vista externa e interna da Igreja Dives in Misericórdia – Itália.	64
Figura 34. Fluxograma de operações da pesquisa.	66
Figura 35. Equipamento utilizado para retífica do topo dos corpos de prova cilíndricos.	70
Figura 36. Corpo de prova antes e após ter passado pelo processo de retificação de topo.	71
Figura 37. Imagem dos corpos de prova antes da execução do ensaio de tração na flexão.	72

Figura 38. Execução do ensaio de tração na flexão.	72
Figura 39. Molde utilizado para a confecção e corpos de prova prontos para medição.....	74
Figura 40. Imagem do equipamento de medição com relógio comparador zerado.....	75
Figura 41. A esquerda a amostra no molde para o ensaio. A direita o ensaio em andamento.	78
Figura 42. Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	79
Figura 43. Aspecto das amostras cobertas com ouro, após o término das imagens no MEV.	80
Figura 44. Curva granulométrica do cimento tipo CP – II – Z – 32.	83
Figura 45. Curva granulométrica do agregado miúdo.....	84
Figura 46. Agregado miúdo utilizado na pesquisa.	85
Figura 47. Distribuição granulométrica do pó de quartzo.....	87
Figura 48. Distribuição granulométrica da sílica ativa.....	89
Figura 49. Imagem dos nanotubos de carbono produzidos pela Nanocyl SA.	90
Figura 50. Diâmetros médios dos materiais analisados por granulometria a laser.	92
Figura 51. Avanço da temperatura de cura ao longo do tempo.	96
Figura 52. Componentes da solução e processo de dispersão da solução.....	98
Figura 53. Solução antes e após dispersão por sonificação.....	98
Figura 54. Influência do teor de aditivo na pasta de cimento e imagem do equipamento utilizado.....	105
Figura 55. Estudo do teor de sílica ativa em adição ao cimento.....	110
Figura 56. Estudo do teor de sílica ativa em substituição parcial do cimento.....	112
Figura 57. Estudo da adição de pó de quartzo ao concreto.....	115
Figura 58. Espalhamento do concreto de referência (A). (B) inclusão de 0,10% de NTC.....	117
Figura 59. Resultados médios de resistência à compressão axial nos CP's cilíndricos 50 x 100 mm.....	119
Figura 60. Resultados do ensaio <i>squeeze-flow</i>	121
Figura 61. Resultado ensaio de tração na flexão em corpos de prova retangulares.....	122
Figura 62. Resultado ensaio de módulo de elasticidade estático – CP cilíndrico.....	123
Figura 63. Retração percentual média dos corpos de prova em estudo.	124
Figura 64. Gráficos de retração do concreto de referência e dos concretos com adição de NTC.	126
Figura 65. Teste de Tukey para a resistência à compressão axial.....	130
Figura 66. Teste de Tukey para a resistência à tração na flexão.	131
Figura 67. Teste de Tukey para o ensaio de módulo de elasticidade.....	132
Figura 68. Imagens do MEV no concreto de referência e análise química do material em estudo.....	134
Figura 69. Imagens do MEV no concreto com adição de 0,10% de NTC.....	135
Figura 70. Imagens do MEV no concreto com adição de 0,20% de NTC.....	137
Figura 71. Imagens do MEV no concreto com adição de 0,30% de NTC.....	138
Figura 72. Imagem do NTC in natura. Imagem de um possível filamento de NTC.	139
Figura 73. Amostras de NTC após dispersão e destaque de um suporte preparado para o MEV.....	139
Figura 74. Imagens do MEV apenas dos NTC – ampliação de 50 vezes.....	140
Figura 75. Imagens MEV apenas dos NTC – ampliação de 10.000 vezes.....	141
Figura 76. Imagens do MEV nos NTC – ampliação de 30.000 vezes.	142

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. AVANÇOS NA MATRIZ CIMENTÍCIA E NA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS NO CONCRETO.....	12
TABELA 2. INSTITUTOS DE REFERÊNCIA NO ESTUDO DOS CUAR.	14
TABELA 3. UNIVERSIDADES E AUTORES COM ESTUDOS ENVOLVENDO CUAR NO BRASIL.....	15
TABELA 4. UNIVERSIDADES INTERNACIONAIS REALIZANDO PESQUISAS EM CUAR.....	16
TABELA 5. PONTES, VIADUTOS E PASSARELAS CONSTRUÍDOS EM CUAR NO MUNDO.....	19
TABELA 6. CONSUMO DE CIMENTO EM TRAÇOS DE CUAR.....	38
TABELA 7. COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DIFERENTES CONCRETOS.	42
TABELA 8. RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA COM A IDADE DE CARREGAMENTO	43
TABELA 9. TESTES EM DIFERENTES TIPOS DE CUAR SUBMETIDOS À ALTA TEMPERATURA.....	47
TABELA 10. INCLUSÃO DE NTC NAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	58
TABELA 11. RESUMO DAS FASES DO ESTUDO.	67
TABELA 12. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO TIPO CP II – Z – 32.	81
TABELA 13. ENSAIOS FÍSICOS DO CIMENTO TIPO CP II – Z – 32.	82
TABELA 14. ENSAIOS QUÍMICOS DO CIMENTO TIPO CP II – Z – 32.....	82
TABELA 15. GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO.....	84
TABELA 16. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO.	85
TABELA 17. ANÁLISE QUÍMICA E ÍNDICE DE UMIDADE DO PÓ DE QUARTZO.	86
TABELA 18. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE QUARTZO.	87
TABELA 19. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA SÍLICA ATIVA.	88
TABELA 20. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA SÍLICA ATIVA.	89
TABELA 21. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS NANOTUBOS DE CARBONO.....	91
TABELA 22. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS NANOTUBOS DE CARBONO.	91
TABELA 23. INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO ADITIVO MC – POWER FLOW 1159.....	93
TABELA 24. FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO DA FLUIDEZ NOS TRAÇOS DE CUAR.....	102
TABELA 25. TEORES DE ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE UTILIZADO NOS CUAR.	104
TABELA 26. TEORES DE SÍLICA ATIVA INCORPORADOS AOS CUAR.	107
TABELA 27. TRAÇO DE REFERÊNCIA PARA O ESTUDO DO CUAR.	107
TABELA 28. CUSTO ESTIMADO DAS MATÉRIAS PRIMAS EMPREGADAS NA MISTURA.....	108
TABELA 29. DADOS DO AGREGADO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO CUSTO R\$/M ³	108
TABELA 30. ESTUDO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO.	109
TABELA 31. ESTUDO DO EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO.	111
TABELA 32. MATRIZ DE ENSAIOS PARA A PESQUISA DO TEOR DE PÓ DE QUARTZO.....	114
TABELA 33. DOSAGEM DESENVOLVIDA PARA O CUAR DE REFERÊNCIA.	116
TABELA 34. RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CUAR DE REFERÊNCIA	116
TABELA 35. DOSAGEM ADAPTADA PARA O CUAR DE REFERÊNCIA.....	118
TABELA 36. ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) PARA À COMPRESSÃO AXIAL.....	127
TABELA 37. ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.	128

TABELA 38. ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE.	128
TABELA 39. ENSAIOS REALIZADOS NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA.	133
TABELA 40. ANÁLISE QUÍMICA REALIZADA NOS NANOTUBOS DE CARBONO.	136

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a/aglo	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP	Associação de Cimento Portland
AD	Adição
AFGC	Association Française de Génie Civil
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaO	Óxido de cálcio
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
C–S–H	Silicato de Cálcio Hidratado
CUAR	Concreto de Ultra - Alta Resistência
cm	Centímetro
CaCo₃	Carbonato de cálcio
CP	Corpo de Prova / Cimento Portland
CP's	Corpos de Prova
CPV – ARI	Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial
DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
DSP	Densified Small Particles
DWNTs	Double-walled carbon nanotubes
fc	Resistência média à compressão
fck	Resistência média à compressão aos k dias
fc₇	Resistência média à compressão aos 7 dias
fc₂₈	Resistência média à compressão aos 28 dias
FHWA	Federal Highway Administration
FRC	Fiber Reinforced Concretes
g	Grama
GPa	Giga Pascal
HSC	High Strength Concretes
Hz	Hertz
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
kg	Quilo grama
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAME	Laboratório de Materiais e Estruturas
l	Litro
m	Metro
m²	Metro quadrado
m³	Metro cúbico

min	Mínimo
MDF	Micro Defect Free
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MET	Microscópio Eletrônico de Transmissão
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MgO	Óxido de Magnésio
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MWNTs	Multi-walled carbon nanotubes
NaCl	Cloreto de Sódio
NBR	Norma Brasileira
nm	Nanômetros
NM	Norma Mercosul
NTC	Nanotubo de carbono
PQ	Pó de quartzo
PR	Paraná
RPC	Reactive Powder Concrete
R\$	Real
s	Segundo
SA	Sílica Ativa
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SCC	Self Compacting Concretes
SETRA	Service d Études Techniques des Routes et Autoroutes
SIFCON	Slurry Infiltrated Fiber (Fibrous) Concrete
SiO₂	Dióxido de silício
SUB	Substituição
SWNTs	Single walled carbon nanotubes
TiO₂	Dióxido de titânio
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHPC	Ultra High Performance Concrete
UHPFRC	Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete
US\$	Dólares americanos
ZT	Zona de Transição
µm	Mícron
%	Percentual
°C	Graus Celsius

RESUMO

Os últimos cinquenta anos marcaram grandes avanços na tecnologia aplicada aos concretos de cimento Portland, tornando-os materiais com características cada vez mais complexas e possibilitando a expansão das resistências mecânicas a patamares cada vez maiores, da ordem de 150 MPa. Os concretos que atingem tais resistências são denominados Concretos de Ultra - Alta Resistência (CUAR) e apresentam comportamento mecânico e características ligadas à durabilidade superiores, quando comparados aos Concretos Convencionais (CC) ou aos Concretos de Alta Resistência (CAR). Mais recentemente, durante a década de 90, estudos envolvendo a sintetização de estruturas de carbono e avanços no campo da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possibilitaram a criação e posterior aplicação de materiais em escala nanométrica a concretos e argamassas. Entre os materiais desenvolvidos, estão os Nanotubos de Carbono (NTC). O presente estudo tem por objetivo principal estudar os efeitos da utilização de nanotubos de carbono dispersos, nas propriedades mecânicas, reológicas e na estrutura interna do composto cimentício de alta resistência desenvolvido através de dosagem empírica e experimental. Foram coletados resultados obtidos nos ensaios mecânicos de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. Foi, ainda, estudado o comportamento do concreto quanto à retração por secagem, espalhamento na mesa para índice de consistência e, apenas para os ensaios finais, pelo método *squeeze-flow*. Como resultados da pesquisa, são apresentados elementos que demonstram que a incorporação de nanotubos de carbono não se mostrou adequada ao concreto em estudo, visto que o material prejudicou algumas propriedades mecânicas avaliadas nos concretos em estudo e proporcionou elevação acentuada da consistência do material no estado fresco, o que, do ponto de vista executivo, é prejudicial para a aplicabilidade do concreto. Este resultado foi comprovado nos três percentuais de adição do material em estudo, 0,10%, 0,20% e 0,30% (percentual relativo à massa de cimento adicionada a mistura) quando comparados ao traço de referência, sem adição dos nanotubos de carbono.

Palavras – chave: concreto de ultra - alta resistência; nanotubos de carbono; microscopia eletrônica de varredura; método *squeeze-flow*.

ABSTRACT

The last fifty years have marked major advances in technology applied to Portland cement concrete, making them improved materials with more complex characteristics and allowing the expansion of the mechanical performance increasing levels to the order of 150 MPa. The concrete reaching such resistances are called Ultra High Performance Concrete (UHPC) and exhibit mechanical behavior and characteristics related to durability higher when compared to Conventional Concrete (CC) or the High Performance Concrete (HPC). More recently, during the nineties, studies involving synthesizing carbon structures and advances in scanning electron microscopy have allowed the creation and subsequent application of materials at the nanometer scale to concrete and mortar. Among the materials developed are the Carbon Nanotubes (CNTs). The present study has the main objective of studying the effects of using carbon nanotubes dispersed at the mechanical properties, rheological characteristics and internal structure of cementitious compound of high strength developed through empirical and experimental methods for concrete mixed design. It was collected results obtained in mechanical tests of compressive strength, flexural tensile strength and modulus of elasticity. It was also studied the behavior of concrete when exposed to drying shrinkage, flow table for consistency index and, only for final testing, the squeeze-flow method. The research results indicated that the incorporation of nanotubes. Carbon was not adequate to the concrete under study, since the material impaired the mechanical properties tested to the referred concrete and provided marked elevation of the consistency of the material in the fresh state, what, from the practical point of view, is detrimental to the applicability of the concrete. This result was confirmed in the three percentages of addition of the CNTs 0,10%, 0,20% and 0,30% (percentage related to the mass of cement added to the mixture) as compared to the concrete reference, without addition of carbon nanotubes.

Keywords: ultra-high performance concrete; carbon nanotubes; electron microscopy; squeeze-flow method.

1 INTRODUÇÃO

Os Concretos de Ultra - Alta Resistência (CUAR) são uma classe de concretos que apresentam comportamento mecânico e características ligadas à durabilidade superiores, quando comparados aos concretos convencionais e aos concretos de alta resistência (AHLBORN, PEUSE e MISSON, 2008).

Como indica a Figura 1, o CUAR possui de maneira associada três tecnologias distintas de concretos onde suas propriedades são levadas ao extremo: os concretos autoadensáveis – *Self Compacting Concretes* (SCC), os concretos reforçados com fibras – *Fiber Reinforced Concretes* (FRC) e os concretos de alta resistência – *High Strength Concretes* (HSC) (CAMACHO; LÓPEZ e ROS, 2012).

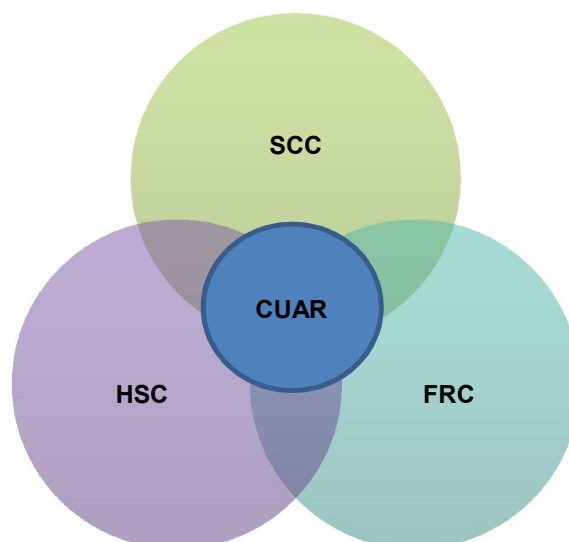


Figura 1. Tecnologias associadas para a formação dos CUAR.

No ano de 2002 a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC/SETRA¹) foi a primeira a definir formalmente o que ela chamou de *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete* (UHPFRC), concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras, conforme definição a seguir:

¹ A AFGC/SETRA é um grupo de trabalho formado por especialistas da Association Française de Génie Civil (Associação Francesa de Engenharia Civil) e pela Service d'études techniques des routes et autoroutes, órgãos equivalente ao DNIT no Brasil.

Um material de matriz cimentícia e características de resistência à compressão que excede os 150 MPa, possivelmente atingindo os 250 MPa, que contém fibras metálicas que lhe garantem melhor comportamento quanto à ductibilidade quando tracionado e, se possível, que dispensam a necessidade de armadura passiva (não protendida). Podem conter também fibras poliméricas.

Os mais recentes estudos envolvendo os CUAR adotam a nomenclatura *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) ou concretos de ultra - alta performance para nomear este material. Em países europeus a denominação UHPFRC aplicada pela AFGC/SETRA ainda é a mais utilizada, talvez pela influência das pesquisas realizadas na França, país pioneiro no desenvolvimento deste concreto, pelos estudos realizados na *Ecole Normale Supérieure de Cachan*, na Universidade de Paris. Apesar das diferenças na nomenclatura, os princípios de confecção são os mesmos e a definição para os CUAR atribuída pela AFGC/SETRA é a mais aceita pela comunidade científica desde então. Estes princípios foram citados de maneira isolada por diversos autores desde o início da década de 80, mas organizados de maneira lógica pelos autores Richard e Cheyrezy (1995). São eles:

- Ausência de agregados graúdos na mistura, sendo utilizados agregados de no máximo 2,0 mm de diâmetro visando diminuir o aparecimento de microfissuras na pasta;
- Maior homogeneidade e densidade, proporcionadas pela distribuição granulométrica adequada, privilegiando o empacotamento das partículas;
- Utilização de tratamento térmico, visando acelerar a hidratação das partículas de cimento e as reações pozolânicas na mistura;
- Altos consumos de cimento e sílica ativa, além da incorporação de pó de quartzo finamente moído;
- Incorporação de microfibras visando melhorar a flexibilidade do concreto;
- Baixas relações água/cimento, tipicamente em torno de 0,20.

O aumento de resistências mecânicas vem possibilitando aos CUAR conquistar espaço em um mercado que antes era ocupado apenas pelas estruturas metálicas, mas com uma grande vantagem, sua fácil adaptação as mais variadas

formas arquitetônicas. Suas aplicações civis são extremamente variadas, como em obras hidráulicas ou de saneamento, confecção de tubos pré-moldados, aplicações na indústria de elementos pré-moldados, elementos construtivos em viadutos, pontes e passarelas de pedestres, reabilitação de antigas estruturas, elementos arquitetônicos em fachadas e mobiliário urbano variado.

Mais de trinta anos passados da elaboração dos primeiros estudos em CUAR com os *Densified Small Particles* (DSP) atribuído à Bache (1981) e com o *Micro Defect Free* (MDF) pesquisado por Birchall, Howard & Kendall (1981), este tipo de concreto já não pode mais ser considerado um novo material. No entanto, suas aplicações práticas ainda são proporcionalmente pouco exploradas em países desenvolvidos e ainda menores em países periféricos.

Neste capítulo introdutório será apresentado o tema da pesquisa, discutindo os motivos que levaram a sua escolha, justificando a importância para o avanço e divulgação das propriedades dos CUAR no país. Será descrito o objetivo da dissertação as delimitações do estudo, além da exposição da estrutura e organização do trabalho.

1.1 Justificativa e importância do tema

Os desafios sempre foram a principal motivação para o aprimoramento das tecnologias construtivas. O desenvolvimento contínuo de novas matérias primas pela engenharia de materiais possibilita este aprimoramento de forma rápida e gradativa.

A cada material descoberto ou melhorado, ocorrem mudanças que possibilitam nova corrida rumo ao desenvolvimento, corrida que consome de forma rápida recursos não renováveis e finitos do planeta. O progresso pode ser considerado virtuoso no primeiro momento, mas pode se tornar perigoso quando medidas mitigadoras de impacto ambiental não acompanham este desenvolvimento acelerado, o que de fato está ocorrendo.

Nos últimos anos a humanidade vem sentindo os efeitos deste rápido processo evolutivo, por meio de mudanças climáticas e catástrofes naturais cada vez mais recorrentes. Portanto, o grande desafio agora para a indústria da construção civil é ligado diretamente à sustentabilidade dos processos de obtenção

dos materiais de construção, através da utilização consciente e correta dos recursos energéticos e da matéria prima, finita, do nosso planeta.

A sociedade contemporânea é muito dependente do material de construção mais importante e utilizado no mundo, o concreto. O sucesso do concreto se dá por diversos motivos como, por exemplo: sua moldabilidade, ótima relação custo/durabilidade, mas principalmente pela facilidade de obtenção da matéria prima para sua fabricação. Por este motivo ainda não se conhece, apesar de muitas pesquisas estarem sendo desenvolvidas², material que o substitua com toda a sua versatilidade.

Como ainda não existe substituto que seja menos poluente que o concreto e ainda conte com todas as suas vantagens, os esforços dos pesquisadores se concentram em tornar a mistura contemporânea a mais otimizada possível, visando durabilidade e economia futura em possíveis reparos estruturais. Isso possibilitaria a utilização por mais tempo das estruturas construídas.

Por estas razões a composição dos concretos modernos é cada vez mais complexa, dado os avanços na tecnologia dos materiais e mais recentemente na utilização dos materiais em escala bastante reduzida, como a dos nano materiais, apenas um bilionésimo do metro.

Mudanças tecnológicas em geral passam pelo estudo de novos materiais, que devem ser conhecidos em escala macro e microscópica. Este conhecimento deve ser consolidado nos centros de pesquisa por meio de estudos científicos, para que possa se difundir e ser incorporada no mercado consumidor de maneira segura.

O presente estudo visa colaborar no entendimento de um material composto, gerado pela união de duas matérias primas ainda pouco utilizados na indústria da construção civil, os concretos de ultra - alta resistência (CUAR) e os nanotubos de carbono (NTC).

No que tange a união entre estes dois materiais, o primeiro passo foi dado pelo pesquisador Torsten Kowald no ano de 2004 (KOWALD, 2004). A pesquisa conduzida por ele na Universidade de Siegen – Alemanha e apresentada no 1º Simpósio Internacional sobre CUAR (*International Symposium on UHPC*) realizado na cidade de Kassel (Alemanha), apresentou a preocupação com a forma de

² Pode-se citar como exemplo, a utilização de madeira densificada, aços patináveis (baixo teor de carbono, alta resistência e baixa liga) e polímeros termorrígidos como as resinas epóxi.

dispersão na matriz cimentícia dos nanotubos de múltiplas paredes, sendo esta operação realizada por sonificação³. Utilizando prismas de 8 x 8 x 30 mm e adicionando 0,5 %, 1,0 %, 2,5 % e 5,0 % de nanotubos, com relação à massa de cimento, ao concreto, o pesquisador comprovou que altas concentrações de nanotubos prejudicam muito a trabalhabilidade da pasta, o que ocasionou aumento da relação a/c de 0,22 do traço de referência, sem adição de nanotubos, para 0,39 quando utilizando adições maiores que 1,0%. Para as adições de 2,5 e 5,0 % se observou a necessidade da utilização de pressão de compactação ainda no estado fresco, para alcançar resultados aceitáveis.

Para o percentual de 0,5%, considerado por ele como o ideal, o pesquisador chegou a um incremento na resistência à compressão axial de 7 % para a idade de 7 dias e 12 % para a idade de 14 dias, alcançando os 153 e 169 MPa, respectivamente.

Quatro anos mais tarde, Kowald *et al.* (2008) apresentam na segunda edição do simpósio de Kassel um estudo que abordou a micro mecânica dos CUAR com adição de nanotubos.

Os pesquisadores verificaram que os nanotubos podem amplificar os produtos de hidratação do concreto, melhorando ainda mais as propriedades dos concretos de ultra - alta resistência, através do aumento da quantidade de silicato de cálcio hidratado, comumente chamado C-S-H⁴, e pela sua melhor distribuição na massa do concreto. A pesquisa mostrou que há uma interação benéfica entre os C-S-H formados na hidratação dos compostos e os nanotubos de carbono adicionados à mistura.

Estas duas primeiras pesquisas realizadas com a inclusão de NTC aos compostos cimentícios de alta resistência, apesar do pioneirismo, deixaram lacunas não respondidas, como por exemplo:

- Como só foram apresentadas resistências à compressão axial nas idades de 7 e 14 dias, qual o ganho obtido para maiores idades nos CUAR com adição de nanotubos de carbono;

³ Processo que visa à dispersão dos NTC. Será abordado no item 4.4.4 deste trabalho.

⁴ Abreviação química utilizada pela indústria cimenteira para: C = CaO; S = SiO₂; H = H₂O.

- Outras propriedades não abordadas nestes estudos como resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade devem ser estudadas;
- Em termos de durabilidade, como é o comportamento em termos de retração deste material associado;
- Qual é o comportamento reológico deste concreto no estado fresco e como este comportamento influencia suas características no estado endurecido;
- Como acontece a interação entre os nanotubos de carbono e os compostos gerados pela hidratação do cimento nos concretos de ultra - alta resistência.
- Como é a distribuição dos nanotubos na massa de concreto e qual a sua concentração analisando a microestrutura do material.

Já na terceira edição do Simpósio de Kassel ocorrido recentemente no ano de 2012, a importância dos estudos abordando os nano materiais foi reconhecida e o simpósio mudou de nome, passando a ser denominado: Simpósio Internacional de UHPC e Nanotecnologia para Materiais de Construção de Alta Performance (*International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials - HiPerMat*).

O evento contou com 120 trabalhos a respeito dos CUAR e entre eles quinze trabalhos ligados à nanotecnologia nos materiais de construção. No entanto, nenhum deles tratou da adição de nanotubos de carbono aos CUAR, concentrando-se nas pesquisas da nanosílica, nano dióxido de silício e titânio, e ainda nos nanocarbonatos de cálcio em matrizes cimentícias.

As lacunas geradas nos estudos citados e a importância que o tema vem tomando nesta década motivaram a elaboração deste trabalho, que tem por objetivo contribuir com o conhecimento do comportamento destes dois materiais que, de maneira associada, podem contribuir para o aprimoramento dos processos construtivos e talvez na durabilidade de estruturas que utilizam o concreto em sua constituição.

1.2 Objetivo da pesquisa

Esta pesquisa tem por objetivo principal estudar os efeitos da utilização de nanotubos de carbono dispersos em algumas propriedades mecânicas, reológicas e na estrutura interna do composto cimentício de ultra - alta resistência em estudo.

1.3 Delimitações da pesquisa

Esta pesquisa se concentra no estudo experimental da adição de nanotubos de carbono ao concreto de ultra - alta resistência utilizado como referência. Foram estudados os efeitos reológicos desta adição no estado fresco, suas características mecânicas no estado endurecido, sua microestrutura através de imagens geradas pelo MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e ainda a composição química de algumas amostras, realizada por espectrografia de Raios – X por dispersão de energia (EDS).

Foram definidos três percentuais de adição de NTC em relação à massa do cimento para o estudo, são eles: 0,10; 0,20 e 0,30%, sendo esta uma delimitação importante do trabalho, dado o alto custo do material.

Os ensaios de caracterização mecânica foram escolhidos por serem os parâmetros básicos para o dimensionamento de estruturas de concreto. Foi estudado o desempenho do concreto quanto à resistência à compressão axial, resistência à flexão e módulo de elasticidade. Foi estudado ainda o comportamento do concreto quanto à retração por secagem. Devido ao alto custo e dificuldade de aquisição dos nanotubos de carbono, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de dimensões reduzidas 50 X 100 mm para os ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade. Foram utilizados corpos de prova de dimensões 40 x 40 x 160 mm para o ensaio de flexão e 25 x 25 x 285 mm para os ensaios de retração.

Os ensaios realizados têm como principal propósito analisar a viabilidade técnica da aplicação dos nanotubos de carbono nos CUAR. O critério econômico constitui a segunda etapa no desenvolvimento de novos materiais. No entanto, apenas como complemento aos resultados mecânicos, é apresentada uma estimativa dos custos com a produção do concreto em estudo, através de um gráfico de desempenho.

1.4 Estrutura do trabalho

Este documento foi dividido em sete partes. No primeiro capítulo foi realizada uma introdução ao tema da pesquisa, destacando a justificativa e relevância do estudo, a apresentação do objetivo, delimitações e estrutura organizacional do trabalho.

O segundo capítulo contém uma revisão da literatura que aborda o histórico de desenvolvimento dos concretos de ultra - alta resistência, aplicações reais, regulamentações técnicas, materiais utilizados na sua confecção, abordagem das suas principais características no estado fresco e endurecido e finalmente alguns resultados de referência envolvendo a durabilidade do material.

No terceiro capítulo é abordada a recente utilização dos nanomateriais na construção civil e perspectivas futuras desta nova vertente da engenharia de materiais.

A metodologia empregada para a execução dos ensaios é apresentada no quarto capítulo, explicando a descrição do planejamento, os ensaios realizados, caracterização dos materiais selecionados, procedimentos adotados para a dosagem, moldagem e cura dos corpos de prova.

O quinto capítulo apresenta a metodologia e os resultados da dosagem que definiram o concreto de referência, sem adição de nanotubos de carbono.

Os resultados do estudo da adição de NTC ao concreto de referência e a análise e discussão dos valores obtidos, são mostrados no sexto capítulo.

No sétimo e último capítulo, é apresentada a conclusão do trabalho, considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros envolvendo temas afins a pesquisa.

Os dados numéricos dos resultados dos ensaios, devido ao volume de informação gerada, foram organizados nos Anexos A ao F.

2 CONCRETOS DE ULTRA-ALTA RESISTÊNCIA

A seguir será apresentada uma revisão da bibliografia que pretende condensar o atual estado da arte dos CUAR através da explanação de sua evolução histórica, exemplos das mais variadas aplicações reais demonstrando toda sua versatilidade, explanação dos materiais constituintes, abordagem das características mecânicas e ainda fatores ligados à durabilidade.

2.1 Evolução dos concretos de ultra - alta resistência

Os últimos cinquenta anos marcaram o desenvolvimento e a expansão de uma linha de pesquisa nos estudos envolvendo o concreto de cimento Portland.

Trata-se de compostos cimentícios de ultra - alta resistência ou como são denominados em inglês *Ultra High Performance Concrete* – UHPC. Na tradução literal o termo “Performance” torna-se muito genérico para nomear estes materiais, pois um concreto de resistência convencional pode apresentar alta performance quanto à trabalhabilidade por exemplo, sendo autoadensável. Da mesma maneira os CUAR não apresentariam bom desempenho na aplicação em barragens compactadas por rolo, onde a consistência do concreto deve permitir que equipamentos pesados transitem em cima do concreto depositado em camadas, compactando-o.

De fato os UHPC possuem alta performance para algumas aplicações, mas não para todas. No entanto eles possuem alto desempenho na sua característica mais marcante, altas resistências mecânicas. Por este motivo, neste trabalho, estes concretos serão denominados Concretos de Ultra - Alta Resistência (CUAR).

Esta determinação tomou como base a definição deste concreto, visto que para ser considerado um CUAR o parâmetro básico a ser analisado é a resistência à compressão axial, devendo o concreto em questão alcançar no mínimo 150 MPa quando submetido a este tipo de solicitação, podendo alcançar, aos 28 dias de idade, os 250 MPa (AFGC/SETRA, 2002) ou até mais.

São representantes dos CUAR o *Micro Defect Free* (MDF), concretos isentos de micro defeitos preparados com adição de polímeros e estudados originalmente por Birchall *et al.* (1981), o *Densified System containing ultrafine Particles* (DSP),

caracterizados pela utilização de agregados miúdos com elevada dureza como o granito e bauxita desenvolvido por Bache, Young, Jennings & Aïtcin durante a década de 80, o *Slurry Infiltrated Fiber Concrete* (SIFCON) desenvolvido na mesma época nos Estados Unidos por Lankard (1985) e por Naaman (1987), o *Compact Reinforced Concrete* (CRC) desenvolvido por Bache (1987) e o *Reactive Powder Concrete* (RPC) estudado originalmente por Richard & Cheyrezy (1995), sendo este último o representante mais estudado e divulgado.

Os CUAR são considerados os sucessores dos Concretos de Alta Resistência (CAR) que podem desenvolver resistências à compressão na faixa de 120 MPa quando utilizado granito como agregado graúdo e até 140 MPa quando empregado o diabásio ou o basalto, Amaral Filho (1997 *apud* MENDES, 2002, p.4).

Nos CAR a resistência à compressão máxima obtida não depende exclusivamente do desempenho mecânico da união dos materiais cimentícios e inertes, mas sim da resistência do agregado graúdo utilizado, ou da sua interface com a pasta caracterizada como elo mais fraco da mistura.

A intenção inicial do desenvolvimento do CUAR era confeccionar estruturas pré-moldadas em concreto que suprissem a necessidade específica de resistir a ambientes altamente agressivos na América do Norte (BIZ, 2001, p.10), tipicamente atacados pela ação de gelo e degelo constantes.

Segundo Feylessoufi *et al.* (1996), um dos pioneiros no estudo deste concreto, estas misturas podem desenvolver resistências altíssimas, sendo duas suas classes de compressão: C200 e C800 MPa. Para essa última classe, utiliza-se limalha de aço na mistura, pressão de compactação de até 50 MPa visando eliminar os vazios existentes naturalmente na pasta, além da temperatura de tratamento por cura térmica que pode atingir os 400°C.

Para Ahlborn, Peuse e Misson (2008) existe uma forte pressão de organizações sociais em países europeus que obriga o desenvolvimento de novos materiais e de construções que utilizem em sua composição concretos mais sustentáveis.

As indústrias ligadas a esta atividade são obrigadas a envolver muita pesquisa e desenvolvimento na busca por concretos melhores do ponto de vista ambiental, para se manter competitivas no mercado. Estas pesquisas vem resultando no pedido de patentes de diferentes tipos de concretos de ultra - alta resistência, onde podem ser citados os mais conhecidos como o Ductal®

comercializado pela Lafarge⁵, o BSI fornecido pelo grupo Eiffage e o CEMENTEC produzido pelo *Laboratoire de Central des Ponts et Chaussées* na França.

Estes concretos apesar de possuírem diferentes nomes comerciais, apresentam características semelhantes, como altíssimas resistências mecânicas, basicamente os mesmos materiais constituintes, além de dosagens muito parecidas.

Em sua composição os CUAR misturam em proporções adequadas cimento Portland e sílica ativa, areia quartzosa e pó de quartzo como agregados, microfibras, aditivos fluidificantes e água, esta em quantidade mínima necessária para hidratar os componentes cimentantes, mantendo a relação água/aglomerante o mais baixa possível.

Em comum todos os tipos de concretos de ultra - alta resistência oferecem uma combinação única de altas resistências mecânicas e excelente durabilidade. Por este motivo, podem ser considerados concretos modernos, pois aliam alto desempenho com altas resistências, proporcionando principalmente maior durabilidade.

Entre os representantes comerciais já apresentados, é necessário uma melhor abordagem e apresentação do principal deles, do ponto de vista de utilização. O Ductal®, denominado pela comunidade científica como Concreto de Pós-Reativos - CPR (*Reactive Powder Concrete*) foi desenvolvido originalmente por pesquisadores franceses das *Ecole Centrale de Nantes e Ecole Nationale Supérieure de Cachan* (VANDERLEI, 2004, p.6) em conjunto com professores da Universidade de Sherbrook no Canadá, pela empresa Lafarge e seus sócios colaboradores Boygues e Rhodia, sendo patenteado pela empresa Boygues S.A. em 1995. Sua constituição lhe conferiu seu nome, visto que os constituintes típicos do CPR apresentam extrema finura, não representando a palavra pós algum tipo de reatividade tardia dos compostos. A maioria das informações encontradas a respeito dos CUAR provém de fontes oriundas dos Estados Unidos, Canadá, França, Japão, Austrália e Alemanha. Artigos relatando pesquisas específicas com estes concretos são publicados em periódicos desde meados da década de 90.

⁵ A Lafarge é uma multinacional francesa criada em 1833, líder na produção mundial de cimento e presente em 70 países. No Brasil iniciou seus trabalhos em 1959, inicialmente com cimento e atualmente também com produção de concreto e gesso, além da extração de agregados.

No entanto este material não foi necessariamente descoberto, mas sim desenvolvido, unindo diversas tecnologias já existentes desde a década de 70.

A Tabela 1 apresenta uma série de informações condensadas de maneira a facilitar o entendimento do desenvolvimento destes concretos e também das fibras adicionadas a estes materiais.

TABELA 1. AVANÇOS NA MATRIZ CIMENTÍCIA E NA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS NO CONCRETO.

Década	Matriz cimentícia, concreto e cimento	Fibras
1970	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Melhor entendimento das reações de hidratação e formação dos géis no concreto. ✓ Melhor entendimento da porosidade e da iteração do concreto com o ambiente. ✓ Resistências de 50 MPa já comercialmente praticadas na cidade de Chicago, Estados Unidos. ✓ Desenvolvimento dos aditivos redutores de água. ✓ Avanços nos tratamentos e condições de cura dos concretos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aparecimento de fibras metálicas lisas. ✓ Utilização de fibras de vidro. ✓ Aparecimento de algumas fibras sintéticas.
1980	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Melhorias nos aditivos químicos. ✓ Início da utilização de adições minerais como a sílica ativa e cinza volante. ✓ Aumento da utilização dos concretos autoadensáveis. ✓ Grande redução da relação água/cimento. ✓ Aparecimento da terminologia Concretos de Alta Resistência (<i>High Strength Concrete</i>). ✓ É comprovado que os concretos de Alta Resistência ajudam na melhoria das propriedades de durabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aparecimento das micro fibras. ✓ Comprovação do alto desempenho das fibras poliméricas como carbono, a Spectra® de polietileno e a Kevlar® de aramida.
1990	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Surgimento de outros tipos de aditivos como modificadores de viscosidade, retardadores de pega, entre outros. ✓ Incorporação de subprodutos industriais na fabricação do cimento. ✓ Confecção dos primeiros CUAR 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Início da utilização das fibras em estruturas reais e não mais apenas para combater fissuração, mas fazendo parte do combate aos esforços de tração.
2000	<ul style="list-style-type: none"> ✓ CUAR: melhoria no entendimento do pacote granulométrico e sua relação com a densidade; início da aplicação dos conceitos da nano tecnologia. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fibras metálicas com altíssima resistência: lisas ou onduladas com diâmetros menores que 0,12mm e resistência maiores que 3400 MPa; ✓ Nanotubos de carbono; nano fibras de carbono;
2010	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento no entendimento e nas pesquisas da matriz cimentícia na nano escala (10^{-9}). Incorporação de nano materiais a matriz cimentícia. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Início da utilização de nano materiais como os nanotubos de carbono, nanosílica e nanocarbonatos;

FONTE: Traduzido e adaptado de Naaman e Wille (2012).

Pela análise da Tabela 1 se verifica que desde meados da década de 90 avanços na matriz cimentícia já possibilitavam obter, em situações laboratoriais, altas resistências em corpos de prova de concreto. Sua aplicação em estruturas reais ainda era inviável.

Da mesma forma, a idéia de reforçar compostos frágeis com elementos fibrosos é muito antiga. Existem relatos que no Egito antigo misturava-se palhas as argilas, após serem retiradas substâncias estranhas. O intuito para amplificar a qualidade dos tijolos, obtendo como resultado final um material de maior qualidade e durabilidade (WTB and TS, 2013). No entanto, foi apenas na década de 50 que este princípio empírico tomou orientação científica, e a partir daí, começaram a tomar grande importância no controle do aparecimento da retração e no combate a solicitações de tração em pavimentos.

Em seguida, são desenvolvidas as fibras metálicas lisas, fibras de vidro e algumas fibras sintéticas. Com o passar do tempo elas foram diminuindo de tamanho e tornaram-se micro fibras, onde se destacam as fibras poliméricas de carbono, Spectra e Kevlar.

Já no início da década de 90 as estruturas em CUAR iniciaram uma revolução na utilização das fibras, dispensando a armadura passiva em determinadas construções, como na passarela de Sherbrook, Canadá.

Entre as principais contribuições para os estudos envolvendo os CUAR destacam-se empresas privadas que utilizando laboratórios altamente equipados e aplicando altos investimentos em pesquisa, desenvolvem tecnologia para possibilitar a aplicação destes concretos. Enquanto os vários tipos de CUAR existentes diferem ligeiramente em composição, a compreensão do comportamento deste concreto e de seu potencial de aplicação continua a ser prioridade para estes centros de pesquisa e para laboratórios nacionais de desenvolvimento de tecnologia mantidos por países de ponta na geração de conhecimento e tecnologia. A Tabela 2 apresenta os nomes e os países sede de institutos, associações ou grupos de pesquisa que desenvolvem estudos em CUAR. No entanto, as pesquisas publicadas por empresas privadas em geral suprimem informações relativas a procedimentos de dosagem por tratar-se de segredo industrial, o que dificulta a difusão deste conhecimento e a reprodutibilidade dos resultados apresentados por estes pesquisadores.

TABELA 2. INSTITUTOS DE REFERÊNCIA NO ESTUDO DOS CUAR.

País	Instituição/Associação ou grupo de pesquisa
Alemanha	Institute for Building Materials – Concrete Construction and Fire Protection (iBMB)
	Fraunhofer Institute for High Speed Dynamics, Ernst – Mach - Institute (EMI)
	Department of the State North Rhine - Westphalia
	Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)
	German Cement Works Association
Bélgica	Belgian Building Research Institute
Canadá	Lafarge North America
	Ministry of Transportation Ontario (MTO)
Coréia do Sul	Korea Institute of Construction Technology (KICT)
França	Lafarge Central Research
	Study and Research for the French Concrete Industry
	Associação Francesa Científica e Técnica de Engenheiros Civis (AFCG)
	Agência Governamental Francesa de Tráfego e Estradas (SETRA)
	Institut français des sciences et technologies des transportes
Japão	Associação Japonesa de engenheiros civis
Suíça	Institute for Construction and the Environment
	Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)
USA	National Institute of Standards and Technology
	North America UHPC Working Group (NA-WG)
	U.S. Army Corps of Engineers
	Federal Highway Administration (FHWA)
	United States Army Engineer Research and Development Center
	Virginia Military Institute
	Iowa Department of Transportation

FONTE: Presente estudo.

NOTA: Informações foram compiladas com base em artigos publicados em periódicos e trabalhos científicos.

Já a Tabela 3 apresenta as universidades nacionais envolvidas em estudos relacionados aos concretos de alta resistência. Não se conhecem empresas nacionais que desenvolvam estudos nesta área. As pesquisas relacionadas ao tema no país ainda são muito escassas. Apesar do amplo desenvolvimento das pesquisas nas universidades, os representantes dos CUAR somente estão sendo produzidos e aplicados pelas grandes empresas detentoras de suas marcas registradas.

TABELA 3. UNIVERSIDADES E AUTORES COM ESTUDOS ENVOLVENDO CUAR NO BRASIL.

Instituição	Pesquisadores	Ano
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)	Biz C. E.	2001
Universidade de São Paulo (EESC/USP)	Vanderlei R. D.	2004
Universidade Federal do Paraná (UFPR)	Henche D. & Medeiros M.H.F	2010
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)	Henche D. & Alessi E.	2011
Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC)	Reginato L. A & Piovesan A.	2011

FONTE: Presente estudo.

O custo praticado por estas empresas para fornecer estes concretos varia significativamente em função das proporções de cada mistura, mas é de aproximadamente US\$ 750 a US\$ 1.000 por m³ (TADROS e MORCOUS, 2009).

Além das despesas com o material, o alto custo de produção dado ao maior tempo para as operações de mistura, em média 45 minutos, e às 48 horas de cura a vapor necessárias para alcançar altas resistências, também encarecem o produto.

Uma mistura de CUAR pode ainda necessitar de mais tempo para ser removida da fôrma, o que pode aumentar muito o custo desta etapa de produção.

No entanto, o aspecto econômico não está impedindo o crescimento de aplicações reais dos concretos de ultra - alta resistência pelo mundo.

Desde a década de 90, por ser um material extremamente versátil, é estudada sua aplicabilidade para diversas finalidades, conforme será apresentado no subitem a seguir. Sabendo da dificuldade de reprodução destes materiais, diversas universidades em todo o mundo também contribuem de maneira importante na geração e consolidação deste conhecimento e estão realizando pesquisas visando estudar o comportamento dos concretos de ultra - alta resistência.

A Tabela 4 apresenta um apanhado de universidades em diversos países que desenvolvem importantes estudos com os CUAR, destacando-se neste sentido a Alemanha, França, Canadá, Japão e Estados Unidos. As informações contidas nesta tabela foram compiladas com base nos estudos publicados nas edições do Simpósio de Kassel, Alemanha 2004, 2008 e 2012.

TABELA 4. UNIVERSIDADES INTERNACIONAIS REALIZANDO PESQUISAS EM CUAR.

País	Instituição	País	Instituição	País	Instituição
Alemanha	University of Kassel	Coreia do Sul	Korea University	Índia	Gorakhpur University
	University of Siegen		Korea Institute of Technology	Iran	University of Tehran
	University of Leipzig	China	Chongqing University	Itália	Politecnico di Milano
	University of Wuppertal		Tsinghua University	Japão	Hokkaido University
	University of Stuttgart		Beijing Jiaotong University		Ishikawa College of Technology
	University of Duisburg-Essen	Espanha	Universitat Politècnica de València	Letônia	Riga technical University
	University of Karlsruhe			Estados Unidos	Florida International University
	University of Brussels	Iowa State University	Holanda		Delft University of Technology
	University of Rostock	Georgia Institute of Technology			Faculty of Civil Engineering Delft
	University of Weimar	Massachusetts Ins. of Tech. (MIT)	Portugal		University of Coimbra
	University of Hannover	Michigan Technological University			Technical University of Lisbon
	University of Technology Munich	Missouri Uni. of Science and Tech.	University of Coimbra		
	Aachen University	Illinois Institute of Technology	Reino Unido		Cardiff University
	Technical University Braunschweig	Ohio University			The University of Liverpool
	Technical University München	New Mexico State University	República Tcheca		Czech Technical University in Prague
	Technical University Dortmund	Columbia University			Brno University of Technology
	Technical University Darmstadt	Northwestern University	Suécia	Luleå University of Technology	
	Technical University Brunswick	Virginia tech University		Suíça	University of Applied Sciences of Southern
	Cologne University of Applied Sciences	University of Connecticut	University of Applied Fribourg		
	Leipzig University of Applied Sciences	University of Michigan	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne		
Karlsruhe Institute of Technology	University of Central Florida	Finlândia	Helsinki University of Technology		
Austrália	New South Wales University		University LyonParis-Est University		
Áustria	Carinthia University of Applied Sciences	França	École des Ponts – Paris Tech	Tailândia	Chulalongkorn University
	Graz University of technology		University of Bordeaux	King Mongkut's of Tech	
Bélgica	Vrije Universiteit Brussel		Universit� Claude Bernard Lyon	Vietnam	Hanoi University of Civil Engineering
	Ghent University				
Canadá	University of New Brunswick				
	University of Calgary				
	Sheerbrook University				

FONTE: Presente estudo.

2.1.1 Aplicações reais dos CUAR

Nos últimos quinze anos, as pesquisas iniciadas nas universidades e consolidadas nas instituições de pesquisa e desenvolvimento foram aplicadas em diversas obras ao redor do mundo, trazendo resultados bastante positivos do ponto de vista executivo.

A primeira aplicação dos CUAR em uma estrutura em escala real que se tem notícia foi à construção da passarela de pedestres sobre o Rio Magog, na cidade canadense de Sherbrook, no ano de 1997. Essa estrutura constituída de seis elementos pré-fabricados de 10 metros de comprimento cada, após montada e pós-tensionada, possibilitou a completa eliminação da armadura passiva da construção, contribuindo para que ela ficasse muito leve e esbelta. Nesta obra a resistência à compressão axial do CUAR empregado chegou a 200 MPa, a resistência a tração 7 MPa, a flexão 40 MPa e o módulo de elasticidade⁶ atingiu 50 GPa (VANDERLEI, 2004, p.4).

A construção pioneira desta passarela cumpriu sua proposta inicial de comprovar ser possível aplicar em estruturas reais os concretos de alta resistência, os pesquisadores adquiriram experiência no seu uso, além de divulgar e voltar às atenções para este novo material de construção.

Após esta primeira experiência, países como Coréia do Sul, Japão, Estados Unidos e França iniciaram a construção de passarelas para pedestres utilizando este material em sua constituição.

Finalmente no ano de 2001, após o esforço combinado da academia com as indústrias e associações de engenheiros (AFGC/SETRA) foi construída a primeira ponte rodoviária em CUAR, em 2001 em *Bourg-lès-Valence*, cidade Francesa. Utilizando em sua constituição o representante mais aplicado e estudado dos CUAR, o Concreto de Pós-Reativos.

O interesse destes países na construção de pontes, viadutos e passarelas em CUAR é bem definida: aumentar a durabilidade das mesmas e diminuir custos com reparo e manutenção.

⁶ O módulo de Young (ou módulo de elasticidade) é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. É a resposta de um material quando submetido a uma força em uma direção em relação a sua deformação nesta mesma direção.

Apenas nos Estados Unidos, de acordo com um relatório divulgado pela Associação de Cimento Portland (ACP) daquele país, um total de 474.182 pontes listadas no inventário nacional, 72.749 estão estruturalmente deficientes e 80.716 foram consideradas com seu funcionamento obsoleto (SRITHARAN *et al.*, 2012).

Ou seja, mais de 30% das estruturas, em sua maioria em concreto, necessitam de reparo ou reforço estrutural. Um relatório emitido pela Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos (*Federal Highway Administration - FHWA*) endossa a afirmativa da ACP e atesta que 156 mil pontes e viadutos necessitam de reparos emergenciais, considerando empreendimentos públicos e privados.

Com o intuito de aumentar a vida útil destas estruturas, a FHWA lançou no ano de 2006 um programa de incentivo a construção de pontes, viadutos e passarelas confeccionadas com os CUAR. Este programa foi chamado de Projeto Ponte do Futuro e visa construir obras de arte que possam durar no mínimo 100 anos em estado de serviço, já se considerando aumento do volume de tráfego e cargas.

O objetivo é utilizar, em novas construções, materiais de maior viabilidade econômica de longo prazo, mesmo que o despendimento de recursos seja maior na fase de construção, esperando-se, no futuro, menores investimentos com manutenção e reparo. A utilização de concretos mais duráveis na fase de execução da estrutura possibilitam melhor estanqueidade do conjunto e por consequência vida útil estendida. Utilizados em obras que demandam alta qualidade e durabilidade, o que se reflete em sustentabilidade, está sendo aplicado desde então com sucesso em várias estruturas viárias na América do Norte, Europa, Ásia, Oceania e recentemente na África.

Das aplicações mencionadas na Tabela 5, destacam-se a ponte rodoviária de Kg. Linsum, em Rantau Malásia, maior vão livre em CUAR do mundo até o momento, 50 metros.

Outro destaque positivo é o esforço do Ministério de Transportes de Ontário, província Canadense que recentemente implantou cinco pontes viárias em concreto de ultra - alto desempenho completas no ano de 2011, conforme pode ser visto na Tabela 5.

TABELA 5. PONTES, VIADUTOS E PASSARELAS CONSTRUÍDOS EM CUAR NO MUNDO.

Nome (localização)	Ano	País	Observação
Passarela de Sherbrooke	1997	Canadá	Primeira construção em CUAR
Ponte rodoviária Bourg-lès-Valence	2001	França	Primeira ponte em CUAR
Passarela de Seonyu	2002	Coréia do Sul	Utilizada tecnologia francesa
Passarela Akakura (Yamagata)	2004	Japão	-
Passarela Tahara Bridge (Aichi)	2004	Japão	-
Ponte rodoviária Washington	2004	EUA	Vigas em formato
Ponte rodoviária Shepherds Creek	2005	Austrália	-
Viaduto rodoviário N°34	2005	França	Feito inteiramente em BCV®
Ponte rodoviária St Pierre La Cour	2005	França	-
Viaduto rodoviário Horikoshi Ramp	2005	Japão	-
Passarela Keio Uni (Tokyo)	2005	Japão	-
Passarelas Papatoetoe (Auckland)	2006	Nova Zelândia	Série de nove passarelas
Ponte rodoviária Mars Hill (Iowa)	2006	EUA	-
Ponte rod. Torisaki River (Hokkaido)	2006	Japão	-
Ponte rodoviária Sunshuine Creek	2007	Canadá	-
Passarela Toyota Gym (Aichi)	2007	Japão	-
Passarela Sanken-ike (Fukuoka)	2007	Japão	-
Ponte Gaertnerplatzbridge (Kassel)	2007	Alemanha	Primeira utilização neste país
Ponte Cat Point Creek (Richmond)	2008	EUA	-
Ponte Jakaway Park	2008	EUA	-
Ponte Hawk Lake	2008	Canadá	Construção na província de Ontário
Ponte Buller Creek	2009	Canadá	Construção na província de Ontário
Ponte Wabigoon River	2009	Canadá	Construção na província de Ontário
Ponte Log River	2009	Canadá	Construção na província de Ontário
Ponte Eagle River (Ontário)	2009	Canadá	Construção na província de Ontário
Ponte Route 31 (New York)	2009	EUA	-
Ponte Oneonta (New York)	2009	EUA	Ponte com 38,8 m de extensão
Ponte Chukuni River (Ontario)	2010	Canadá	Tabuleiro formado de painéis CUAR
Tokyo Int. Airport GSE Bridge (Tokyo)	2010	Japão	Ponte dentro do aeroporto de Tóquio
Ponte Kayokawa	2010	Japão	-
Ponte Wild-Brücke <i>Völkermarkt</i>	2010	Áustria	Primeira Ponte em arco em CUAR
Ponte viária de Kg. Linsum (Rantau)	2011	Malásia	50 metros de vão.

FONTE: Presente estudo.

NOTA: Informações compiladas com base em artigos publicados em periódicos e trabalhos científicos.

Pode-se perceber que as aplicações têm crescido ao longo dos anos, e vem ficando mais ousadas com o passar do tempo. Pode ser considerado exemplo dessa afirmação a recente e pioneira aplicação do CUAR na Áustria, em uma ponte em arco, Figura 2.

Além da aplicação de CUAR nas longarinas e nas transversinas de obras de arte especiais, estes materiais vêm sendo aplicados também em algumas pontes nos Estados Unidos feitas com vigas de aço. Os concretos de ultra - alta resistência constituem as placas que formam o tabuleiro das pontes. Para solidarizar as placas de concreto às vigas metálicas, são soldados pinos metálicos às vigas e posteriormente as juntas são concretadas também em CUAR. A Figura 3 mostra a construção da estrutura de uma ponte utilizando esta tecnologia mista, em concreto e aço, no estado do Iowa, Estados Unidos.



Figura 2. Primeira ponte em arco utilizando CUAR do mundo – Áustria.

FONTE: Hecht (2012).



Figura 3. Construção de ponte rodoviária em CUAR – Estados Unidos.

FONTE: Sritharan *et al.* (2012).

Além das estruturas viárias, uma importante e, talvez, a mais ousada aplicação dos CUAR até o momento foi iniciada no ano de 2007 na cidade de Tóquio no Japão. Trata-se de uma das etapas do projeto de ampliação do Aeroporto Internacional de Haneda, ainda em execução, conforme apresenta a Figura 4.

A construção da quarta pista para pouso e aterrissagem de vôos internacionais conta com uma área total de 520 mil m², onde 192 mil m² estão sendo

confeccionados em forma de placas de concreto de ultra - alta resistência que se apoiam sobre pilares de aço. Estes por sua vez distribuem o carregamento previsto em projeto em uma camada resistente do solo encontrada a 70 metros de profundidade.

O projeto precisou de dois anos de estudos preliminares para ser viabilizado e as investigações iniciais consistiram basicamente no entendimento do processo de mistura dos materiais, muito diferente neste tipo de material do que nos concretos convencionais. A responsabilidade da realização dos estudos e das operações de mistura ficou a cargo da Taiheiyo Cement, com a permissão e supervisão da Lafarge Internacional. No final do projeto terão sido confeccionadas 6.139 placas de 7,80 x 3,60 metros com uma espessura de 135 mm. A produção média mensal prevista de 1.100 m³ de concreto totalizará ao final dos serviços pouco mais de 23 mil m³ de concreto de ultra - alta resistência.

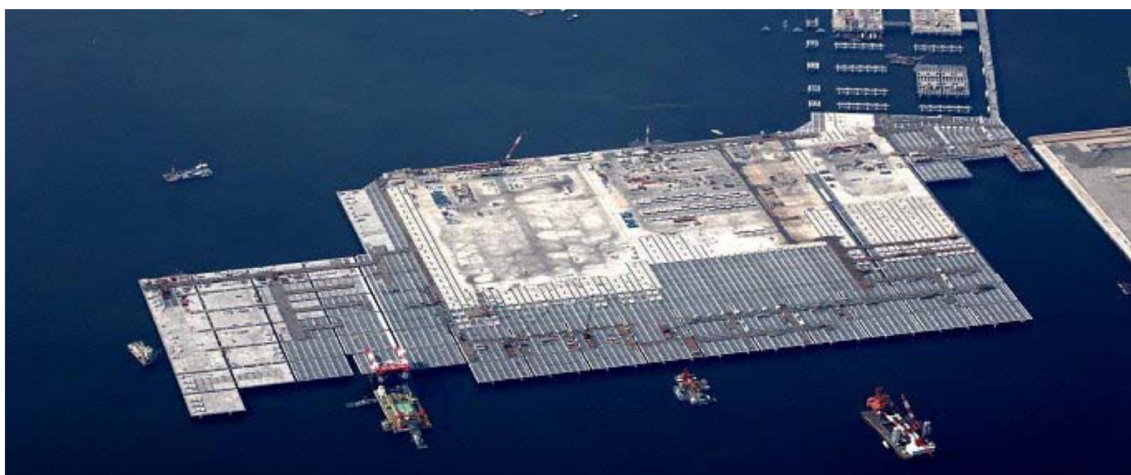


Figura 4. Vista aérea da construção da estrutura do aeroporto de Haneda – Japão.

FONTE: Resplendino, 2012.

Segundo Resplendino (2012), a utilização destas placas em concreto de ultra - alta resistência possibilitou redução dos custos da obra, pois reduziu a estrutura metálica de suporte. Além disso, o alto desempenho alcançado pelo material (capacidade de carga de 600KN para cada eixo de uma aeronave, quase o dobro da resistência de cálculo de projeto), a baixa taxa de carbonatação, permeabilidade e absorção e uma boa resistência aos danos causados pela

cristalização de sais nos poros possibilitarão a utilização da estrutura por no mínimo 100 anos.

A Figura 5 apresenta outra aplicação dos CUAR, uma volumosa estrutura que compõe a praça de pedágio do acesso ao Viaduto de Millau, França.



Figura 5. Vista da cobertura do pedágio de acesso ao viaduto de Millau, França.

FONTE: Resplendino, 2012.

O concreto utilizado nesta construção possibilitou a realização da forma complexa e ao mesmo tempo muito fina, em formato de casca. A estrutura de 98 metros de comprimento e 28 metros de largura conectada por 12 vigas protendidas também em CUAR propiciou um efeito final muito leve e estético a construção.

Outro estudo para aplicações dos concretos de ultra - alta resistência está sendo realizado por Randl, Pichler, Schneider e Juhart (2012). Consiste no seu emprego no revestimento de túneis como, por exemplo, no Túnel Chain Perschling, importante rota do trem que liga as cidades Austríacas de Sazburg a Viena. Um trecho desta rota foi escolhido como projeto piloto para estudar a viabilidade da utilização dos CUAR na fabricação dos segmentos pré-moldados de revestimento, onde normalmente utiliza-se elementos de concreto C40/50 MPa com 30cm de espessura. A conclusão do estudo foi que quando comparado o mesmo diâmetro de abertura 11,50 metros, houve redução na espessura dos segmentos de 30 cm para 22 cm, ou seja, redução de 25% no volume de concreto a ser utilizado. Esta redução se deu devido principalmente ao alto módulo de elasticidade do concreto estudado. Os autores argumentam ainda que a taxa de 2,5% de fibras metálicas utilizadas

dispensa a utilização de tela de armadura para o combate das diferentes solicitações geradas nas paredes destes túneis. As fibras diminuiriam ainda o efeito *spalling* gerado por um eventual incêndio ocorrido no interior do túnel. Por estes motivos é de extrema validade a investigação e aplicação também para os túneis de pequeno diâmetro e grande comprimento, ou ainda para as estruturas verticais de ventilação. Estudos neste sentido estão em realização na Universidade de Ciências Aplicadas de Carinthia, Áustria.

Os concretos de ultra - alta resistência estão sendo utilizados em casos específicos onde à aplicação justifique sua alta qualidade e custo. Em determinados casos, por motivos arquitetônicos, a forma do elemento exige excelente qualidade, como nos pilares do museu MuCEM (*Museum of Mediterranean and European Civilization*). Os pilares desenhados pelo Arquiteto Rudy Riccietii deveriam possuir forma orgânica, que imitasse o tronco das árvores, mas que fossem estruturais, conforme apresenta a Figura 6.

A Figura 7 mostra a utilização do CUAR para reparos estruturais. Aplicado pela empresa francesa de construção Eiffage, o BSI/Ceracem foi usado para reparar os pilares e blocos de fundação que suportam uma ponte em Valabres, França.

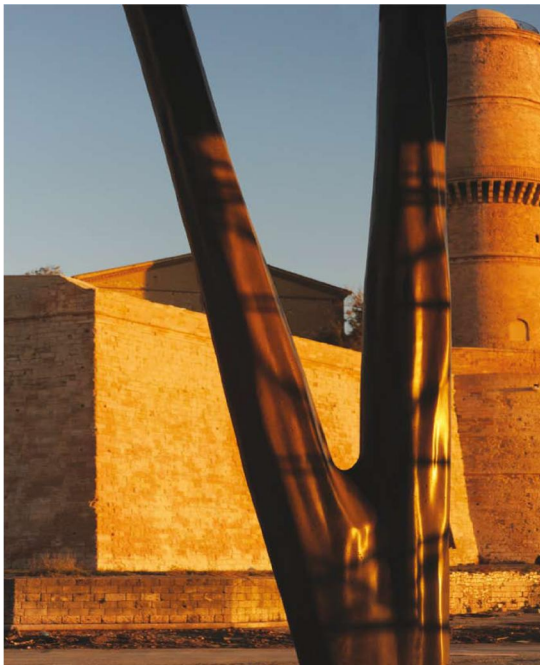


Figura 6. Forma diferenciada de um pilar estrutural em CUAR – França.

FONTE: León, 2012.



Figura 7. Reparo nos blocos de fundação e pilares de um viaduto em Valabres – França.

FONTE: Resplendino, 2012.

Outro exemplo de aplicação real extremamente interessante com este material foi apresentado por Adam e Ma (2012) na Alemanha e aconteceu devido a uma exigência de que alguns postes de comunicação utilizem concretos de classe C100/115 MPa de resistência característica naquele país. Tentando encontrar uma alternativa que não fosse à utilização de postes de aço, caros e de difícil manutenção, eles estudaram o seu emprego para moldar os elementos como o CUAR centrifugado. Segundo os autores, os primeiros resultados satisfatórios foram obtidos após dois anos de pesquisas, com protótipos de tamanho reduzido em colunas de diferentes diâmetros. Em um segundo momento da pesquisa e encorajados pelos bons resultados obtidos na confecção das colunas, os pesquisadores decidiram moldar grandes postes de comunicação com 26 metros de comprimento em CUAR.

A Figura 8 mostra um teste de flexão realizado no laboratório EUROPOLES com um exemplar deste grande elemento, onde não foi possível rompê-lo mesmo na área tracionada do concreto e aplicando-se 15 KN de força.



Figura 8. Teste de flexão realizado em elemento pré-moldado em CUAR – Alemanha.

FONTE: Adam & Ma, 2012.

A conclusão após os testes realizados foi de que os CUAR podem ser usados para confecção deste tipo de elemento pré-moldado em escala industrial, já

que foi possível atingir valores de resistência à compressão da ordem de 172 MPa, aplicando-se tratamento térmico e fibras metálicas, além do ótimo resultado no teste de flexão indicado na Figura 8.

Outra aplicação curiosa dos CUAR está em desenvolvimento na Alemanha pela BAUER⁷ Internacional, na Universidade Tecnológica de Munique, com o apoio do Ministério Federal de Educação e Pesquisa daquele país. Trata-se da utilização deste concreto em equipamentos para a engenharia de fundações especiais, mais especificamente brocas de CUAR substituindo as de aço, comumente utilizado para tal fim.

Para os autores (IBUK & BECKHAUS, 2012) as pontas das brocas quando feitas de CUAR (Figura 9) podem competir com o aço visto que exemplares já foram colocadas em uso, passaram pelos testes de laboratório na solicitação de cisalhamento e também pela utilização real. Eles avaliam que as brocas de CUAR podem ser competitivas no mercado pela sua vantagem econômica, pois são mais baratas de produzir do que brocas de aço e, além disso, pelos aspectos ecológicos envolvidos (a pegada de carbono das brocas de CUAR é comparativamente pequena). Tecnicamente, brocas de CUAR não são inferiores as brocas de aço.

Como ressalva, os pesquisadores afirmam que, neste tipo de aplicação, as fibras de aço são imprescindíveis para o sucesso da substituição do aço. Segundo eles as fibras impedem o cisalhamento total da broca depois desta atingir seu estado limite, limitando a largura das fissuras. Além disso, as brocas feitas de CUAR - com adição de fibras de aço - podem ser caracterizadas por extremamente elevada resistência à corrosão. Para os pesquisadores este aspecto de durabilidade representa uma enorme vantagem para brocas em CUAR.

Testes iniciais em campo, na Itália e na Suíça, foram realizados com grande sucesso. Foram feitas estacas escavadas em condições de terreno difícil para

⁷ O Grupo BAUER é uma empresa internacional de construção e fabricação de máquinas com base na cidade de Schrobenhausen, Alemanha. As operações do Grupo estão divididas em segmentos, onde um deles é de equipamentos de construção, e Recursos. A empresa BAUER Spezialtiefbau GmbH (abrev. BST - segmento de construção) realiza obras especiais de fundação para poços de escavação, fundações, muros de corte e de melhoria do solo em todo o mundo. Outro segmento da empresa BAUER Maschinen GmbH (abrev. BMA - segmento de equipamentos) desenvolve e fabrica equipamentos e ferramentas para engenharia de fundação especiais e aplicações de mineração.

perfuração, contendo inclusive alteração de rocha, com um diâmetro de até 620 mm usando brocas em CUAR. Após o processo de perfuração as brocas de CUAR ainda estavam funcionais e livres de quaisquer fissuras.

Na Figura 10 é mostrada uma aplicação dos CUAR na indústria de máquinas e equipamentos de alta precisão. Para Sagmeister (2012) este material é competitivo para fabricação destes equipamentos quando comparado aos materiais comumente empregados, tipicamente polímeros e ou pedras naturais. Segundo o mesmo autor, companhias da Alemanha já obtiveram sucesso ao confeccionar equipamentos neste campo de aplicação com este tipo de concreto.

Outro campo de pesquisa para novas aplicações e que aparece como possibilidade para a utilização dos CUAR é sua utilização para proteção de valores e pessoas de projeteis balísticos, mísseis e outros armamentos. Após os ataques terroristas de 11 de setembro de 2001, nos Estados Unidos, o mundo percebeu a fragilidade de estruturas a choques mecânicos provocados por grandes massas aceleradas a uma grande velocidade, como no caso de aeronaves, por exemplo.



Figura 9. Broca para perfuração de fundações profundas em CUAR – Alemanha.

FONTE: Ibuk & Beckhaus, 2012.



Figura 10. Equipamento sofisticado de alta precisão em CUAR.

FONTE: Sagmeister, 2012.

Estudos conduzidos na VLS Austrália pela Universidade de Melbourne, pelos pesquisadores Rebentrost e Wight, (2008), tem avaliado a resistência dos CUAR a este tipo de solicitação utilizando para isso estruturas de painéis com 50 a 100 mm de espessura e submetendo-as a explosões equivalentes a seis toneladas do composto de alto poder explosivo denominado Tri Nitro Tolueno (TNT). Os estudos demonstraram a eficácia do material a esta solicitação e este tipo de aparato já protege a embaixada Australiana desde o ano de 2005. A Figura 11 mostra um painel de CUAR após ser alvejado por três tiros de fuzil de grosso calibre.

Devido à resistência dos CUAR aos agentes agressivos, entre eles os íons cloreto, um representante dos CUAR foi escolhido para ser o material de reparo em um complexo de piscinas cobertas e aquecidas em Amiens, França. Devido ao ataque destes agentes agressores às bases de ancoragem dos pilares metálicos que suportam toda a cobertura de vidro do complexo estavam muito deterioradas. Elas foram reforçadas com a proteção proporcionada por este tipo de concreto, apicoando-se os blocos antigos e aumentando-se a seção dos mesmos em 20 cm em todas suas faces (Figura 12).



Figura 11. Placa de CUAR após ser alvejada por tiros de fuzil calibre 7.62mm.

FONTE: Rebentrost e Wight, 2008.



Figura 12. Proteção em CUAR para a base de pilares metálicos – França.

FONTE: León, 2011.

Segundo León (2011), a escolha deste material se deu pela preocupação dos proprietários do clube em não intervir novamente no complexo por um longo período de tempo. Ele foi escolhido, pois a taxa de ataque dos íons cloreto a este tipo de material é cerca de mil vezes menor do que a taxa para concretos comuns.

Além das aplicações reais já finalizadas e dos estudos de aplicações específicas, novos projetos vem sendo desenvolvidos com a utilização dos concretos de ultra - alta resistência. Exemplo das futuras aplicações ainda em fase de projeto ou já com suas aplicações em andamento serão abordadas a seguir.

No ano de 2011 foram iniciadas as pesquisas e preparativos para a construção de mais uma grande estrutura que utilizará o concreto de ultra - alta resistência, mas com uma tecnologia de ponte estaiada especialmente desenvolvida para esta aplicação, denominada Super Ponte 200 pelos seus idealizadores, nome que vem dos vãos centrais de duzentos metros de comprimento. A Figura 13 apresenta uma ilustração de como será o aspecto da ponte quando sua construção estiver concluída.



Figura 13. Maquete eletrônica da Ponte Jobal – Coréia do Sul.

FONTE: Kim *et al.*, 2012.

A ponte rodoviária, que será construída na Coréia do Sul, irá conectar a cidade de Jobal a ilha Dunbyung, na região sul do país. Terá ainda três pórticos de noventa metros de altura confeccionados totalmente em CUAR. Segundo Kim *et al.*

(2012), esta é a primeira aplicação deste concreto em uma ponte estaiada no mundo.

O novo Museu de Arte da cidade de Miami, nos Estados Unidos, com previsão para abertura ao público em 2013 também contará com elementos em CUAR. O concreto de ultra - alta resistência será utilizado para uma única finalidade, suportar a carga da grande cortina de vidro que circundará o prédio. A Figura 14 apresenta o projeto da construção, que terá vista para a baía de Biscayne, importante ponto turístico da cidade.



Figura 14. Novo Museu de Arte de Miami – Estados Unidos.

FONTE: León, 2012.

Podem-se citar ainda outros empreendimentos de grande importância que levarão em sua constituição elementos não estruturais em CUAR, mas que devido a sua complexidade de execução e logística, merecem ser citados neste trabalho. Destacam-se neste sentido três aplicações recentes dos CUAR: a sede da Fundação Louis Vuitton, a Escola de Administração de Rotman da Universidade de Toronto e o Aeroporto de Rabat-Salé no Marrocos, apresentadas respectivamente a seguir.

A construção da Fundação Louis Vuitton (FLV), constituída por 18.800 painéis separados em CUAR e todos de diferentes dimensões, reflete a criatividade do seu criador Arquiteto Frank Gehry.

O projeto do edifício é caracterizado por uma estrutura metálica composta de grandes seções de vidro e por painéis de revestimento em concreto de ultra - alta resistência, conforme apresenta a Figura 15. Segundo Christian Reyne, vice-diretor da Fundação Louis Vuitton e Nicolas Pascal diretor do projeto, várias soluções foram consideradas para produzir estes painéis e propiciar o efeito desejado, como elementos em metal e concreto projetado.

No entanto, após muitos estudos de viabilidade, foi escolhido o CUAR por ser a única solução que atenderia a todas as expectativas em termos de qualidade de acabamento, durabilidade e resistência mecânica.

Neste projeto graças às propriedades mecânicas destes concretos, os painéis possuem apenas 25 mm de espessura e têm um peso médio de 35 kg, tornando-os fáceis de manusear (Figura 15).

O primeiro grande desafio do projeto foi desenvolver um processo para a produção de todos os painéis com geometria não padrão para o revestimento, de modo que eles firmassem à curva dos 9000 m² das fachadas e coberturas. É então comparada com o arquivo de dados digital original, para garantir a sua conformidade. A instalação dos painéis será como resolver um enorme quebra cabeça, mas com precisão de milímetros. Os mais altos padrões de qualidade são esperados pelo proprietário e, por isso, não existe nenhuma tolerância a defeitos. Outro desafio diz respeito a estoque dos painéis já produzidos, de forma a garantir a rastreabilidade e a entrega das peças no canteiro na ordem exata de instalação. Cuidados com condições muito rigorosas: o tempo de desmoldagem, as condições de cura e o tempo antes da aplicação são apenas alguns cuidados seguidos pela equipe de montagem. Até o final de janeiro de 2012, aproximadamente 2.725 painéis tinham sido instalados na estrutura.

Outro exemplo recente desta aplicação foi utilizada na Escola de Administração de Rotman da Universidade de Toronto, Canadá. Em processo de expansão a universidade utilizou nas fachadas de um novo edifício de 150.000 m² elementos em CUAR. As paredes externas da construção foram parcialmente revestidas com 350 painéis de Ductal® cinza escuro de apenas 30 mm de espessura (variando de 0,5 a 1 m de largura por 3,5 a 5,3 m de altura), enquanto

que em outra face, mais de 100 painéis de 19 mm de espessura vedam a fachada, criando um atraente interior ao complexo.

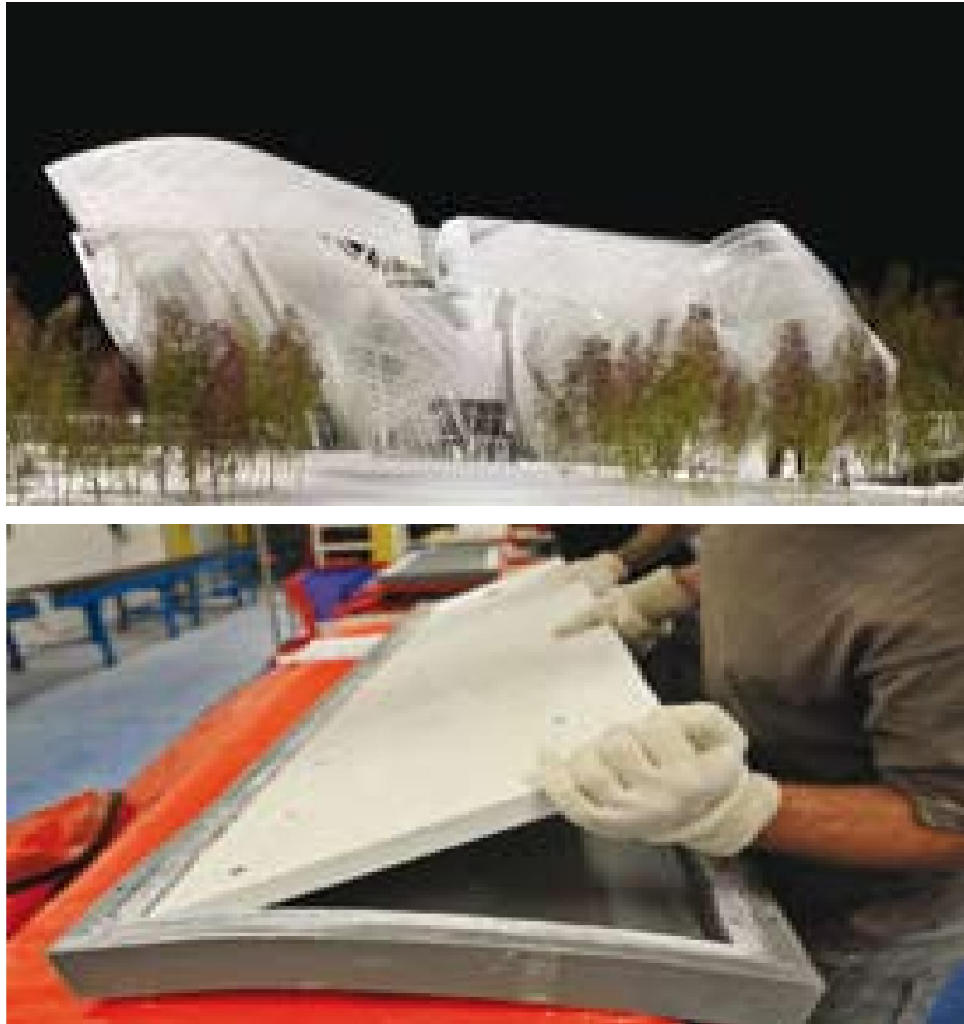


Figura 15. Acima a maquete da futura FLV e abaixo a confecção dos painéis em CUAR.

FONTE: León, 2012.

O tamanho do painel padrão foi determinado pela empresa fornecedora do material (Lafarge) a partir da necessidade de manter cerca de 40% da área total da fachada em pele de vidro, seguindo critérios de desempenho energético para a obtenção da certificação ambiental e para ter pelo menos uma janela móvel por escritório. Uma curiosidade da execução do projeto foi que uma vez que os painéis possuem uma superfície exterior lisa, foi possível utilizar elevadores de vácuo

tipicamente usados pra aplicação de fachadas em pele de vidro atendendo o prazo e mantendo baixos os custos de execução.

Outro exemplo de aplicação da tecnologia de painéis em concreto foi à recente primeira utilização dos CUAR no continente Africano, mas precisamente no Aeroporto de Rabat-Salé, Marrocos (Figura 16). A complexidade deste projeto, segundo seus idealizadores, residia na forma dos painéis, alguns medidos 5,25m x 1,75m, mas também na sua instalação. Isso porque, segundo os critérios de projeto e visando produzir um efeito moderno de malha, uma elevada proporção de vazios foi requerida, cerca de 70% da área do painel. Além disso, estes deveriam ser ligados a uma fachada envidraçada já existente e com o terminal em funcionamento. Antes da fase de fabricação, os engenheiros marroquinos foram levados à França, para um treinamento introdutório em CUAR e nas técnicas associadas a sua fabricação. Desta maneira ocorreu neste projeto uma intensa transferência de tecnologia, habilitando a partir de então, aquele país a executar obras com esta tecnologia.



Figura 16. Futura fachada do Aeroporto de Rabat-Salé – Marrocos.

FONTE: León, 2012.

2.1.2 Normas técnicas e diretrizes de projeto para os CUAR

A aplicação de um conjunto de diretrizes no desenvolvimento de um projeto estrutural visa aprimorar o desempenho da estrutura nas condições de utilização, busca a compatibilidade no processo executivo e a garantia de um custo adequado de construção (BATLOUNI NETO, 2011).

Este conjunto de diretrizes é inserido no meio técnico pelas normalizações e documentos reconhecidos pela sociedade, que tem como princípio básico registrar o conhecimento adquirido e aprovado por consenso pelos especialistas de cada área, de forma a trazer benefícios à coletividade (BATTAGIN, 2011).

Os concretos de ultra - alta resistência possuem grande potencial para mudar a maneira como se idealizam estruturas de concreto do ponto de vista arquitetônico utilizando para isso elementos estruturais mais esbeltos, podendo ser responsáveis no futuro por uma verdadeira revolução na maneira de se projetar edificações.

No entanto, para permitir a aplicação em grande escala destes materiais reconhecidos internacionalmente pelas suas características mecânicas e de durabilidade superiores, diretrizes de projeto se fazem necessárias.

Estas diretrizes devem contemplar as filosofias e exigências modernas, refletindo a evolução da sociedade. Neste contexto, o principal critério de projeto não fica limitado somente à segurança estrutural, mas também a durabilidade da edificação, exigência crescente para o atendimento às reivindicações de sustentabilidade.

Como os CUAR são materiais com características específicas, estudos são realizados para comprovar não sua viabilidade técnica, já ratificada pelas inúmeras aplicações reais, mas sim sua viabilidade financeira caso a caso, o que se traduz em um período de aceitação do material.

No entanto, o aspecto que mais inibe a utilização em larga escala de concretos de altíssima resistência pode não ser necessariamente a questão financeira, mas a falta de diretrizes para elaboração de projetos. Isso dificulta o dimensionamento das estruturas, pois nestes casos a resistência característica de projeto pode atingir até 200 MPa, muito superior às resistências utilizadas habitualmente pelos engenheiros calculistas, da ordem de 25 a 40 MPa.

Para Vanderlei (2004), as propriedades de resistência mecânica do Concreto de Pós-Reativos, um dos representantes dos CUAR, o coloca entre o concreto e o aço, quando o assunto são os parâmetros de projeto. Por este motivo, segundo o mesmo autor, os projetistas serão obrigados a repensar formas e metodologias de projeto e dimensionamento, visando aproveitar este material da melhor forma possível.

Resplendino (2012) argumenta que o projeto de estruturas utilizando CUAR requer um cuidado particular no dimensionamento, pois os volumes das peças são modificados e as dimensões ficam esbeltas. Por este motivo as normatizações nacionais e internacionais que regulamentam o dimensionamento de estruturas terão que sofrer adequações para se enquadrar a nova realidade e velocidade de avanço da tecnologia dos materiais de altíssima resistência.

Nacionalmente a NBR 8953 (ABNT, 2011) classifica os concretos para fins industriais conforme a resistência característica a compressão axial em dois grupos: o grupo I até 50 Mpa e o grupo II até 80 MPa. Para elaboração de projetos que necessitem de uma resistência a compressão superior a 50 MPa é necessário consultar normas internacionais, já que a NBR 6118 Projeto de Estrutura de Concreto – Procedimento (ABNT, 2007) aplica-se apenas ao grupo de resistência I.

Internacionalmente um movimento para regulamentar este material foi iniciado na Austrália em maio de 2000, com o apoio da VSL Austrália (uma empresa do Grupo Bouygues, criadora do RPC), onde a Universidade de New South Wales publicou um guia chamado – *Design Guide for RPC Prestressed Concrete Beams* – norma AS3600/1994 (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000). Este documento oferece exemplos de projetos, recomendações dos materiais a serem utilizados e ainda referências sobre os esforços máximos de torção, flexão e compressão para este tipo de CUAR. É também objeto da norma o desempenho do material a fadiga, comprimentos de ancoragem das barras de aço e flechas máximas. Os apêndices deste documento são dedicados à caracterização do material e a um exemplo completo de cálculo de uma estrutura de ponte seção caixão, de 35 metros de vão, duas faixas de tráfego e f_{c28} de 180 MPa, Figura 17 (medidas em centímetros).

Em março de 1999 na França, um comitê da Associação Francesa Científica e Técnica de Engenheiros Civis (AFCG) em parceria com a Agência Governamental Francesa de Tráfego e Estradas (SETRA) elaborou um guia para projetar estruturas confeccionadas com os CUAR, chamado de *Interim Recommendations*

(WALRAVEN, 2012). O resultado deste trabalho foi um manual publicado em janeiro de 2002, onde recomendações foram escritas com base na experiência adquirida na construção da primeira ponte rodoviária realizada com CUAR naquele país no ano de 2001, a *Bourg Lès Valence Overpasses* (Resplendino, 2012), Figura 18. Ainda hoje este documento é o mais citado em artigos científicos envolvendo os CUAR, pois foi o primeiro a defini-los com clareza.

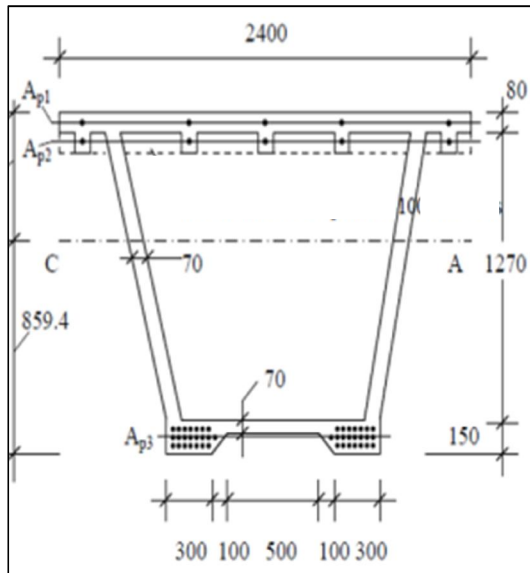


Figura 17. Exemplo de um projeto de ponte rodoviária em CUAR.

FONTE: Gowripalan e Gilbert, 2000.



Figura 18. Construção da primeira ponte rodoviária da França em CUAR.

FONTE: Hajar, Simon, Lecointre, Petitjean, 2004.

Também em 1999, pesquisas com os CUAR começaram no Massachusetts Institute of Technology (MIT) nos Estados Unidos e paralelamente a isso, estudos com os CUAR iniciaram na Federal Highway Administration (FHWA), aplicados ao potencial de utilização deste concreto em obras de arte especiais. A FHWA incumbiu então o MIT de preparar um estudo para otimização deste material em pontes rodoviárias, visando maximizar suas potencialidades e minimizar seus custos. Esta colaboração conduziu a divulgação do boletim publicado pela associação dos engenheiros civis dos Estados Unidos através da Civil Engineering Report, a CEE Report R03-01, com o nome *Model-Based Optimization of Ultra-High Performance Concrete Highway Bridge Girders*, ou seja, modelo de otimização de vigas de pontes

rodoviárias executadas em CUAR. Esta parceria culminou na utilização do CUAR neste tipo de construções a partir do ano de 2002 naquele país.

Em agosto de 2006 duas publicações da FHWA envolvendo um grande estudo com os CUAR são apresentadas ao meio científico. O primeiro estudo denominado *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete* (Caracterização do Concreto de Ultra - Alto Desempenho) apresenta uma caracterização muito detalhada do CUAR fornecido pela Lafarge e comercializado com o designação Ductal®. Com mais de 1.000 corpos de prova moldados, a ênfase do documento foi na determinação de valores de desvio padrão nos ensaios de compressão axial e comportamentos de tração, estabilidade em longo prazo e parâmetros de durabilidade (GRAYBEAL, 2006 - A).

No segundo relatório chamado *Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders* (Comportamento Estrutural de Vigas-I Protendidas de Concreto de Ultra - Alta Performance) foi realizada uma fase experimental de ensaios focados em determinar o comportamento estrutural de CUAR protendido utilizando vigas em formato "I" através do teste com vigas em escala real. Os testes incluíram um ensaio de flexão em uma viga de 24,4 metros de extensão, como pode ser visto na Figura 19 e três testes de cisalhamento em vigas aplicando-se carregamento em um curto espaço. Um detalhe interessante é que essas vigas não continham qualquer armadura em barras sendo as fibras metálicas e o próprio CUAR responsáveis por combater todos os esforços secundários de cisalhamento e de tração, Figura 20 (GRAYBEAL, 2006 - B).

Em agosto de 2008, a Sociedade de Engenheiros Civis do Japão divulgou as Recomendações para o Desenho e Construção de Estruturas de Ultra- Alta Resistência Reforçadas com Fibras – Procedimento (*Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks – HPFRCC*). Constam neste documento orientações sobre disposições de projeto, propriedades dos materiais de construção, testes, durabilidade, metodologia construtiva e exemplos de projetos de pontes já executadas em CUAR no Japão (ROKUGO, 2008).

No Canadá, um dos países pioneiros nos estudos dos CUAR, um manual publicado pela *Canadian Precast/Prestressed Concrete Institute* (CPCI) em 2010, visou discutir as propriedades e possíveis utilizações destes concretos neste país.



Figura 19. Viga de CUAR em escala real.
FONTE: Graybeal, 2006.



Figura 20. Viga de CUAR após ensaio de ruptura.
FONTE: Graybeal, 2006.

Para Walraven (2012) as recomendações internacionais para os CUAR ainda estão em desenvolvimento, longe de se tornar uma normalização internacional. Segundo ele o modelo da FIB (Código para Estruturas de Concreto 2010) apresenta um método geral para dimensionamento de estruturas em CUAR, válido para os concretos com fibras e para as classes a partir da C20 até a C200. Uma recomendação para projetos em CUAR não poderá ser tratada com um único documento, devendo ser harmonizada em um conjunto maior de normas. Esta providência facilitará a confecção de estruturas que adotem soluções combinadas em concreto de altíssima resistência e aço estrutural, por exemplo. Expressões simplificadas são mostradas neste documento e permitem aos projetistas utilizar as fibras como reforço de uma forma que eles já estão familiarizados. A tarefa de grupo FIB TG 8.6: *Ultra – High Performance Fiber - Reinforced Concrete*, escreve uma recomendação especial para os CUAR de forma adaptada, a fim de se aproveitar o conhecimento das particularidades deste material e tomar vantagem completa das suas propriedades mecânicas superiores.

Enquanto no Brasil, pesquisas visando o domínio da técnica de produção deste material ainda são raras, fica claro através das informações aqui apresentadas que existe um grande número de trabalhos em desenvolvimento em países de ponta na tecnologia dos compostos cimentícios, a fim de entender e posteriormente a isso poder usufruir dos benefícios oriundos dos CUAR.

2.2 Materiais constituintes dos concretos de ultra - alta resistência

2.2.1 A utilização do cimento

Altos percentuais de cimento aplicados na confecção de alguns representantes dos concretos de ultra - alta resistência (podendo atingir os 1000 kg/m³), são indicados como uma das maiores desvantagens dos CUAR (CWIRZEN, CWIRZEN E PENTTALA, 2008).

De fato algumas pesquisas utilizam porcentagens desmedidas de cimento em sua composição, vide Tabela 6, como nos estudos conduzidos por Talebinejad *et al.* (2004) na Universidade de Tehrân, Iran. Para alcançar resistências na faixa de 200 a 350 MPa os pesquisadores relatam ter utilizado de 1300 a 2105 kg/m³ de cimento e ainda adição de 25 a 30% de sílica ativa, alcançando o máximo valor de 309 MPa.

TABELA 6. CONSUMO DE CIMENTO EM TRAÇOS DE CUAR.

Pesquisadores	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência (MPa)
Talebinejad <i>et al.</i> (2004)	1300 – 2105	200 – 309
Vanderlei (2004)	874	200 - 210
Yazici <i>et al.</i> (2009)	498 + adições minerais	190 - 206
Henche e Alessi (2011)	734	170 - 186

FONTE: Presente estudo.

Altos resultados podem ser obtidos utilizando uma dosagem muito menor de cimento por metro cúbico, como por exemplos no trabalho de Yazici *et al.* (2009) onde com 498 kg/m³ mais o acréscimo de adições minerais, foi atingido 206 MPa com cura a 28 dias na água e 250 MPa utilizando cura sob pressão. Existe ainda a preferência na utilização deste material é o fato da preferência pelo cimento com alta proporção de aluminato tri cálcico (C₃A) e silicato tri - cálcico (C₃S) para contribuir com altas resistências nas primeiras idades e baixa finura Blaine para possibilitar a melhor hidratação das partículas.

2.2.2 A importância da seleção e proporcionamento dos agregados

Os agregados presentes nos concretos convencionais (CC) quando submetidos a forças de compressão respondem a estas solicitações de maneira a gerar outras tensões de tração e cisalhamento na interface da pasta/agregado, gerando microfissuras nestas regiões. O tamanho e a intensidade das microfissuras geradas está diretamente relacionado com a extensão da zona de sobtensões de tração ou cisalhamento (VANDERLEI, 2004). Portanto, quanto maior o agregado maior o aparecimento de microfissuras na pasta, considerada o elo fraco do CC.

Por este motivo, nos CUAR os agregados graúdos são retirados da dosagem, sendo então selecionadas as partículas de no máximo 2,0 mm de diâmetro médio.

Utilizando esta redução, para Vanderlei (2004), se consegue reduzir o tamanho das microfissuras de origem mecânica (originada por carregamentos externos), química (originada pela retração autógena) e termomecânica (ocasionada pela expansão diferenciada entre a pasta e o agregado durante a aplicação do tratamento térmico).

A seleção do tamanho máximo da partícula é apenas o primeiro passo para a dosagem dos materiais secos nos CUAR, pois após esta etapa, se inicia o processo chamado de máxima densificação do concreto, também denominado de empacotamento das partículas granulares.

Por definição, o perfeito empacotamento das partículas acontece quando os espaços entre as frações maiores são preenchidos pela classe de partículas imediatamente inferior, formando uma distribuição granulométrica o mais homogênea possível (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A Figura 21 apresenta uma representação gráfica computadorizada e teórica de como acontece à acomodação das partículas granulares no concreto. Este processo de densificação possibilita a diminuição de vazios no interior do concreto melhorando consideravelmente suas características mecânicas.

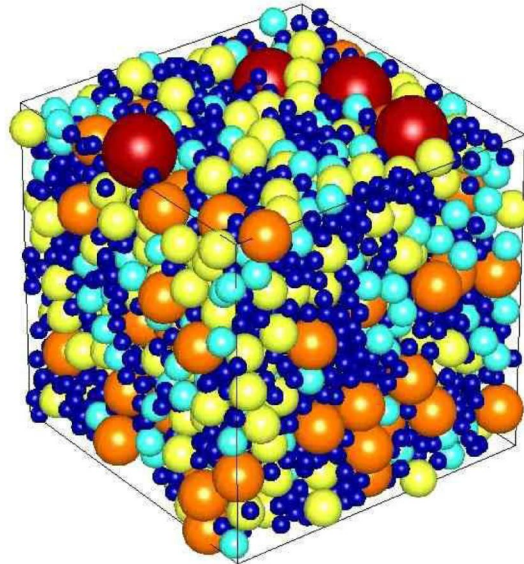


Figura 21. Visualização teórica do empacotamento de partículas.

FONTE: Fidjestol, Thorsteinsen, Svennevig (2012).

2.2.3 Utilização das fibras nos CUAR

As fibras normalmente utilizadas para confecção dos CUAR são fibras de aço reto, que apresentam pequena variação dimensional dependendo do fabricante, mas que em geral possuem de 0,2 a 0,3 mm de diâmetro nominal e comprimento de 12,7 a 13,0 mm.

No processo de fabricação destas fibras é aplicada uma fina camada de revestimento em bronze e por este motivo as fibras virgens possuem coloração dourada como indicado na Figura 22. Este revestimento desaparece durante o processo de mistura e já não é visível após a ruptura dos CUAR conforme a Figura 23. A função prevista dessas fibras dentro do CUAR exige que elas tenham um nível muito elevado de resistência mecânica, sendo a resistência mínima à tração especificada pelo fabricante de 2600 MPa.

Existem basicamente dois tipos de fibras utilizadas nos CUAR: as metálicas, as de polipropileno. As fibras metálicas visam impedir a quebra brusca do concreto, aumentando sua ductibilidade e dispensando, em alguns casos, a armadura de tração. Já as fibras de polipropileno são utilizadas para atenuar a fissuração causada pela retração plástica e no aumento das resistências dos concretos submetidos ao efeito direto do fogo, ao desgaste e ao impacto (SCOARES *et al.* (2005).



Figura 22. Fibras metálicas tipo Dramix®.

FONTE: Catálogo produtos Ganzhou Daye
Metallic Fiber Co. Ltd.



Figura 23. Fibras metálicas aparentes após
ruptura de uma viga de CUAR em escala real.

FONTE: Graybeal, 2006 - A.

Corvez e Mazzacane (2012) explicam que na especificação técnica para a construção do museu MUCEM na França, houve uma exigência de um tipo específico de CUAR comercializado pela Lafarge com o nome comercial de Ductal® AF, iniciais de *Anti Fire* (antifogo). Esta mistura utilizada para compor a estrutura da edificação contém fibra de polipropileno que possui a função de evitar o fenômeno de *spalling* a temperaturas superiores a 1000°C (LÉON, 2012).

Resplendino (2012) conduziu pesquisa sobre a utilização das fibras nos CUAR utilizando diferentes quantidades de fibras, vigas armadas ou não, protendidas e sem protensão. Estes experimentos buscavam o melhor entendimento dos efeitos combinados das fibras e das barras de aço nas vigas e também para definir as condições para a obtenção de uma ductilidade suficiente aos elementos estudados. Segundo ele, a investigação das fibras nos CUAR envolve as seguintes principais preocupações: estudo da incorporação das fibras na mistura, visando o melhor processo de orientação das fibras; otimização das dosagens a fim de controlar ou até limitar os efeitos da retração autógena nas primeiras idades; além da busca da melhor solução estrutural otimizada.

2.3 Os concretos de ultra - alta resistência no estado endurecido

2.3.1 Resistência mecânica

Os CUAR são materiais que oferecem combinação única de propriedades mecânicas aliadas à alta durabilidade e ainda ao ótimo acabamento e estética, proporcionados por serem autoadensáveis.

As suas propriedades são de interesse para as aplicações em Engenharia Civil, pois envolvem alta resistência à compressão axial e diametral, alta capacidade de absorção de energia, durabilidade para ciclos de gelo e degelo, proporcionam resistência à corrosão e ao fogo.

A alta resistência desenvolvida por estes concretos é da ordem de 150 a 200 MPa (comparado à faixa de 15 a 50 MPa dos concretos convencionais) e sua resistência à compressão diametral de 20 a 50 MPa (comparado à faixa de 3 a 7 dos concretos convencionais).

Sua energia de fratura pode chegar a 40.000 J/m² para a classe 200 MPa (em comparação a 100 a 150 J/m² para os concretos convencionais), dependendo do volume de fibras adicionado à mistura, onde a faixa ótima se situa entre 2 a 3% em relação ao volume de cimento (DUGAT, ROUX E BERNIER, 1996).

A Tabela 7 apresenta uma comparação das características mecânicas dos concretos convencionais (CC), de alta resistência (CAR) e os de ultra - alta resistência (CUAR).

TABELA 7. COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DIFERENTES CONCRETOS.

Parâmetro	CC	CAR	CUAR
Resistência axial (MPa)	20 – 50	60 – 140	150 – 800
Resistencia diametral (MPa)	4 – 8	6 – 14	15 – 140
Energia de fratura (J/m ²)	130	140	1000 – 40000
Tensão última estresse (10 ⁻⁶)	100 - 150	100 – 150	2000 - 8000

FONTE: Adaptado de Dugat, Roux e Bernier, 1996.

O tratamento térmico aplicado aos CUAR possibilita a elevação das características mecânicas do concreto em períodos curtos de tempo.

Yazıcı *et al.* (2009) realizaram estudos de diferentes regimes de cura em concretos de ultra - alta resistência. Os estudos demonstraram que a cura a vapor aumentou 14 a 26% sua resistência, enquanto que a utilização da autoclave melhorou os resultados em 21 a 35%.

Cheyrezy, Maret e Froin (1995) estudaram a atividade pozolânica no RPC, um representante dos CUAR, e perceberam que ela se amplifica com a aplicação da temperatura. Segundo os autores, entre 200°C e 250°C ocorre a formação de um cristal hidratado denominado xonotlite. Este cristal seria responsável pela elevação de resistência do concreto nas primeiras idades e sua formação ocorreria pela presença do pó de quartzo na mistura.

2.3.2 Fluência e retração nos CUAR

A fluência e a retração são propriedades discutidas e estudadas nos concretos convencionais e também nos concretos de ultra - alta resistência.

Para o concreto comum, o coeficiente de fluência pode atingir valores da ordem de três a quatro, enquanto que para os concretos de alta resistência este coeficiente é reduzido, da ordem de dois a menos de um (BEHLOUL, 1999).

Gowripalan e Gilbert (2000) relacionam o coeficiente de fluência ao tempo em que a estrutura sofrerá o primeiro carregamento, recomendando para possíveis cálculos os valores apresentados na Tabela 8.

TABELA 8. RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA COM A IDADE DE CARREGAMENTO

Primeiro carregamento da estrutura	Coeficiente de fluência Φ	
	Sem cura aquecida	Com cura de 48 horas a 90°C
4 dias	1,8	0,5
28 dias	1,2	0,3

FONTE: Gowripalan e Gilbert, 2000.

Nota-se que os valores apresentados nesta tabela são menores para os concretos que sofreram aplicação de tratamento térmico a 90°C por 48 horas, do que os coeficientes dos concretos que não passaram pelo tratamento térmico.

Segundo a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC/SETRA, 2002) a aplicação de algum tipo de tratamento térmico reduz significativamente o efeito da fluência e, nestes casos, um fator de deformação de 0,2 pode ser considerado para os cálculos das estruturas. Para concretos não submetidos a este tratamento, a mesma referência recomenda como diretriz básica de projeto o coeficiente de fluência de 0,8.

A Associação Japonesa de Engenharia Civil apresenta valores em conformidade com os expostos pelas demais referências e enfatiza a tendência de estabilização deste valor para o coeficiente de fluência, mesmo após um longo período de ensaio, superior a um ano, Figura 24 (ROKUGO, 2008).

Ensaio envolvendo o fenômeno físico da fluência foram realizados em laboratórios de pesquisa de materiais na França, na *Ecole Centrale de Nantes* e no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e nos Estados Unidos nos laboratórios da *Federal Highway Administration* (FHWA), em McLean, estado da Virginia (GRAYBEAL, 2006 – A). A Figura 25 apresenta uma viga rompida após ensaio de carregamento prolongado realizado no laboratório da FHWA.

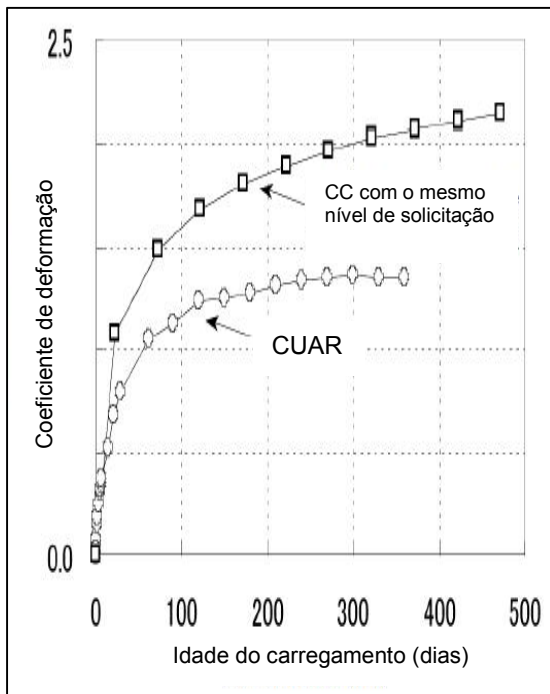


Figura 24. Coeficiente de fluência comparando um representante dos CUAR aos CC.

FONTE: ROKUGO, 2008.



Figura 25. Imagem da ruptura de uma viga de CUAR após prova de carga.

FONTE: GRAYBEAL, 2006 - A.

Com relação à retração por secagem, estudos (GOWRIPALAN E GILBERT, 2000; AFGC/SETRA, 2002) relatam não ocorrer este fenômeno nos concretos de ultra - alta resistência quando o tratamento térmico de pelo menos 90°C pelo tempo de 48 horas é aplicado.

A explicação comum nos estudos pesquisados é que, uma vez que a relação a/c é muito baixa nestes concretos, quando se aplica cura térmica, a retração acontece até ao final do tratamento, não havendo retração residual considerável após este período. A retração ocorrida durante este período é principalmente autógena.

Mesmo para os CUAR curados em temperatura ambiente, a grande maioria da retração endógena ocorre nos primeiros 28 dias após a moldagem e é da ordem de 300 a 400 mm/m (GOWRIPALAN E GILBERT, 2000).

Se nenhum valor laboratorial for conhecido para o material que será utilizado na construção a AFGC/SETRA (2002) recomenda o valor de referência de 550 mm/m. No entanto, esta associação recomenda que este valor seja usado apenas durante a fase de anteprojeto, sendo aconselhável a investigação do material que será empregado no projeto.

2.4 Durabilidade dos concretos de ultra - alta resistência

A seguir serão apresentados alguns parâmetros de durabilidade que refletem as características dos CUAR quando solicitados a diferentes tipos de agressões. Serão abordados os efeitos da exposição ao fogo, à ação do gelo e degelo, resistência ao atrito, abrasão e cavitação, os efeitos da reação álcali sílica, ações dos íons cloreto e dos ataques químicos, permeabilidade e absorção e a ação da carbonatação neste tipo de concreto.

2.4.1 Efeitos da exposição ao fogo nos CUAR

Quanto aos efeitos do fogo direto sobre os CUAR, Gowripalan e Gilbert (2000) afirmaram que misturas com resistência característica de projeto de 200 MPa, normalmente apresentaram *spalling* aos 500°C. Durante os primeiros estudos com este material não se chegou a resultados confiáveis sobre o comportamento dos CUAR expostos as altas temperaturas, proporcionadas por um incêndio, por exemplo. Para os mesmos autores a utilização dos CUAR em elementos estruturais deve considerar a resistência ao fogo, sendo esta uma importante observação a ser feita. Os autores também afirmavam ser importante considerar a inclusão de fibras sintéticas nas misturas.

Uma mistura contendo fibras de aço e também fibras sintéticas foi então desenvolvida pela Lafarge Inc. para solucionar problemas gerados pelas altas temperaturas neste tipo de material. O intuito desta nova mistura era proporcionar vazios controlados no interior do concreto que reduzem o acúmulo de pressão interna durante a exposição ao fogo.

Pimienta *et al.* (2012) reuniram informações sobre o tema e tabelaram através dos estudos da literatura os efeitos ocorridos pela ação do fogo em diferentes tipos de CUAR comercializados por diferentes fabricantes. Os resultados apresentados por eles podem ser visualizados na Tabela 9.

Os resultados apresentados contemplam a aplicação de carregamento em corpos de prova submetidos ao tratamento térmico e também aos que não foram submetidos.

Alguns dos resultados não apresentaram *spalling*, principalmente os produtos que levam a designação AF, abreviatura para anti fogo.

TABELA 9. TESTES EM DIFERENTES TIPOS DE CUAR SUBMETIDOS À ALTA TEMPERATURA.

Tipo de UHPFRC testados	Tratamento térmico	Aplicação de carregamento	Resultados
Ductal® - AF	Sim	Sem aplicação	Não apresentou Spalling
	Não		
Ductal® - FM *	Sim	Sem aplicação	Apresentou Spalling
Ductal® - FO **	Sim		
Ductal® - AF	Sim	Sem aplicação	Pequeno Spalling
	Não		
Ductal® - FO **	Sim	Aplicação em 4 pontos	Não apresentou Spalling
Ductal® - AF	Não		
BSI® - Fire	Sim	Sem aplicação	Não apresentou Spalling
	Não		
CERIB tipos I e II sem fibras de polipropileno	Não	Sem aplicação	Apresentou Spalling severo
CERIB tipos I e II com fibras de polipropileno	Não	Sem aplicação	Não apresentou Spalling

Fonte: Traduzido e adaptado de Pimienta *et al.* (2012).

2.4.2 Ação do gelo e degelo em estruturas de CUAR

Os resultados e procedimentos aqui apresentados foram conduzidos por Graybeal (2006) nos laboratórios da FHWA. Para medir a resistência de concretos de ultra - alta resistência à ação causada pelo congelamento e posterior descongelamento, o autor, utilizou a metodologia americana ASTM C666/08. Esta

norma simula um ambiente agressivo ao concreto e ajuda a determinar se existe uma microestrutura que resista à expansão térmica e aos efeitos oriundos da pressão interna, causada pelo congelamento de água no seu interior. Foi adotado o limite inferior de -18°C e superior de $4,4^{\circ}\text{C}$ para a realização do ensaio. O equipamento automatizado utilizado neste estudo permitiu que o autor observasse cinco ciclos de congelamento e descongelamento completos por dia.

Neste método de teste, cada prisma fica dentro de um recipiente com água, que é um pouco maior do que o prisma. Os recipientes são colocados numa câmara fria, que congela os prismas e a camada de água que os circunda utilizando ar frio. Logo após o congelamento, o equipamento descongela os prismas com água.

O teste de congelamento / descongelamento começou 6 semanas após a moldagem e, após 2 dias os prismas foram submersos em água a $4,4^{\circ}\text{C}$, para prepará-los para a medição inicial.

No total o autor realizou 690 ciclos de congelamento e descongelamento ao longo de nove meses. Durante as interrupções nos testes, os prismas foram armazenados em um estado congelado em uma câmara frigorífica.

Periodicamente, o ciclo de congelamento /descongelamento foi interrompido, e os prismas foram medidos. Os dados coletados incluíam a determinação da massa e da medida transversal de cada prisma.

Os resultados apontaram que na superfície dos prismas apareciam pequenos pontos de corrosão em formato de pite, fruto da oxidação das fibras metálicas incorporadas ao concreto. À medida que os ciclos avançaram este efeito aumentou. O pesquisador notou também que este aparecimento era maior nos prismas não tratados por cura térmica do que nos tratados.

Os resultados confirmam que os CUAR são muito resistentes a degradação causada pela ação dos ciclos gelo/degelo, não apresentando perda de massa mesmo após 125 ciclos completos do ensaio.

Tanto os corpos de prova submetidos ao regime de cura quanto os que não foram submetidos exibiram aumento dimensional ao longo do teste, em média 0,2 por cento da medida inicial, em 125 ciclos.

Num teste de congelamento/descongelamento normal, o prisma perde massa à medida que se deteriora. O autor relata que estes prismas mostraram degradação quase nula mesmo após os 690 ciclos.

Esta variação dimensional foi absorvida pelas fibras e não foi notado o aparecimento de microfissuras durante o ensaio. O pesquisador notou ainda que, em vez de ocorrer uma degradação durante os ciclos que se sucediam, os corpos de prova ficavam mais antigos, e isto possibilitou um aumento de 15 por cento na resistência do concreto curado por imersão, ao longo dos 250 dias de ensaio.

2.4.3 Resistência ao atrito – abrasão e cavitação

A resistência à abrasão é um parâmetro importante de estudo em concretos expostos ao contato direto com outros materiais em condições de fricção (GRAYBEAL e HARTMANN, 2003). É um termo utilizado para referenciar o atrito seco entre partículas, como o contato direto gerado pelos pneus de veículos em pavimentos e pisos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O efeito da abrasão no concreto é medida em um ensaio onde os corpos de prova são submetidos ao desgaste gerado pelo atrito de cerdas de aço em um tempo pré-determinado a uma superfície de um corpo de prova, normalmente em ciclos de dois minutos. Após a execução dos ciclos é medida a perda de massa do concreto. A Figura 26 apresenta uma imagem do procedimento sendo executado em corpos de prova de um concreto de ultra - alta resistência que sofreu tratamento térmico, nos laboratórios da FWHA e seguindo a referência normativa que regulamenta este procedimento nos Estados Unidos, a ASTM C944/12. Na imagem a esquerda apresenta o ensaio em realização. Na imagem a direita é apresentado dois corpos de prova, onde o mais claro, de concreto convencional apresentou desgaste maior do que o CUAR em estudo.

Os resultados mostraram que um tratamento térmico a vapor surte um impacto positivo bastante significativo na resistência à abrasão do CUAR. Em geral, os cilindros não tratados com este tipo específico de cura perderam mais concreto por abrasão do que os corpos de prova tratados. Quantitativamente, os corpos de prova curados com vapor apresentaram perda entre 0,1 e 0,3 gramas de concreto por abrasão, enquanto que os cilindros não tratados perderam entre 1 e 3 gramas de material por abrasão.



Figura 26. Realização do ensaio e resultados comparativos de abrasão.

Fonte: Graybeal (2006).

No entanto, estes resultados são baseados na ASTM C944/12 que estipula uma carga específica para realização do ensaio e para realização destes estudos, os pesquisadores dobraram a carga recomendada pela norma. Portanto, a perda de massa dos CUAR teria sido significativamente menor com a diminuição da força abrasiva na superfície dos cilindros de concreto.

Além disso, os pesquisadores concluíram que os CUAR exibiram resistência à abrasão à medida que o ensaio se prolongou, comprovando que o material é realmente muito resistente a este tipo de solicitação.

A Figura 27 apresenta uma ilustração do resultado de um ensaio comparativo da resistência à abrasão de três corpos de prova, um de argamassa de alta resistência, outro de rocha, e um corpo de prova de concreto de ultra - alta resistência.

Da esquerda para direita são mostradas uma amostra de argamassa de alta resistência e uma de granito (ambas com resistência característica de 100 MPa) e mais a direita uma de concreto de ultra - alta resistência 150 MPa. É perceptível o menor desgaste sofrido pelo corpo de prova de CUAR em comparação com os outros dois materiais.

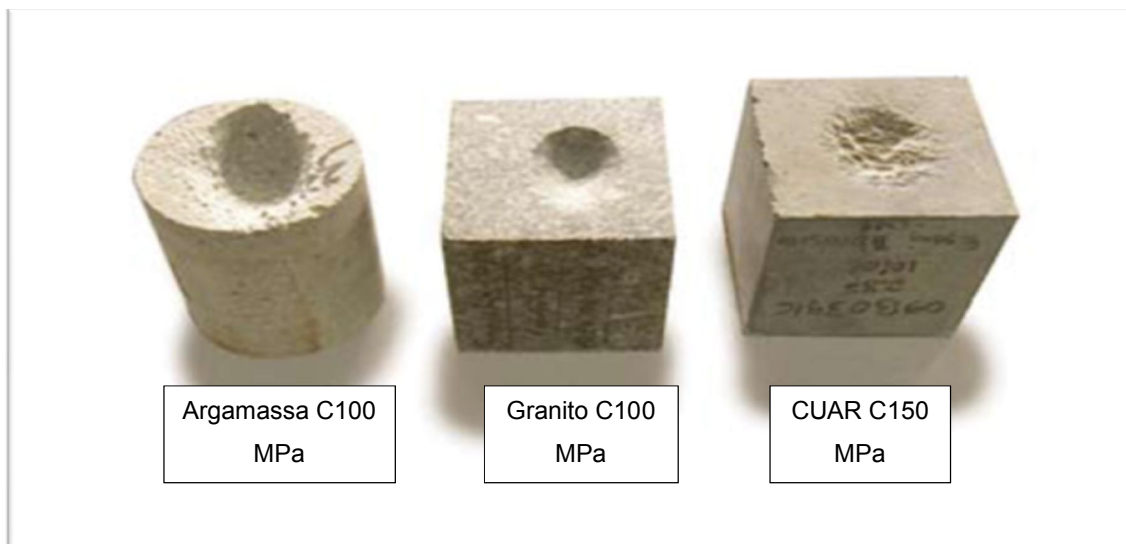


Figura 27. Resultado comparativo do ensaio de abrasão em um CUAR e outros dois materiais.

FONTE: Léon (2011).

2.4.4 Reação álcali sílica

Graybeal & Hartmann (2006) realizaram estudos de reação álcali sílica em corpos de prova de CUAR submetidos a regimes de cura a vapor a alta temperatura e também a temperatura ambiente, utilizando metodologia norte americana descrita pela ASTM C1260/07.

Neste experimento foi medida a expansão dos corpos de prova aos 14 e aos 28 dias, modificando-se a especificação da ASTM, pois se verificou a necessidade de dar mais tempo para a iniciação da reação nestes concretos.

Os resultados demonstraram que para todos os ensaios, em ambas as idades verificadas, a expansão gerada pela reação álcali sílica induzida foi considerada inofensiva, abaixo do limite de 0,10% especificado pela referência normativa. Todos os resultados apresentados indicaram não haver necessidade de preocupação com os problemas relacionados com esta reação.

No entanto os autores alertam que o teste requer a imersão dos corpos de prova em uma solução de água e hidróxido de sódio de temperatura elevada. Este tratamento pode ter resultado em uma cura adicional do CUAR e, por isso, pode ter ocorrido uma subestimação do resultado da reação.

Möser & Pfeifer (2008) realizando ensaios de microestrutura em um microscópio eletrônico de varredura, verificaram que devido à dispersão insuficiente da sílica ativa foram detectados pontos de concentração deste material no interior dos corpos de prova de CUAR. Estas concentrações apresentam a reação álcali sílica, conforme pode ser visto na Figura 28.

Segundo os autores a reação pode acontecer independentemente das condições de armazenamento dos corpos de prova, dado o tratamento térmico empregado nos CUAR, baseado na elevação da temperatura, condição para a propagação da reação. Embora o cimento tenha em geral um baixo conteúdo de álcalis na sua composição, para os pesquisadores, a reação não pode ser evitada.

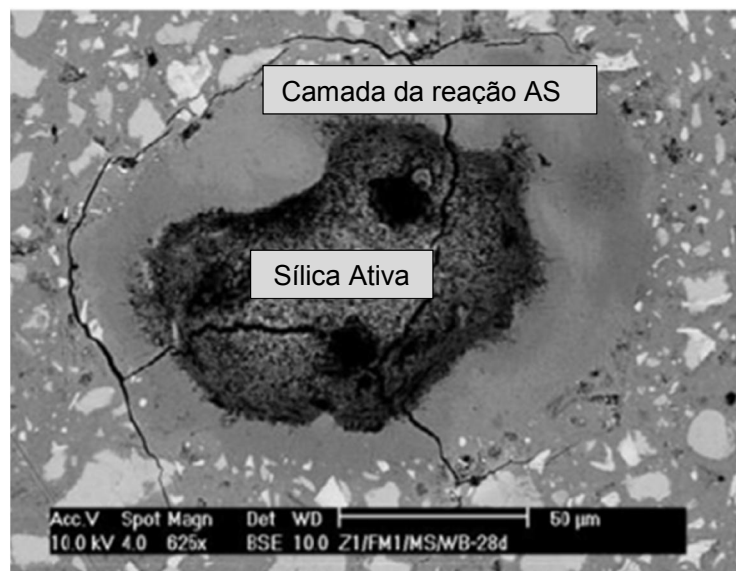


Figura 28. Acúmulo de sílica e fissuras causadas pela reação álcali sílica.

FONTE: Möser e Pfeifer (2008).

2.4.5 Ações dos íons cloretos

O desenvolvimento de projetos de infraestrutura levando em sua composição os concretos de ultra - alta resistência pode ser uma alternativa para o aumento de durabilidade das estruturas de concreto que sofrem ataque direto dos íons cloreto como estruturas marítimas portuárias, por exemplo.

Para que sua utilização se torne viável é necessário estudar o comportamento dos CUAR quando expostos a este tipo de ataque externo e comprovar sua maior eficiência frente aos concretos convencionais.

Foi este o objetivo de um estudo conduzido por Teichmann e Schmidt (2004). Estes pesquisadores compararam um concreto convencional classe C35, um concreto de alta resistência C100 e um CUAR C200, quanto ao ataque de íons cloreto.

Neste estudo pequenas placas de concreto de 3,5 cm de espessura foram moldadas e instaladas entre duas câmaras, uma contendo água e outra contendo uma solução de 10% de NaCl. Procedeu-se o ensaio provocando o efeito de migração e aplicando voltagem de 40V por um período de 6 horas no conjunto.

Os resultados demonstraram 2,3 cm de penetração para o CC, 0,7 cm para o HPC e menos de 0,1 cm para o CUAR.

Este resultado demonstrou alta resistência do CUAR ao ataque dos íons cloreto, dado principalmente a sua baixa permeabilidade.

2.4.6 Efeitos da carbonatação

Resultados de estudos envolvendo o fenômeno da carbonatação também apontam que os CUAR são melhores na manutenção e durabilidade de edificações de concreto, quando comparados a estruturas que utilizam os concretos convencionais.

Ensaio de carbonatação acelerada com mistura controlada de gás ($50 \pm 5\%$ de CO_2 e $50 \pm 5\%$ de ar, temperatura constante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa) foram realizados pelo período de quatro meses em corpos de prova por Rougeau e Borys (2004). Neste estudo os pesquisadores verificaram, com a fenolftaleína como indicador de acidez ou basicidade, profundidades de carbonatação não superiores a 0,5 mm.

Matsubara *et al.* (2008) utilizando a normatização JIS A 1153 (exposição de 5% de CO_2 de maneira acelerada) observaram ausência de carbonatação após seis meses de ensaio em corpos de prova de CUAR. Piérard, Doms & Cauberg (2012) também realizaram ensaios de carbonatação acelerada em prismas de 100x100 mm² curados a 50°C por 14 dias, mantidos em condições de temperatura e umidade relativa laboratorial.

Os resultados, após um ano de exposição a 1% de CO_2 atmosférico, quanto à profundidade da frente de carbonatação foi de 1,5 a 2 mm, aplicando-se

fenolftaleína em um corpo de prova recém-fraturado. O coeficiente de carbonatação pode ser calculado para estimar a profundidade de carbonatação em condições reais de uso, utilizando modelos matemáticos apropriados como o modelo DuraCrete^{®8}, utilizado neste estudo. Os coeficientes calculados foram de $k_c = 1,5$ mm/dia no concreto convencional, nos HPC $k_c = 0,6$ mm/dia e nos CUAR $k_c = 0,1$ mm/dia para ensaios realizados nas mesmas condições.

Com os coeficientes calculados foi possível estimar a profundidade de carbonatação para uma estrutura com 100 anos de idade, por exemplo. Os valores obtidos foram de 65 mm para o CC, 25 mm para os HPC e menos de 5 mm para os CUAR em estudo.

Scheydt e Müller (2012) estudaram a carbonatação que ocorre naturalmente no ambiente. Moldando prismas de 40x40x160 mm e os estocando a 20°C e 65% U.R. em local controlado foram observados valores máximos da frente de carbonatação de 180 µm de espessura. Neste estudo uma informação interessante foi descoberta. Verificou-se que no entorno das fibras metálicas que estão mais próximas à superfície do concreto, houve um aumento do ingresso de CO₂, o que acelerou o processo de carbonatação nestas áreas.

Esta afirmativa poderia conduzir a dúvidas quanto à estabilidade das estruturas em CUAR, visto que em alguns casos de aplicação real as microfibras metálicas fazem o papel da armadura passiva na estrutura. As microfibras mais próximas à superfície do concreto poderiam perder a proteção da película passivadora e por consequência iniciar um processo de corrosão das fibras nestes locais.

A mesma observação foi feita por Piérard, Doods & Cauberg (2012), relatando que, no mínimo, ocorreriam problemas futuros relacionados à estética nas superfícies dos elementos confeccionados com CUAR e que contenham fibras metálicas em sua constituição. Os mesmos autores afirmam ainda que a resistência a carbonatação dos CUAR proporcionam uma longa proteção contra a carbonatação e assim, são benéficos para as armaduras imersas no concreto.

⁸ O projeto DuraCrete resultou em diretrizes gerais para o projeto e dimensionamento de estruturas de concreto. Foi reunida nesta pesquisa a experiência de doze empresas e institutos, de seis países europeus. O resultado foi um relatório denominado *Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures* (THE EUROPEAN UNION – BRITE EURAM III).

3.0 UTILIZAÇÃO DE NANO MATERIAIS EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS

Até meados da década passada, os estudos visando à otimização nos concretos e argamassas eram, em grande parte, destinados a obter alto desempenho mecânico, por meio da inclusão de materiais na escala micro, visando, principalmente, possibilitar a substituição de cimento nas misturas. Recentemente, a nanotecnologia também começou a ser aplicada para esta finalidade, e atraiu considerável interesse científico, devido ao potencial de uso de novos compostos químicos, ou até dos mesmos materiais anteriormente utilizados, no entanto sob a forma de partículas em escala extremamente reduzida.

Esta escala é extremamente importante, pois as propriedades dos materiais nanométricos são determinadas pelo seu tamanho e pela sua morfologia, originando uma fascinante sintonia em suas propriedades físico-químicas (SOUZA FILHO E FAGAN, 2007). Pesquisadores (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2012) defendem que quando partículas ultra finas são incorporadas a concretos ou argamassas que utilizam cimento Portland em sua composição, materiais com diferentes características, quando comparados aos convencionais, podem ser obtidos.

O desempenho destes materiais à base de cimento é fortemente dependente da formação de compostos químicos resistentes, como as partículas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e também da qualidade da zona interfacial de transição entre a pasta e as partículas dos agregados. As inovações envolvendo a nanotecnologia e mais especificamente as nano modificações de materiais à base de cimento Portland, prometem amplificação nestes dois aspectos dos materiais cimentícios. Esta é a função da nano modificação, manipular na escala nano (em geral inferior a 100 nm) compósitos de cimento, visando possibilitar propriedades melhoradas. Entre os tipos de nano partículas que têm sido estudadas em concretos e argamassas, são exemplos, os nanotubos de carbono (NTC), o nano CaCO_3 (carbonato de cálcio), o nano SiO_2 (dióxido de silício) e o nano TiO_2 (dióxido de titânio). É importante salientar que a nanociência 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 engenharias) (GLEIZE, 2010). A seguir estes materiais serão abordados de maneira resumida.

3.1 Nanotubos de carbono

O carbono é um dos elementos mais abundantes existentes na natureza e pode ser encontrado em diversas formas alotrópicas estáveis, que variam do diamante, o carbono amorfo, grafite, nanotubos de carbono, fulereno e o grafeno (MATOS, 2011).

Os nanotubos de carbono, pequenos cilindros ocos formados por átomos de carbono, foram descobertos durante a década de 90 pelo pesquisador japonês Sumio Iijima (IIJIMA, 1991). Possuem escala muito reduzida e medem, aproximadamente, três nanômetros de diâmetro por 1000 nanômetros de comprimento (MARCONDES, 2012). Essas moléculas são as mais rígidas, flexíveis e resistentes a tensões que já foram produzidas. Além disso, podem ser de maneira simultânea, bons condutores de calor e de eletricidade (LOBO *et al.*, 2005).

A Figura 29 apresenta duas imagens envolvendo estes materiais. A primeira (esquerda) foi obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura de estruturas reais de nanotubos de carbono, na Universidade de Viena, Áustria e possui ampliação de 25.000 vezes. A segunda apresenta de maneira esquemática a forma de arranjo de estruturas formadas através de moléculas de grafeno. O tipo de arranjo define também o número de camadas do material (MATOS, 2011).

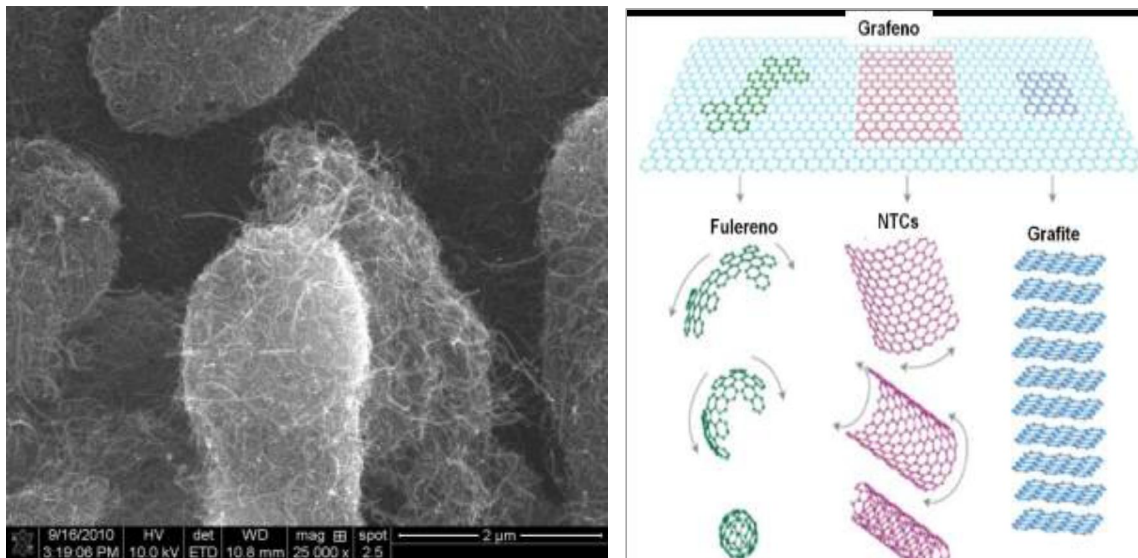


Figura 29. Nanotubos de carbono (esq.). Arranjo esquemático da molécula de grafeno (dir.).

FONTE: Universidade de Viena, 2013 (esq.). MATOS, 2011 (dir.).

Os nanotubos de carbono, quanto ao número de camadas, podem ser classificados em duas formas: nanotubos multicamadas (*multi-walled carbon nanotubes - MWNTs*) e camada simples (*single-walled carbon nanotubes - SWNTs*). Um tipo especial de MWNT é o nanotubo de parede dupla (*double-walled carbon nanotubes - DWNTs*). Uma ou outra forma de nanotubos apresenta-se mais apropriada dependendo da aplicação desejada (SOUZA FILHO e FAGAN, 2007).

De acordo com Batiston *et al.* (2010) existem dois grandes desafios para introdução de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias, são eles: homogeneizar a distribuição dos nanotubos de carbono na matriz cimentícia, e adequar a interação com os compostos resultantes da hidratação do cimento. Esta adequação pode ser entendida como a metodologia empregada para dispersar o material no concreto.

Barreto e Bellettini (2012) explicam que existem duas alternativas diferentes utilizadas para dispersar os nanotubos de carbono, os métodos físicos e os químicos. O uso de métodos mecânicos ou físicos consiste na utilização de equipamentos que emitem ondas ultrassônicas, é a chamada ultrassonificação, ou agitação com alta taxa de cisalhamento. Este método permite a separação dos nanotubos uns dos outros, dispersando – os. O método químico utiliza reagentes para possibilitar a dispersão dos nanotubos.

A capacidade de nanotubos de carbono para controlar fissuras em nano escala, seja esta induzida por flexão ou pela retração autógena, também chama atenção. Konsta, Metaxa e Shah (2010) demonstraram que os nanotubos de carbono altamente dispersos podem melhorar significativamente a resistência à flexão de pastas de cimento, com taxas tão baixas quanto 0,025%.

Além desta propriedade mecânica superior, os nanotubos de carbono podem ser altamente condutores de energia e, quando submetidos a uma solicitação como a tensão/deformação, podem alterar suas propriedades elétricas, de maneira a expressar resposta a estímulos desta natureza.

Essa propriedade pode se traduzir, no futuro, a aplicações como monitoramento da “saúde” das estruturas de concreto, avaliação de danos e monitoramento de tráfego possível em uma obra de arte rodoviária, por exemplo.

A Tabela 10 apresenta um apanhado de resultados envolvendo a utilização dos nanotubos de carbono em argamassas e concretos de cimento Portland.

TABELA 10. INCLUSÃO DE NTC NAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.

Autores	Teor NTC (%)	Material a/c	Resistência à compressão	Resistência à flexão
Kowald, (2004)	Até 0,50	CUAR a/c < 0,39	+12%	-
Li, Wang e Zhao, (2005)	0,50	Argamassa a/c = 0,45	+19%	+25%
Batiston, (2007)	Até 0,50	Argamassa a/c = 0,45	+22%	+5%
Cwirzen <i>et al</i> , (2008)	Até 0,15	Argamassa a/c = 0,25 – 0,40	+50%	+10%
Musso <i>et al</i> (2009)	0,50	Argamassa a/c = 0,40	+10% +17% -85%	+34% +9% -60%
Melo (2009)	Até 0,80	Argamassa a/c = 0,48	+22%	+35%
Konsta-gdoutos; Metaxa; Shah (2010)	Até 0,08	Pasta de cimento a/c = 0,5	-	+25%
Marcondes (2012)	0,03	Concreto a/c = 0,55	36%	19% (tração)

FONTE: Adaptado de Gleize (2010).

NOTA: A adaptação consistiu na incorporação dos resultados de Marcondes, 2012.

Apesar dos resultados positivos apontados e embora seja utilizado por diversas indústrias, Marcondes (2012) relata que uma das barreiras encontradas para o uso dos NTC em cimentos e concretos em larga escala é seu elevado custo e baixa oferta do produto.

A possibilidade de síntese dos NTC durante a fabricação do clínquer (cimento) promete baratear o processo de fabricação do produto (MARCONDES, 2012).

3.2 Nano carbonato de cálcio

O carbonato de cálcio é uma substância química de fórmula CaCO_3 . É o principal componente de rochas calcárias e, de acordo com o tamanho das partículas, era considerado inerte, participando das mistura apenas com o efeito de preenchimento dos vazios. O fíler calcário com diâmetro médio próximo ao do cimento, já era conhecido como reagente (DAL MOLIN, 2010), no entanto, pesquisas recentes descobriram que quando introduzidos como nano partículas nas misturas em concretos e argamassas, pode acelerar ainda mais a taxa de hidratação dos compostos cimentícios. Para viabilizar a utilização deste pó finamente moído de nano CaCO_3 , o material precisa ser disperso utilizando equipamentos que emitam ultrassom pelo processo de sonificação. O efeito do nano CaCO_3 dispersos prevê atuação sobre a taxa de hidratação dos compostos e ganho de resistência à compressão (SURENDRA *et al.*, 2012).

Surendra *et al.* (2012) estudaram este tipo de adição a argamassas de cimento Portland, dispersando nano CaCO_3 durante 30 minutos em uma solução aquosa na concentração de 15% do material avaliado, com uma adição de 0,06% de aditivo superplastificante à base de policarboxilato, em peso, de água. Foram comparadas argamassas confeccionadas com o cimento Portland puro, sem adição incorporada, contra argamassas de cimento que continham adição de cinzas volantes. As concentrações que não foram dispersas, receberam apenas uma agitação realizada em um misturador simples, por 3 minutos. Os nano CaCO_3 utilizados no estudo tinham um gama de partículas de tamanho entre 15 a 40 nm.

Foi monitorada a taxa de hidratação das argamassas com cimento puro e teor de adição de 5,0% de nano CaCO_3 , em relação à massa do cimento. Ficou comprovado que, para ambas as amostras que continham uma adição de nano CaCO_3 , houve aceleração da velocidade de hidratação dos compostos. No entanto, o efeito foi muito mais pronunciado para a amostra anteriormente dispersas, além do pico de hidratação ter sido muito mais elevado e ter ocorrido mais cedo. Em ambas as amostras, na misturada e também para a amostra dispersa, a adição de nano CaCO_3 ajudou a acelerar as reações químicas. O ganho de resistência à compressão para 1, 3 e 7 dias, para corpos de prova cúbicos de 50 milímetros de aresta foi de 30% nas amostras que continham a adição de 5% nano CaCO_3 .

3.3 Nano dióxido de silício

O composto químico dióxido de silício, também conhecido como sílica, é conhecido pela fórmula química representada pela sigla SiO_2 . Em seu estado natural pode ser encontrado em diversas possui 17 formas cristalinas distintas, entre elas o quartzo, o topázio e a ametista. A sílica é o principal componente da areia e a principal matéria prima para o vidro. Também é usado na fabricação de cimento Portland. É um dos óxidos mais abundantes na crosta terrestre.

A sílica fundida é produzida em fornos de arco, de plasma ou outros tipos. Pode ter pureza de até 99,9% de SiO_2 e é usada principalmente na indústria eletro eletrônica. A sílica fundida de alta pureza pode por si ser usada para vidros de alta resistência térmica e mecânica empregados em naves espaciais.

Ramezianpour, *et al.* (2012) estudaram a influência do nano dióxido de silício quando adicionado a argamassas, e compararam com a adição de sílica ativa convencional. Os resultados demonstraram que, utilizando relação água/cimento constante em todos os ensaios, a utilização da nano sílica amplificou propriedades reológicas como a viscosidade, que aumentou consideravelmente.

A inclusão de nano sílica, e mesmo da sílica ativa, visa possibilitar uma integração entre as propriedades reológicas e mecânicas das argamassas, possibilitando um melhor desempenho mecânico, mas invariavelmente mantendo a fluidez adequada das argamassas. Este efeito se torna ainda mais importante nas argamassas com alta fluidez. Os resultados mostram que a adição deste material reduziu a fluidez do concreto, prejudicando tal propriedade. Este efeito foi considerado negativo pelos autores e novos estudos devem avaliar esta característica do material.

A resistência à compressão das amostras de argamassa contendo partículas de nano SiO_2 apresentou aumento quando comparadas as argamassas contendo o mesmo teor de adição de SA convencional, especialmente nas primeiras idades.

A conclusão dos pesquisadores foi que, ao utilizar a nano sílica como um aditivo, esta pôde melhorar a microestrutura do material, possibilitando a redução da permeabilidade à água, através do efeito de preenchimento dos poros, dada pela atividade pozolânica superior. Por este motivo, eles concluíram ser eficaz adicionar estas partículas a misturas, visando torna-la um material de alto desempenho.

3.4 Nano dióxido de titânio

A fotocatalise é um termo mencionado desde a década de 30. É geralmente interpretado como a aceleração de uma foto reação por ação de um catalisador. O principal exemplo de fotocatalisador é o dióxido de titânio (TiO_2), cujas propriedades têm sido intensamente investigadas na última década nas mais diferentes aplicações (FAUSTO, 2012). Sua ativação pode dar-se pela radiação UV.

Utilizando suas propriedades, grande variedade de produtos diferenciados já foi desenvolvida, como óculos, espelhos, vidros e revestimentos cerâmicos, todos eles promovendo a fotocatalise. Estas aplicações são revestidas pelo TiO_2 , com uma espessura de apenas alguns nanômetros. Cada vez mais materiais de construção com propriedades fotocatalíticas estão em desenvolvimento. A modificação de materiais de construção como telhas e tintas já é usual em determinados países. Outras pesquisas, como a aplicação deste material ao concreto, leva a algumas novas modificações nas suas propriedades e estão em desenvolvimento.

O efeito fotocatalítico do TiO_2 no concreto foi descoberto há 40 anos pelo pesquisador Fujishima, no Japão, Esta descoberta resultou em um aumento das atividades de pesquisa em nanotecnologia aplicada aos materiais de construção na Ásia, especialmente no Japão desde então (AMRHEIN e STEPHAN, 2012). A Figura 30 apresenta o mecanismo de reação do dióxido de titânio quando submetido à radiação ultravioleta.

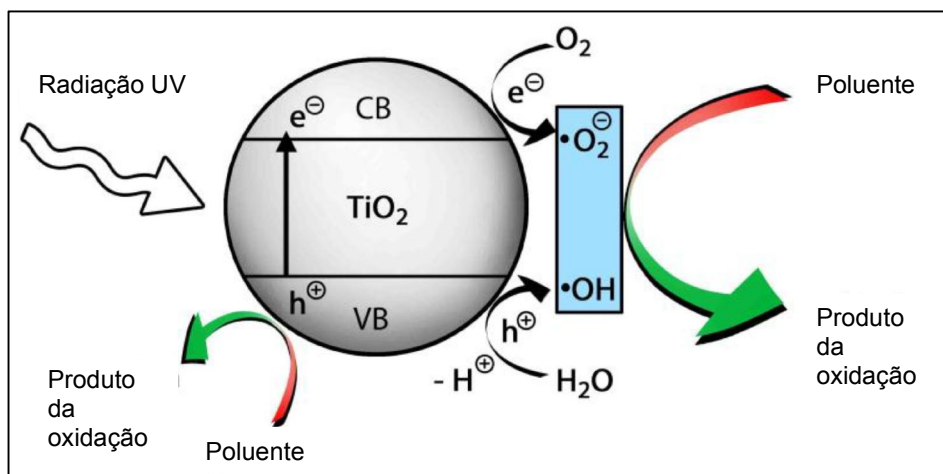


Figura 30. Esquema de funcionamento de uma superfície contendo nano TiO_2 .

FONTE: Fausto (2012).

A Figura 31 apresenta o que acontece com uma superfície que possui um tratamento com o dióxido de titânio. O efeito observado é o de uma superfície hidrorrepelente.

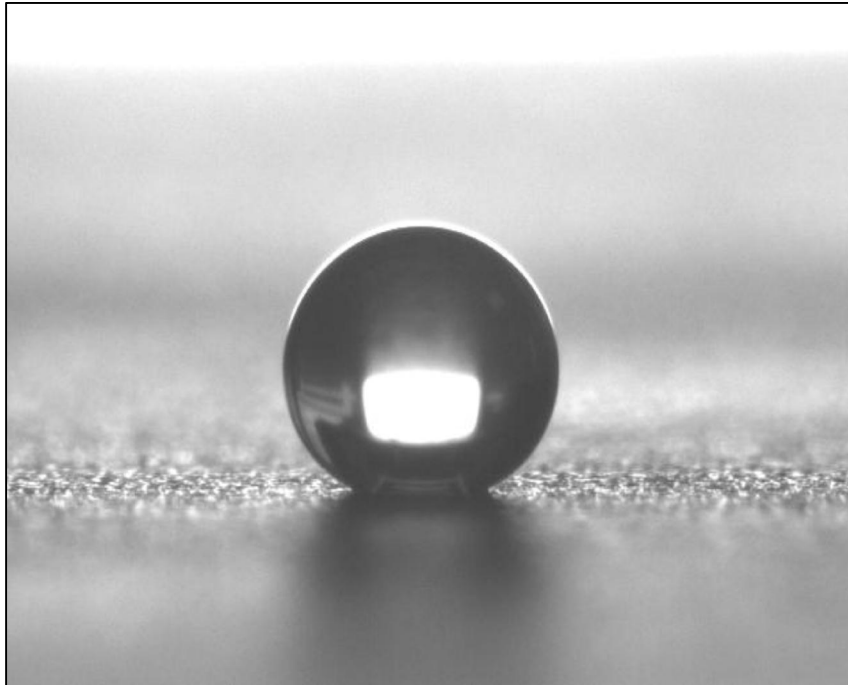


Figura 31. Gotícula de água depositada sobre uma superfície onde foi aplicado o nano TiO_2 .
FONTE: Chen e Horgnies, 2012.

A diferença é o que acontece com a superfície quando ela é exposta a radiação ultravioleta. É justamente o que a Figura 32 apresenta. Na experiência conduzida por Chen e Horgnies (2012), uma placa de concreto submetida à ação superficial de diversos materiais conhecidos pelo seu poder de manchar as superfícies onde são aplicados ou derramados e que continha nano TiO_2 , foi submetida à radiação ultravioleta.

Na imagem (a) podem ser vistos três manchas de cinco tipos diferentes de produtos causadores de manchas. De cima para baixo são apresentadas manchas de café, vinho tinto, suco de limão, pigmento de coloração azulada a base de óleo e óleo de máquina queimado. Após a exposição da superfície por dez dias ao sol, todos os materiais em estudo foram eliminados da placa, (figura a direita), não deixando vestígios visíveis a olho nu. A linha que ainda continua a aparecer na placa

após este tempo não estava sob análise, servindo na experiência apenas para separar os materiais naturais dos industrializados.

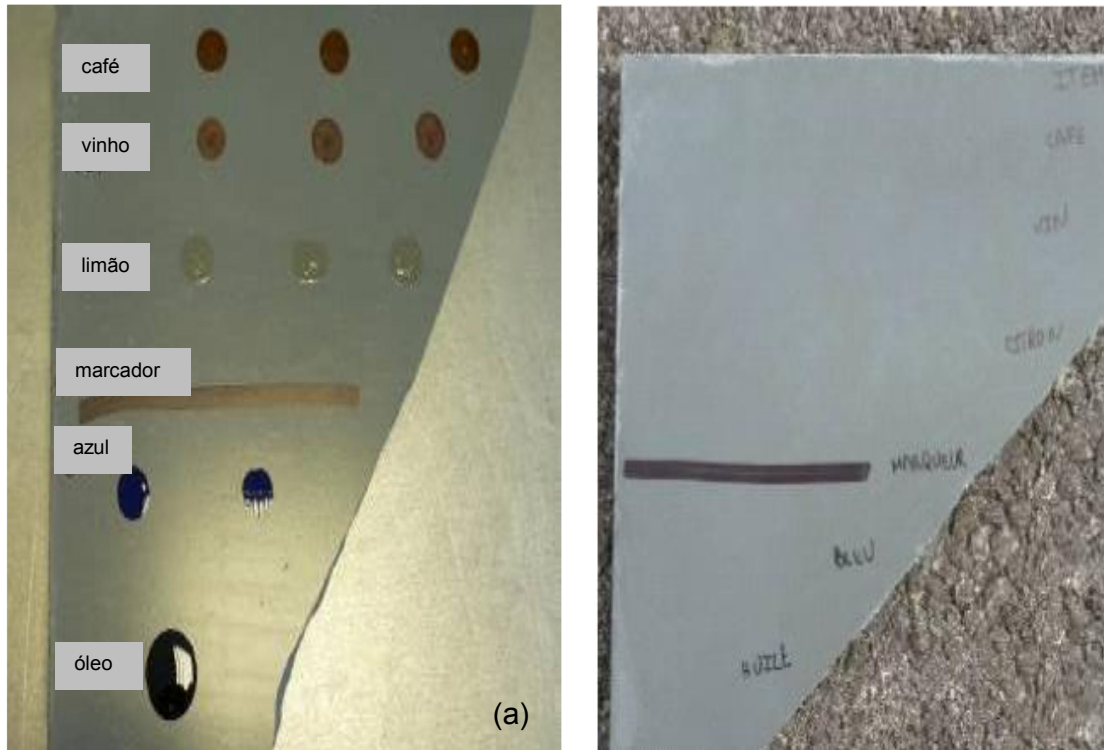


Figura 32. Experiência envolvendo o nano TiO_2 .

FONTE: Chen e Horgnies, 2012.

A experiência comprovou que, através de fotocatalise, partículas de TiO_2 capacitam o concreto, aumentando sua compatibilidade ambiental, visto que a reação impediu que bactérias ficassem aderidas nas superfícies estudadas.

Para Horgnies (2012), a deposição de manchas, as micro partículas e os micro-organismos depositados na superfície dos concretos de ultra - alta resistência (CUAR), mesmo que não comprometam sua integridade bom em um primeiro momento, visto a sua resistência à sua resistência à degradação superior, acarreta na degradação prematura da estética de superfície.

Estes fenômenos podem ter consequências particularmente prejudiciais para aplicações de arquitetura, como fachadas diferenciadas, onde a estética tem um grande impacto sobre a percepção das pessoas sobre a estrutura.

Para assegurar à sensação de limpeza de maneira duradoura a superfície, é desejável ter uma auto limpeza da superfície, isto é, uma superfície que se mantém limpa sem a necessidade da intervenção humana.

Um exemplo da aplicação real desta tecnologia, já pode ser visualizada em uma edificação de grande porte. Partículas de TiO_2 foram adicionadas ao concreto utilizado para a construção da *Church Jubilee*, em Roma, Itália.

O intuito da incorporação deste material ao concreto branco utilizado na construção foi manter a aparência original do edifício indefinidamente, mesmo que este esteja inserido no coração de um grande centro urbano europeu. A Figura 33 apresenta uma imagem externa e uma do interior da edificação.



Figura 33. Vista externa e interna da Igreja Dives in Misericordia – Itália.

FONTE: Fogliarini, 2013.

Mais recentemente, verificou-se que, quando introduzido como as nanopartículas de TiO_2 , pode ajudar a acelerar a taxa de hidratação e melhorar a resistência à compressão através de efeitos fíler.

Em um estudo de Jayapalyan *et al.* (2012 *apud* SURENDRA, SHIHO, PENGKUN e CORR, 2012), a taxa de hidratação de um CUAR contendo nano TiO_2 foi mais rápida do que a hidratação com micro TiO_2 .

4.0 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, através da explanação sobre o planejamento do experimento, das variáveis em estudo e dos itens fixados. Serão abordados procedimentos de execução dos ensaios, seleção e caracterização dos materiais utilizados para a confecção dos concretos, além da descrição dos procedimentos de produção e preparo dos corpos de prova.

4.1 Planejamento do experimento

O programa experimental foi dividido em duas partes distintas e complementares. A primeira consistiu na elaboração do concreto de ultra - alta resistência de referência. Esta etapa foi chamada de dosagem do concreto e a metodologia específica, bem como os resultados atingidos, será apresentada no quinto capítulo, referente à dosagem do concreto. Dois pontos principais nortearam a primeira fase dos estudos. Além de desenvolver resistência no estado endurecido, um dos maiores desafios para elaboração dos CUAR é atingir a trabalhabilidade adequada no estado fresco. Estes dois requisitos podem ser considerados os mais importantes para o sucesso da dosagem.

A segunda parte da pesquisa consistiu na incorporação dos nanotubos de carbono ao traço estipulado na primeira etapa. Os resultados desta adição serão apresentados no sexto capítulo deste trabalho. O experimento foi planejado buscando analisar a influência de três teores de adição de nanotubos de carbono, com relação à massa de cimento, ao concreto de referência.

Os teores de adição foram estipulados com base no referencial teórico sobre o tema, mas também através de adições empíricas do material ao concreto, onde se procedeu pré - testes com a mistura. Percebeu-se que grandes adições, acima de 0,30% de NTC em relação à massa de cimento, não seriam adequadas ao concreto estudado, devido ao aumento na demanda de água. Com base nestas premissas, mas não perdendo o foco no objetivo principal do trabalho, foram estabelecidos

ensaios para avaliar a utilização dos NTC nos CUAR. A Figura 34 apresenta o fluxograma de operações do estudo.

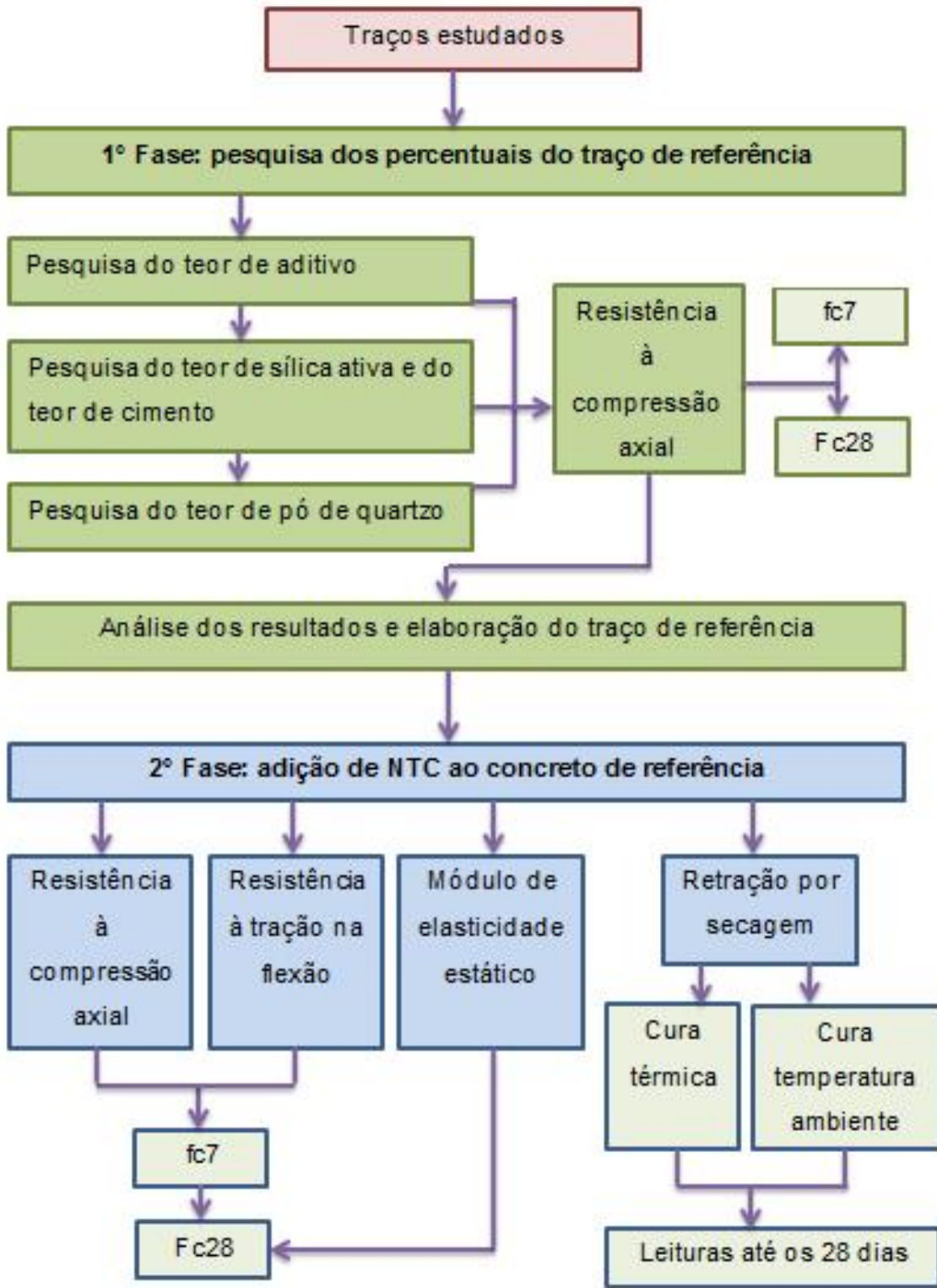


Figura 34. Fluxograma de operações da pesquisa.

A Tabela 11 apresenta uma visão geral do experimento, indicando os ensaios realizados em cada uma das duas fases do estudo. O item 4.2 deste trabalho tratará de cada ensaio de maneira específica e detalhada.

TABELA 11. RESUMO DAS FASES DO ESTUDO.

Fase	Descrição	Ensaio realizado	Total CP's
Primeira	Determinação do traço de referência	Compressão axial	78
Segunda	Incorporação dos NTC ao concreto de referência	Compressão axial	48
		Tração na flexão	48
		Módulo de elasticidade	16
		Retração	16
Total			206

4.1.1 Variáveis independentes

Foi estabelecida para este trabalho a metodologia científica de característica experimental, que visa comprovar as premissas estabelecidas no início dos estudos de que a adição de NTC conduzirá a um aumento nas características mecânicas do CUAR em estudo e reduzirá a retração por secagem. As variáveis independentes são:

- Três teores de adição de nanotubos de carbono (NTC): 0,10%; 0,20% e 0,30% em relação à massa do cimento;
- Idade de ruptura dos CP's em 7 e 28 dias, a contar da data de moldagem.
- No ensaio de retração, variação no tipo de tratamento térmico empregado. Metade dos corpos de prova submetidos à cura aquecida a 90°C por 48 horas. A outra metade permaneceu imersa na água a temperatura ambiente.

4. 1.2 Variáveis resposta

As medidas que são influenciadas pelas variáveis independentes são as variáveis de resposta, ou dependentes. Visando caracterizar e comparar os dados obtidos, foram definidos os seguintes pontos a serem analisados:

- Resistência à compressão axial;
- Resistência à tração na flexão;
- Módulo de elasticidade;
- Retração por secagem;
- Comportamento reológico do concreto no estado fresco.

4.1.3 Itens fixados

A fim de fixar parâmetros e diminuir a quantidade de fatores aleatórios na pesquisa, foram estipulados os seguintes fatores controláveis para a confecção dos concretos:

- Utilização da cura térmica por 48 horas, a 90°C. Após a cura térmica os corpos de prova foram mantidos submersos em água a temperatura ambiente.
- Fixação de um único teor de aditivo superplastificante e de um único tipo de cimento (CP II – Z – 32).
- Devido à grande quantidade de corpos de prova a serem moldados e a impossibilidade da realização da moldagem de todos em um mesmo dia, o experimento foi fracionado de modo a confeccionar todos os exemplares necessários para a realização dos ensaios do mesmo teor de adição no mesmo dia, visando minimizar os efeitos externos nos resultados.

4.2 Execução dos ensaios

O desenvolvimento dos trabalhos físicos deste estudo aconteceram no Laboratório de Durabilidade do Concreto (DURACON), no Laboratório de Tecnologia de Argamassas (LATECA) e no laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR), todos pertencentes a UFPR. Para os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizado o Centro de Microscopia Eletrônica, pertencente ao departamento de Física da UFPR.

Foi utilizado também o Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME/LACTEC), conveniado à Universidade Federal do Paraná e credenciado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial).

Foram ainda utilizados equipamentos e apoio de técnicos do laboratório do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da UTFPR.

4.2.1 Ensaio mecânicos

O ensaio mecânico com o maior número de realizações e o único a ser feito nas duas etapas da pesquisa, foi à determinação da resistência à compressão axial. O resultado do ensaio é uma importante referência para o dimensionamento de estruturas que utilizam o concreto como elemento estrutural principal. É considerado um ensaio de fácil execução, necessitando apenas de uma prensa universal e uma amostra de concreto de dimensões pré-estabelecidas, neste estudo foram usados cilindros de dimensões 50 x100 mm.

A escolha da utilização de corpos de prova de dimensões reduzidas se deve ao custo elevado e dificuldade de obtenção da matéria prima, em particular dos nanotubos de carbono. Além disso, o fato da mistura dos materiais ser realizada no misturador planetário de pequenas dimensões limita o volume de material a ser produzido. Utilizando corpos de prova nestas dimensões cada betonada foi capaz de produzir seis corpos de prova por mistura.

Os ensaios foram realizados seguindo metodologia nacional de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), que define os tipos de tratamento empregados nos topos dos corpos de prova, velocidade de carregamento, entre outros parâmetros que possam interferir nos resultados. Os ensaios foram conduzidos de forma a manter a

aplicação de carga centrada no topo e base dos corpos de prova a uma taxa de 0,5 MPa/s. Todos os corpos de prova tiveram seus topos planificados, procedimento realizado em um torno mecânico adaptado para tal fim e pertencente ao departamento de engenharia mecânica da UFPR, setor de usinagem de peças mecânicas. A Figura 35 apresenta a imagem do equipamento.



Figura 35. Equipamento utilizado para retífica do topo dos corpos de prova cilíndricos.

O emprego do torno foi motivado pelo fato de o emprego da retífica convencional para corpos de prova de concreto, de propriedade do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME/LACTEC), não apresentar uniformidade nos resultados. O equipamento projetado para a retificação de corpos de prova 100 x 200 mm não apresentou precisão suficiente para proporcionar sua utilização, pois faceava as amostras sem paralelismo, devido a dificuldade de apoio do corpo de prova com dimensões reduzidas. Esta dificuldade ficou evidenciada quando os primeiros resultados do ensaio de resistência à compressão axial apresentaram um desvio padrão muito alto, da ordem de 20 MPa. Este resultado desfavorável foi atribuído a deficiência na distribuição dos esforços no topo dos corpos de prova, provavelmente pela falta de precisão na retificação e no paralelismo entre as faces. Após o início da utilização do torno mecânico, este problema foi resolvido. A Figura 36 apresenta a imagem de dois corpos de prova de concreto, o primeiro (A) antes e após ter passado pelo processo de retificação no torno e segundo (B) já retificado. As setas em vermelho apontam a face do corpo de prova antes da retificação. É possível notar a superfície abaulada no centro da amostra.

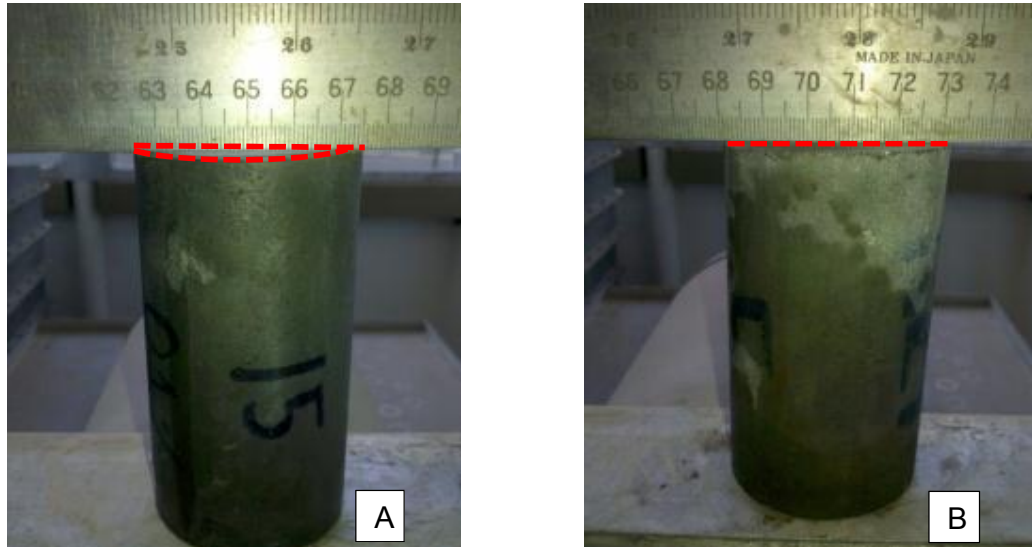


Figura 36. Corpo de prova antes e após ter passado pelo processo de retificação de topo.

A segunda propriedade importante para o cálculo e dimensionamento de estruturas de concreto armado que foi estudada neste trabalho, é o valor da resistência à tração, que pode ser obtido de três maneiras, são elas: resistência à tração na flexão, tração direta e tração por compressão diametral.

Neste estudo optou-se por utilizar a primeira alternativa, medindo-se a resistência à tração por flexão em doze corpos de prova de dimensões de 40 x 40 x 160 mm para cada teor de adição de NTC mais o concreto de referência. Foram ensaiados seis corpos de prova para cada idade, 7 e 28 dias após a moldagem.

Este ensaio aconteceu apenas na segunda etapa da pesquisa, onde já havia sido definido o traço de referência. Através do conhecimento do valor da resistência a tração é possível estimar parâmetros importantes para o correto dimensionamento de elementos estruturais, como a estimação do cálculo de fissuração, aderência entre as barras da armadura e o concreto e ainda os estados limites de utilização dos elementos.

A Figura 37 apresenta os 48 corpos de prova antes de se iniciarem as rupturas. Foram rompidos seis exemplares para cada uma das duas idades de ensaio, 7 e 28 dias.

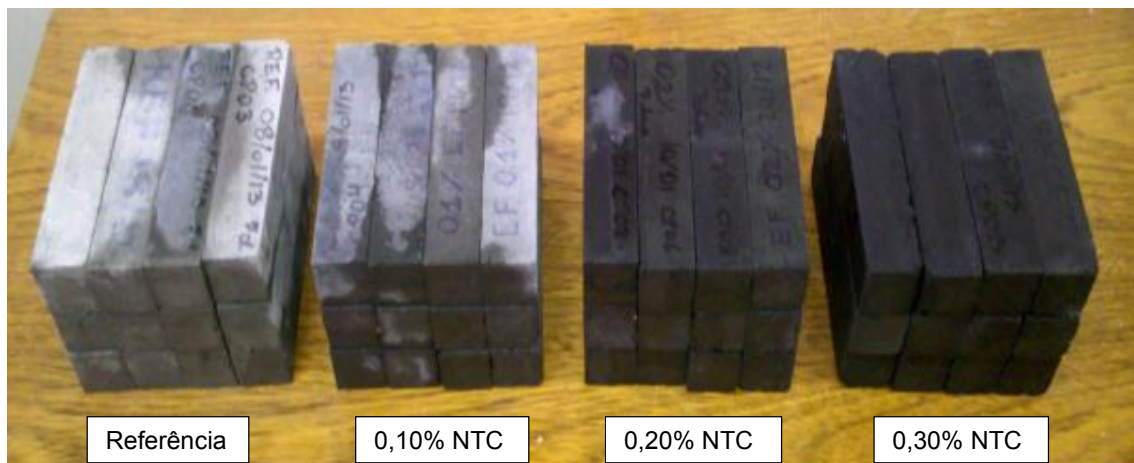


Figura 37. Imagem dos corpos de prova antes da execução do ensaio de tração na flexão.

A Figura 38 apresenta a execução do ensaio na prensa universal da marca Emic modelo DL 3000N, pertencente à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

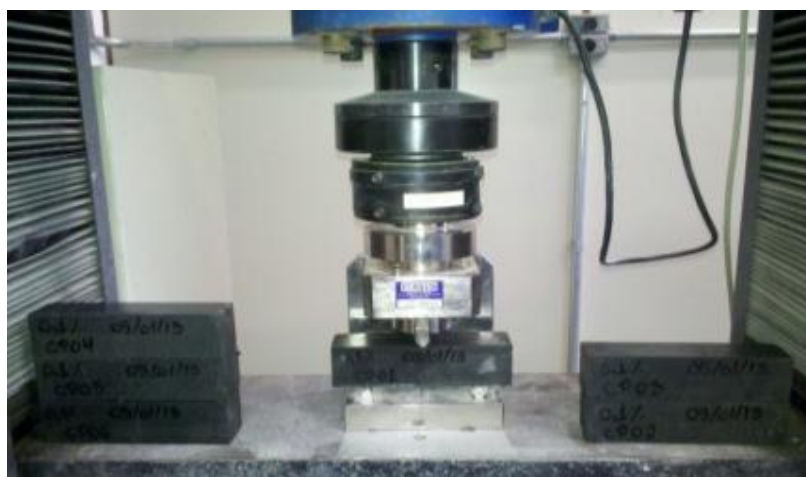


Figura 38. Execução do ensaio de tração na flexão.

Para completar o estudo das propriedades mecânicas do concreto de ultra - alta resistência com adição de nanotubos de carbono foi investigado o valor do módulo de deformação longitudinal, também chamado de módulo de elasticidade, parâmetro importante para se conhecer a capacidade de deformação do concreto.

Para a realização do ensaio foi utilizada a referência NBR 8522 (ABNT, 2003), que estabelece os métodos para a determinação do módulo estático de elasticidade, utilizando para isso resultado de compressão do concreto no estado endurecido.

Foram ensaiados três corpos de prova cilíndricos, como recomenda a norma e ainda utilizado um quarto CP para obter a resistência à compressão estimada da amostra. A partir do valor médio da resistência à compressão obtida ou estimada, determinam-se os níveis de carregamento a serem aplicados conforme descreve o item 7.3.2 da referência normativa.

4.2.2 Ensaio de retração por secagem

A importância do estudo do fenômeno de retração dos concretos está ligada à qualidade e durabilidade das edificações, pois fatores como a quantidade e intensidade de fissuras geradas nas primeiras idades prejudicam a estanqueidade do concreto, abrindo caminho para a entrada de agentes agressivos na estrutura.

Gleize, 2010 relata que a fissuração nas primeiras idades pode ocorrer através da perda de água por secagem, ou sob condições endógenas, ou seja, sem a troca de água com o ambiente. O segundo caso é o que ocorre no caso de compostos cimentícios de alta resistência, com baixa relação $a/aglo$, em geral inferiores a 0,30, como o material em estudo neste trabalho. Para o mesmo autor, a incorporação de pequenas quantidades de nanofibras pode atuar como ponte de transferência das tensões geradas pelas forças capilares, forças que conduzem a tal fissuração, e pode ser uma alternativa para diminuir a ocorrência de fissuras nas primeiras idades, propiciando melhoria de desempenho destes materiais.

A decisão de investigar a retração no CUAR vem de uma informação retirada da literatura (GRAYBEAL, 2006 – A; ROKUGO, 2008), que afirma que estes concretos quando submetidos a tratamento térmico específico de 90°C por 48 horas, praticamente não apresentam retração por secagem. Procurou-se então investigar estas duas informações, da seguinte maneira:

- Visando investigar se os nanotubos de carbono interagem positivamente no concreto, diminuindo a retração por secagem, foram moldados corpos de prova de referência, sem adição de NTC;
- Para avaliar a retração após a cura foram moldados quatro corpos de prova para cada percentual de adição de NTC e a mesma quantidade de exemplares para o concreto de referência. Dois corpos de prova

de cada traço foram submetidos ao tratamento térmico submerso a 90°C por 48 horas. O restante dos corpos de prova foram mantidos submersos em água a temperatura ambiente.

Para investigar esta afirmação será utilizada aparelhagem (pórtico de medição e fôrmas para corpo de prova) descrita na ASTM C157/08. Neste ensaio a variação dimensional é medida em corpos de prova no estado endurecido em formato de prismas, de dimensões 25 x 25 x 285 mm, com um comparador de precisão 0,001 mm.

A Figura 39 apresenta os corpos de prova após o término da moldagem, ainda nos moldes metálicos e todos os exemplares resultantes das moldagens.



Figura 39. Molde utilizado para a confecção e corpos de prova prontos para medição.

Pode-se perceber que a imagem a direita da Figura 39 apresenta apenas 15 corpos de prova. Isso porque um corpo de prova do percentual de adição 0,20% de NTC se quebrou quando foi desmoldado.

Na Figura 40 é apresentado o aparato de medição. O aparelho é bastante sensível a variações, portanto foi necessário estabelecer uma série de procedimentos visando minimizar erros de leitura.



Figura 40. Imagem do equipamento de medição com relógio comparador zerado.

A metodologia de estocagem e marcação dos corpos de prova antes da realização das leituras é muito importante para a padronização do ensaio e consistiu nos seguintes procedimentos:

- Os corpos de prova eram mantidos dentro de uma câmara seca durante todo o período de ensaio. Este local era mantido em temperatura e umidade relativa do ar controlada, variando de 23°C a 25°C e de 45 a 50%, respectivamente;
- As quatro laterais de todos os corpos de prova foram marcados com as letras A, B, C e D;
- Todos os corpos de prova foram marcados com uma seta, indicando a posição correta para realização das leituras;
- Antes de cada leitura, era feita a verificação se a face do corpo de prova estava perfeitamente paralela aos apoios do equipamento, com o auxílio de uma chapa de aço. Esse procedimento visou a padronização da posição de leitura para cada face do CP, de maneira que as leituras fossem iguais no decorrer do período.

A metodologia adotada para as leituras foi mantida constante durante todo o período de ensaio, e consistiu nas etapas a seguir:

- Ao iniciar a medição, utilizava-se uma barra de aço inoxidável própria do equipamento para zerar a leitura. Esta barra é específica para esta finalidade e, segundo o fabricante do produto, não possui alteração significativa no seu comprimento, podendo ser considerada de dimensões constantes;
- Eram medidos os resultados de todas as faces dos corpos de prova. Como resultado final de cada leitura foi tomada a média dos resultados obtidos.
- Os resultados obtidos foram tabulados para posterior elaboração do gráfico de retração. Os valores constam no Anexo E deste documento.

4.2.3 Ensaios de caracterização reológica no estado fresco

4.2.3.1 Espalhamento na mesa de consistência

Foram utilizados dois ensaios para a caracterização reológica no estado fresco do concreto em estudo. O primeiro deles foi o índice de consistência, determinado pelo espalhamento do material em mesa específica para tal fim.

O teste consiste em medir o espalhamento horizontal do material moldado na forma de um cone padrão, submetido a sucessivos impactos após a retirada do molde.

A metodologia utilizada para o ensaio é nacional e está descrita na NBR 13276 (ABNT, 2005). Esta metodologia é utilizada para caracterização de argamassas, mas pela semelhança no estado fresco com o concreto em questão, foi adaptada para o presente estudo.

A adaptação consistiu em encher o molde padrão com o concreto em apenas uma camada. Não foi necessário aplicar golpes com o soquete metálico para adensar o material em nenhuma determinação, devido o caráter autoadensável da mistura.

O índice de consistência do concreto corresponde à média de três medidas do diâmetro obtido após a aplicação de 30 quedas na mesa, uma a cada segundo. Seguindo recomendação da norma a medida foi coletada em milímetros e sempre arredondada para o número inteiro mais próximo.

4.2.3.2 Método squeeze-flow

A metodologia NBR 15839 (ABNT, 2010) descreve o método de ensaio para determinação do comportamento reológico de argamassas de assentamento e revestimento no estado fresco pelo método *squeeze-flow*.

Foi utilizada uma máquina universal de ensaios com deslocamento máximo de 9 mm, carga máxima de 1 KN e realizadas leituras sucessivas no concreto em estudo, até que fosse verificada a similaridade entre os resultados, analisando as curvas geradas. A velocidade de deslocamento foi fixado em 3 mm/s.

A Figura 41 apresenta o molde preenchido pelo concreto e, logo na sequência, o mesmo corpo de prova sendo puncionado pelo embolo da prensa.



Figura 41. A esquerda a amostra no molde para o ensaio. A direita o ensaio em andamento.

Cardoso, Pileggi e John (2005), relatam que o resultado do ensaio realizado com controle por deslocamento expresso na forma de carga vs. deslocamento, apresenta um perfil típico representado por três estágios bem definidos.

No primeiro estágio, em geral, ocorrem pequenas deformações no material, que se comporta como um sólido, apresentando deformação elástica linear. No estágio seguinte, relatam os pesquisadores, ocorre a fase das maiores deformações nos materiais, é a chamada deformação plástica e/ou viscosa. Já no terceiro e último estágio, continuam os autores, o material é submetido a grandes deformações e pode ocorrer um grande aumento da carga (tensão) necessária para ocasionar o deslocamento do mesmo. Os mesmo autores relatam ainda que a faixa de deformação e a intensidade dos estágios podem variar de acordo com parâmetros próprios de cada material ensaiado, como teor de água, dimensão mínima e máxima das partículas e presença de aditivos.

O ensaio de *squeeze-flow* gera dados relativos a parâmetros reológicos fundamentais nos sólidos, como viscosidade e tensão de escoamento. Por definição, a viscosidade é a propriedade do fluido correspondente ao transporte microscópico da quantidade de movimento por difusão molecular. Já a tensão de escoamento é a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação. Se houver algum acréscimo de tensão após este limite, o material não seguirá mais a lei de Hooke, passando a sofrer deformação plástica.

4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Amostras de concreto foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), Figura 42, de marca JEOL e modelo JCM – 6360LV, com a finalidade de observar a microestrutura de cada traço estudado, mas principalmente na tentativa de observar o comportamento e disposição dos NTCs incorporados aos concretos em estudo. O equipamento fica instalado no Centro de Microscopia Eletrônica, pertencente ao departamento de Física da UFPR.

O princípio de funcionamento do MEV consiste em realizar o varrimento da superfície de uma amostra com um feixe eletrônico finamente focado, em sincronismo com o varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto, pela intensidade de um sinal emitido pela amostra. Obtém-se, deste modo uma correspondência, ponto a ponto, entre a imagem e a região observada da amostra, que depende da natureza da informação, do tipo de sinal registrado e do detector utilizado (VANDERLEI, 2004).



Figura 42. Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

A preparação das amostras a serem analisadas consiste na aplicação de uma fina camada de ouro sobre a superfície do concreto, conforme apresenta a Figura 43. Foi ainda realizada a análise química dos compostos das amostras utilizando o equipamento de Espectrometria de Dispersão de Energia, *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Este aparelho visa identificar elementos químicos

presentes na amostra observada em pontos específicos de interesse, identificados durante o processo de varredura da superfície analisada. Assim é possível analisar e identificar os cristais e componentes nas amostras.



Figura 43. Aspecto das amostras cobertas com ouro, após o término das imagens no MEV.

Utilizando esta técnica é possível determinar a composição química qualitativa das amostras, a partir da emissão de raios X característicos. É possível identificar a composição de regiões com até 1 μm de diâmetro.

Dal Molin (2010) explica que a análise qualitativa consiste na análise dos elementos presentes em uma determinada amostra, sendo que os elementos em maior quantidade na amostra são identificados com maior facilidade e precisão pelo equipamento. Já os elementos que estão em pequenas quantidades não são identificados com clareza, necessitando da interpretação correta do pesquisador. Considera-se que, acima de 10% em massa, um elemento identificado estará em grande quantidade. Entre 1% e 10%, em pequena quantidade; e em menos que 1%, há apenas traços (Dal Molin, 2010).

Foram analisados no MEV fragmentos dos concretos ensaiados a compressão axial aos 28 dias. As imagens foram capturadas em várias escalas de ampliação, variando de 50 a 100.000 vezes.

Apesar de o aparelho possibilitar ampliar uma imagem até 300.000 vezes, não é possível obter precisão nesta escala. Para extrair imagens de qualidade o equipamento utilizado limitou a análise das imagens com cerca de 30.000 vezes de magnificação.

4.3 Caracterização dos materiais

Para a seleção da matéria prima utilizada nos experimentos deste trabalho, procurou-se aplicar o critério de selecionar materiais com características similares aqueles que apresentaram bom desempenho nos trabalhos internacionais pesquisados. Especificamente se tratando do pó de quartzo, procurou-se utilizar o mesmo material utilizado por VANDERLEI (2004), inclusive proveniente do mesmo fornecedor, devido aos resultados satisfatórios alcançados pelo pesquisador.

As características técnicas do cimento, pó de quartzo, sílica ativa, dos nanotubos de carbono e do aditivo superplastificante foram fornecidas pelos fabricantes de cada produto.

A caracterização dos agregados e a verificação da compatibilidade aditivo/cimento foram feitas nas instalações da Universidade Federal do Paraná, como será apresentado a seguir.

4.3.1 Cimento

O cimento utilizado para realização desta pesquisa foi o CP II – Z – 32 produzido pela Cia. de Cimento Itambé, localizada na cidade de Balsa Nova, região metropolitana de Curitiba.

Os resultados mecânicos da pasta de cimento são apresentados na Tabela 12 e foram fornecidos pela fabricante do produto.

TABELA 12. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO TIPO CP II – Z – 32.

Ensaio	Dias	Valores médios	Unidade
Resistência à compressão	1	13,4	MPa
	3	25,9	MPa
	7	32,5	MPa
	28	39,9	MPa

Fonte: Cia. de Cimentos Itambé. Valores médios divulgados no relatório de abril 2013.

A Tabela 13 apresenta os resultados dos ensaios físicos realizados pelo fabricante no cimento CP II – Z – 32.

TABELA 13. ENSAIOS FÍSICOS DO CIMENTO TIPO CP II – Z – 32.

Ensaio	Valores médios	Unidade
Finura Blaine	3.636	cm ² /g
Massa específica	2.970	g/cm ³
Início de Pega	3:17	h:min
Fim de Pega	3:57	h:min
Finura na peneira #200	2,65	%
Finura na peneira #325	11,54	%
Consistência Normal	27,60	%

FONTE: Cia. de Cimentos Itambé. Valores médios divulgados no relatório de abril 2013.

A Tabela 14 apresenta a análise química do cimento empregado na pesquisa. As informações apresentadas também são divulgados pelo fabricante através de relatórios com periodicidade variada.

TABELA 14. ENSAIOS QUÍMICOS DO CIMENTO TIPO CP II – Z – 32.

Parâmetro químico	Valores médios	Unidade
Al ₂ O ₃	6,52	%
SiO ₂	22,43	%
Fe ₂ O ₃	3,12	%
CaO	54,10	%
MgO	3,82	%
SO ₃	2,35	%
Perda ao fogo	4,92	%
CaO livre	1,25	%
R. Ins.	10,84	%
Eq. Alc.	0,94	%

FONTE: Cia. de Cimento Itambé. Valores médios divulgados no relatório de abril 2013.

Procurando caracterizar e conhecer um pouco melhor o material que seria utilizado na pesquisa, foi realizada uma análise granulométrica mais específica e detalhada do cimento em questão.

Realizando a determinação da granulometria por raio laser em um granulômetro da marca CILAS 1064 por sessenta segundos, foi possível verificar que 90% dos grãos da amostra tem diâmetro menor que 27,12 μm , 50% possui diâmetro menor que 12,00 μm e 10% diâmetro menor que 1,47 μm .

O diâmetro médio das partículas apontado pelo equipamento foi de 13,38 μm .

A Figura 44 apresenta uma análise granulométrica do cimento realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR/UFPR.

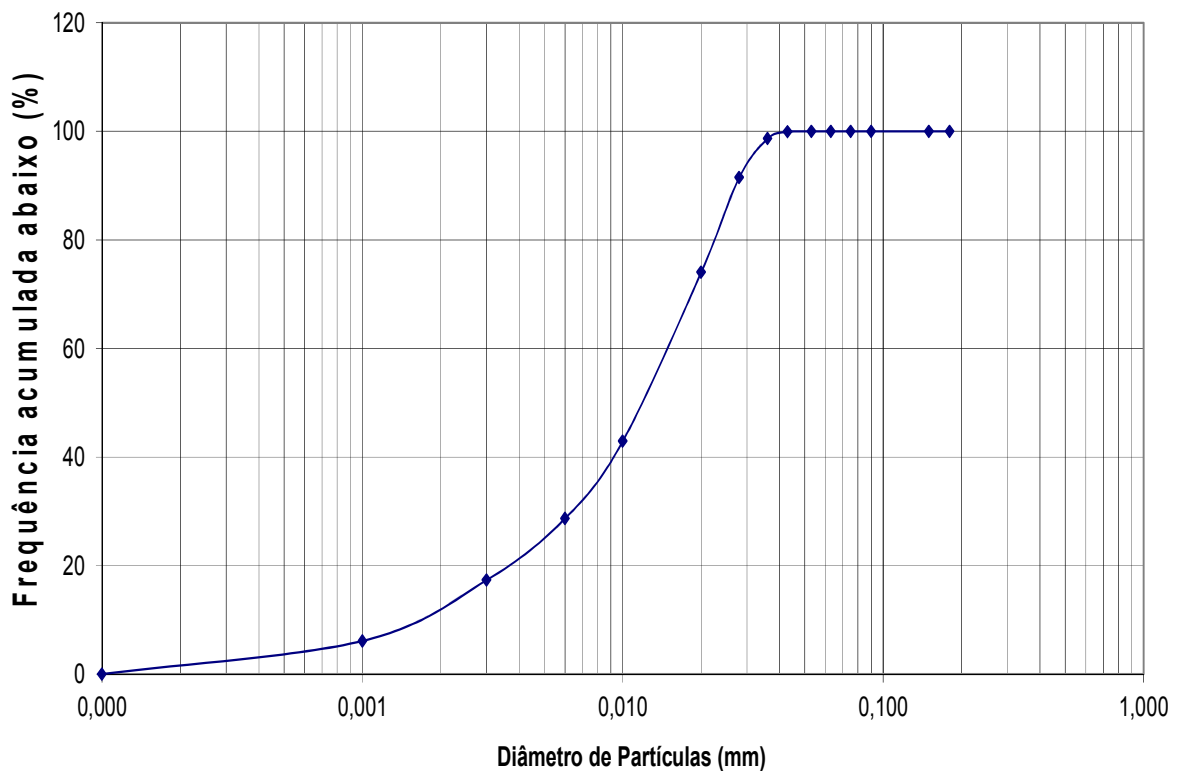


Figura 44. Curva granulométrica do cimento tipo CP – II – Z – 32.

FONTE: Análise realizada no Laboratório de Minerais e Rochas, LAMIR/LACTEC.

4.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa é uma areia natural, quartzosa, originada das cavas do Rio Iguaçu, região metropolitana de Curitiba. Para a dosagem foi seca em estufa por 24 horas e peneirada, a fim de retirar o material mais grosseiro da amostra.

Foi utilizada na pesquisa apenas a fração do material passante na malha 2,00 mm, caracterizada como maior partícula da mistura. A Tabela 15 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo realizada seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

TABELA 15. GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO.

Abertura da Peneira (mm)	Média retida (%)	Média retida acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	0	0
1,2	5,5	5,5
0,6	29,2	34,8
0,3	21,0	55,8
0,15	38,0	93,8
< 0,15	6,20	100

A Figura 45 apresenta a curva granulométrica gerada com o material passante acumulado pelas peneiras da série normal.

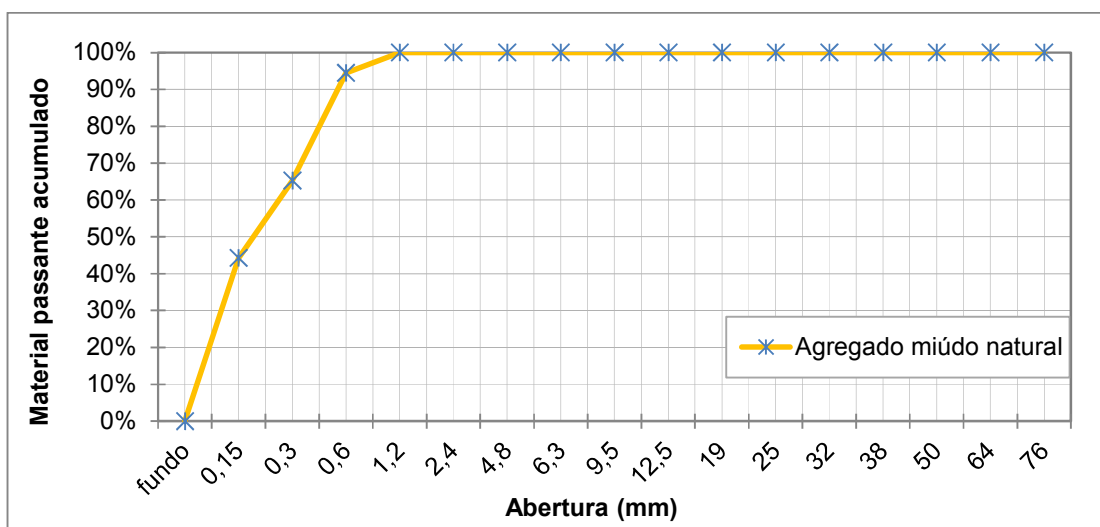


Figura 45. Curva granulométrica do agregado miúdo.

Na Tabela 16 é apresentada características físicas do agregado miúdo utilizado para produção dos concretos de ultra - alta resistência obtida seguindo a NBR 9775 (ABNT,20012). O módulo de finura foi obtido dividindo a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa por 100 (cem), seguindo recomendação da NBR NB 248 (ABNT, 2003).

TABELA 16. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO.

Resultados físicos	Valor	Unidade
Massa específica	2.631,58	Kg/m ³
Dimensão máxima característica	1,20	mm
Módulo de finura	2,90	-
Umidade média	0,50	%

Na Figura 46 é apresentada uma imagem do agregado miúdo utilizado na pesquisa.



Figura 46. Agregado miúdo utilizado na pesquisa.

4.3.3 Adições

Com o intuito de reproduzir as dosagens dos concretos de ultra - alta resistência com êxito foram utilizadas adições ao concreto em estudo. Foi buscado incorporar as adições com características semelhantes às adições utilizadas por outros pesquisadores deste tipo de concreto. As descrições destes materiais são feitas a seguir.

4.3.3.1 Pó de quartzo

O pó de quartzo utilizado neste estudo é comercialmente chamado de Sílica Malha 325 e foi disponibilizado pela Mineração Jundu por doação para fins de pesquisa para a Universidade Federal do Paraná. O produto é extraído e beneficiado na cidade de Araguari, interior do estado de São Paulo.

A Tabela 17 apresenta a composição química do pó de quartzo, fornecida pela fabricante do produto.

TABELA 17. ANÁLISE QUÍMICA E ÍNDICE DE UMIDADE DO PÓ DE QUARTZO.

Elemento	Unidade	Resultado
Umidade	%	0, 020
Perda ao fogo	%	0, 130
Teor de SiO ₂	%	> 99, 000
Teor de Fe ₂ O ₃	%	< 0, 050
Teor de Al ₂ O ₃	%	< 0, 300
Teor de TiO ₂	%	< 0, 035

FONTE: Mineração Jundu.

A Tabela 18 apresenta a composição granulométrica da fração mais graúda do pó de quartzo, ou seja, da granulometria possível de ser obtida por peneiramento. As informações foram fornecidas pela fabricante do produto através de laudo emitido no momento da retirada do produto na unidade de beneficiamento.

TABELA 18. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE QUARTZO.

Peneiras	Abertura (mm)	% Retido	% Retido acumulado
100	0,150	0,00	0,00
140	0,106	0,06	0,06
200	0,075	0,45	0,51
325	0,045	7,00	7,51
< 325	< 0,045	92,49	100,00

FONTE: Mineração Jundu.

A Figura 47 apresenta o resultado de uma análise granulométrica realizada com o mesmo material fornecido pela Mineração Jundu e realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR / UFPR.

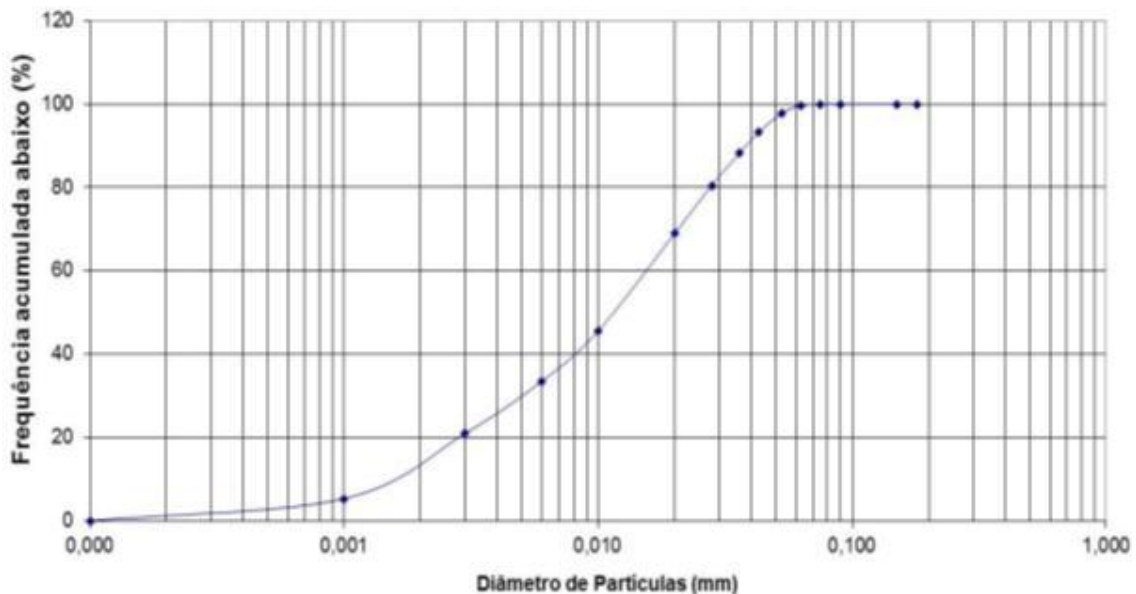


Figura 47. Distribuição granulométrica do pó de quartzo.

FONTE: LAMIR / UFPR.

Realizando a determinação da granulometria por raio laser em um granulômetro da marca CILAS 1064 por sessenta segundos, foi demonstrado que 90% dos grãos da amostra possui diâmetro menores que 38,28 μm , 50% possui diâmetros menores que 11,60 μm e 10% diâmetros menores que 1,43 μm . O diâmetro médio das partículas de pó de quartzo foi de 15,89 μm .

4.3.3.2 Sílica ativa

Para a confecção do concreto de ultra - alta resistência foi incorporada a dosagem sílica ativa nacional, proveniente de um mesmo lote de fabricação, fornecida pela empresa Silmix em sacos de papel *Kraft* de 20 kg. A sílica ativa, pó fino de cor cinza claro, é própria para aplicação em concretos e argamassas e possui formato da partícula predominantemente esférico, de acordo com a NBR 13956 (ABNT, 2006).

A quantidade de sílica ativa empregada nas misturas foi testada através de incorporação gradual, conforme será discutido no quinto capítulo, referente à dosagem do concreto. Como limite superior de dosagens foi utilizado estudos de pesquisadores pioneiros na confecção dos CUAR como Cheyrezy, Maret e Froin (1995) que utilizaram 30 % do material em relação à massa do cimento. Este percentual vai contra a recomendação proposta pelo fabricante do produto, que é utilizar até 15 % de produto em relação à massa do cimento. Devido à finura elevada, sua incorporação em grandes porções aumenta consideravelmente a necessidade de água no concreto.

As características químicas e físicas da sílica ativa utilizada são apresentadas nas Tabelas 19 e 20, respectivamente. Todas as características foram fornecidas pelo fabricante do produto.

TABELA 19. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA SÍLICA ATIVA.

Características	Resultados	Unidade
Perda ao fogo	3,14	%
SiO ₂	94,30	%
Al ₂ O ₃	0,09	%
Fe ₂ O ₃	0,10	%
CaO	0,30	%
MgO	0,43	%
K ₂ O	0,83	%
Na ₂ O	0,27	%

FONTE: Silmix.

TABELA 20. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA SÍLICA ATIVA.

Características	Valor	Unidade
Massa específica	2.220	kg/m ³
Superfície específica	19.000	m ² /kg

FONTE: Silmix.

A Figura 48 apresenta a curva de composição granulométrica da sílica ativa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná – LAMIR.

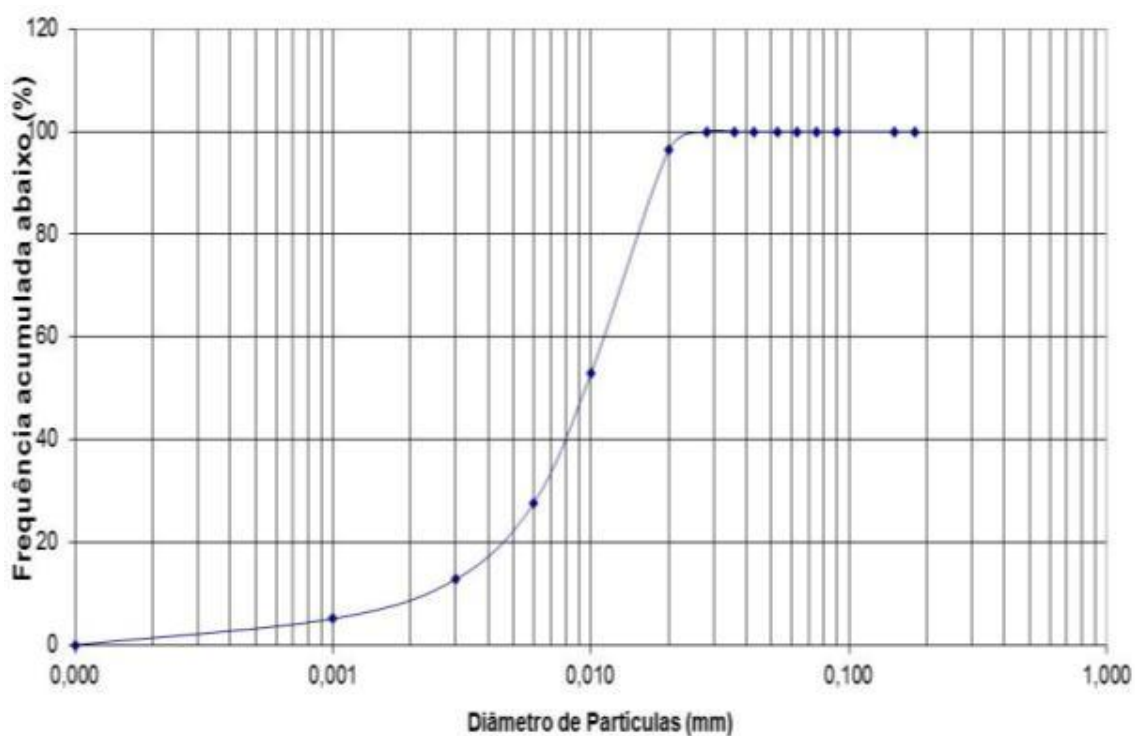


Figura 48. Distribuição granulométrica da sílica ativa.

FONTE: LAMIR/UFPR.

A técnica empregada também foi a granulometria por raio laser em um granulômetro da marca CILAS 1064 por um tempo de sessenta segundos. O resultado indicou que 90% dos grãos da amostra tem diâmetro menor que 16,86 μm , 50% possui diâmetros menores que 9,58 μm e 10% diâmetros menores que 1,94 μm . O diâmetro médio das partículas analisadas foi de 9,69 μm .

4.3.3.3 Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono utilizados nesta pesquisa foram adquiridos da empresa Nanocyl AS., localizada na Bélgica. É o mesmo material utilizado por Marcondes (2012) sendo comercialmente conhecidos com o nome de NC 7000. O material foi gentilmente cedido pelo pesquisador para esta pesquisa, e o valor pago pelo produto em pó foi 120 euros por quilo, no ano de 2012.

Segundo o fabricante, tratam-se de NTCs de paredes múltiplas sintetizados pelo método de deposição química a vapor ou também chamado CVD - *Chemical Vapor Deposition*.

A Figura 49 mostra uma imagem deste material com o emprego da microscopia eletrônica de varredura (MEV). O estado atual do produto é no formato de pó, sendo necessário dispersá-lo em uma solução de aditivo e água para melhor dispersão no concreto.

O processo de dispersão chama-se sonificação e para tal foi utilizado um equipamento que emite energia ultrassônica, conforme descreve o item 4.4.4 deste trabalho. Procedimento análogo foi utilizado por Marcondes (2012) em seus estudos.

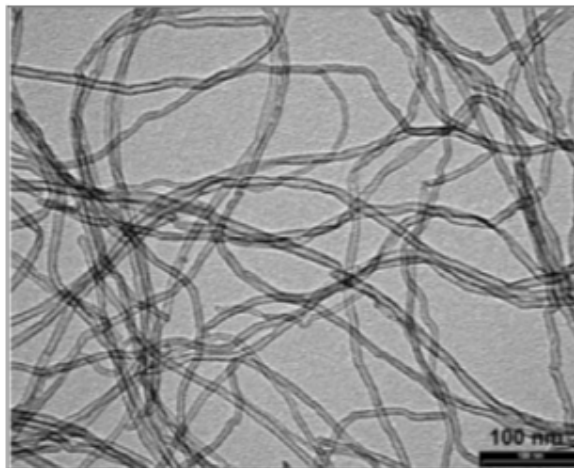


Figura 49. Imagem dos nanotubos de carbono produzidos pela Nanocyl SA.

FONTE: Marcondes, 2012.

A Tabela 21 apresenta a caracterização dos nanotubos de carbono fornecidos pelo fabricante do produto.

TABELA 21. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS NANOTUBOS DE CARBONO.

Propriedade*	Valor	Unidade
Diâmetro médio	9,5	Nanômetros
Comprimento médio	1,5	Mícron
Área superficial	250 a 300	m ² /g
Densidade média	60	g/l

FONTE: Marcondes, 2012. *Informações fornecidas pelo fabricante.

A Tabela 22 apresenta a composição típica do produto, apresentadas pelo fabricante do produto.

TABELA 22. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS NANOTUBOS DE CARBONO.

Componente*	Percentual em peso
Grafite sintetizado (NTC)	90%
Pureza de carbono	90%
Óxido metálico	10%
Óxido de cobalto	< 1%
Outros	9%

FONTE: Marcondes, 2012. * Informações fornecidas pelo fabricante.

4.3.4 Comparação dos diâmetros dos materiais estudados

Após a análise da granulometria dos materiais constituintes do traço, são eles: cimento, pó de quartzo e sílica ativa e utilizando as informações fornecidas pelo fabricante dos NTC's, foi possível realizar, a comparação das finuras.

A finura dos materiais influencia nas propriedades reológicas do concreto no estado fresco, proporcionando melhor ou pior trabalhabilidade, mas principalmente no estado endurecido, onde poderá influir negativamente na resistência pretendida. Isso porque uma grande quantidade de materiais finos demanda grande quantidade de água na mistura. A Figura 50 apresenta os resultados da análise feita nos materiais.

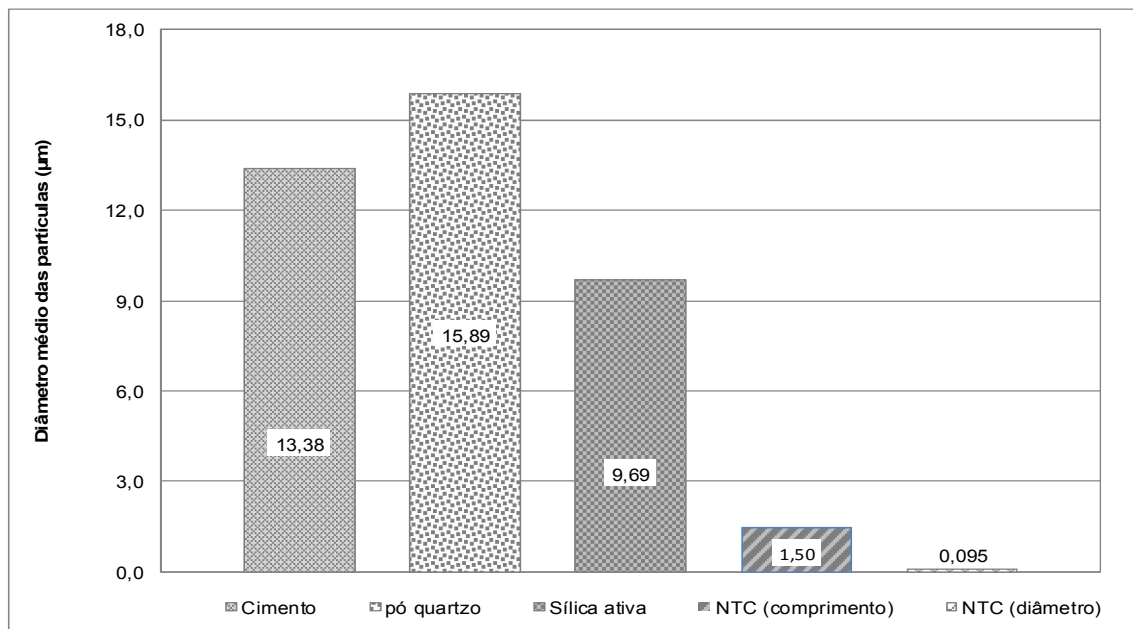


Figura 50. Diâmetros médios dos materiais analisados por granulometria a laser.

Pode-se notar que as partículas do pó de quartzo, são ligeiramente maiores que as do cimento e que as partículas da sílica ativa são as de menor diâmetro médio dentre os materiais de predominância esférica, como era de se esperar.

O diâmetro médio do NTC é apresentado na imagem para comparação e considera o diâmetro médio dos tubos (menor dimensão), e o comprimento do material, sendo estas informações fornecidas pelo fabricante.

4.3.5 Aditivo

Foi utilizado durante todo o estudo um aditivo superfluidificante de terceira geração, que utiliza como base química uma solução de polímeros policarboxilatos em meio aquoso, denominado comercialmente como MC – *Power Flow* 1159.

De forma líquida, coloração marrom e pega normal, o aditivo é indicado pelo fabricante para indústria de elementos pré-moldados, concreto autoadensável, concreto com resistência a agentes agressivos, concretos de alta resistência e/ou alta fluidez.

O aditivo foi adotado para a confecção de todos os corpos de prova da pesquisa visando torná-lo um fator controlável e diminuindo o número de variáveis no estudo. Suas informações técnicas estão contidas na Tabela 23.

TABELA 23. INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO ADITIVO MC – POWER FLOW 1159.

Característica	Valor	Unidade
Densidade	1,06	g/cm ³
Dosagem recomendada*	0,2 a 5,0	%
Teor de cloretos	< 0,10	%
Teor de álcalis	< 0,10	%

* Sobre o peso do cimento.

FONTE: Ficha técnica edição 01/2010, presente em www.mc-bauchemie.com.br.

4.3.6 Água de Amassamento

Foi utilizada para todos os ensaios da pesquisa água potável proveniente da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

4.4 Procedimentos para produção e preparo dos corpos de prova

A padronização dos procedimentos para produção e preparo dos corpos de prova é muito importante para uma possível reprodutibilidade dos resultados obtidos no estudo. Os procedimentos apresentados a seguir se mantiveram constantes em todo o período de estudo e foram determinados com base em estudos experimentais preliminares.

4.4.1 Mistura dos materiais

A ordem de colocação dos materiais no misturador planetário, após a pré - mistura manual dos materiais secos e a dispersão do aditivo e dos nanotubos de carbono na água de amassamento, foi mantida constante para todas as misturas. A sequência utilizada foi a seguinte:

- Era adicionado 50% da mistura de materiais secos e toda a parte líquida, (água de amassamento e aditivo⁹) no misturador planetário;
- O misturador era ligado na velocidade mais lenta. Esta velocidade era mantida por todo o tempo de mistura;
- Era incorporado gradualmente o restante da mistura de materiais secos com o equipamento ligado, procedimento que levava cerca de 2 minutos.

O tempo total de mistura era de 15 minutos para a primeira etapa da pesquisa, que procurou estabelecer o traço de referência. Após os ensaios iniciais da segunda etapa, com a incorporação dos NTC, foi percebido a necessidade de ampliar o tempo de mistura para 20 minutos,

Encerrado o período de mistura, eram realizados os ensaios de caracterização reológica no estado fresco e a determinação do índice de consistência, utilizado para a definição do traço padrão. O método *squeeze-flow* foi realizado para a análise do concreto contendo NTC. A massa específica no estado fresco foi realizada apenas para os ensaios da segunda fase, utilizando procedimento descrito na NBR 9778 (ABNT, 2009).

⁹ Na segunda etapa dos estudos, também era adicionada a parte líquida os NTC dispersos.

4.4.2 Moldagem e adensamento

O procedimento para a moldagem dos corpos de prova seguiu a NBR 5738 (ABNT, 2008). Um procedimento para evitar a perda de umidade das amostras para o ambiente nas primeiras 24 horas consistiu em aplicar uma placa de vidro temperado de 8,0 mm de espessura sobre os corpos de prova, movendo-a em forma circular e simultaneamente aplicando pressão de cima para baixo, a fim de planificar a superfície e retirar o excesso de concreto. Este procedimento facilitou também o processo de retificação de topo nos corpos de prova. Pela necessidade de padronização, foi adotado um procedimento de adensamento para os corpos de prova da primeira etapa da pesquisa, onde o concreto era autoadensável. O procedimento não se baseou em nenhum trabalho anterior e foi o mesmo para todas as séries de ensaio da primeira fase. Ele será descrito detalhadamente a seguir:

- Foi utilizada uma quantidade de concreto que atingisse um terço da fôrma metálica;
- Foram aplicados 20 golpes na mesa para índice de consistência;
- Foi depositada a segunda camada de concreto, cobrindo mais um terço da fôrma metálica, totalizando dois terços;
- Aplicavam-se mais 20 golpes na mesa para índice de consistência;
- Apenas para padronizar o procedimento e evitar perda de água para o ambiente, todas as amostras aguardavam 24 horas para a desforma.

Para a segunda etapa da pesquisa, o procedimento de moldagem sofreu alteração, devido à perda de trabalhabilidade do concreto. O Adensamento foi feito com a ação do soquete metálico, em três camadas e aplicação de 25 golpes por camada. Este foi o único procedimento que se adaptou a pouca trabalhabilidade do concreto.

4.4.3 Desforma e cura

A desforma dos corpos de prova foi realizada, em todas as séries de ensaio e nas duas etapas do trabalho, 24 horas após a moldagem. Devido à utilização da

cura térmica, a identificação dos corpos de prova teve atenção especial para não ser perdida ao longo do tempo em que os CP permaneceram em cura. A maneira adotada para identificar as amostras foi marcá-las com grafite ou giz de cera, visto que qualquer outro tipo de identificação adotada descolava ou desprendia quando submetida à cura térmica submersa.

Logo após a desforma e posterior identificação, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico em temperatura constante de 90°C por dois dias (48 horas), respeitando o procedimento apresentado na Figura 51.

Após 24 horas de tratamento térmico, a água contida no equipamento era drenada e substituída. Isso acontecia para que se pudessem adicionar novos corpos de prova ao tratamento térmico. Por este motivo o gráfico da Figura 51 apresenta dois ciclos de temperatura. O procedimento completo de desligamento e religamento do equipamento, já com os novos corpos de prova em cura, não ultrapassava uma hora de duração.

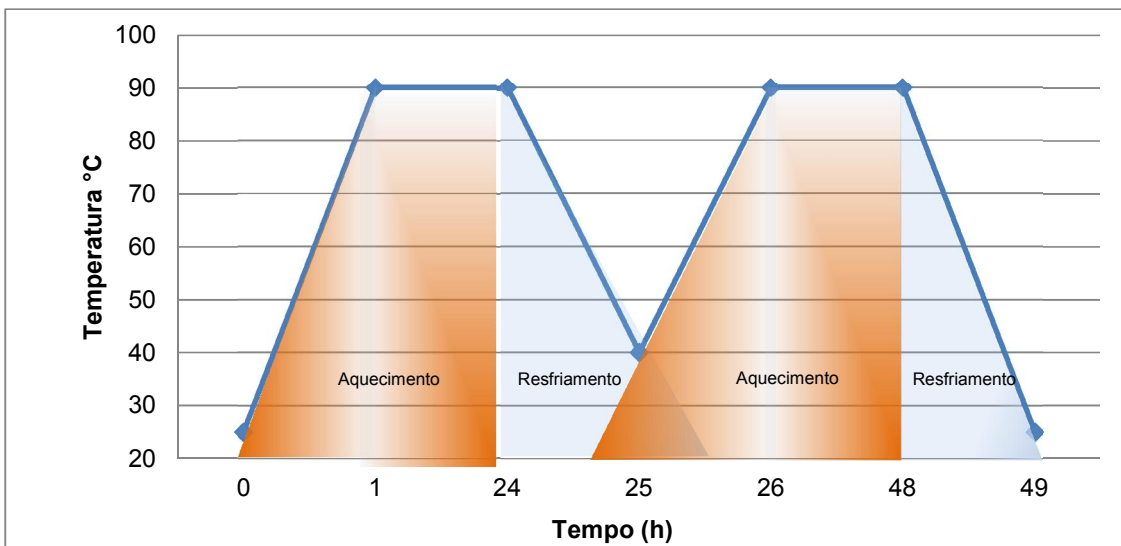


Figura 51. Avanço da temperatura de cura ao longo do tempo.

Após o desligamento da cura térmica, todos os corpos de prova foram mantidos submersos até que a água retornasse a temperatura ambiente. Esta prática foi adotada para evitar o choque térmico nos corpos de prova, que poderiam causar o surgimento de fissuras. Este tempo era de aproximadamente uma hora, sendo, então, os corpos de prova mantidos na condição submersa até a data de ruptura.

4.4.4 Metodologia para dispersão dos NTC

Os nanotubos de carbono utilizados nesta pesquisa (comercialmente chamados de NC 7000) são comercializados no estado de pó quando *in natura* e, portanto, necessitam de dispersão em meio aquoso para aumentar sua eficiência.

Essa foi uma das principais conclusões de Marcondes (2012) que constatou a importância que a dispersão possui na redução do desvio padrão das amostras estudadas por ele. O pesquisador estudou 12 formas de dispersão em meio aquoso, sendo essa uma grande contribuição do seu trabalho.

Para a dispersão foi utilizada metodologia específica, denominada sonificação. Por definição, sonificação é o procedimento que utiliza a energia das ondas sonoras, mais comumente o ultrassom aplicado sobre um determinado meio aquoso, para promover reações de catalisação, extração de componentes e redução do tamanho das partículas, por exemplo. Possui aplicações industriais na área de tintas e pigmentos e nas indústrias que trabalham com biotecnologia. Na área farmacêutica é utilizada na produção de emulsões, cremes e loções.

O equipamento utilizado para dispersão do NTC é denominado sonicador e é normalmente utilizado para limpeza de acessórios e instrumentos médicos, odontológicos e laboratoriais. Esta utilização se deve a sua capacidade de soltar partículas aderidas às paredes de recipientes por meio de cavitação.

O equipamento utilizado para dispersar os nanotubos nesta pesquisa é encontrado comercialmente pelo nome de lavadora ultrassônica, modelo L-100 da marca Schuster de propriedade da UFPR. As características técnicas apresentadas pelo fabricante relatam que o equipamento possui frequência ultrassônica de 42.000 Hz e ciclo máximo de operação de até oito minutos.

O ciclo máximo é o tempo em que o equipamento opera automaticamente, antes que desligue e tenha que ser reprogramado. Neste estudo foi adotada a utilização de cinco ciclos completos de oito minutos, totalizando 40 minutos de dispersão. A metodologia e o tempo de dispersão também foram baseados nos estudos de Marcondes (2012).

Como procedimento, foi adotado o método indireto de dispersão, que consiste em adicionar água no equipamento e acondicionar béqueres que contenham a solução a ser dispersa no seu interior. A Figura 52 apresenta a

esquerda, imagem A, os materiais da solução e a maneira como se desenvolvia o processo de dispersão, da esquerda para a direita: aditivo superplastificante, NTC e água. Na mesma figura, à direita, B, são mostrados quatro béqueres acondicionados no sonicador durante a execução da dispersão.

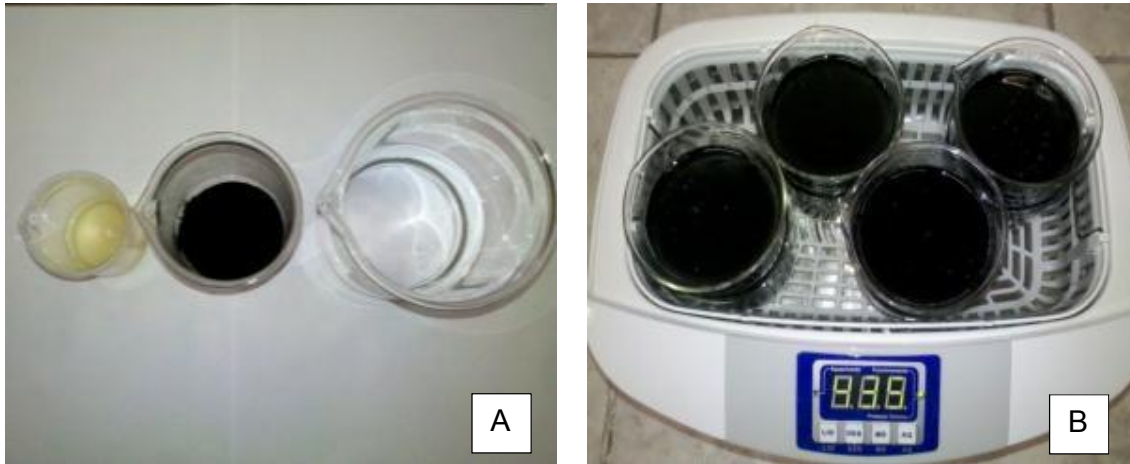


Figura 52. Componentes da solução e processo de dispersão da solução.

Na Figura 53 são apresentadas duas imagens da solução de aditivo superplastificante, água e NTC. A imagem da esquerda, A, apresenta o momento antes da realização do processo de dispersão e a segunda imagem, B, após os cinco ciclos concluídos. É possível notar que após o término do processo de dispersão, a solução apresenta aspecto mais homogêneo e está totalmente opaca, imagem da direita.

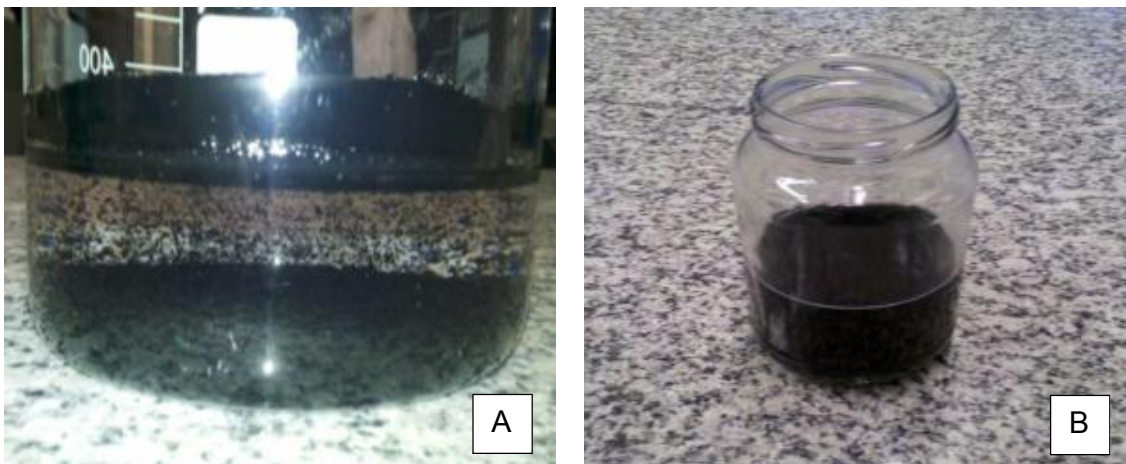


Figura 53. Solução antes e após dispersão por sonificação.

5 DOSAGEM DO CONCRETO

A dosagem do Concreto de Ultra - Alta Resistência (CUAR) aplicada nesta pesquisa foi dividida em duas etapas distintas e complementares, são elas: elaboração do concreto de referência (subitem 5.1) e adaptação deste concreto à adição dos nanotubos de carbono (subitem 5.2). O motivo da necessidade desta adaptação é relatado de maneira detalhada ao final do capítulo.

Portanto, o quinto capítulo deste estudo não apresentará resultados envolvendo a adição de nanotubos de carbono ao concreto, ficando restrito apenas a elaboração do concreto utilizado como referência. A inclusão dos NTC será abordada no sexto capítulo deste trabalho.

Decidiu-se explicar a metodologia específica empregada para a dosagem do concreto e, simultaneamente aos procedimentos expostos, apresentar os resultados obtidos por meio gráfico, de maneira a deixar claros o método empregado e as decisões tomadas durante o processo de dosagem.

5.1 Dosagem do concreto de ultra - alta resistência de referência

Diferente do que acontece com os concretos convencionais, ou mesmo com os concretos de alta resistência que possuem inúmeros métodos nacionais e internacionais consagrados para sua dosagem¹⁰, os concretos de ultra - alta resistência não possuem metodologia específica para seu proporcionamento.

Sendo assim, inicialmente, pode-se pensar em utilizar um método de dosagem para argamassas, visto que os concretos de ultra - alta resistência não possuem agregados graúdos em sua composição. No entanto, segundo Carasek (2009), ainda não se dispõe no cenário nacional, apesar dos esforços de centros tecnológicos do país, métodos totalmente consagrados e difundidos para este fim.

Mesmo que seja utilizado um método internacional para dosar o concreto de ultra - alta resistência como se fosse argamassa, diante da diferença de finalidade e de aplicação destes dois materiais tão distintos, não parece adequado abordar tal procedimento.

¹⁰ Para concretos convencionais se pode citar o método IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1993). Já para os CAR são exemplos Mehta e Aïtcin (1990); O'Reilly Díaz (1998); Aïtcin (2000).

Como apresentado, muito pouco é relatado na bibliografia a respeito da dosagem destes concretos, em geral, os trabalhos publicados não apresentam o método empregado para a dosagem, somente o traço final utilizado. Estes traços, em regra, diferem muito pouco dos traços apresentados pelos pesquisadores pioneiros no desenvolvimento dos CUAR, dentre os quais se podem citar, por exemplo, Cheyrezy, Maret e Frouin (1995) e Dugat, Roux e Bernier (1996). Isso reflete a tendência dos trabalhos posteriores a estes estudos pioneiros serem de ordem racional e empírica, ou seja, não apresentarem formulações matemáticas para seu proporcionamento.

Na contra partida da dosagem prática do concreto, abordando apenas o campo teórico, Carneiro e Cincotto (1999) apresentam um método para dosagem de argamassas que se baseia nos princípios de empacotamento de partículas granulares. Por definição, o perfeito empacotamento das partículas acontece quando os espaços entre as frações maiores são preenchidos pela classe de partículas imediatamente inferior, formando uma distribuição granulométrica o mais homogênea possível (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Tais métodos se baseiam no princípio de aumentar a densidade do concreto através de uma curva granulométrica contínua, o que, em teoria, proporcionaria um material mais denso e, portanto, mais resistente. Vanderlei (2004) apresenta metodologia semelhante para dosagem do concreto de Pós-Reativos (um tipo de CUAR), obtendo bons resultados quanto a resistência mecânica, da ordem de 200 MPa.

No entanto, estes métodos teóricos apresentam pontos desfavoráveis para a dosagem dos concretos de ultra - alto desempenho, dentre os quais se destacam:

- Consideram todas as partículas da mistura plenamente esféricas e de granulometria contínua, o que de fato não acontece na prática com a maioria dos materiais. O material que se assemelha mais a esta descrição é a sílica ativa, por possuir grãos com predominância esférica;
- Pelo fato do concreto conter em sua constituição materiais aglomerantes como o cimento e a sílica ativa, estes deveriam ter importância diferenciada na dosagem, por serem os responsáveis pela formação dos produtos de hidratação no concreto. Tais métodos não enxergam esta diferenciação, tratando todos os materiais de maneira igualitária. Essa falha impossibilita o proporcionamento

adequado e completo de todos os materiais da mistura, pois a aplicabilidade do método fica restrita apenas aos materiais inertes da mistura (agregados);

- Mesmo que fossem utilizados apenas os materiais inertes da mistura, o processo de separação dos percentuais das faixas granulométricas, variável de resposta dos métodos, tornaria o concreto pouco atrativo pelo ponto de vista comercial, e provavelmente inviabilizaria o processo industrial de confecção em larga escala.

De fato, o concreto de ultra - alta resistência comercializado pela Lafarge® possui apenas duas faixas granulométricas, sendo uma denominada mais grossa e outra mais fina. A granulometria exata, apresentando o módulo de finura de cada fração, não é divulgada nos catálogos técnicos da empresa, mas, em geral, o agregado miúdo está dentro de uma faixa granulométrica de 150 a 600 μm (GRAYBEAL, 2006).

Por todos os motivos aqui apresentados, para fins desta pesquisa, decidiu-se realizar uma metodologia de dosagem racional e empírica do concreto de ultra - alta resistência em estudo, utilizando os seguintes princípios básicos:

- Utilizar a menor quantidade de aditivo superfluidificante possível, devido ao alto custo do material. A porcentagem de aditivo utilizado deve permitir adensamento adequado do material em estudo, ao menos 200 mm de espalhamento, utilizando a mesa para índice de consistência como indicativo de fluidez.
- Com base no teor de aditivo superfluidificante e da quantidade de aglomerante ideal (melhor custo/benefício¹¹ que possibilite adensamento ao material), foi fixada a menor relação a/aglo possível, visando possibilitar ao concreto atingir altas resistências mecânicas (da ordem de 150 MPa);
- Após chegar a um proporcionamento adequado para o concreto em estudo, isto é, um traço que atingisse resistência à compressão elevada e boa fluidez (da ordem de 200 mm de espalhamento), este foi considerado o concreto referência. Ao concreto de referência foram adicionados os NTC.

¹¹ Relação obtida entre o custo em reais e a resistência axial do concreto, R\$/MPa.

Para a avaliação da trabalhabilidade foram utilizadas as informações apresentadas na Tabela 24, onde são apresentadas quatro faixas de classificação da fluidez para os CUAR. Este critério, originalmente proposto por Ahlborn, Peuse e Misson (2008), foi adotado para categorizar os concretos desenvolvidos nesta etapa da pesquisa. A adaptação consistiu na inclusão da quarta faixa classificatória, e foi baseada em experiências pré elaboração dos ensaios, onde se tentava adensar concretos com fluidez muito baixa (da ordem de 160 mm) e se verificavam grandes falhas de moldagem.

Os resultados dos ensaios mecânicos apresentados neste capítulo estão apresentados de maneira detalhada no Anexo A deste trabalho.

TABELA 24. FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO DA FLUIDEZ NOS TRAÇOS DE CUAR.

Procedimento	Muito fluido (A)	Fluido (B)	Consistente (C)	Impraticável (D)
Média após 30 quedas da mesa de consistência	> 250 mm	250 mm a 200 mm	200 mm a 160 mm	< 160 mm*

FONTE: Adaptado de Ahlborn, Peuse e Misson (2008).

* Impraticável do ponto de vista laboratorial.

5.1.1 Determinação do teor de aditivo redutor de água

O primeiro passo para a dosagem experimental do concreto de ultra - alta resistência foi a verificação do comportamento de vários teores do mesmo aditivo redutor de água (também chamado de superfluidificante), quando adicionado a uma pasta confeccionada com o cimento utilizado na pesquisa. O aditivo em estudo foi apresentado no quarto capítulo, subitem 4.3.5.

A NBR 11768 (ABNT, 2011) define este tipo de aditivo como aquele que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite reduzir seu conteúdo de água, ou, ainda, como aquele aditivo que, sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez. Este tipo de aditivo pode ainda produzir estes dois efeitos de maneira simultânea. Este é o objetivo da sua incorporação nos CUAR.

No entanto, por ser uma adição química que modifica propriedades no estado fresco dos concretos, caso sua adição seja realizada sem estudo prévio, a utilização em excesso pode prejudicar características no estado endurecido do material. Isso acontece quando o percentual de aditivo ultrapassa o teor de saturação da mistura. Este teor varia normalmente entre 0,05% a 5,0% da massa dos materiais cimentícios (HARTMANN, JEKNAVORIAN, SILVA e BENINI, 2011).

De fato, diversos autores realizam estudos envolvendo compatibilização de cimentos com aditivos. Isso porque o aditivo necessita ter elevada compatibilidade com o cimento e, de preferência, deve-se estudar seu ponto de saturação através de métodos como o funil de Marsh, NBR 7682 (ABNT, 2003)¹², ou o cone de Kantro (FREITAS, 2005).

Problemas oriundos da incompatibilidade entre estes dois materiais tornam-se perceptíveis pela rápida perda de abatimento ou pela baixa fluidez do concreto no estado fresco, o que compromete o adensamento do material (HARTMAN, *et al.* 2010).

Para os Concretos de Alta Resistência (CAR), material mais próximo em termos de desempenho mecânico ao CUAR em estudo, três trabalhos desenvolvidos no Programa de Pós Graduação em Engenharia em Construção Civil (PPGECC) da UFPR realizaram este tipo de verificação. Mendes (2002) estudou a influência de três tipos distintos de agregado graúdo para confecção de CAR. O pesquisador observou que a taxa ótima de aditivo a base de naftaleno sulfonado, para o concreto por ele estudado, foi de 1,20%, em relação à massa do cimento tipo CPV – ARI. Freitas (2005) estudou diferentes métodos para dosagem para CAR e, realizando procedimento semelhante a Mendes, obteve como dosagem ótima de aditivo a base de éter carboxílico foi 0,40%, com relação à massa do mesmo tipo de cimento utilizado por Mendes. Raeder (2005), verificando a influência da utilização de cimento aluminoso em concretos de alta resistência, encontrou o ponto de saturação do aditivo a base de policarboxilatos em 0,35%, utilizando o teor de 10% de adição de sílica ativa, em relação à massa do cimento.

¹² A NBR 7682/2003 foi cancelada pela ABNT no dia 20/02/2013 e substituída pela NBR 7681 – 2/2013. A modificação aconteceu após o término dos ensaios do programa experimental desta pesquisa.

No entanto, estes três trabalhos comprovam apenas a utilização dos ensaios de compatibilização para definir procedimentos experimentais de dosagem de concretos. Isso porque todos os parâmetros reológicos se alteram quando se trata dos concretos de ultra - alta resistência, devido a sua composição muito específica, com alto teor de materiais finos (cimento, pó de quartzo e sílica ativa) e baixíssima relação água/cimento.

Evidência desta diferença é exposta na Tabela 25, que apresenta quatro trabalhos de relevância neste tipo de concreto e os respectivos teores de aditivo superfluidificante utilizados em cada um deles.

TABELA 25. TEORES DE ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE UTILIZADO NOS CUAR.

Autor/Companhia	Teor de aditivo (%) (relação à massa do cimento)	Base química
Feylessoufi <i>et al.</i> (1996)	4,4	Melamina sulfonato
Yazici <i>et al.</i> (2009)	6,6	Policarboxilato
Vanderlei (2004)	3,0	Policarboxilato
Lafarge (Ductal [®] – FM)	4,0 a 4,5	Policarboxilato

Pela observação da Tabela 25, verifica-se que o teor de aditivo praticado para os CUAR, em geral, é muito superior ao empregado nos concretos de alta resistência, citados anteriormente.

Nesta etapa da pesquisa, foram testados seis teores de aditivo na pasta de cimento, com o auxílio do funil de Marsh, NBR 7682 (ABNT, 2003). A faixa superior de estudo foi estipulada em 3,0% com relação à massa de cimento em virtude do alto custo do material. O ensaio foi realizado utilizando uma relação a/c fixa em 0,50. As leituras aconteceram aos 10, 30, 60, 90 e 120 minutos após ter sido adicionada água e aditivo ao cimento. O cimento utilizado para a execução deste ensaio foi apresentado no subitem 4.3.1. A água contida no aditivo foi descontada da água adicionada a cada percentual estudado.

A Figura 54 apresenta os resultados obtidos neste ensaio, onde foi traçado no eixo das ordenadas o tempo de escoamento do concreto, apresentado em segundos, bem como no eixo das abscissas foi plotado o tempo de medição individual dos teores de aditivos, em minutos. A mesma figura apresenta o funil

padronizado que era preenchido com a pasta. O ensaio era iniciado cinco minutos após a incorporação de água com aditivo ao cimento. Para a medição do período de escoamento, foi utilizado um cronômetro, que media o tempo decorrido entre o início da passagem do material pelo orifício inferior do funil, até o momento final da passagem pelo mesmo, desprezando o gotejamento final de material.

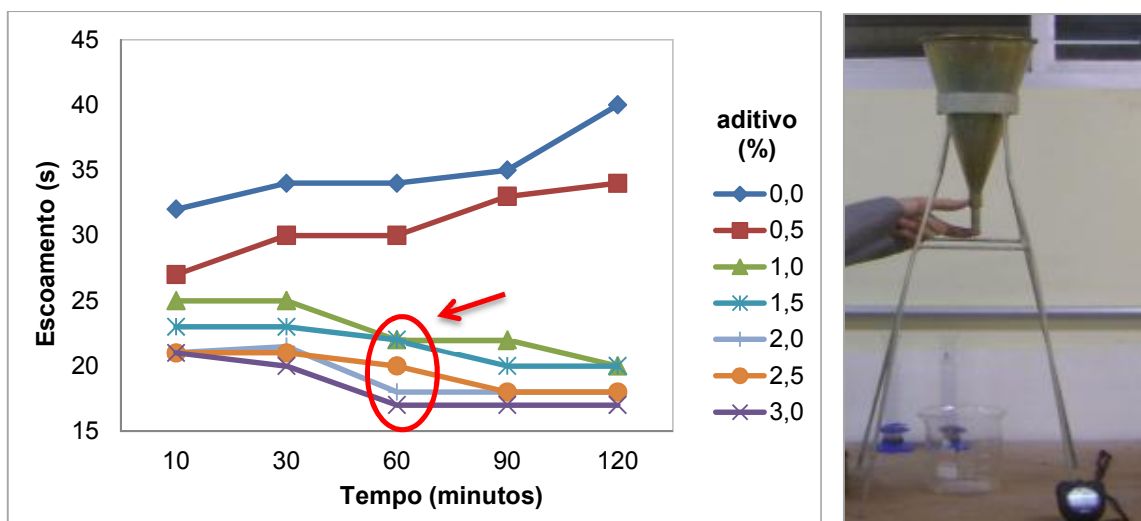


Figura 54. Influência do teor de aditivo na pasta de cimento e imagem do equipamento utilizado.

Pela análise dos resultados do ensaio, pode-se verificar que existe uma tendência de que as pastas sob a influência do aditivo mantenham a fluidez por um tempo maior do que a pasta sem esta adição (referência). A pasta de referência perdeu 20% do tempo da sua fluidez inicial, comparado à primeira observação, realizada aos 10 minutos, com a última verificação, aos 120 minutos. O percentual de aditivo de 0,50% obteve a mesma perda de fluidez no período analisado, 20%.

A partir da inclusão de 1,0% de aditivo, até o limite superior de adição, 3,0%, foi percebido aumento considerável na fluidez do material, verificado pela passagem mais rápida da pasta pelo funil. Este ganho de fluidez variou de 14,3% até 23,5%, respectivamente. Observou-se ainda que o melhor desempenho do aditivo em termos de trabalhabilidade aconteceu aos 60 minutos (ver Figura 54). A mesma trabalhabilidade se manteve praticamente constante até a última verificação realizada com 120 minutos, para estes teores de adição.

A partir da inclusão de 2,0% de aditivo, observou-se pouco ganho relativo de viscosidade aparente na pasta. A inclusão de mais aditivo a partir deste ponto não apresentou ganho significativo de fluidez do material em análise.

Como nessa primeira experiência não foi realizada a inclusão de sílica ativa na mistura, o teor de 2,0% de aditivo com relação à massa de cimento foi tomado como base para o início dos estudos. No entanto, pretendia-se que, após a inclusão da sílica ativa, o teor de aditivo incorporado tenderia naturalmente a um aumento substancial, visto que a SA possui grande superfície específica e, dependendo do teor de adição empregado na mistura, ocasionaria dificuldade na trabalhabilidade do concreto. Esta dificuldade será observada na próxima etapa do trabalho de dosagem, que consistiu na definição do teor de aglomerante a ser utilizado no traço de referência. O procedimento adotado será apresentado a seguir.

5.1.2 Determinação do teor de aglomerante

O passo seguinte na busca do proporcionamento dos materiais para o concreto de ultra - alta resistência de referência foi à investigação da quantidade de aglomerante a ser utilizada na mistura.

Enquanto materiais aglomerantes, para fins deste trabalho, entendeu-se a necessidade de pesquisar a influência de diferentes teores de cimento e de sílica ativa na mistura.

O consumo destes dois materiais é muito elevado neste tipo de concreto (verificar item 2.2.1 para o teor de cimento). As dosagens apresentadas por diversos autores apresentam altas taxas de sílica ativa em sua composição, conforme apresenta a Tabela 26.

Aïtcin (2000) relata que, em teoria, a dosagem ideal de sílica ativa necessária para fixar todo o potencial de cal liberada pela hidratação do C_3S e do C_2S estaria entre 25 a 30% em relação à massa do cimento.

Devido ao alto valor comercial dos materiais aglomerantes, foi realizado um estudo experimental que tomou por base o traço experimental desenvolvido por Henche e Alessi (2009), quando os autores estudaram um tipo específico de CUAR, o concreto de pós-reativos.

TABELA 26. TEORES DE SÍLICA ATIVA INCORPORADOS AOS CUAR.

Autores / ano	Teor de adição de sílica ativa (%)	Resistência à compressão f_{c28} (MPa)
Dugat, Roux e Bernier (1996).	25	194 - 203
Long, Wang e Xie (2002).	10 - 30	151 - 213
Biz (2001)	20	176
Vanderlei (2004)	24	190 - 205

FONTE: Presente estudo.

A Tabela 27 apresenta o traço desenvolvido pelos pesquisadores HENCHE e ALESSI (2011). O consumo de cimento deste estudo foi 734 kg/m³.

TABELA 27. TRAÇO DE REFERÊNCIA PARA O ESTUDO DO CUAR.

Material	Relação em massa	Consumo kg/m³
Cimento	1,000	734,00
Sílica ativa	0,250	183,50
Pó de quartzo	0,306	224,60
Agregado miúdo	1,475	1082,65
Aditivo (%)	0,040	29,36
Relação a/c	0,220	-
Relação a/aglo	0,176	-

FONTE: Henche e Alessi (2011).

É importante salientar que no presente estudo experimental houve uma concentração de esforços para melhorar a trabalhabilidade do concreto desenvolvido pelos autores citados. Isso porque o espalhamento na mesa para índice de consistência, obtido pelo concreto desenvolvido por Henche e Alessi (2011), foi de 170 mm.

O presente estudo visou aperfeiçoar a utilização dos materiais reativos da mistura – cimento e sílica ativa como aglomerantes e também o pó de quartzo. Conforme explicado no subitem 2.3.1, o pó de quartzo foi considerado reativo, mas não aglomerante, neste trabalho, devido à formação dos cristais de xonotlite, apresentadas por Cheyrezy, Maret e Froin (1995). Houve também um esforço para diminuir a quantidade de aditivo superplastificante, devido ao seu alto custo.

O estudo envolvendo o custo do material, apesar de meramente comparativo, utilizou os valores apresentados na Tabela 28 e extraídos do trabalho de Bianchini, 2010. Houveram dois complementos na tabela de valores, são eles: pó de quartzo, de acordo com valores praticados pela Mineração Jundu para a tonelada de pó de quartzo finamente moído, no ano de 2010; e o valor do m³ da água praticado pela SANEPAR no ano de 2013.

TABELA 28. CUSTO ESTIMADO DAS MATÉRIAS PRIMAS EMPREGADAS NA MISTURA.

Material	Valor (R\$)	Unidade de venda	R\$/kg
Cimento	290,00	Tonelada	0,290
Sílica ativa	1.300,00	Tonelada	1,300
Pó de quartzo	309,00	Tonelada	0,309
Areia natural	45,00	m ³	0,038
Aditivo	11,30	kg	0,011
Água	2,71	m ³	0,003

FONTE: Bianchini, 2010.

Para o cálculo do valor do agregado miúdo foram consideradas as informações apresentadas na Tabela 29 e também foram retirados do trabalho desenvolvido por Bianchini, 2010.

TABELA 29. DADOS DO AGREGADO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO CUSTO R\$/M³.

Resultados médios do agregado miúdo empregado	
Umidade de recebimento	6 %
Coeficiente de inchamento	23 %
Massa unitária	1,44 kg/dm ³

FONTE: Bianchini, 2010.

Foram fixados todos os materiais não aglomerantes da mistura, tornando-os fatores controláveis do processo. O objetivo foi avaliar os efeitos da adição e da substituição da sílica ativa no traço de referência. Para cumprir este objetivo, foram coletados dois elementos durante o ensaio, são eles: fluidez no estado fresco e resistência à compressão axial no estado endurecido. Com estes dois dados, foram traçados dois diagramas de dosagem, um somente para a adição de sílica ativa na mistura e outro com os valores relativos à substituição de cimento por sílica ativa.

Para comparar os resultados, foi elaborado um traço de referência, sem a adição de sílica ativa. A partir deste traço, foram adicionados (AD) percentuais de sílica ativa (SA) de 5% em 5%, até alcançar os 30% da adição, limite superior de ensaio. A Tabela 30 apresenta os traços em massa utilizados na adição da SA ao concreto. O teor de 2% de aditivo superplastificante com relação à massa do cimento foi estipulado no item 5.1.1 e utilizados em todos os traços.

TABELA 30. ESTUDO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO.

Dosagem	Cimento	Sílica Ativa	Pó de quartzo	Agregado	Água	a/c	a/aglo **	Consumo cimento	Fluidez	Custo/ m ³	Relação
	Unitário							kg/m ³	mm	R\$	R\$/MPa
Ref.	1	0,000	0,306	1,475	0,220	0,220	784,4	290	346,3	3,92	
AD-05%	1	0,050	0,306	1,475	0,220	0,210	774,2	330	392,1	4,15	
AD-10%	1	0,100	0,306	1,475	0,220	0,200	764,1	320	436,7	3,89	
AD-15%	1	0,150	0,306	1,475	0,220	0,191	754,0	275	479,9	4,28	
AD-20%	1	0,200	0,306	1,475	0,220	0,183	743,9	180	521,9	4,36	
AD-25%	1	0,250	0,306	1,475	0,220	0,176	734,0	170	562,6	4,63	
AD-30%	1	0,300	0,306	1,475	0,220	0,169	724,3	160	602,2	5,06	

FONTE: Presente estudo. * AD: Adição de sílica ativa a mistura em relação à massa de cimento. ** Aglo = cimento + Sílica Ativa.

O consumo de aglomerante para esta situação de análise variou de 583,8 a 549,4 kg/m³. A Figura 55 apresenta os resultados da adição de sílica ativa ao concreto de referência. O gráfico de eficiência foi construído utilizando a razão entre o custo para confecção de um m³ de concreto pelo resultado da resistência mecânica aos 28 dias em MPa. Se traduz no custo para atingir um MPa de resistência mecânica para cada teor de adição, sendo preferível, neste caso, valores de ordem menor.

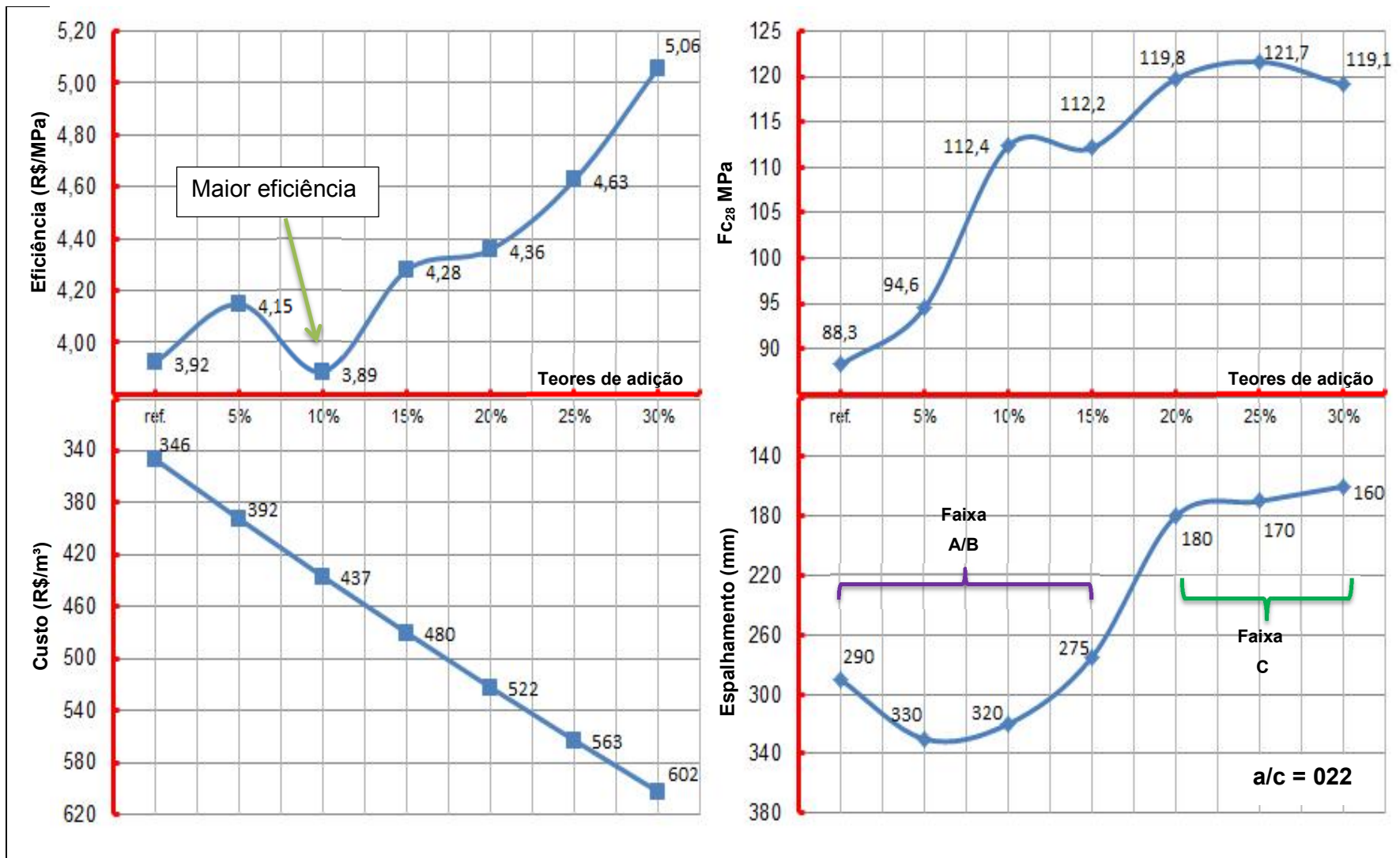


Figura 55. Estudo do teor de sílica ativa em adição ao cimento.

Pode-se notar que a adição de sílica ativa ao concreto, de maneira geral, foi benéfica para a elevação da resistência mecânica dos traços em estudo.

Foi possível concluir ainda que a fluidez do concreto aumentou com a adição de 5% de SA (traço AD5%), atingindo os 330 mm de espalhamento em relação ao traço de referência. Incremento na fluidez foi também verificado na adição AD10%, apresentando 320 mm. A partir da adição AD15%, a fluidez apresentou-se menor de maneira gradativa, até atingir os 170 mm de espalhamento.

Com relação ao custo estimado de confecção deste concreto, verifica-se que mesmo o concreto de referência apresenta alto custo de confecção, 346,31 R\$/m³. Devido ao alto custo da sílica ativa o incremento no custo do concreto foi significativo para o traço AD30%, representando 57% mais caro. Por este motivo o concreto que apresentou o melhor custo/benefício e ainda permaneceu com boa fluidez foi o AD10%. Em termo de trabalhabilidade o traço que possibilitou melhor acondicionamento nos moldes metálicos foi o AD15%, visto que as adições de 5 e 10% apresentaram fluidez muito elevada, tornando difícil sua colocação nos mesmos. O concreto nestes dois casos fluía para fora da forma metálica pelas frestas dos moldes, devido à granulometria muito fina dos materiais da mistura.

Após a incorporação de sílica ativa ao concreto, foi estudada a substituição do teor de cimento pelos mesmos teores de sílica ativa. A Tabela 31 apresenta o traço utilizado nesta segunda etapa do estudo do teor de aglomerante. A Figura 56 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 31. ESTUDO DO EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO.

Dosagem	Cimento	Sílica Ativa	Pó de quartzo	Agregado	Água	a/c	a/aglo	Consumo cimento	Fluidez	Custo/m ³	Relação
								kg/m ³	mm	R\$	R\$/MPa
Ref.	1	0,100	0,000	1,475	0,220	0,220	784,4	290	346,3	3,92	
SUB - 05%	1	0,100	0,050	1,475	0,220	0,220	771,6	330	379,6	4,00	
SUB - 10%	1	0,100	0,100	1,475	0,220	0,220	759,1	190	411,8	3,57	
SUB - 15%	1	0,100	0,150	1,475	0,220	0,220	747,1	170	443,0	3,63	
SUB - 20%	1	0,100	0,200	1,475	0,220	0,220	735,4	165	473,2	3,70	
SUB - 25%	1	0,100	0,250	1,475	0,220	0,220	724,1	130	502,5	4,48	
SUB - 30%	1	0,100	0,300	1,475	0,220	0,220	713,1	115	530,9	5,52	

FONTE: Presente estudo. * SUB: Substituição de cimento por sílica ativa.

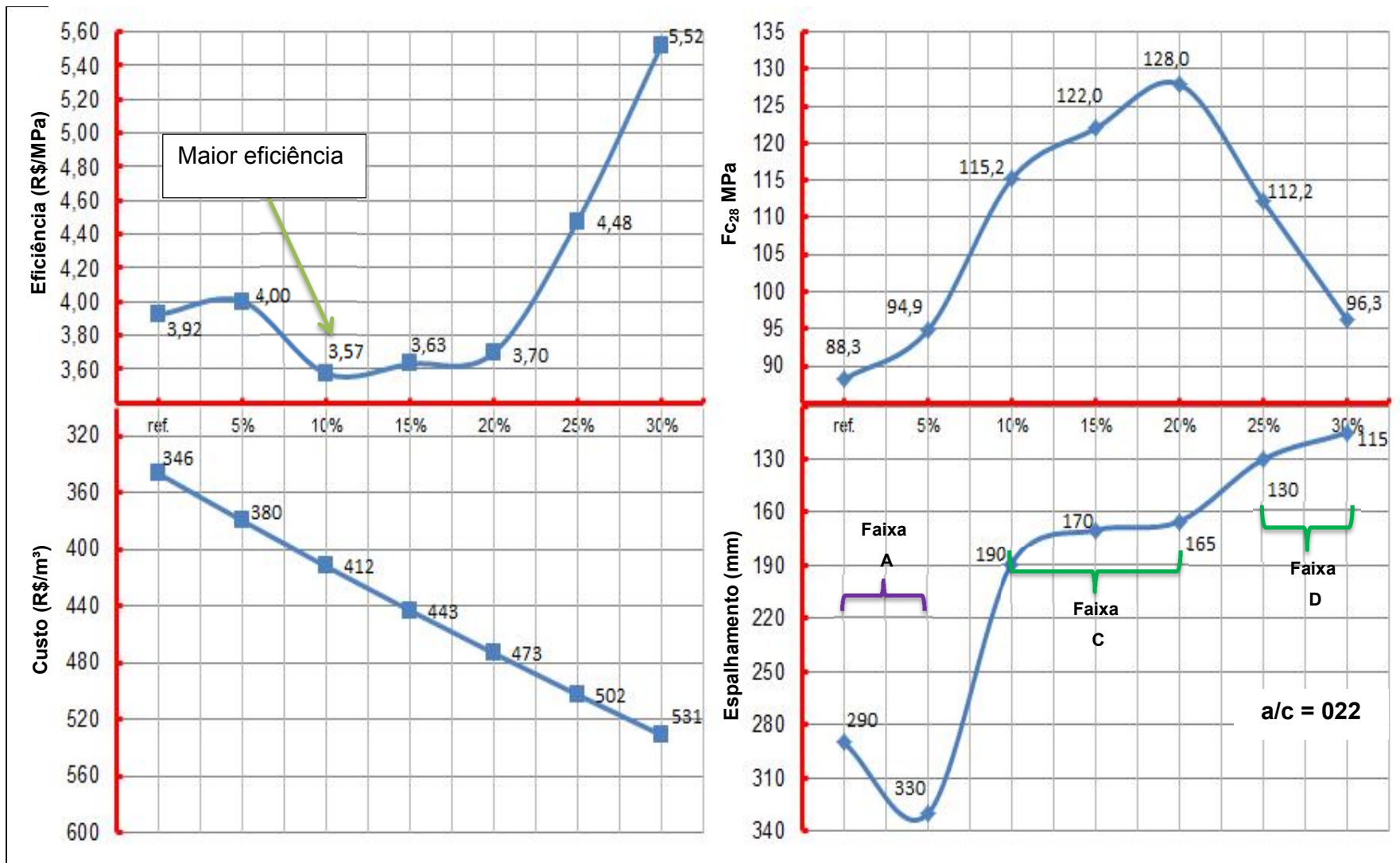


Figura 56. Estudo do teor de sílica ativa em substituição parcial do cimento.

Importante notar que todos os percentuais de substituição foram aumentando gradativamente de 5% em 5%, até o limite superior de 30%. O consumo de aglomerante permaneceu constante neste experimento, em 734 kg/m³.

Pode-se notar que a fluidez do material sofreu grande influência, devido à quantidade proporcional de SA, um material mais fino e que demanda maior quantidade de água da mistura. Até a SUBS10%, o concreto apresentou fluidez dentro da faixa A e B, o que possibilitou bom adensamento. A partir da SUBS15% até a SUBS30%, a trabalhabilidade sofreu grande perda, tornando-se difícil o adensamento do concreto nas fôrmas metálicas.

A diferença relativa entre a resistência mecânica obtida no traço SUBS10%, 122 MPa e o SUBS20%, 125 MPa, não justifica o maior consumo de sílica ativa. Vale ressaltar que os resultados envolvendo a fluidez dos traços apresentados nos dois últimos gráficos (Figura 55 e 56) diferem entre si, tendo em vista um se tratar de adição de SA e outro de substituição na mistura.

Analisando os melhores resultados apresentados na Figura 55 e 56, relativos à esta etapa da pesquisa, se pode concluir que o traço SUBS10%, relativo à substituição de sílica ativa frente ao cimento, foi o que refletiu os melhores resultados no quesito custo/benefício e fluidez.

Frente ao traço AD15%, o traço SUBS10% se mostrou nove por cento mais econômico. Por este motivo, foi fixado para a continuidade dos estudos do traço de referência o percentual de 10% de substituição de sílica ativa sobre a massa de cimento.

5.1.3 Pesquisa do teor de pó de quartzo

Continuando com a elaboração do traço para o concreto de referência, foi pesquisado qual seria o teor ideal de adição do pó de quartzo a mistura. Como teor ideal, seguiu-se a mesma premissa dos estudos envolvendo a sílica ativa e o cimento, aliar altas resistências à máxima trabalhabilidade possível.

Mantendo a quantidade de aditivo fixa em 2,0%, bem como a quantidade de cimento e de sílica ativa obtidas nos ensaios descritos no subitem 5.1.2, foi montada a matriz de ensaios exposta na Tabela 32.

Para verificar a influência deste material na mistura, utilizou-se metodologia semelhante à descrita na adição de SA ao concreto. Acrescentou-se, a um traço de

referência, pó de quartzo de 5% em 5% até o limite superior de 30%. Nesta etapa, já foi utilizado o teor de cimento e sílica ativa determinados no item 5.1.2. Estes parâmetros tornaram-se fixos a partir desta etapa da pesquisa.

TABELA 32. MATRIZ DE ENSAIOS PARA A PESQUISA DO TEOR DE PÓ DE QUARTZO.

Dosagem	Cimento	Sílica Ativa	Pó de quartzo	Agregado	Água	a/c	a/aglo	Consumo cimento	Fluidez	Custo /m ³	Relação
	Unitário							kg/m ³	mm	R\$	R\$/m ³
Ref.	1	0,100	0,000	1,475	0,220	0,220	842,3	290	459,0	5,39	
PQ-05%	1	0,100	0,050	1,475	0,220	0,220	827,4	320	450,9	4,55	
PQ -10%	1	0,100	0,100	1,475	0,220	0,220	813,2	330	443,1	4,66	
PQ -15%	1	0,100	0,150	1,475	0,220	0,220	799,4	270	435,6	4,17	
PQ -20%	1	0,100	0,200	1,475	0,220	0,220	786,0	260	428,3	4,38	
PQ -25%	1	0,100	0,250	1,475	0,220	0,220	773,1	250	421,3	3,78	
PQ -30%	1	0,100	0,300	1,475	0,220	0,220	760,6	215	414,5	3,24	

FONTE: Presente estudo. * SUB: Substituição de cimento por sílica ativa.

A partir dos resultados obtidos com a ruptura dos corpos de prova aos 28 dias, foi construído o gráfico apresentado na Figura 57. É apresentado ainda neste gráfico o espalhamento do concreto, o custo estimado para a elaboração dos traços (considerando apenas os materiais), e a relação custo/benefício de cada concreto.

Pela análise dos resultados, verifica-se que o percentual de 30% de adição de pó de quartzo foi o que alcançou o melhor resultado quanto à resistência à compressão e, mesmo assim, continuou apresentando fluidez adequada no estado fresco, 215 mm de espalhamento na mesa para índice de consistência. Esta trabalhabilidade se mostrou adequada para a moldagem dos corpos de prova, estando na faixa B de classificação, de 200 a 250 mm de espalhamento.

Custando R\$ 309,00 a tonelada, o pó de quartzo é um material caro, quando comparado ao cimento, por exemplo. No entanto, considerando a relação custo/benefício (R\$/MPa), sua inclusão se justifica. Esta relação é interpretada como o custo necessário para obter um MPa, sendo neste caso R\$ 3,24. Devido a esta relação positiva, foi fixado em 30% o teor de adição do pó de quartzo ao concreto de referência proposto, por este ter conquistado a maior eficiência dentre os percentuais testados.

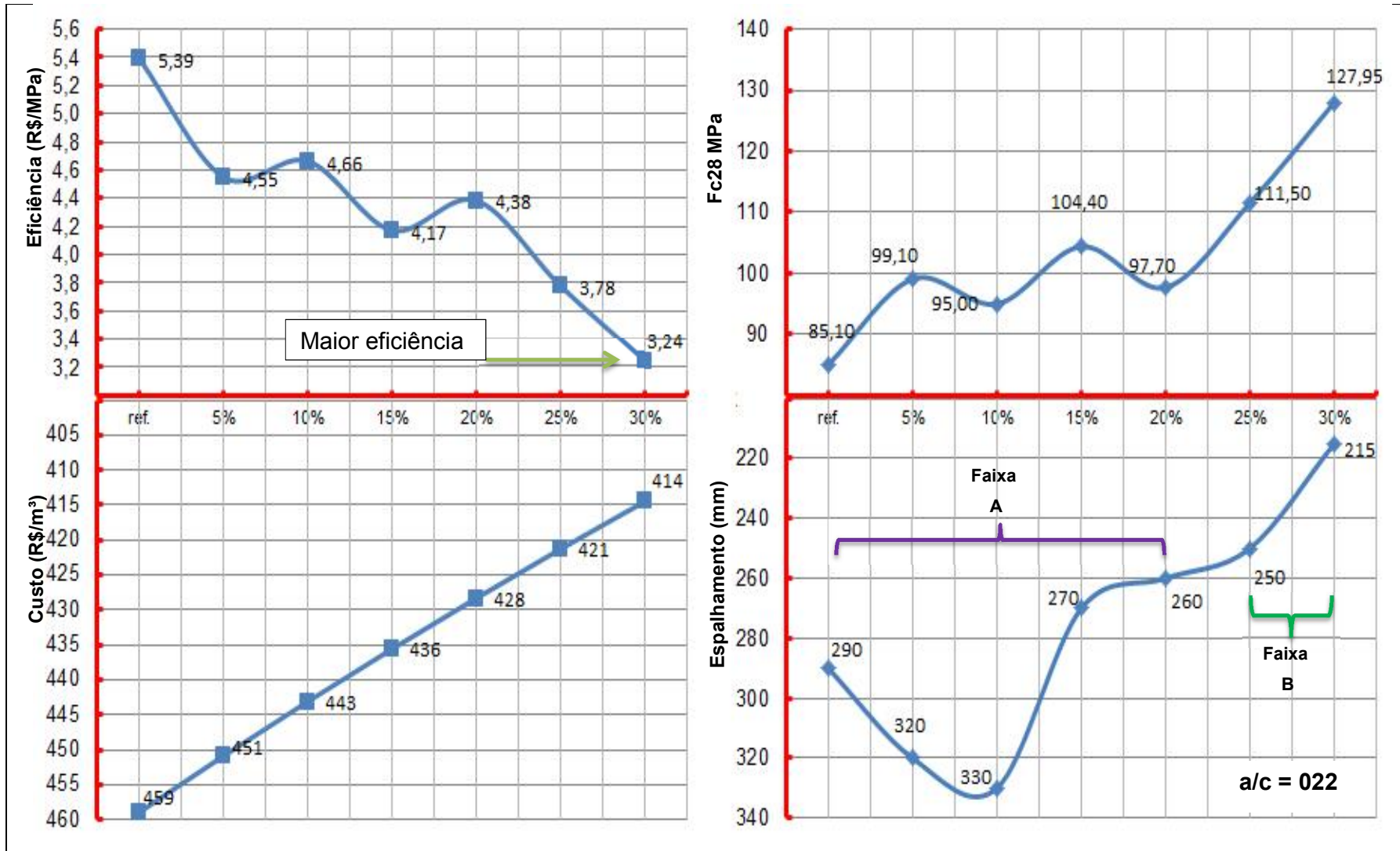


Figura 57. Estudo da adição de pó de quartzo ao concreto.

5.1.4 Traço proposto para o concreto de ultra - alta resistência

Com base nos resultados obtidos através de ensaios experimentais, foi definida a dosagem do concreto de ultra - alta resistência que serviu como referência para a adição dos nanotubos de carbono. A Tabela 33 apresenta o traço em massa e o consumo dos materiais em peso, por uma unidade cúbica. Visando possibilitar incremento na resistência mecânica, no momento da confecção do concreto a relação a/c foi diminuída ainda mais, de 0,22 para 0,20, visto que o concreto estava com boa fluidez, da ordem de 215 mm. Com esta alteração a fluidez passou a ser 200 mm. O peso específico médio do concreto foi de 2.354,09 kg/m³.

TABELA 33. DOSAGEM DESENVOLVIDA PARA O CUAR DE REFERÊNCIA.

Material	Relação em massa	Consumo (kg/m ³)
Cimento	1,000	760,60
Sílica ativa	0,100	76,10
Pó de quartzo	0,300	167,30
Agregado miúdo	1,475	1.121,90
Aditivo (%)	0,020	15,20
Relação a/c	0,200	-
Relação a/aglo	0,225	-

A Tabela 34 apresenta o resultado médio obtido na ruptura de seis corpos de prova confeccionados com o traço desenvolvido para o concreto de referência. O ganho de resistência observado da ruptura com sete dias para o $f_{c\ 28d}$ foi de 8,16%.

TABELA 34. RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CUAR DE REFERÊNCIA

Ensaio realizado	$f_c\ 7d$ (MPa)	$f_c\ 28d$ (MPa)
CP 01	136,7	155,9
CP 02	142,3	149,8
CP 03	145,4	158,8
CP 04	144,9	158,6
CP 05	152,8	158,4
CP 06	145,7	157,1
Resistência à compressão média	144,6	156,4
Desvio padrão (s)	5,23	3,43
Coefficiente de variação (%)	3,62	2,19
Resistência relativa (%)	92,0	100,0

5.2 Adaptação da dosagem do concreto de referência

Apesar dos esforços conferidos para dosar um concreto que pudesse ser trabalhável no estado fresco e que proporcionasse altas resistências mecânicas no estado endurecido, não foi possível prever a resposta do material quando adicionado nanotubos de carbono à mistura.

Por este motivo, após ter chegado ao traço de referência apresentado na Tabela 33, foram realizados ensaios preliminares de incorporação dos NTC. Estes ensaios visaram à familiarização dos pesquisadores com o comportamento do concreto quando da inserção deste novo material na dosagem.

Já nas primeiras experiências de incorporação de NTC ao concreto, foi observada grande dificuldade em realizar a mistura do concreto no misturador planetário, mesmo com baixas taxas de inclusão de NTC, da ordem de 0,10%. As imagens apresentadas na Figura 58 exemplificam o problema encontrado. A Figura 58 (A), de aspecto mais claro, apresenta o concreto de referência, com espalhamento de 200 mm. Quando adicionado NTC a uma taxa de 0,10% com relação à massa de cimento, Figura 58 (B), o espalhamento para o mesmo traço foi zero, após os mesmos 30 golpes na mesa para índice de consistência.

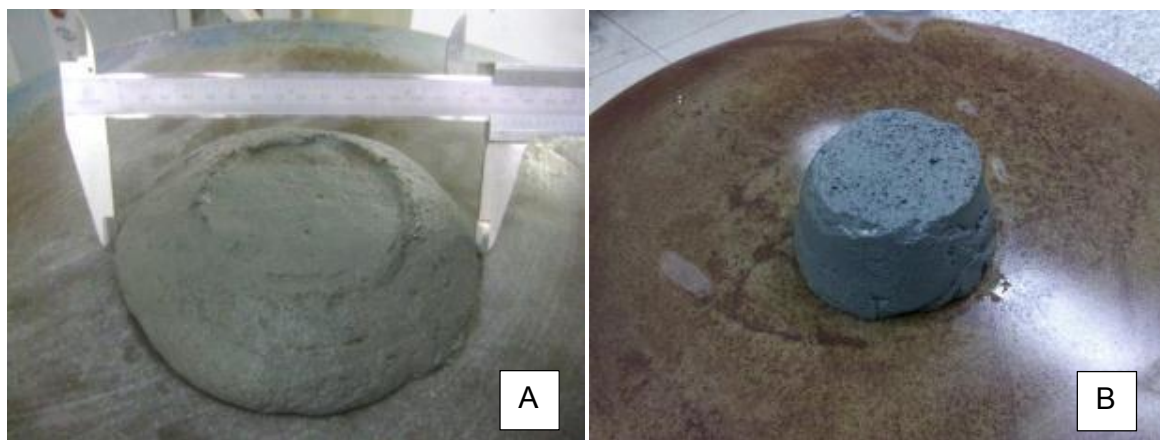


Figura 58. Espalhamento do concreto de referência (A). (B) inclusão de 0,10% de NTC.

Visando possibilitar a confecção do concreto com taxas mais altas de NTC e a moldagem de corpos de prova de maneira a não prejudicar o adensamento e, por consequência, a resistência mecânica do concreto, foram tomadas as seguintes medidas para obter uma melhor trabalhabilidade no estado fresco:

- A relação a/c foi alterada de 0,20, conforme apresentado na Tabela 33, para 0,25. Esta foi a relação a/c mínima que proporcionou o concreto com um maior teor de adição de NTC (0,30%) e ao mesmo tempo moldável. Ainda assim houve certa dificuldade, pois o espalhamento obtido no concreto foi zero quando medido na mesa para índice de consistência;
- Por este motivo, ficou constatada a impossibilidade da utilização da mesa de espalhamento para mensurar a fluidez no estado fresco do concreto com adição de NTC. A medida de trabalhabilidade de todas as séries de ensaio que contaram com a adição dos nanotubos de carbono e também do concreto de referência a partir deste ponto da pesquisa, foi realizada utilizando o método *squeeze-flow*;
- Foi necessário ainda aumentar o teor de aditivo utilizado de 2,0% para 3,0% em relação à massa de cimento. Nos ensaios envolvendo a adição de NTC e o concreto de referência, todos os traços foram confeccionados com o novo teor de 3,0% de aditivo, visando possibilitar a comparação dos resultados obtidos.

Após as modificações necessárias, é apresentado na Tabela 35 o traço de referência desenvolvido ao longo deste capítulo. Os resultados da incorporação dos NTC a este concreto serão apresentados no sexto capítulo.

As principais diferenças entre o traço proposto por HENCHE e ALESSI (2011), apesar do aumento no consumo de cimento, foram relativos à trabalhabilidade do material (aumentando de 170 para 215 mm) e ao custo (reduzindo de R\$ 562,64 para R\$ 414,46, redução em 26% no preço por m³).

TABELA 35. DOSAGEM ADAPTADA PARA O CUAR DE REFERÊNCIA.

Material	Relação em massa	Consumo (kg/m ³)
Cimento	1,000	760,60
Sílica ativa	0,100	76,10
Pó de quartzo	0,300	167,30
Agregado miúdo	1,475	1.121,90
Água	0,250	190,15
Aditivo (%)	0,030	22,81
Relação a/c	0,250	-
Relação a/aglo	0,225	-

6.0 RESULTADOS DA INCORPORAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO AO CONCRETO DE REFERÊNCIA

Os resultados numéricos obtidos nos ensaios mecânicos referentes aos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e ao módulo de elasticidade, encontram-se nos Anexos B, C e D, respectivamente.

Juntamente aos resultados obtidos, são apresentados os parâmetros estatísticos referentes a cada variável analisada. Os resultados finais de cada ensaio da fase de inclusão de NTC ao concreto de referência são apresentados a seguir.

6.1 Resistência à compressão axial

A Figura 59 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndricos 50 x 100 mm para o concreto de referência e também para os concretos com adição de NTC. Cada valor plotado representa a média de seis corpos de prova rompidos em cada uma das duas idades analisadas (f_{c7d} e f_{c28d}).

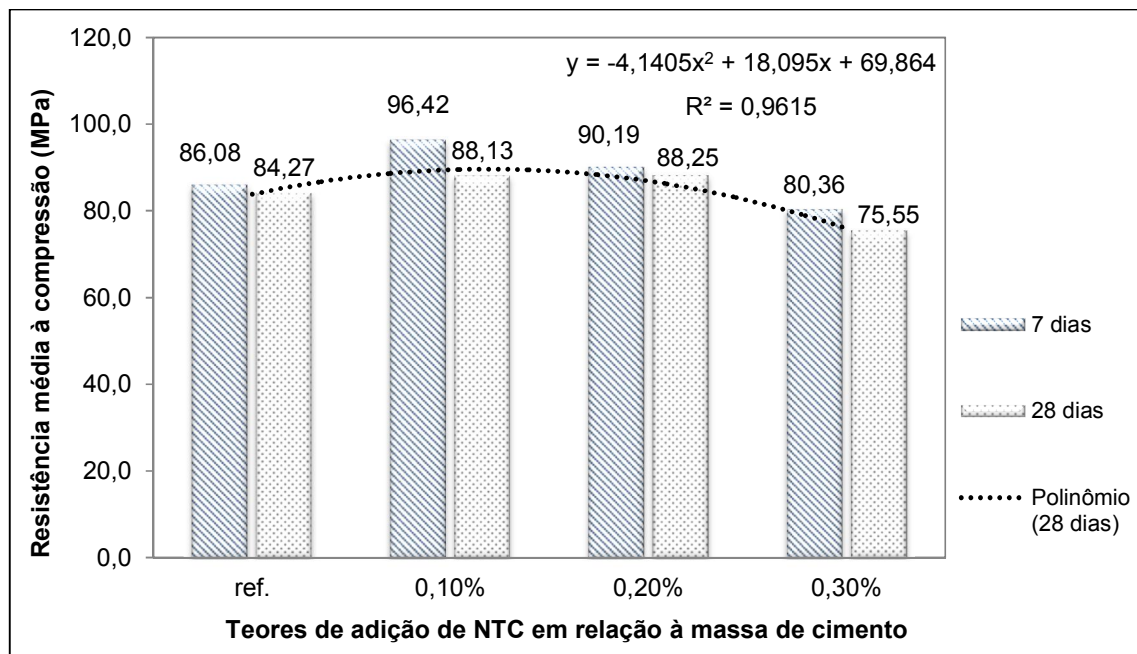


Figura 59. Resultados médios de resistência à compressão axial nos CP's cilíndricos 50 x 100 mm.

Pode-se notar pela análise da Figura 59 que a maior média absoluta obtida, foi verificada com a inclusão de 0,10% de NTC em relação à massa do cimento para a idade de sete dias. Este valor apresentando um leve aumento ao valor da resistência média das amostras do traço de referência.

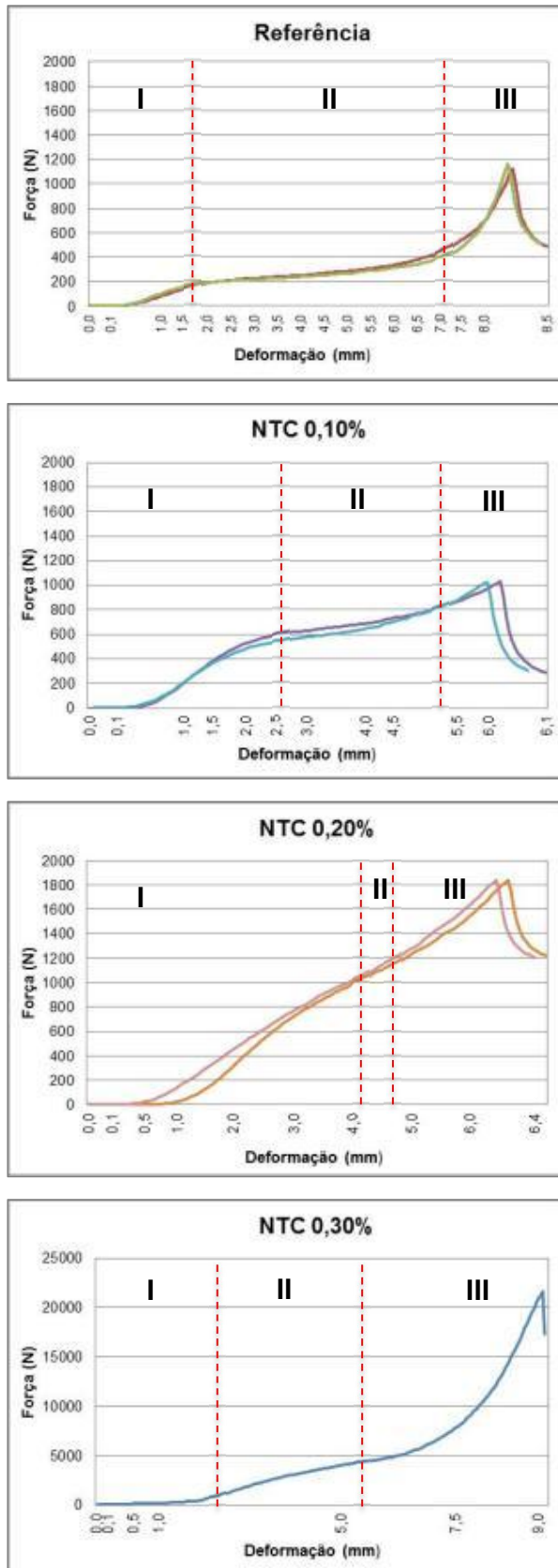
No entanto, não se pode afirmar que o NTC tenha sido benéfico ao concreto de referência na propriedade mecânica resistência à compressão axial. De fato, os percentuais de adição de 0,10 e 0,20%, se mantiveram praticamente estáveis, quando comparados ao concreto de referência. O percentual 0,30% apresentou queda da resistência mecânica, devido principalmente a dificuldades na moldagem e adensamento do concreto nos moldes metálicos.

É perceptível ainda que todas as médias de valores obtidas aos sete dias (f_{c7d}) são maiores que as médias para 28 dias (f_{c28d}). Este fato pode ser explicado pela moldagem em dias diferentes dos corpos de prova ensaiados em cada idade, devido a necessidade de fracionamento do experimento, conforme explicado no subitem 4.1.3. Este fracionamento foi realizado dividindo-se as datas de moldagem das duas idades em análise.

A diminuição da resistência mecânica das amostras não pode ser atribuída apenas ao NTC, mas sim a dificuldades de moldagem dos concretos que continham nanotubos. De fato, a diminuição brusca de fluidez do material quando realizada a inclusão dos nanotubos de carbono, teve de ser considerada. Procurou-se então, através da análise dos gráficos obtidos no ensaio *squeeze-flow*, compreender a diferença do comportamento dos concretos contendo adição de NTC, frente ao concreto de referência.

Um perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de *squeeze-flow* realizado com deslocamento controlado acontece em três estágios. No primeiro (I) ocorre um pequeno deslocamento controlado no material. Em seguida, segundo estágio (II), ocorre um deslocamento intermediário, que caracteriza deformação plástica e/ou fluxo viscoso na amostra. No terceiro e último estágio, ocorre um grande deslocamento e é onde é medido o enrijecimento por deformação (*strain hardening*) (CARDOSO, PILEGGI, JOHN, 2005).

A Figura 60 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de *squeeze-flow* para os concretos com inclusão de NTC mais o concreto de referência. A análise dos gráficos é realizada ao lado de cada gráfico.

Figura 60. Resultados do ensaio *squeeze-flow*.

- No concreto de referência o resultado demonstrou força máxima aplicada igual a 1100 N. A deformação máxima obtida foi de 8,45 mm. Todos os gráficos foram gerados com base em duas medições. São as duas curvas que aparecem nos gráficos.

- No concreto com adição de 0,10% de NTC, são vistos resultados praticamente iguais aos do concreto de referência. A força máxima aplicada foi igual a 1033 N. A deformação máxima obtida foi menor, igual a 6,0 mm. Fica evidente na curva a diminuição do trecho II, referente a deformação plástica.

- No concreto com adição de 0,20% de NTC, a força máxima aplicada foi de 1836 N, demonstrando que o material apresentou maior resistência mecânica. Houve uma diminuição do trecho II e aumento do trecho III, referente ao enrijecimento por deformação do material. A deformação máxima foi de 6,48 mm.

- No concreto com adição de 0,30% de NTC, o trecho III ficou muito mais pronunciado que os demais, demonstrando grande enrijecimento do material. Este comportamento ficou claro no momento da moldagem das amostras. A força máxima aplicada foi de 21.500 N e a deformação foi de 9,6 mm.

6.2 Resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos

A Figura 61 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios de flexão em corpos de prova retangulares 40 x 40 x 160 mm, para o concreto de referência e também para os concretos com adição de NTC. Cada valor plotado representa a média de seis corpos de prova, rompidos em cada uma das duas idades analisadas.

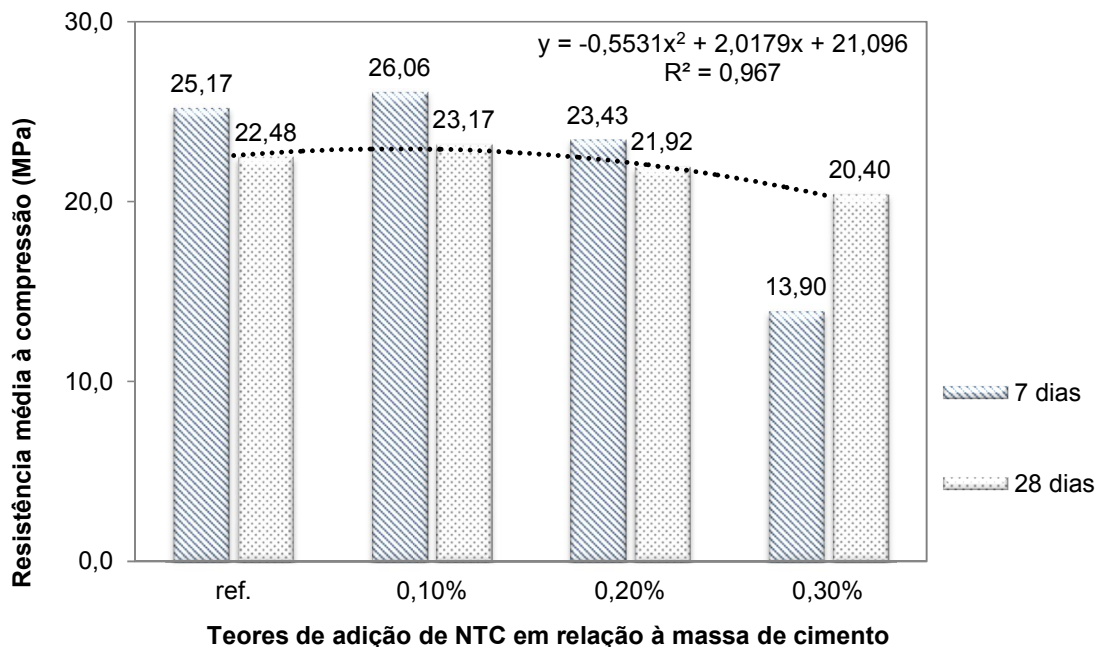


Figura 61. Resultado ensaio de tração na flexão em corpos de prova retangulares.

Pela análise dos resultados é possível notar que os nanotubos de carbono não aumentaram a resistência a tração na flexão das amostras analisadas. Os resultados dos percentuais sob análise foram muito semelhantes aos obtidos no traço de controle. A exceção novamente foi a adição do teor 0,30%. No entanto acredita-se que a explicação para este fenômeno foi, novamente, a dificuldade com o adensamento do concreto.

Neste ensaio também ficou perceptível que todas as médias de sete dias são maiores que as médias para 28 dias. A explicação possível para este fato é a mesma relatada para os corpos de prova do ensaio de resistência à compressão axial.

6.3 Módulo de elasticidade

Os valores do módulo de elasticidade do concreto de referência e dos concretos produzidos com incorporação de NTC são apresentados na Figura 62. Os valores apresentados representam a média de três determinações. Os resultados dos ensaios estão apresentados no Anexo D deste trabalho.

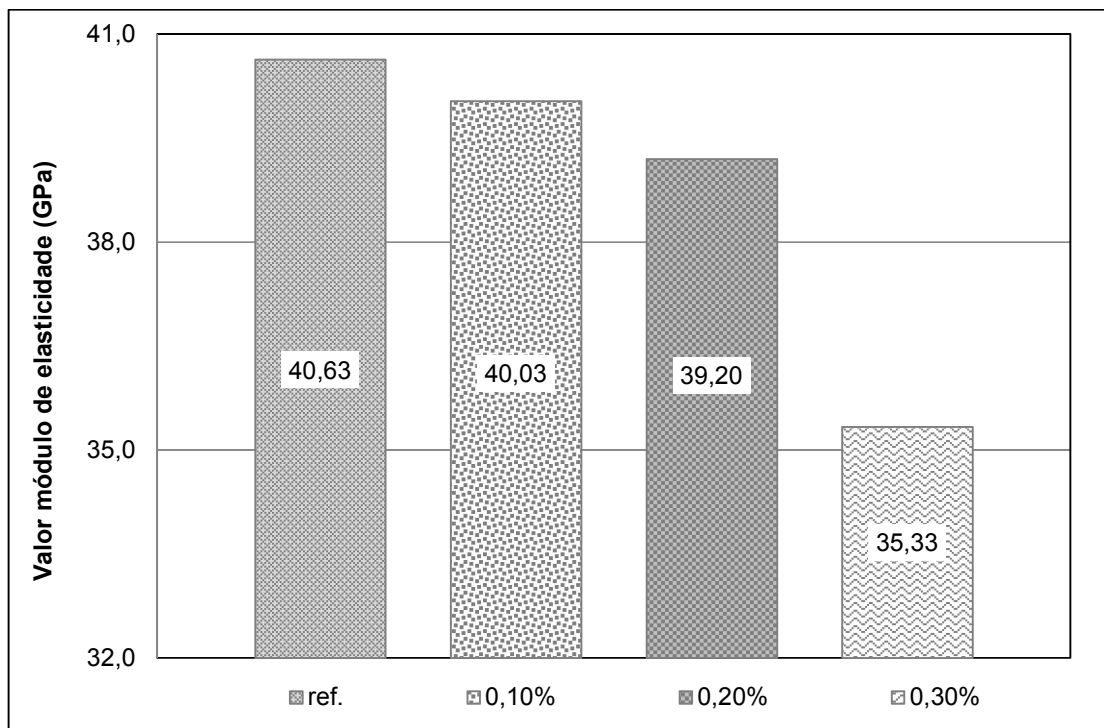


Figura 62. Resultado ensaio de módulo de elasticidade estático – CP cilíndrico.

Os valores do módulo de elasticidade dos concretos de ultra - alta resistência, normalmente, são superiores aos obtidos em concretos convencionais. Na bibliografia são encontrados valores da ordem de 40 GPa até 65 GPa (Graybeal, et al. 2006). Os catálogos da Lafarge apresentam para o CUAR de 120 MPa módulo de elasticidade de 45 GPa.

O resultado obtido no traço de referência condiz, no limite inferior, com os apresentados na bibliografia, ainda que os resultados dos ensaios mecânicos não tenham sido plenamente satisfatórios. Os resultados atingidos, provavelmente devido a dificuldades de adensamento, decaíram na medida em que a taxa de incorporação NTC ao concreto de referência aumentou. Esta conclusão está de acordo com a obtida nos outros ensaios mecânicos apresentados neste estudo.

6.4 Ensaio de retração

Na Figura 63 são apresentados os resultados da retração livre por secagem dos corpos de prova de 25 mm x 25 mm x 285 mm confeccionados sem a adição de NTC (concreto de referência) e com adição de 0,10%, 0,20% e 0,30% do nano tubo de carbono em estudo.

O procedimento do ensaio foi descrito no quarto capítulo, item 4.2.2. Foi realizada a aplicação de dois tipos distintos de cura, são elas: cura térmica a 90°C por 48 horas e cura ambiente controlada a 28°C ± 2°C e umidade relativa do ar 45% ± 3%. Os valores obtidos nas leituras são apresentados no Anexo E deste trabalho.

Os resultados demonstraram que a aplicação de cura térmica limitou a retração dos sete corpos de prova que foram submetidos a procedimento de cura, ao percentual médio de 0,002%.

Assim pode-se dizer que os corpos de prova que passaram por este tipo de tratamento não sofreram retração livre por secagem considerável no período de observação. Este fato confirma a afirmação de alguns autores que argumentam que a cura térmica realizada neste tipo de material elimina a retração por secagem.

Já os oito corpos de prova submetidos à cura ambiente, apresentaram retração por secagem na faixa de 0,022% a 0,072%, conforme apresenta a Figura 63. O sinal negativo, neste caso, representa a retração com base na média do tamanho original dos corpos de prova em estudo para cada percentual em estudo.

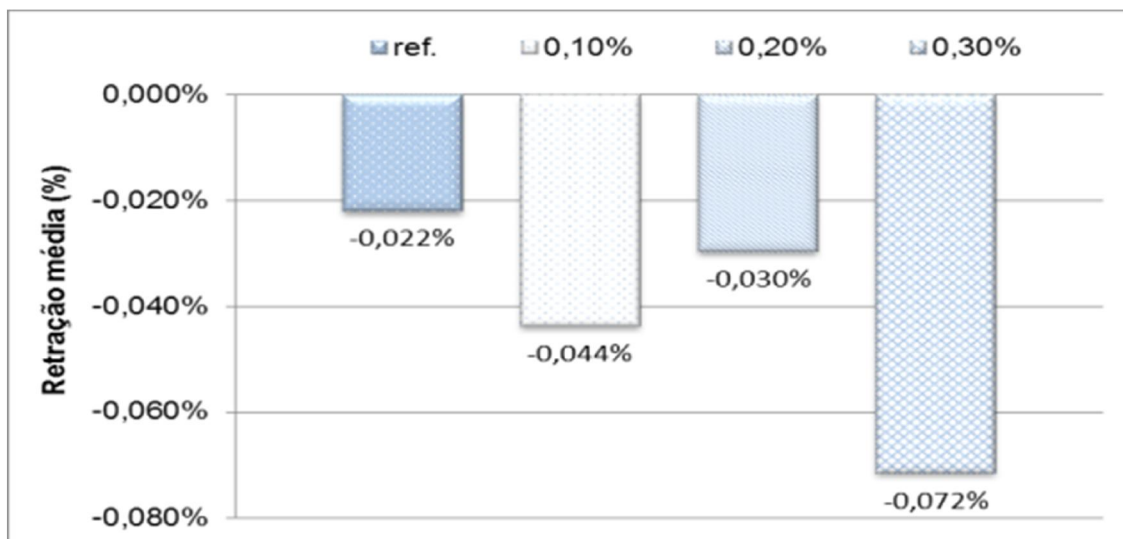


Figura 63. Retração percentual média dos corpos de prova em estudo.

Desse modo, pode-se afirmar que a inclusão de NTC ao concreto de referência não contribuiu para o combate da retração, como se imaginava no início dos estudos.

Pelo fato dos nanotubos serem de constituição predominantemente tubular, imaginava-se que os tubos em escala manométrica poderiam agir como agem as fibras metálicas no concreto, combatendo a formação de microfissuras e impedindo a retração acentuada.

No entanto esta hipótese não se comprovou e, de alguma maneira, a retração aumentou com relação ao concreto de referência para todos os percentuais de adição de NTC.

O aumento na retração pode ter sido influenciado pelo adensamento dificultado dos corpos de prova, fruto da baixa fluidez do material.

A Figura 64 apresenta o gráfico de medições dos quatro corpos de prova analisados para o concreto de referência, mais os três teores de adição de NTC, ao longo do período de medições.

É possível verificar que, a leitura que ocorreu no dia 24 de janeiro, por exemplo, apresentou leitura inconsistente, com relação as demais. Esta ocorrência aconteceu devido a um desligamento do equipamento de regulagem da temperatura da câmara seca, devido, provavelmente à falta de energia.

Este fato demonstra que o ensaio é bastante sensível a variações em suas condições de execução, e comprova a importância da padronização das leituras e de pouca variabilidade nas condições de armazenagem dos corpos de prova.

Durante todo o período de estudo que se estendeu por 26 dias, sendo realizadas 12 medições durante este tempo, que resultaram em 720 leituras do equipamento.

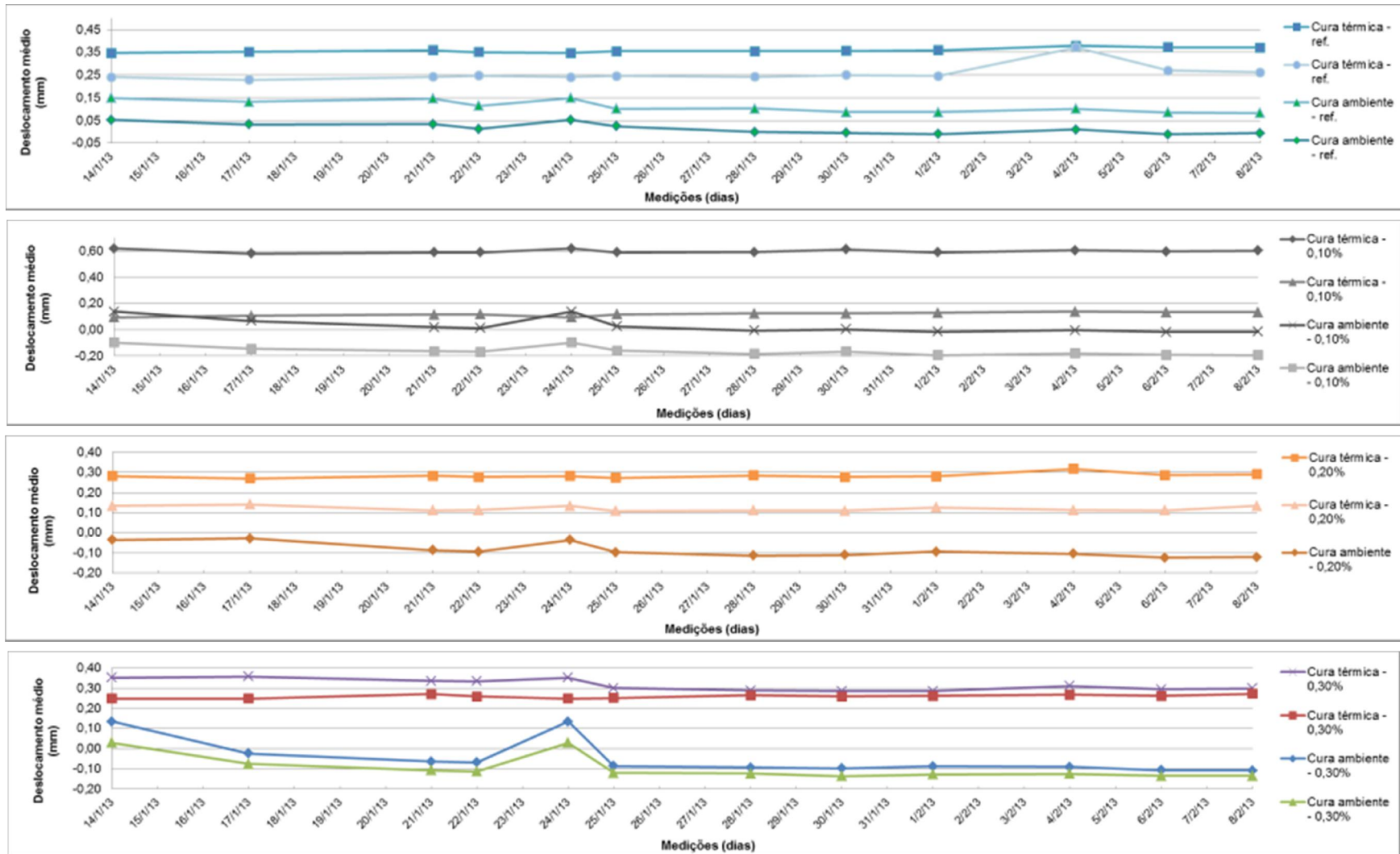


Figura 64. Gráficos de retração do concreto de referência e dos concretos com adição de NTC.

6.5 Análise estatística dos resultados obtidos

6.5.1 Análise da variância

A Análise de Variância (ANOVA) é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos estatísticos, que visa verificar a significância dos resultados obtidos. De acordo com RIBEIRO e CATEN (2001), este tipo de teste verifica a significância das médias dos grupos através da relação de variabilidade entre os diversos grupos e da variabilidade das observações dentro dos mesmos.

Neste estudo os testes foram aplicados apenas para os ensaios de resistência mecânica (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade) e utilizaram os resultados dos corpos de prova ensaiados aos 28 dias. Os cálculos dos procedimentos adotados nos subitens 6.5.1 e 6.5.2 são apresentados no Anexo F – Testes estatísticos.

A hipótese de nulidade neste trabalho é a de que as médias são todas iguais e esta hipótese foi testada com um nível de confiança de 95%, ou seja, existe apenas 5% de probabilidade de erro.

A Tabela 36 apresenta a Análise de Variância (ANOVA) do modelo de regressão para a resistência à compressão axial do concreto contendo NTC.

TABELA 36. ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) PARA À COMPRESSÃO AXIAL.

Fonte de Variação	SQ	GDL	MQ	P-valor	F-crítico	Significante
Entre grupos	743,46	3	247,82	1,70	3,10	Não
Dentro dos grupos	2.921,02	20	146,05			
Total	3.664,49	23				

* Ao nível de 5% de probabilidade

NOTA: SQ – soma quadrada; MQ – média quadrada; GDL – grau de liberdade.

Observou-se pela análise estatística realizada, que a adição dos percentuais de NTC não pode ser considerada significativa. Portanto conclui-se que não houve diferença média significativa na inclusão dos NTC ao concreto de referência, para os resultados obtidos neste ensaio mecânico.

A Tabela 37 apresenta a Análise de Variância (ANOVA) do modelo de regressão para a resistência à tração na flexão.

TABELA 37. ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.

Fonte de Variação	SQ	GDL	MQ	P-valor	F-crítico	Significativo*
Entre grupos	42,89	3	14,30	9,80	3,10	Sim
Dentro dos grupos	29,19	20	1,46			
Total	72,08	23				

* Ao nível de 5% de probabilidade

NOTA: SQ – soma quadrada; MQ – média quadrada; GDL – grau de liberdade.

Observamos pela análise estatística realizada para o ensaio de resistência à tração na flexão, que a adição dos percentuais de NTC pode ser considerada significativa. Portanto conclui-se que houve diferença média significativa na inclusão dos NTC ao concreto de referência, para a resistência à tração na flexão.

A Tabela 38 apresenta a Análise de Variância (ANOVA) do modelo de regressão para o módulo de elasticidade dos concretos em estudo.

TABELA 38. ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE.

Fonte de Variação	SQ	GDL	MQ	P-valor	F-crítico	Significativo*
Entre grupos	51,18	3	17,06	33,78	4,07	Sim
Dentro dos grupos	4,04	8	0,51			
Total	55,22	11				

* Ao nível de 5% de probabilidade

NOTA: SQ – soma quadrada; MQ – média quadrada; GDL – grau de liberdade.

Observa-se pela análise estatística realizada que, para o ensaio de módulo de elasticidade, a adição dos percentuais de NTC pode ser considerada significativa. Portanto houve diferença média significativa na inclusão dos NTC ao concreto de referência.

Após as análises de variância procedeu-se o teste de Tukey, visando observar se as diferenças entre as amostras de um mesmo grupo de estudo foram significativas entre si e analisar se esta possível significância foi positiva ou negativa para a melhoria das propriedades mecânicas dos percentuais de adição em estudo.

6.5.2 Teste de Tukey

Após concluirmos a existência ou não existência de diferenças significativas entre tratamentos por meio da Análise da Variância, houve o interesse em avaliar a magnitude destas diferenças dentro dos grupos de observação.

Este processo foi realizado utilizando um teste de comparações múltiplas e, neste trabalho, para tal análise, foi utilizado o teste de Tukey.

Esta escolha se deu, pois, segundo Costa Neto (1977), no caso de comparações múltiplas entre amostras de tamanhos iguais, como é o caso do presente estudo, o procedimento mais eficiente é o proposto por Tukey, que utiliza valores críticos de amplitude total studentizada – *studentized range* -, denotada pela notação “q”. O teste permite testar qualquer contraste, sempre, entre duas médias de tratamentos. Baseia-se na Diferença Mínima Significativa (DMS), sendo a estatística do teste dada da seguinte forma:

$$DMS = q \sqrt{\frac{QMR}{r}}$$

A amplitude total studentizada é tabelada e o QMR é o quadrado médio do resíduo. A letra r representa o número de repetições. O valor de q depende do número de tratamentos e do número de graus de liberdade do resíduo. Da mesma maneira que na análise da variância, em um teste de comparações de médias, deve-se determinar um nível de significância (α) para o teste. Utilizou-se neste estudo o nível de 5% de significância.

Como o teste de Tukey é de certa forma, independente da análise da variância, é possível que, mesmo sendo significativo o valor de F-calculado, não se encontrem diferenças significativas entre contrastes de médias.

Existem diferentes métodos para apresentar o resultado do teste, como, por exemplo, o uso de tabelas ou gráficos. Neste estudo foi escolhida a apresentação dos resultados por meio gráfico, pela facilidade da análise e interpretação dos resultados. A análise é feita verificando se a linha vertical tracejada é cortada pelas barras horizontais, chamadas intervalos de confiança. A Figura 65 apresenta o teste realizado para a resistência à compressão axial.

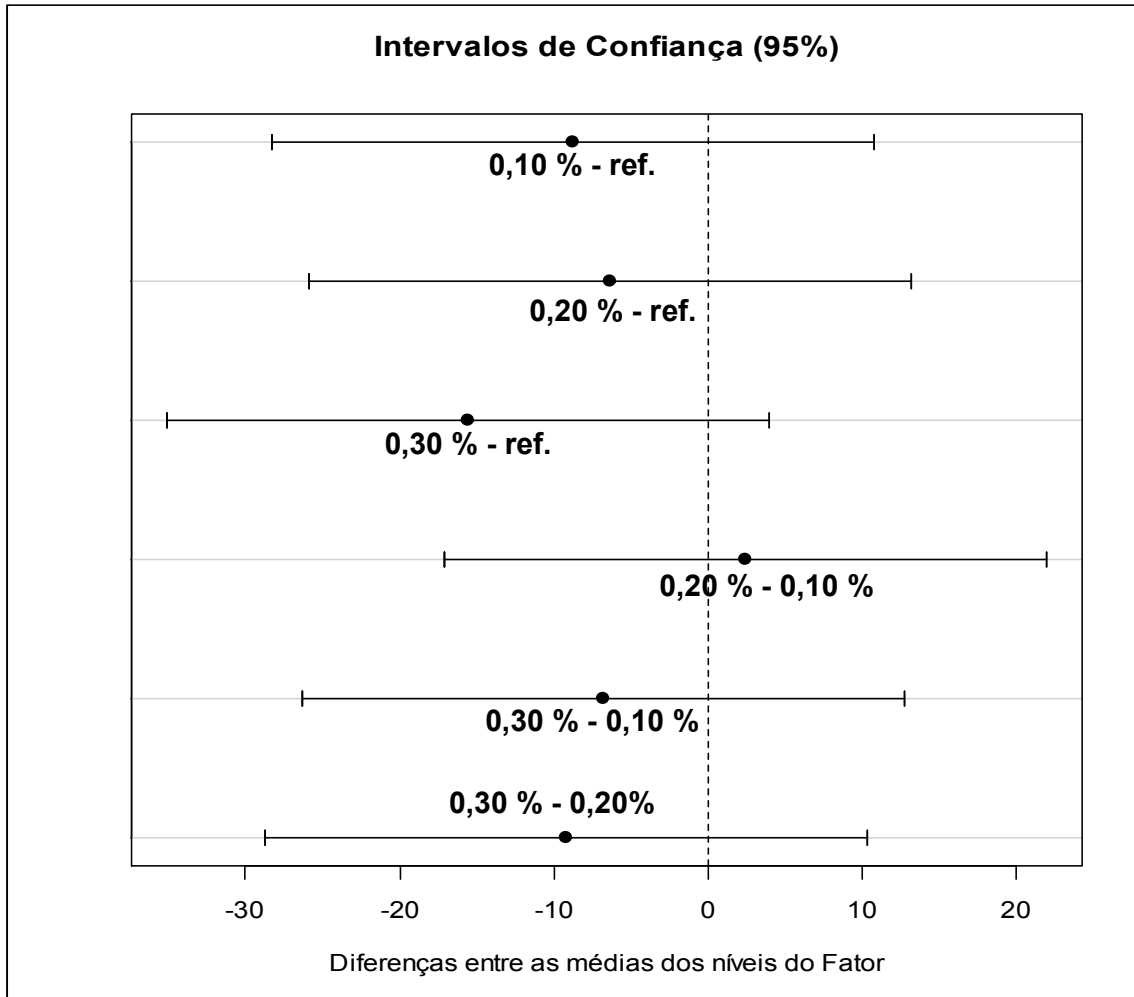


Figura 65. Teste de Tukey para a resistência à compressão axial.

Os intervalos de confiança representam a interação entre duas amostras, seja entre o concreto de referência e uma adição de NTC, ou mesmo de duas adições entre si. Se houver a intersecção entre as duas retas, pode-se afirmar que as diferenças são significativas, do contrário nada se pode afirmar.

Analisando-se a Figura 65, conclui-se que, para a resistência à compressão axial, não existem diferenças significativas entre os percentuais das amostras estudadas, pois todas as barras estão na área de influência da linha tracejada, ou seja, dentro do intervalo de confiança. Esta análise vai de encontro com o resultado obtido através da análise da variância. Pode-se concluir, portanto que a adição de NTC além de não influenciar na resistência à compressão axial nos grupos individualmente, não exerceu melhoria alguma entre os percentuais isoladamente. A Figura 66 apresenta o resultado da análise feita para o ensaio de resistência à tração na flexão.

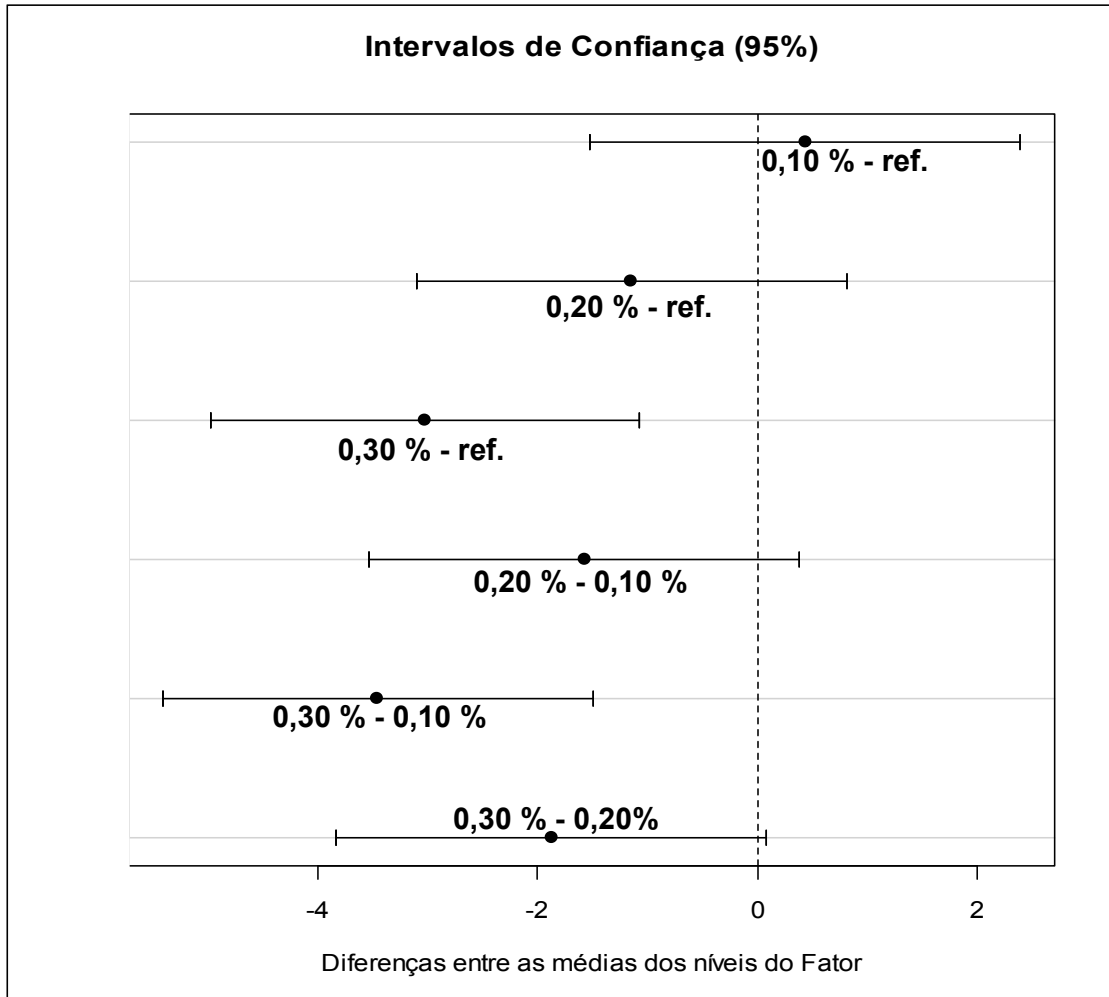


Figura 66. Teste de Tukey para a resistência à tração na flexão.

A interpretação dos resultados neste caso leva a crer que não houve diferença média significativa quando comparamos as adições 0,10% e 0,20% ao concreto de referência. A mesma análise pode ser feita para o percentual 0,20 % em relação ao percentual 0,10% e entre a adição de 0,30% de NTC ao percentual de 0,20%.

No entanto duas comparações se apresentaram significativamente inferiores entre si, estando o intervalo de confiança fora da linha tracejada. O percentual de 0,30% de adição de NTC influenciou significativamente de maneira negativa os resultados de resistência mecânica, em relação à referência e ao percentual mais baixo de adição (0,10%).

A Figura 67 apresenta o resultado da análise feita para o ensaio de módulo de elasticidade.

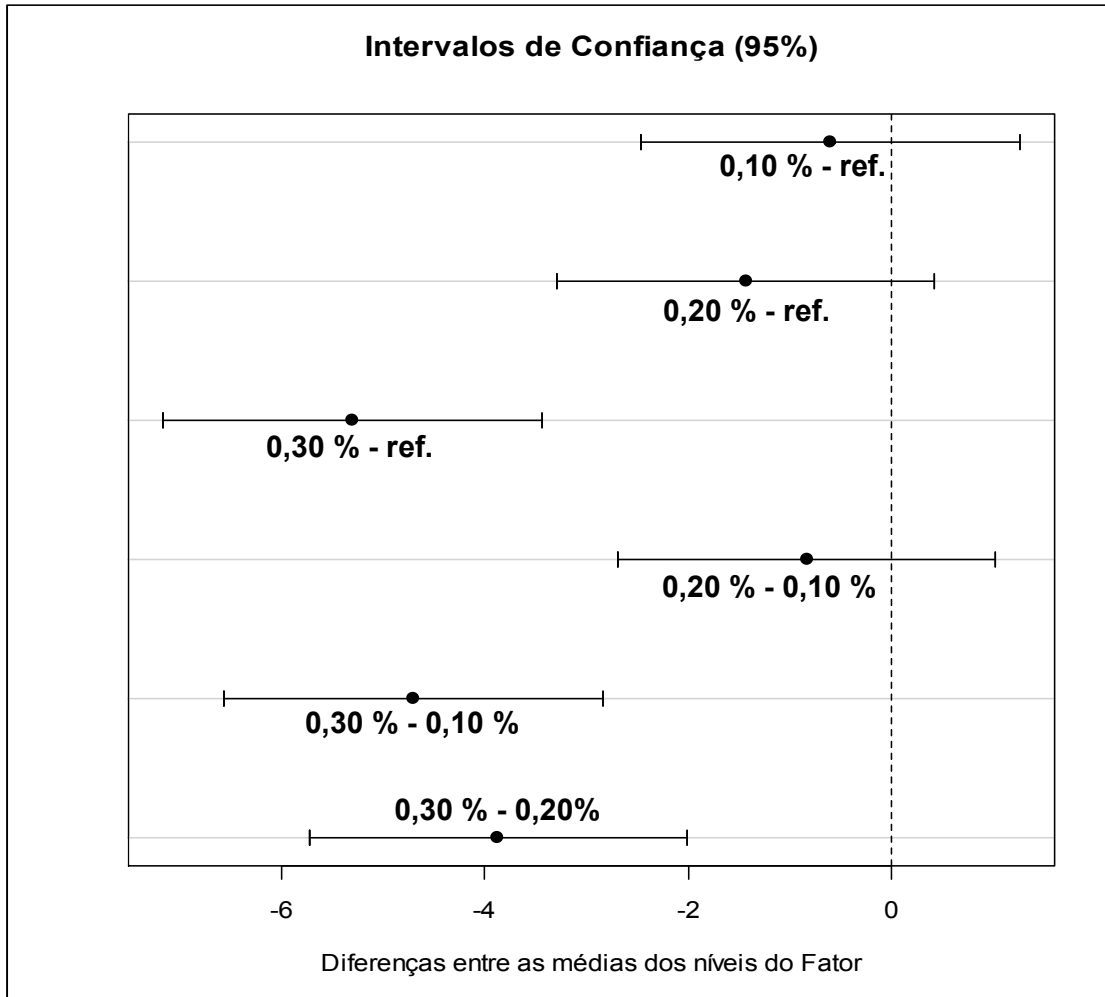


Figura 67. Teste de Tukey para o ensaio de módulo de elasticidade.

A interpretação dos resultados para o ensaio de módulo de elasticidade deixa claro que houve diferença média significativa quando comparamos a adição de 0,30% às demais adições. Ao observarmos os valores em MPa fica evidente que, em virtude de dificuldades de moldagem, este percentual influenciou de maneira significativamente negativa os demais percentuais e ao concreto de referência.

Com relação aos demais concretos, pode-se afirmar que não houve influência significativa.

6.6 Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV

A Tabela 36 mostra o tipo de análise realizada em cada amostra verificada neste ensaio, bem como a idade do corpo de prova no dia da aplicação da técnica. A idade varia de amostra para amostra, devido ao fracionamento do experimento, onde cada traço foi moldado em um dia, iniciando no traço de referência, e terminando quatro dias após, no traço com adição de 0,30% de nanotubos de carbono.

TABELA 39. ENSAIOS REALIZADOS NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA.

Amostra	Tipo	Idade (dias) Imagens / EDS
Referência	Imagens + EDS	37 / 98
0,10%	Imagens	36
0,20%	Imagens	35
0,30%	Imagens + EDS	34 / 95
Nanotubos de carbono	Imagens + EDS	-

As imagens obtidas foram intencionalmente direcionadas para o local mais próximo ao agregado, de maneira às ampliações sucessivas fosse possível observar a zona de transição entre a matriz da pasta e o agregado miúdo empregado na mistura. A Figura 68 apresenta imagens feitas no concreto de referência, ampliadas 50, 500, 5000 e 10.000 vezes. Nas imagens, foram marcadas as regiões aproximadas onde a ampliação, apresentada na imagem subsequente, aconteceu.

O aspecto do concreto de referência é homogêneo, mas a presença de poros é perceptível na amostra. A zona de transição entre a pasta e o agregado é bem delimitada, e apresenta a formação de C-S-H denso, diferente da formação encontrada no concreto convencional, onde os cristais aparecem de forma mais esparsa. Na imagem (e) é apresentada a análise realizada pelo EDS. A concentração de carbono na mistura foi de 24,76%, medida pela atomicidade. Na Figura 69 são apresentadas as imagens tiradas da amostra com adição de 0,10% de nanotubos de carbono ao concreto de referência. A análise dos resultados é realizada ao lado das imagens.

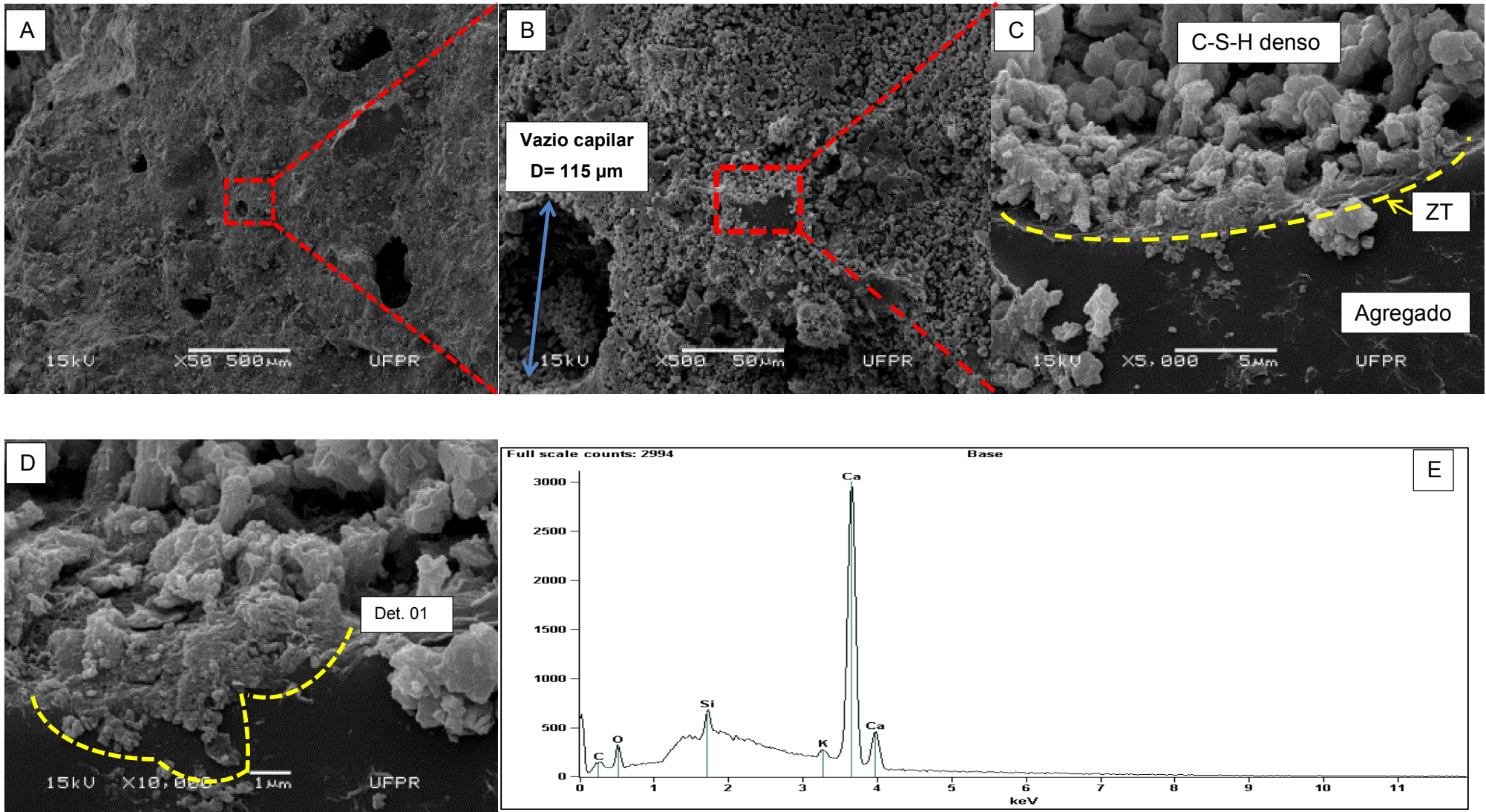
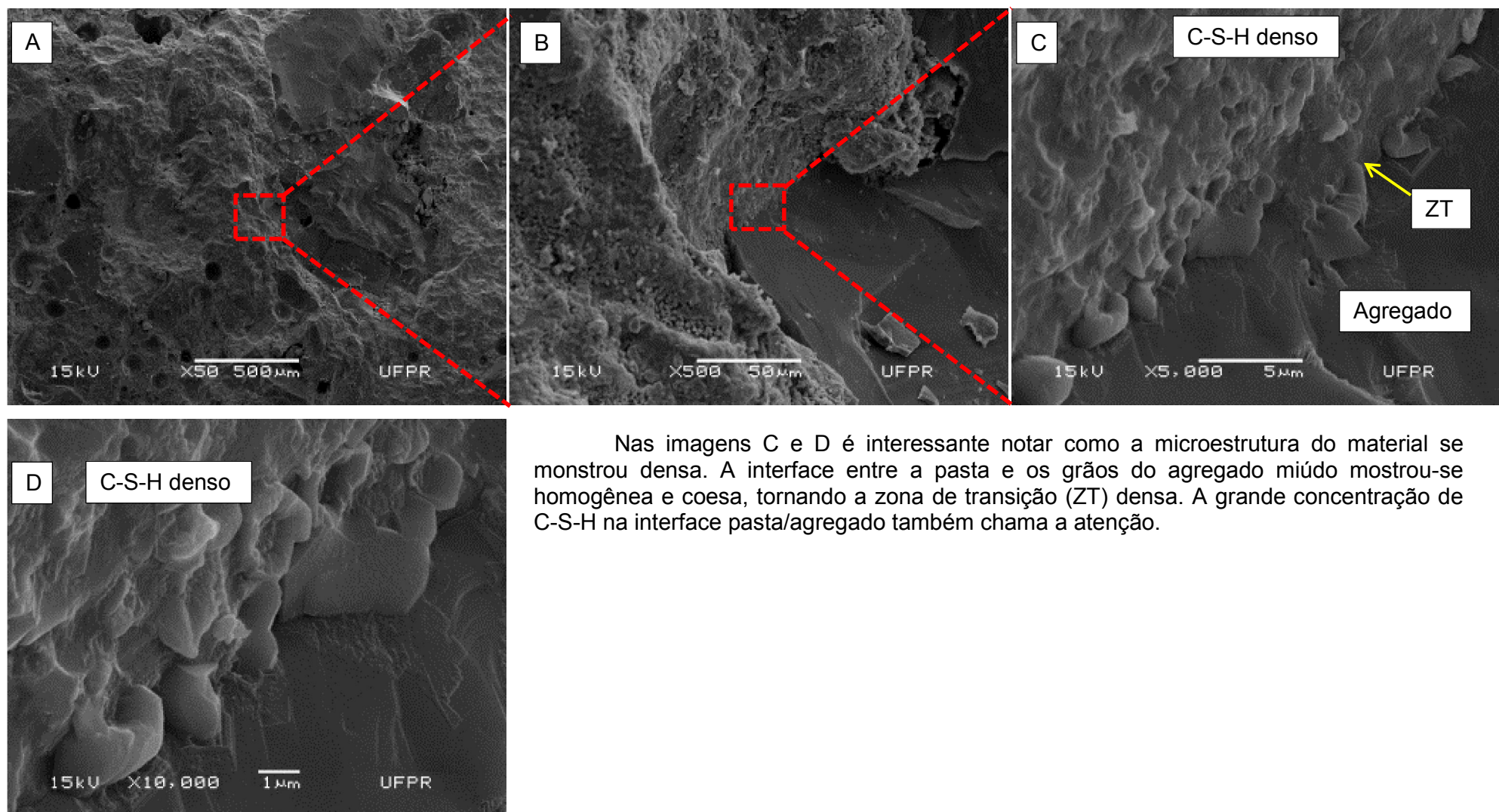


Figura 68. Imagens do MEV no concreto de referência e análise química do material em estudo.

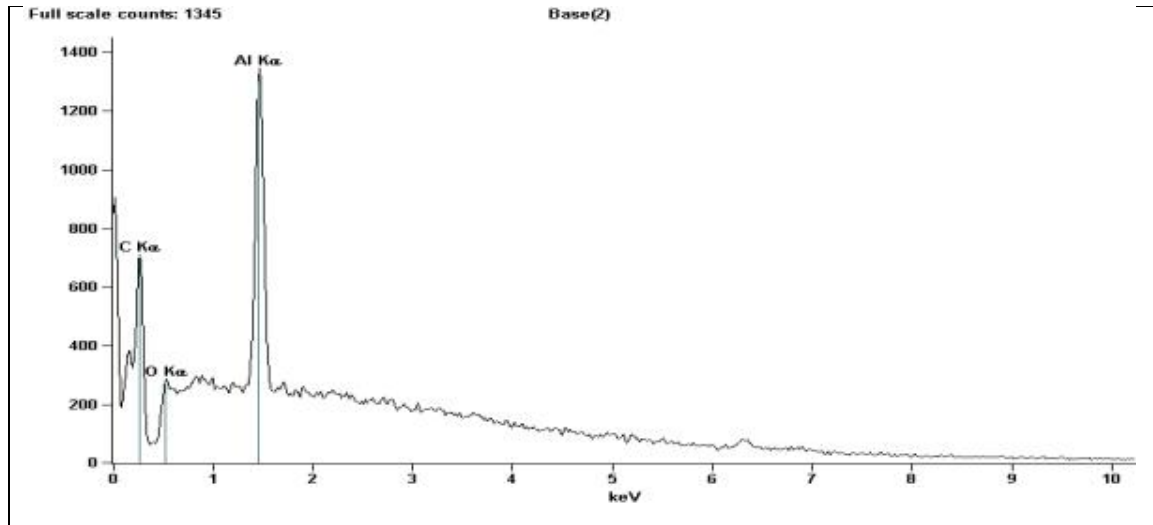


Nas imagens C e D é interessante notar como a microestrutura do material se mostrou densa. A interface entre a pasta e os grãos do agregado miúdo mostrou-se homogênea e coesa, tornando a zona de transição (ZT) densa. A grande concentração de C-S-H na interface pasta/agregado também chama a atenção.

Figura 69. Imagens do MEV no concreto com adição de 0,10% de NTC.

Visando identificar quais os componentes presentes na amostra, utilizando o MEV, foi realizada a verificação no EDS nos nanotubos de carbono. A Tabela 37 apresenta os resultados obtidos neste ensaio.

TABELA 40. ANÁLISE QUÍMICA REALIZADA NOS NANOTUBOS DE CARBONO.



Elemento	Peso (%)	Peso (% erro)	Atomicidade (%)	Atomicidade (% erro)
Carbono (C)	70,08	± 2,47	79,00	± 2,79
Oxigênio (O)	17,36	± 1,14	14,69	± 0,96
Alumínio (Al)	12,56	± 0,23	6,30	± 0,11
Total	100,00		100,00	

Importante salientar que o alumínio que aparece na composição dos nanotubos de carbono na realidade é o material de composição do porta amostra que sustenta os NTC durante a leitura. Na Figura 70 são apresentadas as imagens tiradas da amostra com adição de 0,20% de nanotubos de carbono ao concreto de referência. A análise dos resultados é realizada ao lado das imagens.

Na Figura 71 são mostradas as imagens geradas pela análise do concreto com adição de 0,30% de NTC. Um indício da presença dos NTC foi observado. Uma ampliação da região observada é na Figura 72, juntamente com uma ampliação do NTC natural. Verifica-se que existe semelhança geométrica, no entanto não se pode afirmar que o material observado seja de fato nanotubos de carbono.

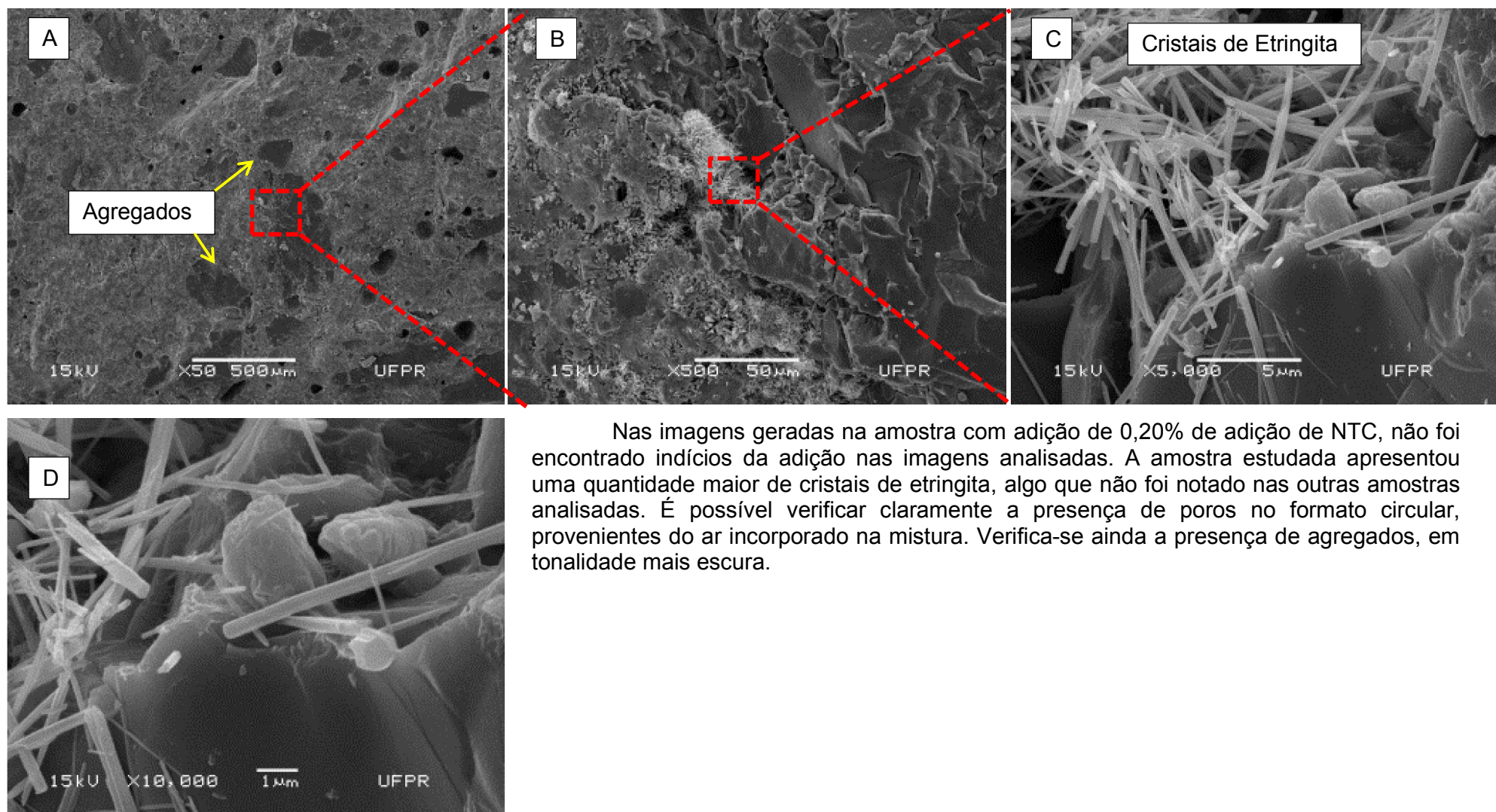


Figura 70. Imagens do MEV no concreto com adição de 0,20% de NTC.

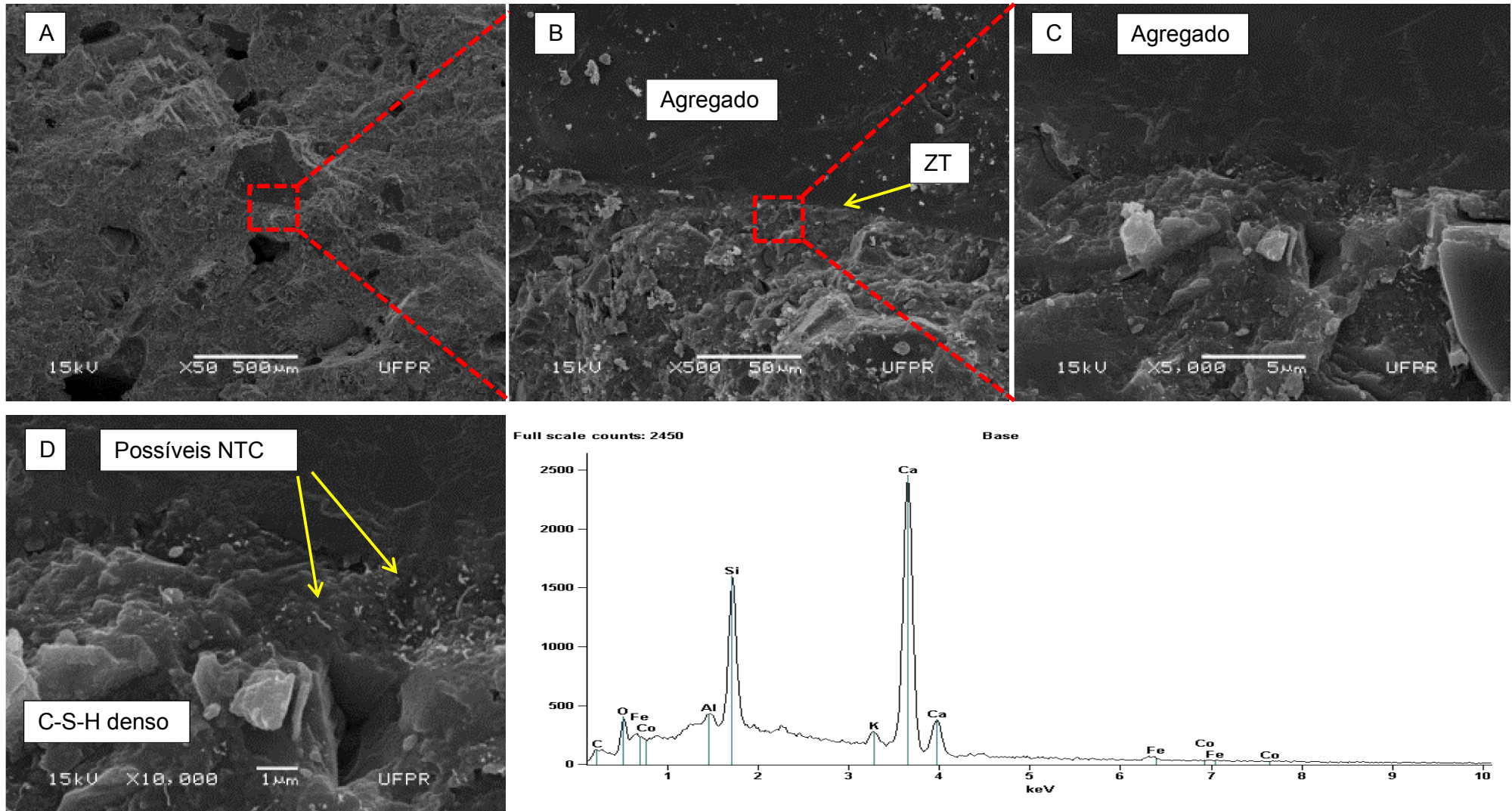


Figura 71. Imagens do MEV no concreto com adição de 0,30% de NTC

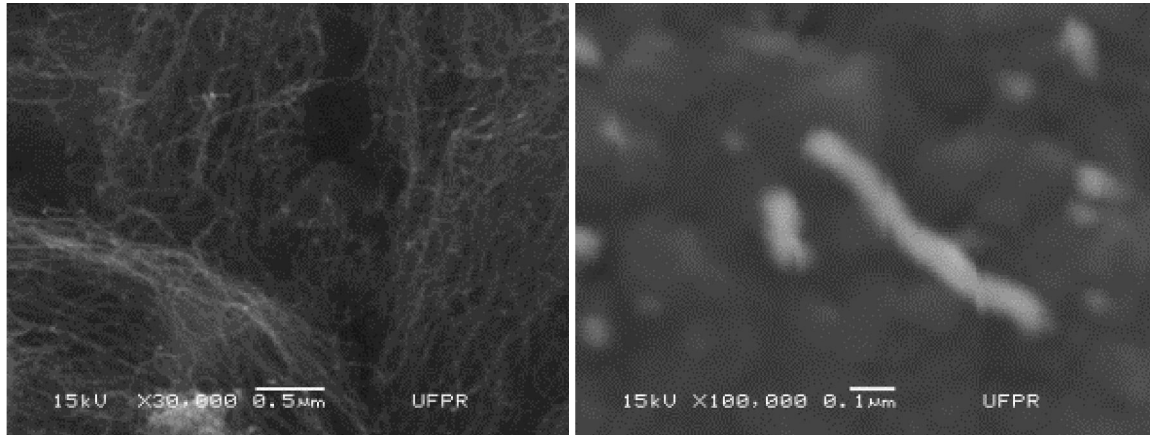


Figura 72. Imagem do NTC in natura. Imagem de um possível filamento de NTC.

Para finalizar o estudo envolvendo imagens do MEV, foi realizada uma tentativa de verificar a eficiência do tempo de dispersão nos NTC. A Figura 73 apresenta dois suportes contendo três amostras cada, cinco amostras coletadas após dispersar o NTC em tempos distintos, de acordo com o ciclo do equipamento, de oito em oito minutos, até o limite de 40 minutos, mais a amostra de referência.

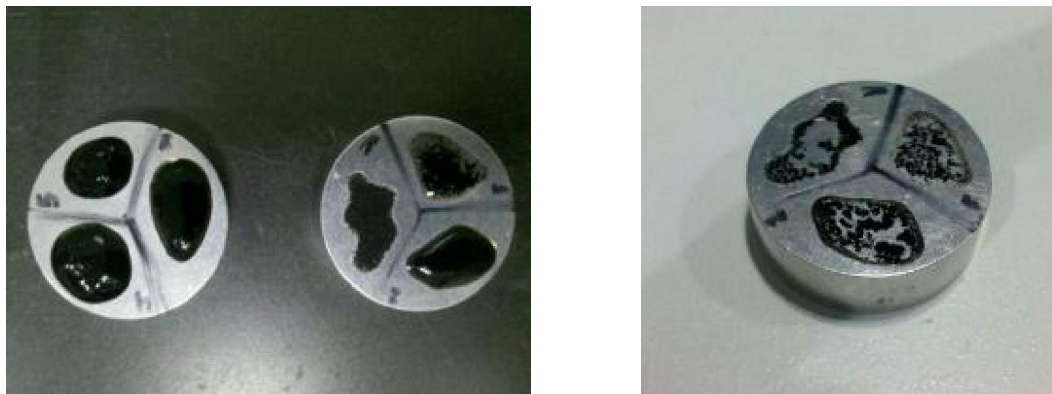


Figura 73. Amostras de NTC após dispersão e destaque de um suporte preparado para o MEV.

As Figuras 74 até 76 apresentam as imagens deste experimento, que foram tiradas com ampliação variando de 500 a 30.000 vezes, de cada uma das amostras verificadas. É possível observar, principalmente nas imagens ampliadas 30.000 vezes um indício visual que os grumos estão mais separados uns dos outros, quando se compara a amostra de referência, a amostra do NTC disperso por 40 minutos, em virtude do aparecimento de maior quantidade de filamentos visíveis.

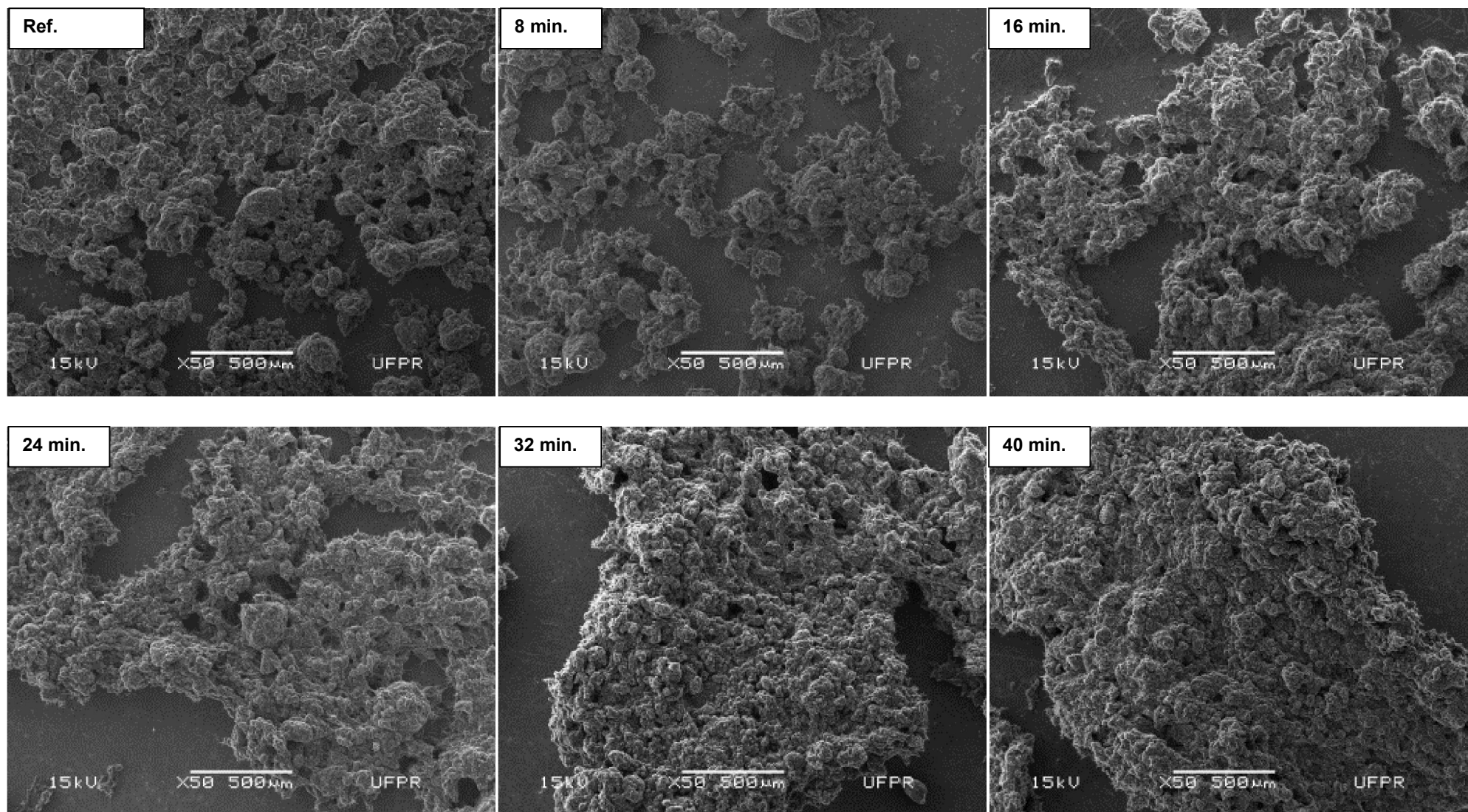


Figura 74. Imagens do MEV apenas dos NTC – ampliação de 50 vezes.

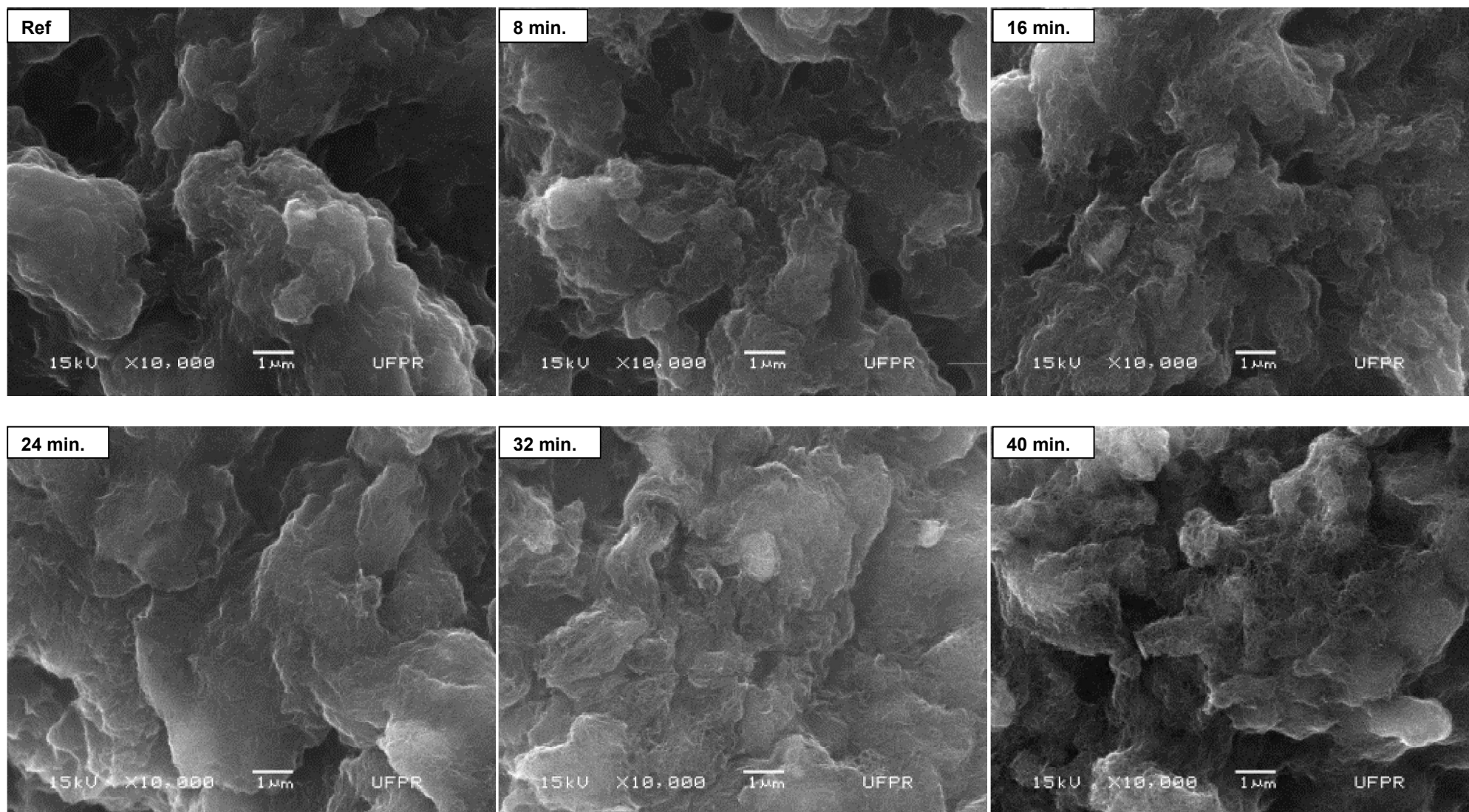


Figura 75. Imagens MEV apenas dos NTC – ampliação de 10.000 vezes.

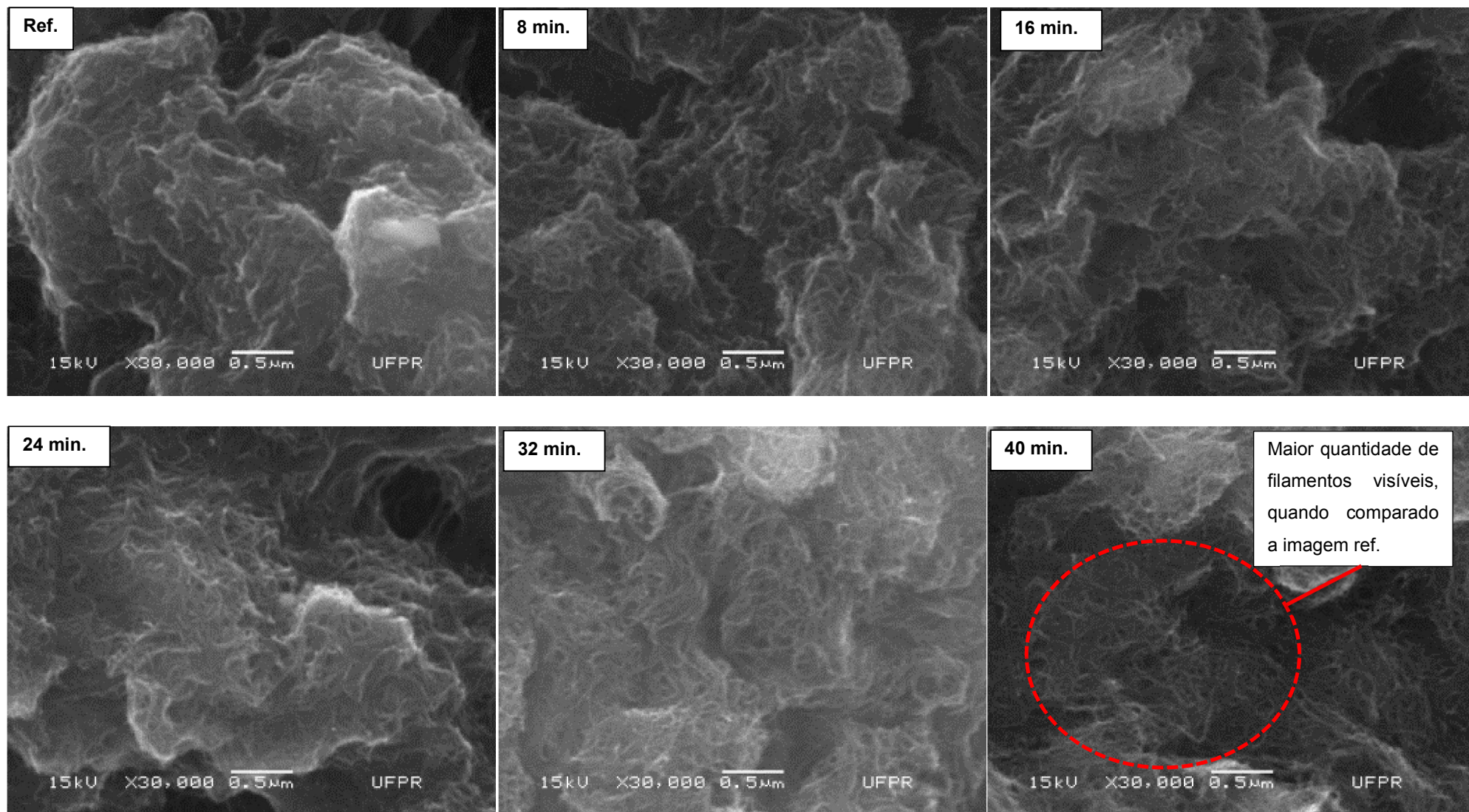


Figura 76. Imagens do MEV nos NTC – ampliação de 30.000 vezes.

7.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal produzir o concreto de ultra - alta resistência (CUAR) - concreto de referência - e incorporar ao mesmo nanotubos de carbono (NTC) como adição, visando comparar seus efeitos no estado fresco e endurecido.

Para obter resultados físicos quantificáveis que viabilizassem a avaliação desta adição com relação ao traço de controle, foram estudadas propriedades mecânicas, são elas: resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. Ainda no campo físico, foi estudada a retração por secagem, onde se procurou investigar a influência da cura térmica aquecida, frente à cura submersa à temperatura ambiente.

Como verificação complementar, foi realizado estudo específico de imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Este estudo contemplou ainda uma varredura química das amostras, a fim de constatar se vestígios verificados nas imagens representavam a presença de nanotubos de carbono em posições específicas das amostras.

As conclusões apresentadas a seguir, ainda que limitadas às condições expostas neste trabalho, podem ajudar a entender o comportamento dos nanotubos de carbono quando adicionados a uma matriz cimentícia.

Neste sentido, o entendimento dos efeitos da inclusão de materiais em escala nano métrica ao concreto de cimento Portland ainda está no início. Esforços neste sentido fazem parte da continuidade natural das pesquisas.

7.1 Conclusões

Considerando as condições laboratoriais em que os ensaios foram realizados, a metodologia utilizada, os resultados obtidos nos ensaios destrutivos e não destrutivos, o tratamento estatístico dos resultados obtidos e as características intrínsecas dos materiais utilizados nesta pesquisa, chega-se às seguintes conclusões sobre o experimento:

- 1) Conclusões sobre a dosagem do concreto de ultra - alta resistência de referência:

Quanto ao processo executivo, o concreto de referência se mostrou bastante sensível às mudanças na dosagem. Através de adições gradativas dos diferentes componentes estudados (cimento, sílica ativa e pó de quartzo), foi possível observar que a fluidez variou quase três vezes quando observado o menor (115 mm) e o maior valor de fluidez (330 mm). Com base destas observações, foi desenvolvido o concreto de referência, que, em termos de trabalhabilidade, pode ser considerado de característica autoadensável, visto a fluidez atingida de 200 mm na mesa de espalhamento para a relação $a/c = 0,20$. É possível ainda caracterizá-lo como de ultra - alta resistência, pois o $f_{c_{28d}}$ médio obtido para a resistência à compressão axial, 156,4 MPa, o caracteriza como tal. Pode-se afirmar ainda que, observando estes dois resultados, o objetivo de elaborar um proporcionamento adequado para o CUAR em estudo foi alcançado de forma satisfatória. O custo estimado por metro cúbico do concreto de referência, observando-se apenas o custo dos materiais empregados, foi calculado em R\$ 346,31. Este custo é 62% superior ao valor do m^3 comercializado na região metropolitana de Curitiba para um concreto $f_{c_{28d}}$ de 30 MPa, R\$ 215,00. Evidente que o custo na confecção deste concreto seria muito superior se contados os valores relativos a máquinas, equipamentos, tributos e outros que possam incidir no processo industrial de confecção, como a cura térmica, por exemplo.

- 2) Adição de NTC ao concreto em estudo:

Quanto ao processo executivo, à adição de NTC ao concreto em estudo não se mostrou satisfatória. Devido a grande superfície específica do NTC, mesmo aplicando-se pequenas quantidades do material ao concreto, o consumo de água aumentou em demasia. Os concretos de ultra - alta resistência necessitam de baixíssimas relações a/c para atingirem resistências da ordem de 150 MPa. Para possibilitar a utilização de NTC, foi necessário aumentar o consumo de água da mistura, passando do $a/c 0,20$, que possibilitou resistência característica compatível com o esperado, para o $a/c 0,25$. Com isso, mesmo o concreto sem a adição de NTC atingiu resistência média da ordem de 84 MPa, 56% menor que a faixa de

resistência desejada para a mistura. Considerando esta afirmação, o NTC deveria ter trazido um benefício superior a perda de desempenho com o aumento de água na mistura, o que de fato não ocorreu. Na realidade, foi necessário modificar a maneira de determinar a fluidez do material, da mesa de espalhamento para índice de consistência para o *squeeze-flow*. Durante a elaboração dos estudos, foi verificado que a grande área específica do NTC poderia ser outro empecilho para a utilização do material em larga escala. Tomando como referência um determinado CUAR, com o consumo de 700 kg de cimento por m³, e uma adição de apenas 0,10% do material em massa do cimento, necessitariam ser adicionadas 700 gramas do material por m³. Isso significa que em um caminhão betoneira de oito m³, seriam necessários 5,6 kg de NTC para satisfazer a dosagem requerida. O volume físico do NTC, dificuldades de armazenamento e a metodologia de adição e dispersão da mistura sem dúvida são obstáculos a serem superados.

3) Imagens de microscopia eletrônica e análise química das amostras:

As imagens do MEV indicaram que o tempo de dispersão dos nanotubos de carbono no aparelho de sonificação auxilia na separação dos grumos do material. Foi constatada, pela análise visual das imagens geradas, que os nanotubos pareciam estar gradativamente mais dispersos nas amostras que ficaram por tempo maior no equipamento dispersor. Devido ao tamanho do NTC, não foi possível afirmar com certeza, utilizando o equipamento disponível, se esta hipótese é verdadeira. Nas imagens realizadas nos corpos de prova fraturados, foi possível identificar na imagem ampliada 30.000 vezes um filamento que se assemelha às características físicas dos NTC adicionados à mistura. Estes filamentos só puderam ser visualizados na amostra de 0,30% e se apresentaram dispersos no corpo de prova, não estando depositados em nenhuma posição específica dentro da amostra, como a zona de transição, por exemplo. Estes filamentos também não apresentaram orientação preferencial, estando dispostos aleatoriamente na superfície analisada. Pela análise química das amostras, apenas ficou comprovada a presença da substância química Carbono (C) na varredura de elementos químicos realizada pelo equipamento. No entanto não foi possível afirmar se o elemento foi detectado em virtude dos nano tubos adicionados à mistura.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

A escassez de publicações envolvendo estudos com os concretos de ultra - alta resistência no país, bem como a falta ainda maior de estudos envolvendo a aplicação dos nano materiais a estes concretos, ou mesmo a concretos convencionais, possibilita a elaboração de uma série de novos trabalhos envolvendo estes temas de pesquisa.

Sugere-se como possibilidades para novas pesquisas, a fim de complementar o estudo desenvolvido, os seguintes temas:

- a) Analisar a influência de outros tipos de aditivos para a produção dos Concretos de Ultra - Alta Resistência (CUAR), como os inibidores de hidratação ou retardadores/acceleradores de pega.
- b) Avaliar as resistências mecânicas em idades superiores aos 28 dias para os concretos de ultra - alta resistência e analisar o comportamento quanto ao ganho, perda ou manutenção das resistências mecânicas do material.
- c) Investigar parâmetros importantes para a durabilidade dos concretos de ultra - alta resistência, como permeabilidade aos íons cloreto, porosidade, carbonatação e resistividade elétrica.
- d) Estudar a produção dos concretos de ultra - alta resistência em escala industrial e sua aplicação em elementos pré-moldados em tamanho real.
- e) Estudar a incorporação de micro fibras metálicas e poliméricas ao concreto de ultra - alta resistência e avaliar a reologia no estado fresco do material.
- f) Analisar a influência dos nanotubos de Carbono (NTC) em concretos de classe inferiores de resistência, da ordem de 40 a 70 MPa, verificando seu comportamento físico no estado endurecido e reológico no estado fresco.
- g) Realizar estudo em um Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) visando comprovar se os filamentos visualizados no concreto com 0,30% de adição de NTC são mesmo nanotubos de carbono.

REFERÊNCIAS

ADAM, T.; MA, J.. **Development of an Ultra-High Performance Concrete for precast spun concrete columns**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

AHLBORN, T. M.; PEUSE, E.J.; MISSON, D.L.. **Ultra-High-Performance-Concrete for Michigan Bridges Material Performance – Phase I**. Center for Structural Durability Michigan Technological University. Reserarch report RC – 1525, Houghton, Michigan, Estados Unidos – novembro, 2008.

AİTCIN P. C.. **Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow**. Cement & Concrete Research Issue No. 9, Vol. 30, 2000, pp: 1349-1359.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARD PRACTICE C157. **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic – Cement Mortar and Concrete**. Philadelphia, PA, 2008.

_____. ASTM C666. **Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing**. Philadelphia, PA, 2008.

_____. ASTM C944. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating Cutter Method**. Philadelphia, PA, 2012.

_____. ASTM C1260. **Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-bar Method)**. Philadelphia, PA, 2007.

AMRHEIN, K.; STEPHAN, D.. **Photocatalytic Building Materials and Methods of Measurement**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7681:** Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7682:** Calda de cimento para injeção. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7682:** Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade e de deformação e da curva tensão - deformação. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 8953:** Concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9775:** Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13956:** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.

Association Française de Génie Civil, **AFGC/SETRA. Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes – Interim Recommendations**. Paris, França – janeiro 2002.

BACHE, H. H. **Densified cement/ultrafine particle-based materials**. 2° Int. Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa, Canadá, 10 a 12 Junho, 1981.

BATISTON, E. R. **Estudo exploratório do efeito da incorporação de nanotubos de carbono em algumas propriedades de matrizes de cimento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2007.

BATISTON, E. R. *et al.* **Funcionalização e efeito da incorporação de nano tubos de carbono na cinética de hidratação em matrizes cimentícias**. In: 52° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. Anais. Fortaleza: IBRACON, out. 2010.

BATLOUNI NETO, J. B.. **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Diretrizes de projeto de Estrutura para garantia do Desempenho e Custo - Capítulo 4 pg 123 - 142, volume I, 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011.

BATTAGIN, I. L. da S.. **Normas Técnicas de Concreto e Estruturas**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. v. 1. cap. 05, p. 157 a 184. São Paulo: IBRACON, 2011.

BAUCHEMIE. MC.. **MC – PowerFlow 1159**. Disponível em: <<http://www.mc-bauchemie.com.br>>. Acesso em: 20/03/2012.

BEHLOUL, M.. **Design Rules for DUCTAL Prestressed Beams**. 19pp, 1999.

BIANCHINI, M.. **Análise da Influência dos Teores de Sílica Ativa na Produção de Concretos de Alta Resistência em Central Dosadora em Concreto**. Curitiba, PR. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, PPGCC - UFPR, 2010.

BIRCHALL J.D.; HOWARD A.J., KENDALL K.. **Flexural strength and porosity of cements**. Nature 289, pp. 388 – 390, 1981.

BIZ, C. E.. **Concreto de pós-reativos**. Dissertação (Mestrado). UEC. Campinas, 118 p., 2001.

CAMACHO, E.; LÓPEZ, J. A.; ROS, P. S.. **Definition of three levels of performance for UHPFRC-VHPFRC with available materials**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

CARASEK; H.. **Argamassas**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. v. 2. cap. 28, p. 893 a 944. São Paulo: IBRACON, 2010.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M.; **Caracterização Reológica de Argamassas pelo Método de Squeeze-flow**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.. **Dosagens de argamassas através de curvas granulométricas**. Boletim técnico da Escola politécnica da USP – Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo, 1999.

CHEN, J.; HORGNIÉS, M.. **Self-cleaning ultra-high performance concrete surfaces**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

CHEYREZY M.; MARET V.; FROUIN L.. **Micro structural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)**. Cement and Concrete Research, Vol. 25, N°. 7. pp. 1491 – 1500, 1995.

CORVEZ, D.; MAZAZACANE, P.. **Material performance control on two large projects: Jean-Bouin stadium and MUCEM museum**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

CWIRZEN, A.; CWIRZEN, K. H.; PENTTALA, V.. **The effect of heat treatment on the salt freeze-thaw durability of UHSC**. Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – março, 2008.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas experimentais para estudo da microestrutura. In: ISAIA, G. C. - 2.ed. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. v. 1. cap. 14, p. 405 - 438. São Paulo: IBRACON, 2010. 2v.

DUGAT J.; ROUX N.; BERNIER G.. **Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes**, Materials and Structures – Vol. 29, p. 233 – 240, 1996.

FAUST, R.. **Efficient Photocatalysis in the Visible with TiO₂ / Phthalocyanine-Hybrid Particles**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

FEYLESSOUFI A.; VILLIÉRAS F.; MICHOT L. J.; DONATO P. de; CASES J. M.; RICHARD P.. **Water Environment and nanostructural network in a reactive powder concrete**. Cement e Concrete Composites, n° 18, p. 23 – 29, 1996.

FIDJESTOL, P.; THORSTEINSEN, R. T.; SVENNEVIG, P.. **Making UHPC with local Materials – The Way Forward**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

FOGLIARINI. M. **The Church Dives in Misericordia in Rome**. Disponível em: <http://www.fogliarini.it/dives_in_misericordia_en.htm>. Acesso em: 18/03/2013.

FREITAS, Jr., J. de A.; **Estudo comparativo de métodos de dosagem Para concretos de alta resistência com o Uso de materiais disponíveis na região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba, PR. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2005.

GANZHOU. D. **Micro steel fiber for ultra-high performance concrete**. Ganzhou Daye Metallic Fiber Co. Ltd. Disponível em: <<http://www.gzdymf.com>>. Acesso em: 15/02/2012.

GLEIZE, P. J. P.. **Nanotecnologia e Materiais de Construção**. Capítulo 53 do livro *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. Ed. G. C. Isaia. 2.ed. Sao Paulo, IBRACON, 2010. 2v. pg 1719 – 1745.

GOWRIPALAN, N.; GILBERT, I. R.. **Design Guide for RPC Prestressed Concrete Beams**. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Austrália – maio 2000: 53 pg.

GRAYBEAL, B. A.. **Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete**. Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration – FHWA – HRT – 06 – 103, McLean, Estados Unidos – ago 2006 - A.

GRAYBEAL, B. A.. **Structural Behavior of Ultra-High Concrete Prestressed I-Girders**. Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration – FHWA – HRT – 06 – 115, McLean, Estados Unidos – ago 2006 - B.

GRAYBEAL, B. A.; HARTMANN, J. L.. **Strength and Durability of Ultra-High Performance Concrete**. Concrete Bridge Conference, Federal Highway Administration, McLean, VA – 2003.

HAJAR, Z.; SIMON, A.; LECOINTRE, D.; PETITJEAN, J.. **Design and Construction of the world first Ultra-High Performance Concrete road bridges**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – setembro, 2004.

HARTMANN, C; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H.. **Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos**. Capítulo 10 do livro *Concreto: ciência e tecnologia*. Ed. G. C. Isaia. 1.ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v. pg 347 – 380.

HECHT, M.. **Practical use of fibre-reinforced UHPC in construction - production of precast elements for Wild-Brücke in Völkermarkt**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

HELENE, P.; TERZIAN, P.. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. Pini, SENAI, Brasília, 1993.

HENCHE, D.; ALESSI. E.. **Concreto De Pós-Reativos: Parâmetros De Dosagem E Propriedades**. Trabalho de Conclusão de Curso em Tecnologia em Concreto. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Paraná, Brasil - março 2012.

HENCHE, D.; MAZER. W.. **Efeito da Distribuição Granulométrica sobre o Empacotamento de Partículas e Trabalhabilidade do Concreto de Pós-Reativos**. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza, Brasil – outubro, 2010.

HENCHE, D.; MEDEIROS, M. H. F. de. **Influência do Fator de Empacotamento do Agregado Graúdo em Concretos de Alta Resistência e de Resistência Convencional**. Trabalho de Iniciação Científica. Universidade Federal do Paraná (UTPR), Curitiba, Paraná, Brasil - março 2010.

HERBST, H. M.; MACÊDO, M. I. F.; ROCCO, A. M.. **Tecnologia Dos Nanotubos De Carbono: Tendências e Perspectivas de uma Área Multidisciplinar**. Quim, Nova, Vol. 27, N° 06, página 986 - 992, 2004.

HOFMANN. T.. **Nanotechnology for Water Filter**. Disponível em: <<http://www.medienportal.univie.ac.at/presse/aktue> e <http://www.presseme/dungen/detail/ansicht/artike/nanotechnology-for-water-filter/>>. Acesso em: 20/04/2013.

IJIMA, S.. **Helical Microtubules of Graphitic Carbon**. Nature, pp 354 a 356, 1991.

IBUK, H; BECKHAUS, K.. **Ultra high performance Concrete for Drill Bits in Special Foundation Engineering**. 3º International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

ITAMBÉ. C. C.. **Relatórios de ensaio – Cimento Portland Composto CP II – Z - 32**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatoriosdeensaio>>. Acesso em: 01/04/2013.

KIM, B. S.; KIM, S.; KIM, Y. J.; PARK, S. Y.; KOH, K. T.; JOH, C.. **R&D Activities and Application of Ultra High Performance Concrete to Cable Stayed Bridges**.

3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

KONSTA-GDOUTOS, M. S.; METAXA, Z. S.; SHAH; S. P.. **Highly Dispersed Carbon Nanotube Reinforced Cement Based Materials**. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 7, p. 1052-1059, 2010.

KOWALD, T.. **Influence of surface-modified Carbon Nanotubes on Ultra-High Performance Concrete**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – setembro, 2004.

KOWALD, T.; TRETTIN, R.; DÖRBAUM, N.; STÄDLER, T.; JIANG, X.. **Influence of Carbon Nanotubes on the micromechanical properties of a model system for ultra-high performance concrete**. Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – março, 2008.

LANKARD, D.. **Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications**. Very High Strength Cement-Based Materials, J. F. Young, Editor. Materials Research Society, Symposia Proceedings. Volume 42, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 277 a 286, 1985.

LÉON, J.M.S.. **Ductal Solutions Newsletter N° 11**. Lafarge Ductal ®. – novembro, 2011.

LÉON, J.M.S.. **Ductal Solutions Newsletter N° 12**. Lafarge Ductal ®. – março, 2012.

LOBO. A. de O., ANTUNES. E. F.; MARTIN. A. A.; CORAT. J. E.. **Estudo de Nanotubos de Carbono (mwnts) Utilizando Espectroscopia Raman Dispersiva e ft-raman**. VIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IV Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2005.

LONG, G.; WANG. X.; XIE. Y.. **Very-high-performance concrete with ultrafine powders**. Cement and Concrete Research. Cement and Concrete Research, Vol. 32. pp. 601 – 605, 2002.

MARCONDES, C. E. N.. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de Cimento Portland – absorção, permeabilidade, Penetração de cloretos e**

propriedades mecânicas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil - março 2012.

MATOS; C. F. de.. **Materiais Nanocompósitos Multifuncionais Formados entre Nanotubos De Carbono e Látices Poliméricos.** Curitiba, PR. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2011.

MATSUBARA, N.; OHNO, T.; SAKAI, G.; WATANABE, Y.; ISHII, S.; ASHIDA, M.. **Application of a New Type of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete to a Prestressed Concrete Bridge.** Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – março,2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, S. E. da S.. **Estudo Experimental de Concreto de Alto Desempenho Utilizando Agregados Graúdos Disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba.** Curitiba, PR. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2002.

MÖSER, B.; PFEIFER, C.. **Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete.** Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – março,2008.

NAAMAN, A.E.. **High performance fiber reinforced cement composites.** Proceedings of the IABSE Symposium on Concrete Structures for the Future, Paris, França, Setembro 1987, pp. 371 a 376.

NAAMAN, A.E.; WILLE, K.. **The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress.** 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

OLIVEIRA I. R. de; STUDART A. R.; PILEGGI R. G.; PANDOLFELLI V. C.. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico.** 1° ed. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 193 p, 2000.

PIÉRARD, J.; DOOMS, B.; CAUBERG, N.. **Evaluation of Durability Parameters of UHPC Using Accelerated Lab Tests**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

PIMIANTA, P.; MINDEGUIA J.C.; SIMON, A.; BEHLOUL M.; FELICETTI, R.; BAMONTE, P.; GAMBAROVA, P. G.. **Literature Review on the Behaviour of UHPFRC at High Temperature**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

RAEDER; M. F.. **Caracterização do Cimento Aluminoso e sua Aplicação em Concretos de Alta Resistência (CAR)**. Curitiba, PR. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2002.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; MAHDIKHANI, M.; MOGHADDAM, S. Y.; NIKRAVAN, M.; MOUSAVI, R.. **Mechanical Properties and Durability of Self Consolidating Mortars containing Nano SiO₂**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

RANDL, N.; PICHLER, A.; SCHNEIDER, W.; JUHART, J.. **Study on the Application of UHPC for Precast Tunnel Segments**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

REBENTROST, M.; WIGHT, G.. **Behaviour and Resistance of Ultra High Performance Concrete to Blast Effects**. Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – março, 2008.

REGINATO, L. A.; PIOVESAN. A.. **Emprego do modelo teórico de empacotamento de partículas para dosagens de concreto de pós-reativos e análise das propriedades mecânicas**. Anais do 53° Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, Brasil – novembro, 2011.

RESPLENDINO, J.. **State of the art of design and construction of UHPFRC structures in France**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology

for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M.. **Composition of reactive powder concretes**. Cement and Concrete Research. Vol. 25, N°. 7, p. 1501 – 1511, 1995.

ROKUGO, K.. **Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPRCC)**. Japan Society of Civil Engineers – Concrete Committee. Japão, março, 2008: 113 pgs.

ROUGEAU, P.; BORYS, B.. **Ultra High Performance Concrete with ultrafine particles other than silica fume**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2004.

SAGMEISTER, B. **On The Way To Micrometer Scale: Applications Of UHPC In Machinery Construction**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

SCHEYDT J. C.; MÜLLER, H. S.. **Microstructure of Ultra High Performance Concrete (UHPC) and its Impact on Durability**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

SCOARIS, M. R.; BARBOSA, M. P.; PINTO JR., N. de O.. **Avaliação da resistência e rigidez de concretos reforçados com fibras submetidas a cura térmica pelo método da maturidade**. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil Vol - e-Mat. 2, n. 2, p. 127-141, Novembro 2005.

SILVA, I. R. da; BARRETO, P. L. M.; BELLETTINI, I. C.. **Estudo das Dispersões Aquosas de Nanotubos de Carbono Utilizando Diferentes Surfactantes**. Quim. Nova, Vol. 36, No. 1, 5-9, 2013.

SOUZA FILHO. A. G. de.; FAGAN. S. B.. **Funcionalização De Nanotubos De Carbono**. Quim. Nova, Vol. 30, No. 7, 1695 a1703, 2007.

SRITHARAN, S.; AALETI, S.; BIERWAGEN, D.; GARDER, J.; ABU-HAWASH, A.. **Current Research on Ultra High Performance Concrete (UHPC) for Bridge Applications in Iowa**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

SURENDRA P. S.; SHIHO K.; PENGKUN H.; CORR. D.. **Application of Nanoparticles**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

TADROS, M. K.; MORCOUS, G.. **Application of Ultra-High Performance Concrete to Bridge Girders**. Department of Civil Engineering University of Nebraska-Lincoln. Omaha, Nebraska Estados Unidos – dezembro, 2008: 72 pgs.

TALEBINEJAD, I.; BASSAM, S. A.; IRANMANESH, A.; SHEKARCHIZADEH, M.. **Optimizing mix proportions of Normal Weight Reactive Powder Concrete with Strengths of 200-350 MPa**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – setembro, 2004.

TEICHMANN, T.; SCHMIDT M.. **Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Alemanha – setembro, 2004.

THE EUROPEAN UNION – BRITE EURAM III – **General Guidelines for Durability Design and Redesign – DuraCrete. Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures**. Project BE95 – 1347, Document BE95 – 1347/R15, fevereiro, 2000.

VANDERLEI, R. D.. **Análise experimental do concreto de pós-reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 168 p., 2004.

WALRAVEN, J.. **On the way to international design recommendations for Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete**. 3° International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials – HiPerMat. Kassel, Alemanha – março, 2012.

WATH TOWER BIBLE and TRACT SOCIETY of PENNSYLVANIA. **Tijolo**. Disponível em: <<http://www.wol.jw.org/pr/wod/d/r5/lp-t/1200000822> >. Acesso em: 10/01/2011.

YAZICI H.; YARDIMCI. M. Y.; AYDIN S.; KARABULUT A. S.. **Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes**. Construction and Building Materials, N° 23. p.1223 – 1231, 2009.

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Resultados da dosagem do concreto

Anexo B - Resultados dos ensaios compressão axial

Anexo C - Resultados dos ensaios de tração na flexão

Anexo D - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

Anexo E - Resultados do ensaio de retração

Anexo F – Testes estatísticos

Anexo A - Resultados da dosagem do concreto

Tabela 1. Ensaio compressão axial traço: REFERÊNCIA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	47,5	CP 04	77,4
CP 02	76,4	CP 05	99,1
CP 03	48,1	CP 06	65,4
Média	47,8	Média	88,3
Desvio padrão	0,4	Desvio padrão	15,3

Espalhamento 290 mm

Tabela 2. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 5% DE SÍLICA ATIVA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	96,6	CP 04	96,5
CP 02	83,7	CP 05	80,7
CP 03	89,9	CP 06	92,6
Média	93,3	Média	94,6
Desvio padrão	4,7	Desvio padrão	2,8

Espalhamento 330 mm

Tabela 3. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 10% SÍLICA ATIVA REFERÊNCIA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	99,5	CP 04	101,6
CP 02	114,8	CP 05	111,2
CP 03	68,1	CP 06	113,5
Média	107,2	Média	112,4
Desvio padrão	10,8	Desvio padrão	6,3
Espalhamento 320 mm			

Tabela 4. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 15% SÍLICA ATIVA REFERÊNCIA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	105,6	CP 04	107,7
CP 02	99	CP 05	91,5
CP 03	117,5	CP 06	116,6
Média	111,6	Média	112,2
Desvio padrão	9,4	Desvio padrão	6,3
Espalhamento 275 mm			

Tabela 5. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 20% SÍLICA ATIVA REFERÊNCIA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	115,3	CP 04	120
CP 02	83,1	CP 05	107
CP 03	79,9	CP 06	119,5
Média	99,2	Média	119,8
Desvio padrão	22,8	Desvio padrão	0,4
Espalhamento 180 mm			

Tabela 6. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 25% SÍLICA ATIVA REFERÊNCIA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	87,7	CP 04	112,5
CP 02	90,3	CP 05	115,5
CP 03	109,5	CP 06	127,8
Média	99,9	Média	121,7
Desvio padrão	13,6	Desvio padrão	8,7
Espalhamento 170 mm			

Tabela 7. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 30% SÍLICA ATIVA REFERÊNCIA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	109	CP 04	116,5
CP 02	108,9	CP 05	121,7
CP 03	107,4	CP 06	44,8
Média	109,0	Média	119,1
Desvio padrão	0,1	Desvio padrão	3,7
Espalhamento 160 mm			

Tabela 8. Ensaio compressão axial traço: SUBSTITUIÇÃO 5% SÍLICA ATIVA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	73	CP 04	93
CP 02	107,8	CP 05	96,7
CP 03	101,5	CP 06	80,6
Média	104,7	Média	94,9
Desvio padrão	4,5	Desvio padrão	2,6
Espalhamento 330 mm			

Tabela 9. Ensaio compressão axial traço: SUBSTITUIÇÃO 10% SÍLICA ATIVA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	117,2	CP 04	113,4
CP 02	106,6	CP 05	117
CP 03	106	CP 06	124,3
Média	106,3	Média	115,2
Desvio padrão	7,9	Desvio padrão	2,5
Espalhamento 190 mm			

Tabela 10. Ensaio compressão axial traço: SUBSTITUIÇÃO 15% SÍLICA ATIVA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	117,4	CP 04	110,6
CP 02	116,4	CP 05	132,9
CP 03	121,5	CP 06	122,5
Média	118,4	Média	122
Desvio padrão	2,9	Desvio padrão	15,8
Espalhamento 170 mm			

Tabela 11. Ensaio compressão axial traço: SUBSTITUIÇÃO 20 % SÍLICA ATIVA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	116,8	CP 04	116,5
CP 02	141,1	CP 05	133
CP 03	115,1	CP 06	122,9
Média	116,0	Média	128,0
Desvio padrão	17,2	Desvio padrão	11,7
Espalhamento 165 mm			

Tabela 12. Ensaio compressão axial traço: SUBSTITUIÇÃO 25% SÍLICA ATIVA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	117,5	CP 04	102,2
CP 02	115,5	CP 05	120,6
CP 03	144	CP 06	103,8
Média	116,5	Média	112,2
Desvio padrão	1,4	Desvio padrão	13,0
Espalhamento 130 mm			

Tabela 13. Ensaio compressão axial traço: SUBSTITUIÇÃO 30% SÍLICA ATIVA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	144,2	CP 04	100,4
CP 02	134,3	CP 05	87,7
CP 03	82,2	CP 06	92,1
Média	108,3	Média	96,25
Desvio padrão	7,0	Desvio padrão	9,0
Espalhamento 115 mm			

Tabela 14. Ensaio compressão axial traço: REFERÊNCIA.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	74,9	CP 04	89,7
CP 02	90,2	CP 05	80,4
CP 03	80	CP 06	104,3
Média	85,1	Média	85,1
Desvio padrão	10,8	Desvio padrão	6,6
Espalhamento 290 mm			

Tabela 15. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 5% DE PÓ DE QUARTZO.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	101	CP 04	95,2
CP 02	99,1	CP 05	77,5
CP 03	128	CP 06	76,8
Média	99,1	Média	95,2
Desvio padrão	1,3	Desvio padrão	12,5
Espalhamento 320 mm			

Tabela 16. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 10% DE PÓ DE QUARTZO.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	95	CP 04	77,1
CP 02	125	CP 05	62,2
CP 03	118,2	CP 06	76
Média	95,0	Média	77,1
Desvio padrão	21,2	Desvio padrão	10,5
Espalhamento 330 mm			

Tabela 17. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 15% DE PÓ DE QUARTZO.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	123	CP 04	63,9
CP 02	115	CP 05	77,3
CP 03	104,4	CP 06	128,8
Média	104,4	Média	128,8
Desvio padrão	5,7	Desvio padrão	9,5
Espalhamento 270 mm			

Tabela 18. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 20% PÓ DE QUARTZO.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	115,6	CP 04	63,9
CP 02	97,7	CP 05	98,7
CP 03	130,4	CP 06	79,7
Média	97,7	Média	98,7
Desvio padrão	12,7	Desvio padrão	24,6

Espalhamento 260 mm

Tabela 19. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 25% DE PÓ DE QUARTZO.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	125	CP 04	99,5
CP 02	111,5	CP 05	74,5
CP 03	131	CP 06	130,1
Média	111,5	Média	99,5
Desvio padrão	9,5	Desvio padrão	17,7

Espalhamento 250 mm

Tabela 20. Ensaio compressão axial traço: ADIÇÃO DE 30% DE PÓ DE QUARTZO.

Idade 7 dias		Idade 28 dias	
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Tensão (MPa)
CP 01	120,7	CP 04	50,3
CP 02	94	CP 05	73,5
CP 03	135,2	CP 06	83,7
Média	128,0	Média	83,7
Desvio padrão	18,9	Desvio padrão	16,4

Espalhamento 215 mm

Anexo B - Resultados dos ensaios compressão axial

Tabela 1. Resultados compressão axial **sem tratamento classificatório/estatístico.**

Concreto de referência. Idade: 7 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	149128,23	15206,90	75,95
CP 02	166520,33	16980,41	84,81
CP 03	170014,81	17336,75	86,59
CP 04	203383,16	20739,39	103,58
CP 05	180367,73	18392,46	91,86
CP 06	159119,66	16225,75	81,04
Média	171422,32	17480,28	87,31
Mediana	168267,57	17158,58	85,70
Mínimo	149128,23	15206,90	75,95
Máximo	203383,16	20739,39	103,58
Amplitude	54254,93	5532,49	27,63
Desvio padrão	18846,26	1921,79	9,60
Coef. var. (%)	10,99%	10,99%	10,99%

Tabela 2. Resultados compressão axial **com tratamento classificatório/estatístico.**

Concreto de referência. Idade: 7 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 02	166520,33	16980,41	84,81
CP 03	170014,81	17336,75	86,59
CP 05	180367,73	18392,46	91,86
CP 06	159119,66	16225,75	81,04
Média	169005,63	17233,84	86,08
Mediana	168267,57	17158,58	85,70
Mínimo	159119,66	16225,75	81,04
Máximo	180367,73	18392,46	91,86
Amplitude	21248,07	2166,71	10,82
Desvio padrão	8832,23	900,64	4,50
Coef. var. (%)	5,23%	5,23%	5,23%

Tabela 3. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

Concreto de referência. Idade: 7 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 01	Estatístico	Abaixo do desvio padrão
CP 04	Estatístico	Acima do desvio padrão

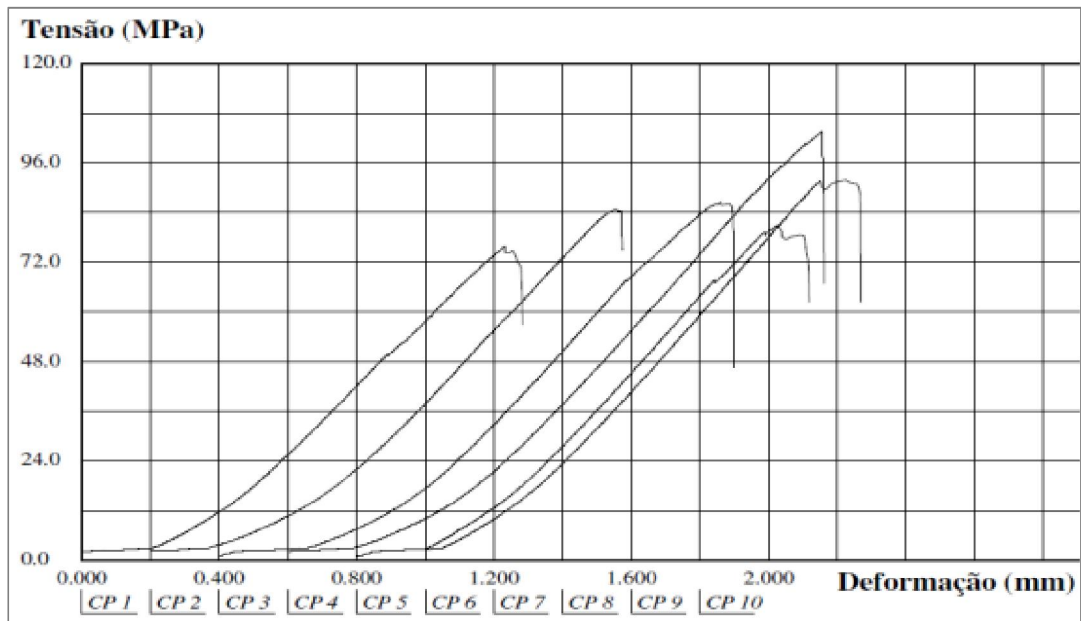
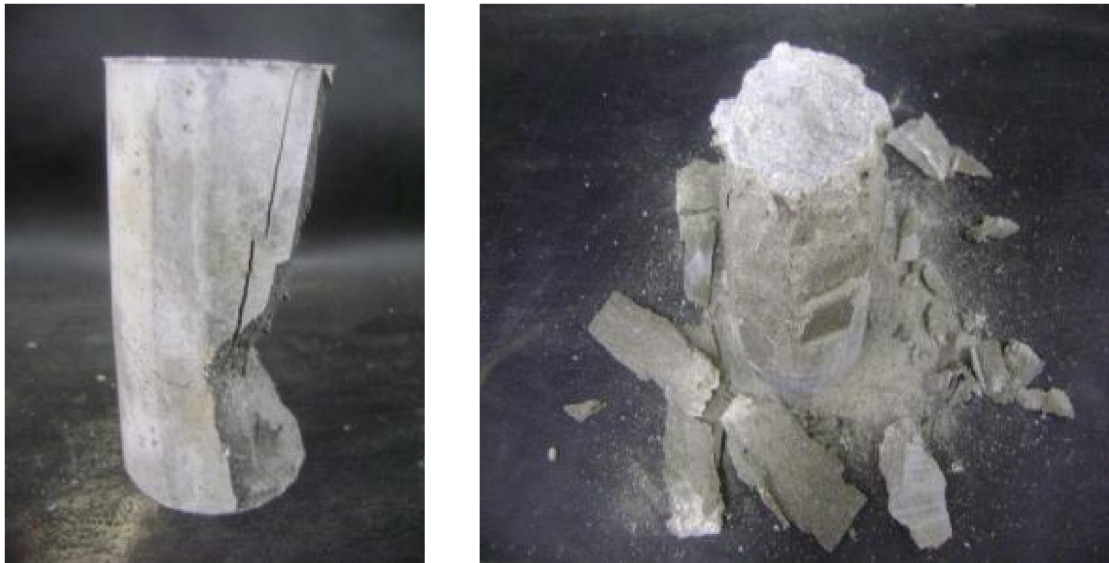
**Figura 1. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) do concreto de referência – 7 dias.****Figura 2. Exemplo de rupturas consideradas inadequadas de um corpo de prova.**

Tabela 4. Resultados compressão axial **sem tratamento classificatório/estatístico.**

Concreto de referência. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	199195,80	20312,39	101,45
CP 02	167785,58	17109,43	85,45
CP 03	160796,61	16396,75	81,89
CP 04	209498,50	21362,98	106,70
CP 05	171631,52	17501,61	87,41
CP 06	161670,22	16485,84	82,34
Média	178429,71	18194,83	90,87
Mediana	169708,55	17305,52	86,43
Mínimo	160796,61	16396,75	81,89
Máximo	209498,50	21362,98	106,70
Amplitude	48701,89	4966,23	24,81
Desvio padrão	20725,92	2113,46	10,56
Coef. var. (%)	11,62%	11,62%	11,62%

Tabela 5. Resultados compressão axial **com tratamento classificatório/estatístico.**

Concreto de referência. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 02	167785,58	17109,43	85,45
CP 03	160796,61	16396,75	81,89
CP 05	171631,52	17501,61	87,41
CP 06	161670,22	16485,84	82,34
Média	165470,98	16873,41	84,27
Mediana	164727,90	16797,64	83,90
Mínimo	160796,61	16396,75	81,89
Máximo	171631,52	17501,61	87,41
Amplitude	10834,91	1104,86	5,52
Desvio padrão	5151,22	525,28	2,62
Coef. var. (%)	3,11%	3,11%	3,11%

Tabela 6. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

Concreto de referência. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 01	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 04	Estatístico	Acima do desvio padrão

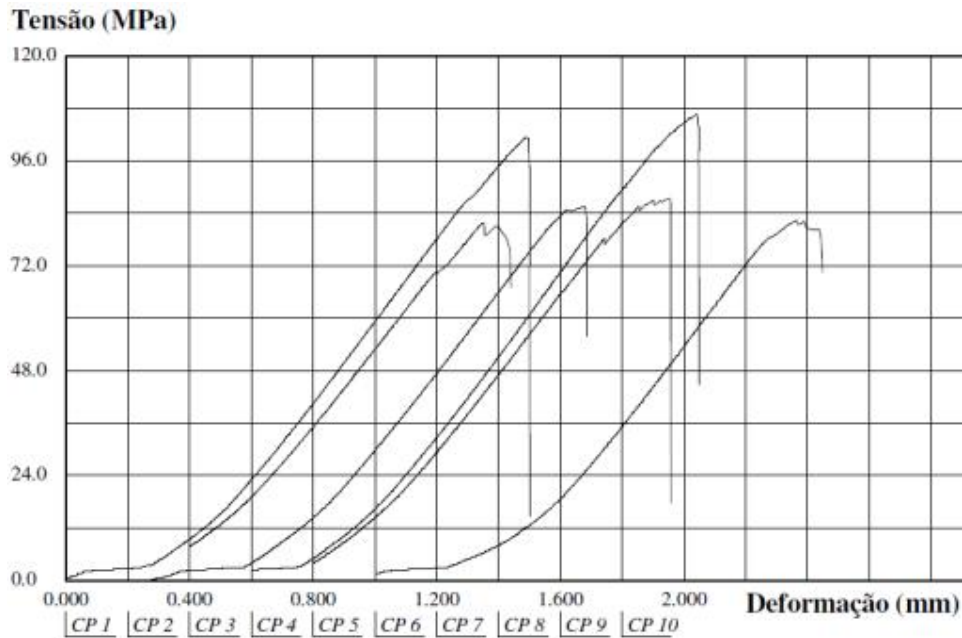


Figura 3. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) do concreto de referência – 28 dias.

Tabela 7. Resultados ensaio compressão axial **sem** tratamento classificatório/estatístico.

0,1%. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	208745,38	21286,18	106,31
CP 02	153546,55	15657,45	78,20
CP 03	231881,30	23645,40	118,10
CP 04	140813,77	14359,06	71,72
CP 05	184083,14	18771,33	93,75
CP 06	210944,50	21510,43	107,43
Média	188335,77	19204,98	95,92
Mediana	196414,26	20028,76	100,03
Mínimo	140813,77	14359,06	71,72
Máximo	231881,30	23645,40	118,10
Amplitude	91067,53	9286,34	46,38
Desvio padrão	35526,43	3622,70	18,09
Coef. var. (%)	18,86%	18,86%	18,86%

Tabela 8. Resultados ensaio compressão axial com tratamento classificatório/estatístico.

0,1%. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	208745,38	21286,18	106,31
CP 02	153546,55	15657,45	78,20
CP 05	184083,14	18771,33	93,75
CP 06	210944,50	21510,43	107,43
Média	189329,89	19306,35	96,42
Mediana	196414,26	20028,76	100,03
Mínimo	153546,55	15657,45	78,20
Máximo	210944,50	21510,43	107,43
Amplitude	57397,95	5852,98	29,23
Desvio padrão	26783,88	2731,20	13,64
Coef. var. (%)	14,15%	14,15%	14,15%

Tabela 9. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,1%. Idade: 07 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 03	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 04	Estatístico	Abaixo do desvio padrão

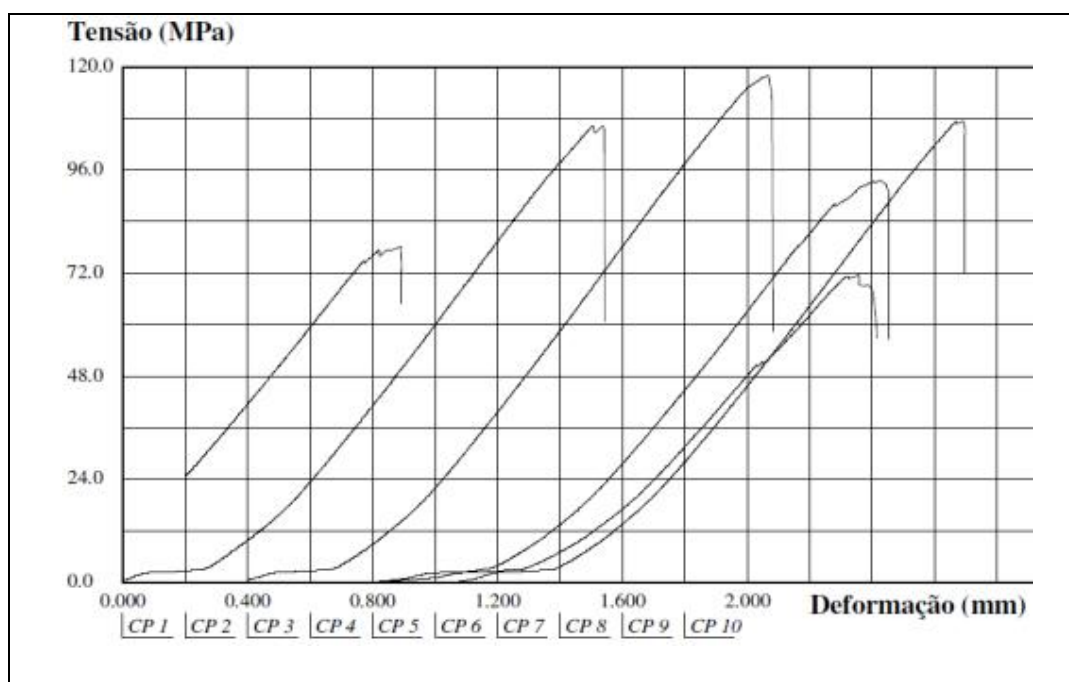
**Figura 4. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,1% – 7 dias.**

Tabela 10. Resultados ensaio compressão axial *s*/ tratamento classificatório/estatístico.

0,1%. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	120007,51	12237,41	61,12
CP 02	174071,64	17750,43	88,65
CP 03	178289,13	18180,50	90,80
CP 04	211065,00	21522,72	107,49
CP 05	166791,45	17008,06	84,95
CP 06	116523,06	11882,09	59,34
Média	161124,63	16430,20	82,06
Mediana	170431,55	17379,25	86,80
Mínimo	116523,06	11882,09	59,34
Máximo	211065,00	21522,72	107,49
Amplitude	94541,94	9640,63	48,15
Desvio padrão	36519,35	3723,95	18,60
Coef. var. (%)	22,67%	22,67%	22,67%

Tabela 11. Resultados ensaio compressão axial *c*/ tratamento classificatório/estatístico.

0,1%. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 02	174071,64	17750,43	88,65
CP 03	178289,13	18180,50	90,80
CP 05	166791,45	17008,06	84,95
Média	173050,74	17646,33	88,13
Mediana	174071,64	17750,43	88,65
Mínimo	166791,45	17008,06	84,95
Máximo	178289,13	18180,50	90,80
Amplitude	11497,68	1172,44	5,85
Desvio padrão	5816,43	593,11	2,96
Coef. var. (%)	3,36%	3,36%	3,36%

Tabela 12. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,1%. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 03	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 04	Estatístico	Abaixo do desvio padrão

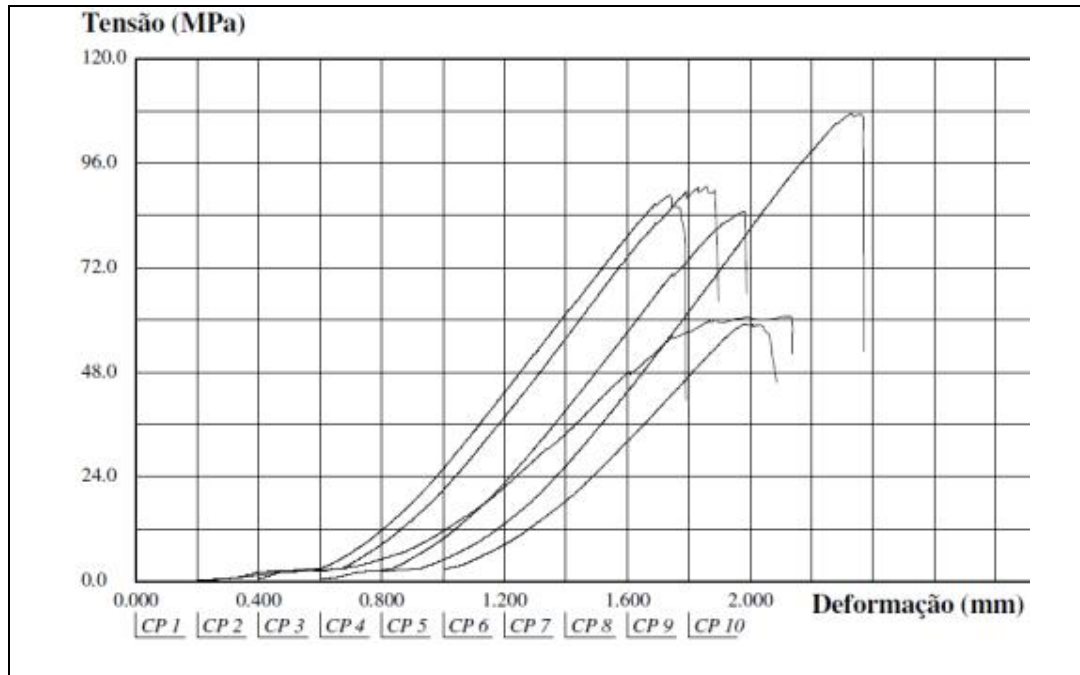


Figura 5. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,1% – 28 dias.

Tabela 13. Resultados ensaio compressão axial s/ tratamento classificatório/estatístico.

0,20%. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	225806,11	23025,90	115,00
CP 02	205040,02	20908,34	104,43
CP 03	176672,42	18015,64	89,98
CP 04	183520,81	18713,98	93,47
CP 05	171631,52	17501,61	87,41
CP 06	148596,03	15152,63	75,68
Média	185211,15	18886,35	94,33
Mediana	180096,62	18364,81	91,73
Mínimo	148596,03	15152,63	75,68
Máximo	225806,11	23025,90	115,00
Amplitude	77210,08	7873,27	39,32
Desvio padrão	26988,80	2752,10	13,75
Coef. var. (%)	14,57%	14,57%	14,57%

Tabela 14. Resultados ensaio compressão axial c/ tratamento classificatório/estatístico.

0,20 %. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 02	205040,02	20908,34	104,43
CP 03	176672,42	18015,64	89,98
CP 04	183520,81	18713,98	93,47
CP 05	171631,52	17501,61	87,41
CP 06	148596,03	15152,63	75,68
Média	177092,16	18058,44	90,19
Mediana	176672,42	18015,64	89,98
Mínimo	148596,03	15152,63	75,68
Máximo	205040,02	20908,34	104,43
Amplitude	56443,99	5755,71	28,75
Desvio padrão	20398,74	2080,10	10,39
Coef. var. (%)	11,52%	11,52%	11,52%

Tabela 15. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,20 %. Idade: 07 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 01	Estatístico	Acima do desvio padrão

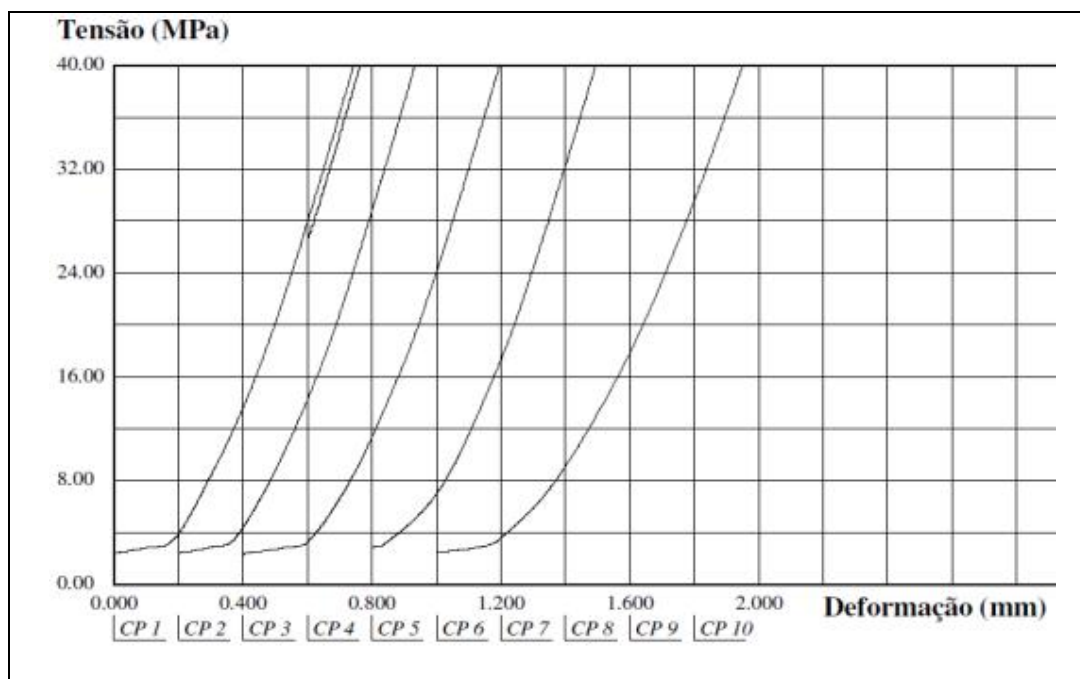
**Figura 6. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) do 0,2% – 7 dias.**

Tabela 16. Resultados ensaio compressão axial *s*/ tratamento classificatório/estatístico.

0,20 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	173308,47	17672,61	88,27
CP 02	157533,08	16063,96	80,23
CP 03	128874,27	13141,57	65,64
CP 04	181884,02	18547,08	92,63
CP 05	171280,06	17465,77	87,23
CP 06	182345,94	18594,18	92,87
Média	165870,97	16914,20	84,48
Mediana	172294,27	17569,19	87,75
Mínimo	128874,27	13141,57	65,64
Máximo	182345,94	18594,18	92,87
Amplitude	53471,67	5452,61	27,23
Desvio padrão	20251,88	2065,12	10,31
Coef. var. (%)	12,21%	12,21%	12,21%

Tabela 17. Resultados ensaio compressão axial *c*/ tratamento classificatório/estatístico.

0,20 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	173308,47	17672,61	88,27
CP 02	157533,08	16063,96	80,23
CP 04	181884,02	18547,08	92,63
CP 05	171280,06	17465,77	87,23
CP 06	182345,94	18594,18	92,87
Média	173270,31	17668,72	88,25
Mediana	173308,47	17672,61	88,27
Mínimo	157533,08	16063,96	80,23
Máximo	182345,94	18594,18	92,87
Amplitude	24812,86	2530,22	12,64
Desvio padrão	10101,81	1030,10	5,15
Coef. var. (%)	5,83%	5,83%	5,83%

Tabela 18. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,20 %. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 03	Estatístico	Abaixo do desvio padrão

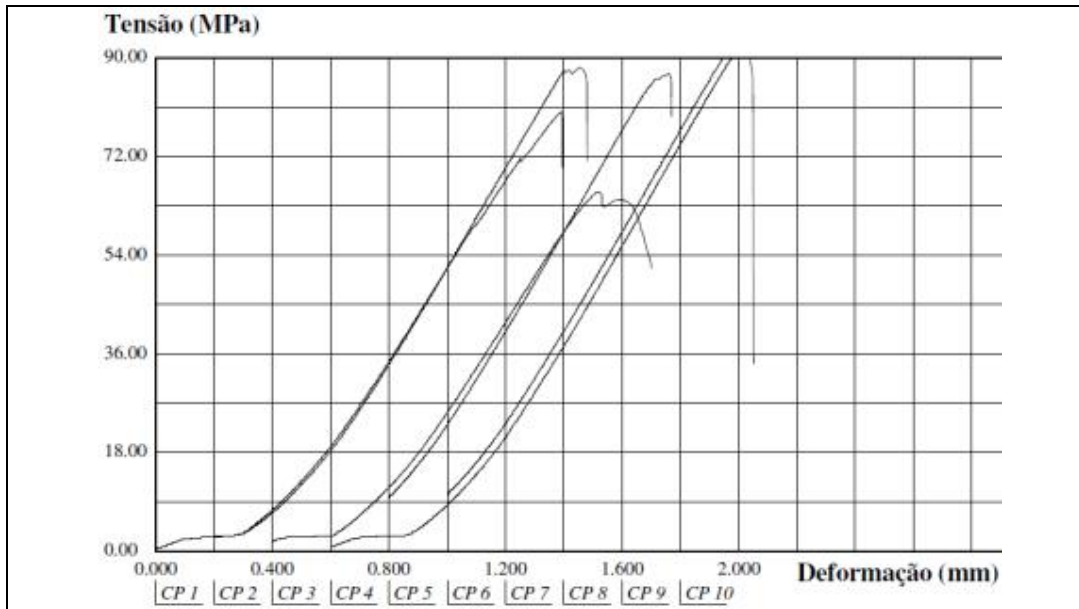


Figura 7. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,2% – 28 dias.

Tabela 19. Resultados ensaio compressão axial s/ tratamento classificatório/estatístico.

0,30 %. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	173238,19	17665,44	88,23
CP 02	154430,20	15747,56	78,65
CP 03	157271,98	16037,34	80,10
CP 04	157934,73	16104,92	80,44
CP 05	178961,91	18249,10	91,14
CP 06	134658,25	13731,37	68,58
Média	159415,88	16255,96	81,19
Mediana	157603,36	16071,13	80,27
Mínimo	134658,25	13731,37	68,58
Máximo	178961,91	18249,10	91,14
Amplitude	44303,66	4517,73	22,56
Desvio padrão	15605,71	1591,34	7,95
Coef. var. (%)	9,79%	9,79%	9,79%

Tabela 20. Resultados ensaio compressão axial c/ tratamento classificatório/estatístico.

0,30 %. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	173238,19	17665,44	88,23
CP 02	154430,20	15747,56	78,65
CP 03	157271,98	16037,34	80,10
CP 04	157934,73	16104,92	80,44
Média	160718,78	16388,82	81,86
Mediana	157603,36	16071,13	80,27
Mínimo	154430,20	15747,56	78,65
Máximo	173238,19	17665,44	88,23
Amplitude	18807,99	1917,88	9,58
Desvio padrão	8483,58	865,08	4,32
Coef. var. (%)	5,28%	5,28%	5,28%

Tabela 21. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,30 %. Idade: 07 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 05	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 06	Estatístico	Abaixo do desvio padrão

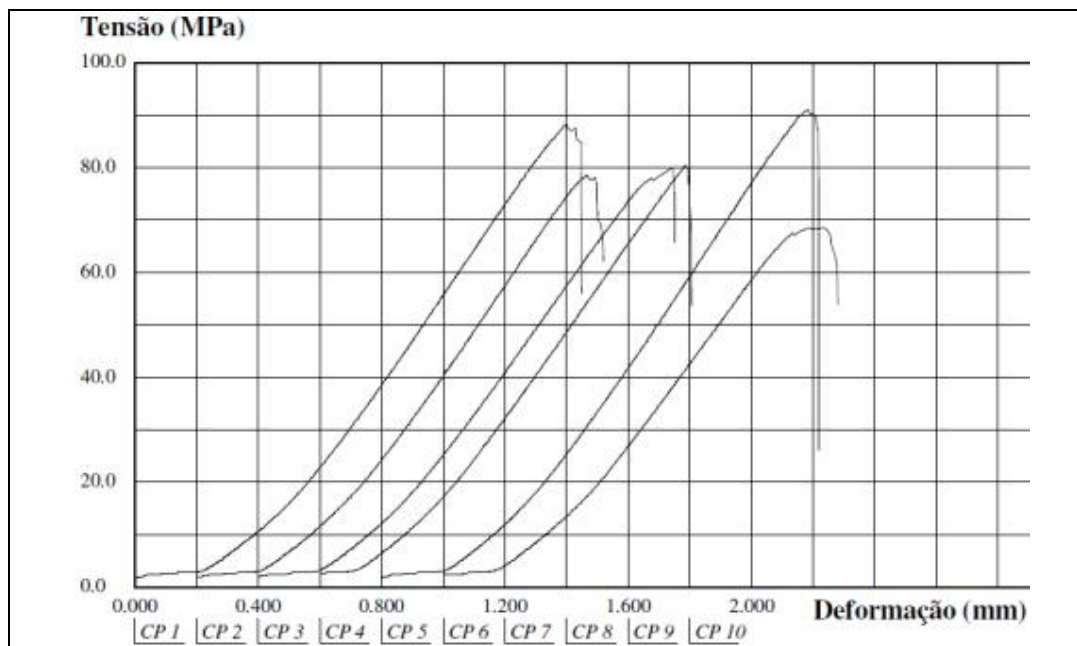
**Figura 8. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,3% – 7 dias.**

Tabela 22. Resultados ensaio compressão axial *s*/ tratamento classificatório/estatístico.

0,30 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	144730,00	14758,41	73,71
CP 02	143715,80	14654,99	73,19
CP 03	134296,75	13694,51	68,40
CP 04	153375,84	15640,04	78,11
CP 05	159712,11	16286,16	81,34
CP 06	151518,14	15450,61	77,17
Média	147891,44	15080,79	75,32
Mediana	148124,07	15104,51	75,44
Mínimo	134296,75	13694,51	68,40
Máximo	159712,11	16286,16	81,34
Amplitude	25415,36	2591,65	12,94
Desvio padrão	8890,51	906,58	4,53
Coef. var. (%)	6,01%	6,01%	6,01%

Tabela 23. Resultados ensaio compressão axial *c*/ tratamento classificatório/estatístico.

0,30 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	144730,00	14758,41	73,71
CP 02	143715,80	14654,99	73,19
CP 04	153375,84	15640,04	78,11
CP 06	151518,14	15450,61	77,17
Média	148334,95	15126,01	75,55
Mediana	148124,07	15104,51	75,44
Mínimo	143715,80	14654,99	73,19
Máximo	153375,84	15640,04	78,11
Amplitude	9660,04	985,05	4,92
Desvio padrão	4826,16	492,13	2,46
Coef. var. (%)	3,25%	3,25%	3,25%

Tabela 24. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,30 %. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 03	Estatístico	Abaixo do desvio padrão
CP 05	Estatístico	Acima do desvio padrão

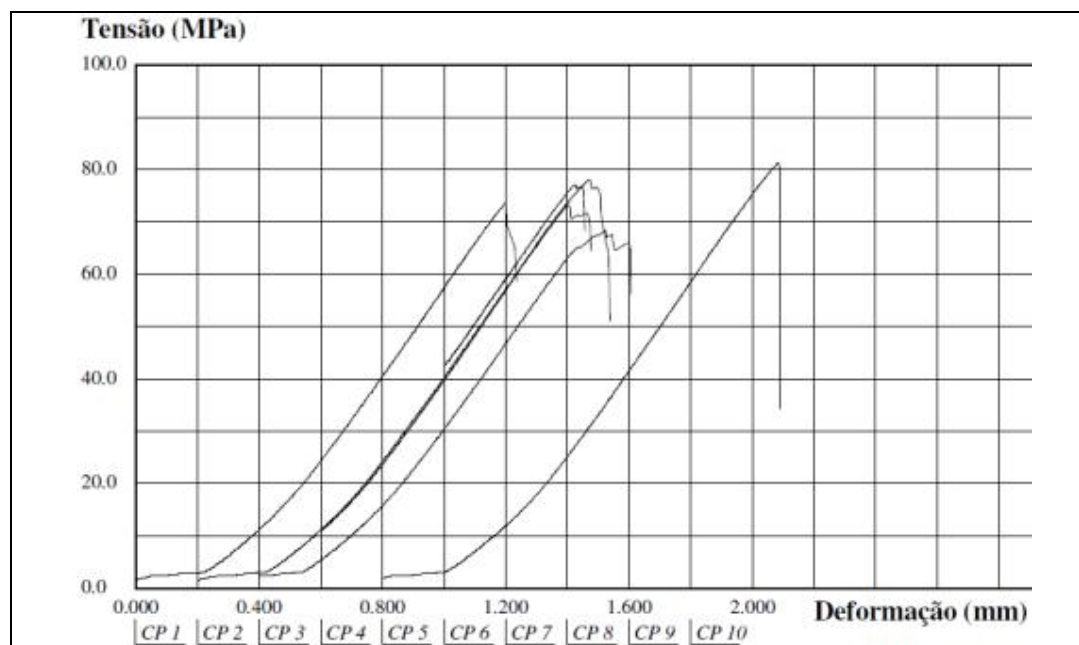


Figura 9. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,3% – 28 dias.

Anexo C - Resultados dos ensaios de tração na flexão

Tabela 1. Resultados ensaio de flexão **sem tratamento classificatório/estatístico.**

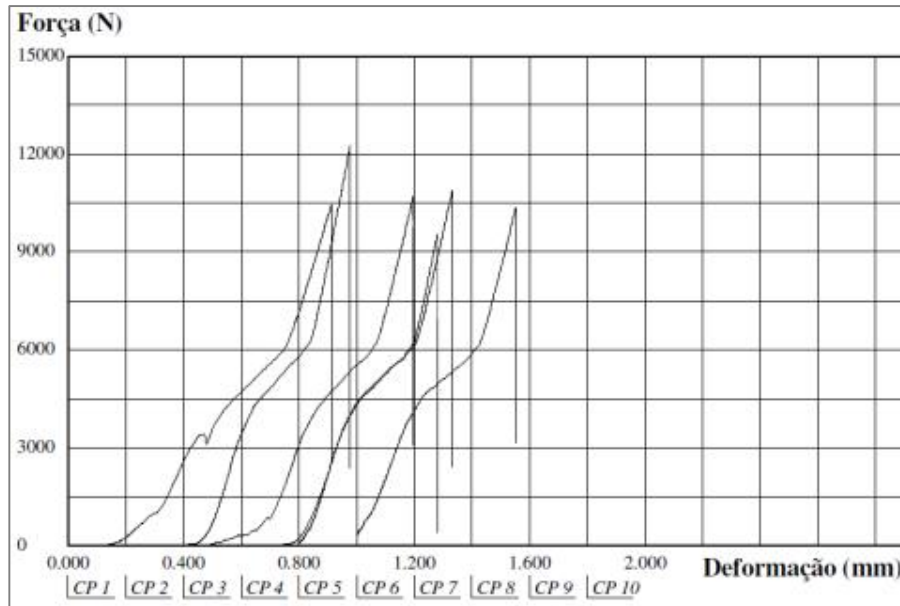
Concreto de referência. Idade: 7 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	10443,29	1064,92	24,48
CP 02	10714,42	1092,57	25,11
CP 03	12240,75	1248,21	28,69
CP 04	9559,63	974,81	22,41
CP 05	10895,17	1111,00	25,54
CP 06	10373,00	1057,76	24,31
Média	10704,38	1091,55	25,09
Mediana	10578,86	1078,75	24,80
Mínimo	9559,63	974,81	22,41
Máximo	12240,75	1248,21	28,69
Amplitude	2681,12	273,40	6,28
Desvio padrão	881,52	89,89	2,07
Coef. var. (%)	8,24%	8,24%	8,24%

Tabela 2. Resultados ensaio de flexão **com tratamento classificatório/estatístico.**

Concreto de referência. Idade: 7 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	10443,29	1064,92	24,48
CP 02	10714,42	1092,57	25,11
CP 05	10895,17	1111,00	25,54
CP 06	10373,00	1057,76	24,31
Média	10660,86	1081,56	24,86
Mediana	10714,42	1078,75	24,80
Mínimo	10373,00	1057,76	24,31
Máximo	10895,17	1111,00	25,54
Amplitude	522,17	53,24	1,23
Desvio padrão	265,17	24,71	0,57
Coef. var. (%)	2,29%	2,29%	2,29%

Tabela 3. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

Concreto de referência. Idade: 7 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 01	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 04	Estatístico	Acima do desvio padrão

**Figura 1. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) do concreto de referência – 7 dias.****Tabela 4. Resultados ensaio de flexão sem tratamento classificatório/estatístico.**

Concreto de referência. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	9218,21	940,00	21,61
CP 02	9328,67	951,26	21,86
CP 03	9991,42	1018,85	23,42
CP 04	9820,71	1001,44	23,02
CP 05	10533,67	1074,14	24,69
CP 06	10734,50	1094,62	25,16
Média	9937,86	1013,39	23,29
Mediana	9906,07	1010,15	23,22
Mínimo	9218,21	940,00	21,61
Máximo	10734,50	1094,62	25,16
Amplitude	1516,29	154,62	3,55
Desvio padrão	615,67	62,78	1,44
Coef. var. (%)	6,20%	6,20%	6,20%

Tabela 5. Resultados ensaio de flexão com tratamento classificatório/estatístico.

Concreto de referência. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 02	9328,67	951,26	21,86
CP 03	9991,42	1018,85	23,42
CP 04	9820,71	1001,44	23,02
CP 05	10533,67	1074,14	24,69
Média	9918,62	1011,42	23,25
Mediana	9906,07	1010,15	23,22
Mínimo	9328,67	951,26	21,86
Máximo	10533,67	1074,14	24,69
Amplitude	1205,00	122,88	2,83
Desvio padrão	497,06	50,69	1,17
Coef. var. (%)	5,01%	5,01%	5,01%

Tabela 6. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

Concreto de referência. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 01	Estatístico	Abaixo do desvio padrão
CP 06	Estatístico	Acima do desvio padrão

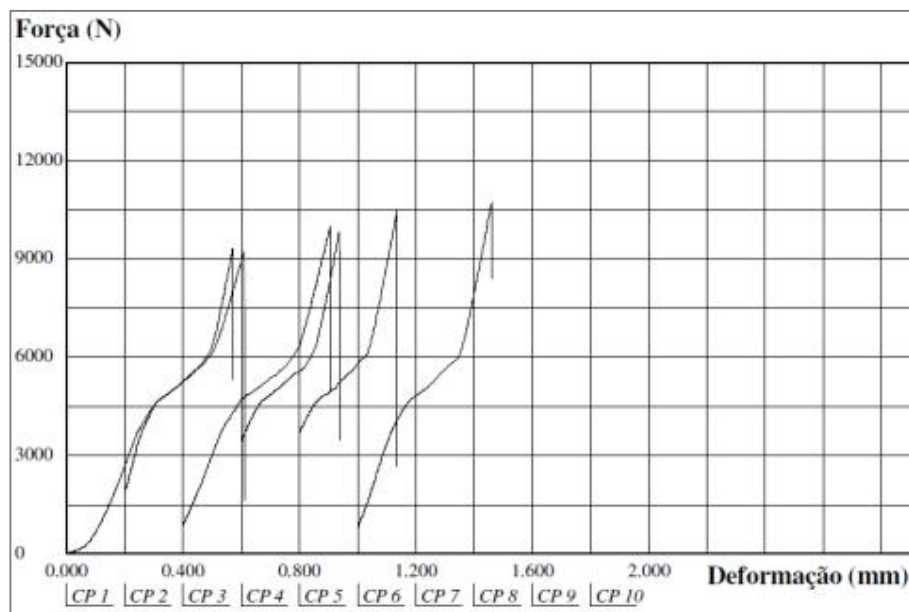
**Figura 2. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) do concreto de referência – 28 dias.**

Tabela 7. Resultados ensaio de flexão sem tratamento classificatório/estatístico.

0,10%. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	10935,33	1115,10	25,63
CP 02	11588,04	1181,66	27,16
CP 03	11186,38	1140,70	26,22
CP 04	10764,63	1097,69	25,23
CP 05	10804,79	1101,79	25,32
CP 06	10121,96	1032,16	23,72
Média	10900,19	1111,52	25,55
Mediana	10870,06	1108,45	25,48
Mínimo	10121,96	1032,16	23,72
Máximo	11588,04	1181,66	27,16
Amplitude	1466,08	149,50	3,44
Desvio padrão	487,73	49,74	1,14
Coef. var. (%)	4,47%	4,47%	4,47%

Tabela 8. Resultados ensaio de flexão com tratamento classificatório/estatístico.

0,10%. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	10935,33	1115,10	25,63
CP 03	11186,38	1140,70	26,22
CP 04	10764,63	1097,69	25,23
CP 05	10804,79	1101,79	25,32
Média	10922,78	1113,82	25,60
Mediana	10870,06	1108,45	25,48
Mínimo	10764,63	1097,69	25,23
Máximo	11186,38	1140,70	26,22
Amplitude	421,75	43,01	0,99
Desvio padrão	190,24	19,40	0,45
Coef. var. (%)	1,74%	1,74%	1,74%

Tabela 9. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,10 %. Idade: 07 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 02	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 06	Ruptura inadequada	Verificar imagem

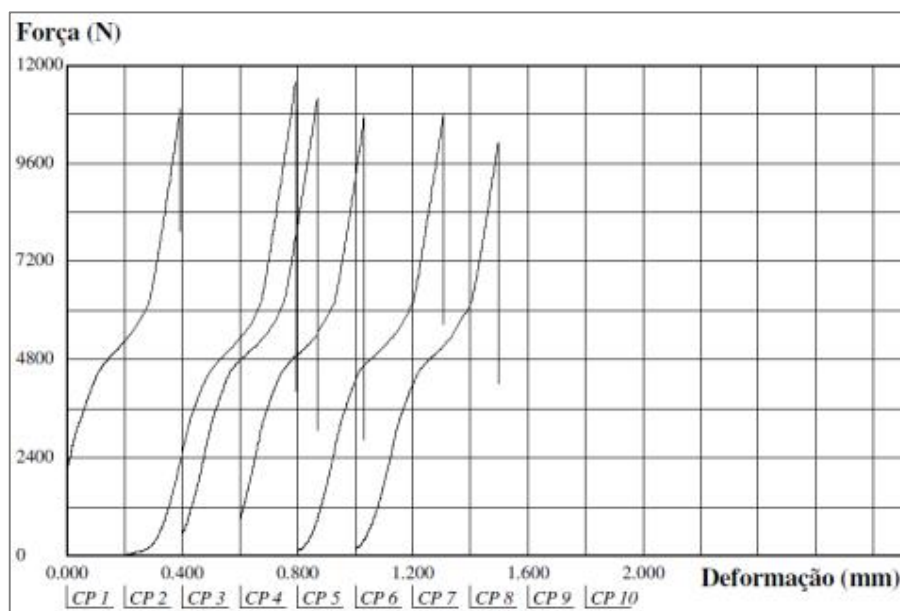


Figura 3. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,10% – 7 dias.

Tabela 10. Resultados ensaio de flexão **sem** tratamento classificatório/estatístico.

0,10 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	9810,67	1000,41	22,99
CP 02	9288,51	947,17	21,77
CP 03	9840,80	1003,49	23,06
CP 04	10603,96	1081,31	24,85
CP 05	10794,75	1100,76	25,30
CP 06	10403,13	1060,83	24,38
Média	10123,64	1032,33	23,73
Mediana	10121,97	1032,16	23,72
Mínimo	9288,51	947,17	21,77
Máximo	10794,75	1100,76	25,30
Amplitude	1506,24	153,59	3,53
Desvio padrão	571,77	58,30	1,34
Coef. var. (%)	5,65%	5,65%	5,65%

Tabela 11. Resultados ensaio de flexão com tratamento classificatório/estatístico.

0,10 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	9810,67	1000,41	22,99
CP 03	9840,80	1003,49	23,06
CP 04	10603,96	1081,31	24,85
CP 06	10403,13	1060,83	24,38
Média	10164,64	1036,51	23,82
Mediana	10121,97	1032,16	23,72
Mínimo	9810,67	1000,41	22,99
Máximo	10603,96	1081,31	24,85
Amplitude	793,29	80,90	1,86
Desvio padrão	400,02	40,79	0,94
Coef. var. (%)	3,94%	3,94%	3,94%

Tabela 12. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,10%. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 02	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 05	Ruptura inadequada	Verificar imagem

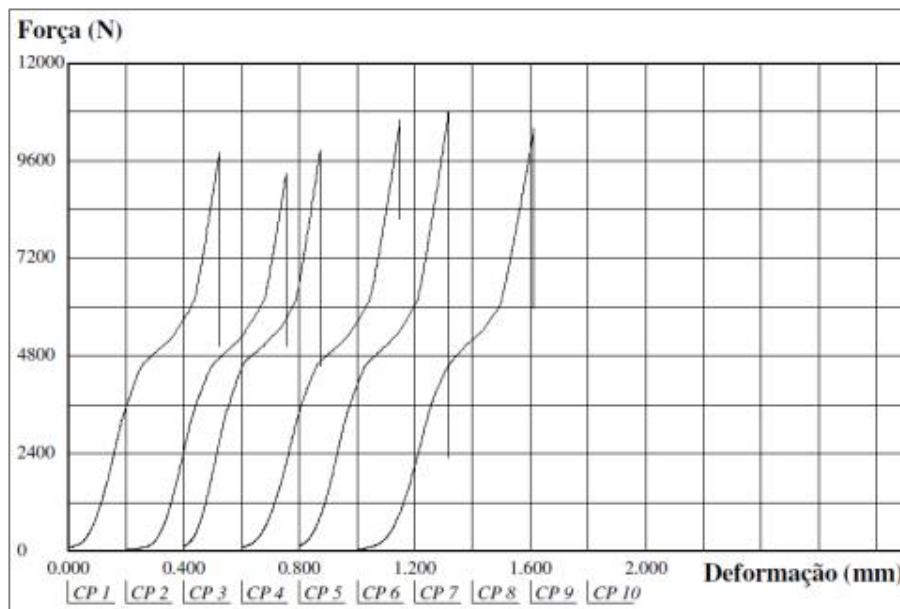
**Figura 4. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,10% – 28 dias.**

Tabela 13. Resultados ensaio de flexão sem tratamento classificatório/estatístico.

0,20%. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	10684,29	1089,50	25,04
CP 02	9439,13	962,53	22,12
CP 03	9670,09	986,08	22,66
CP 04	10192,25	1039,32	23,89
CP 05	10563,79	1077,21	24,76
CP 06	11166,29	1138,65	26,17
Média	10285,97	1048,88	24,11
Mediana	10378,02	1058,27	24,33
Mínimo	9439,13	962,53	22,12
Máximo	11166,29	1138,65	26,17
Amplitude	1727,16	176,12	4,05
Desvio padrão	650,54	66,34	1,53
Coef. var. (%)	6,32%	6,32%	6,32%

Tabela 14. Resultados ensaio de flexão com tratamento classificatório/estatístico.

0,20%. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	10684,29	1089,50	25,04
CP 03	9670,09	986,08	22,66
CP 04	10192,25	1039,32	23,89
CP 05	10563,79	1077,21	24,76
Média	10277,61	1048,03	24,09
Mediana	10378,02	1058,27	24,33
Mínimo	9670,09	986,08	22,66
Máximo	10684,29	1089,50	25,04
Amplitude	1014,20	103,42	2,38
Desvio padrão	455,94	46,49	1,07
Coef. var. (%)	4,44%	4,44%	4,44%

Tabela 15. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,20%. Idade: 07 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 02	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 06	Estatístico	Acima do desvio padrão

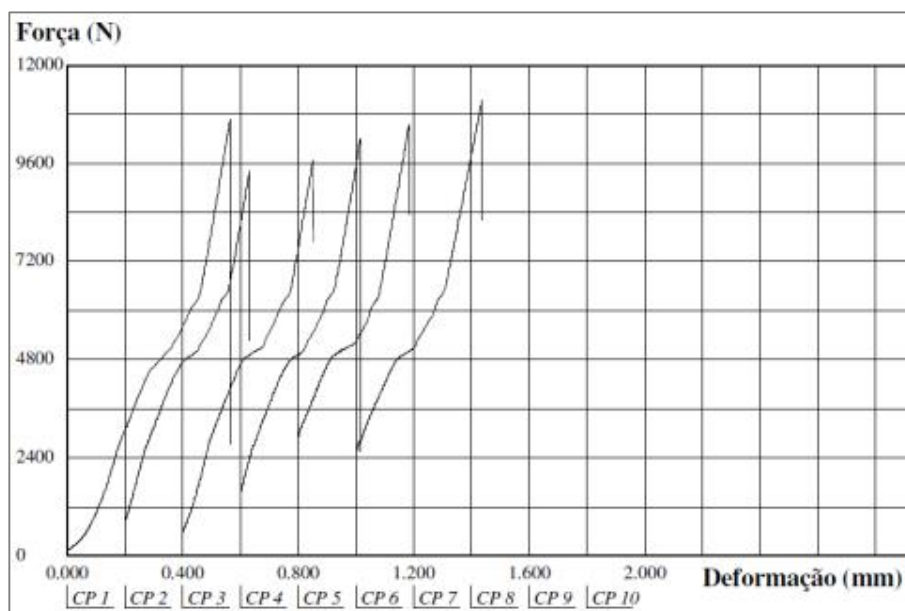


Figura 5. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,20% – 7 dias.

Tabela 16. Resultados ensaio de flexão **sem** tratamento classificatório/estatístico.

0,20%. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	9459,21	964,58	22,17
CP 02	9870,92	1006,56	23,13
CP 03	8776,38	894,95	20,57
CP 04	9308,59	949,22	21,82
CP 05	9599,80	978,91	22,50
CP 06	9680,13	987,10	22,69
Média	9449,17	963,55	22,15
Mediana	9529,51	971,75	22,34
Mínimo	8776,38	894,95	20,57
Máximo	9870,92	1006,56	23,13
Amplitude	1094,54	111,61	2,56
Desvio padrão	381,16	38,87	0,89
Coef. var. (%)	4,03%	4,03%	4,03%

Tabela 17. Resultados ensaio de flexão com tratamento classificatório/estatístico.

0,20%. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	9459,21	964,58	22,17
CP 04	9308,59	949,22	21,82
CP 05	9599,80	978,91	22,50
CP 06	9680,13	987,10	22,69
Média	9511,93	969,95	22,30
Mediana	9529,51	971,75	22,34
Mínimo	9308,59	949,22	21,82
Máximo	9680,13	987,10	22,69
Amplitude	371,54	37,88	0,87
Desvio padrão	163,44	16,66	0,38
Coef. var. (%)	1,72%	1,72%	1,72%

Tabela 18. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,20%. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 02	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 03	Estatístico	Acima do desvio padrão

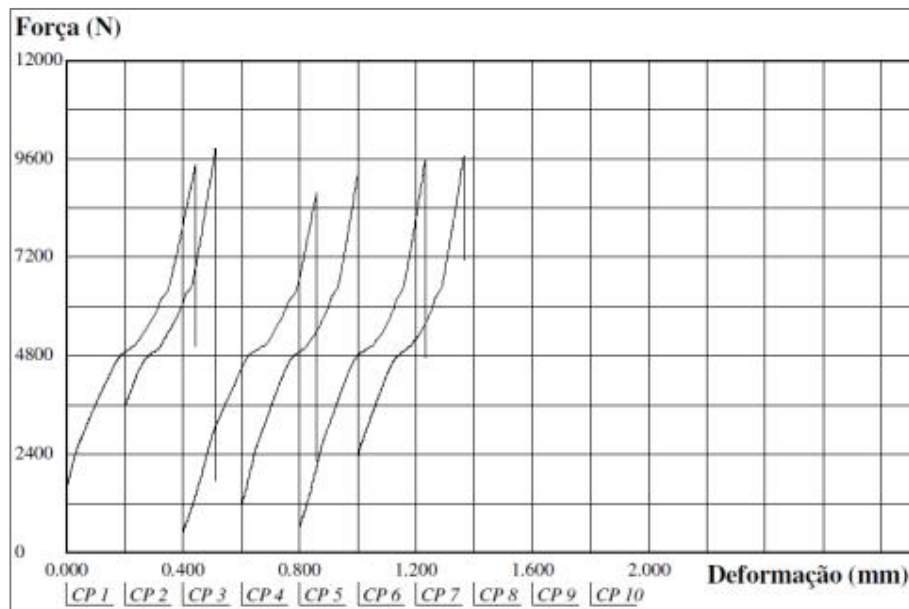
**Figura 6. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,20% – 28 dias.**

Tabela 19. Resultados ensaio de flexão **sem tratamento classificatório/estatístico.**

0,30 %. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	5763,90	587,76	13,51
CP 02	5382,31	548,85	12,61
CP 03	5954,69	607,21	13,96
CP 04	6617,43	674,79	15,51
CP 05	7089,39	722,92	16,62
CP 06	7139,60	728,04	16,73
Média	6324,55	644,93	14,82
Mediana	6286,06	641,00	14,74
Mínimo	5382,31	548,85	12,61
Máximo	7139,60	728,04	16,73
Amplitude	1757,29	179,19	4,12
Desvio padrão	731,30	74,57	1,71
Coef. var. (%)	11,56%	11,56%	11,56%

Tabela 20. Resultados ensaio de flexão **com tratamento classificatório/estatístico.**

0,30 %. Idade: 07 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	5763,90	587,76	13,51
CP 03	5954,69	607,21	13,96
CP 04	6617,43	674,79	15,51
Média	6112,01	623,25	14,33
Mediana	5954,69	607,21	13,96
Mínimo	5763,90	587,76	13,51
Máximo	6617,43	674,79	15,51
Amplitude	853,53	87,03	2,00
Desvio padrão	447,98	45,68	1,05
Coef. var. (%)	7,33%	7,33%	7,32%

Tabela 21. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,30 %. Idade: 07 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 01	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 02	Estatístico	
CP 04	Estatístico	Verificar imagem

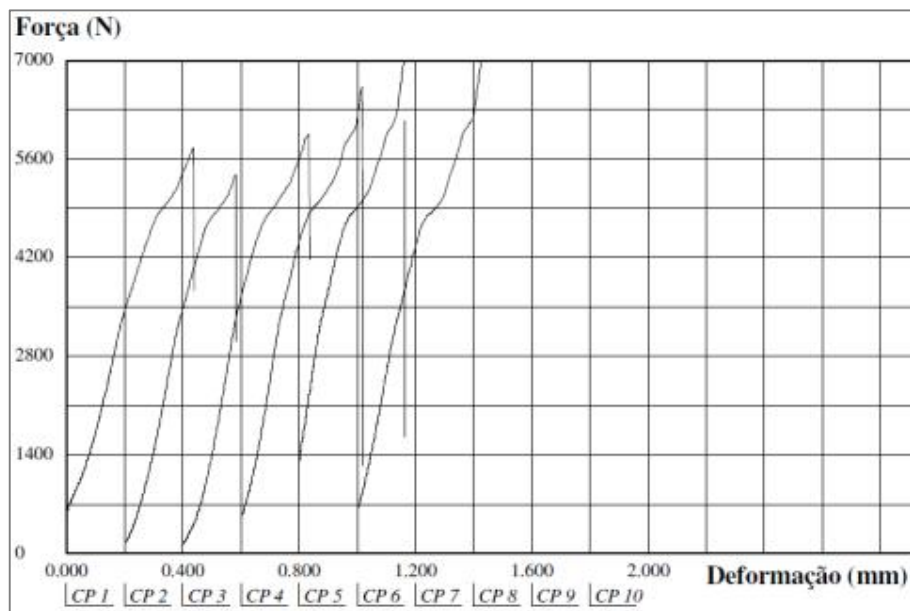


Figura 7. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,30 % – 7 dias.

Tabela 22. Resultados ensaio de flexão **sem** tratamento classificatório/estatístico.

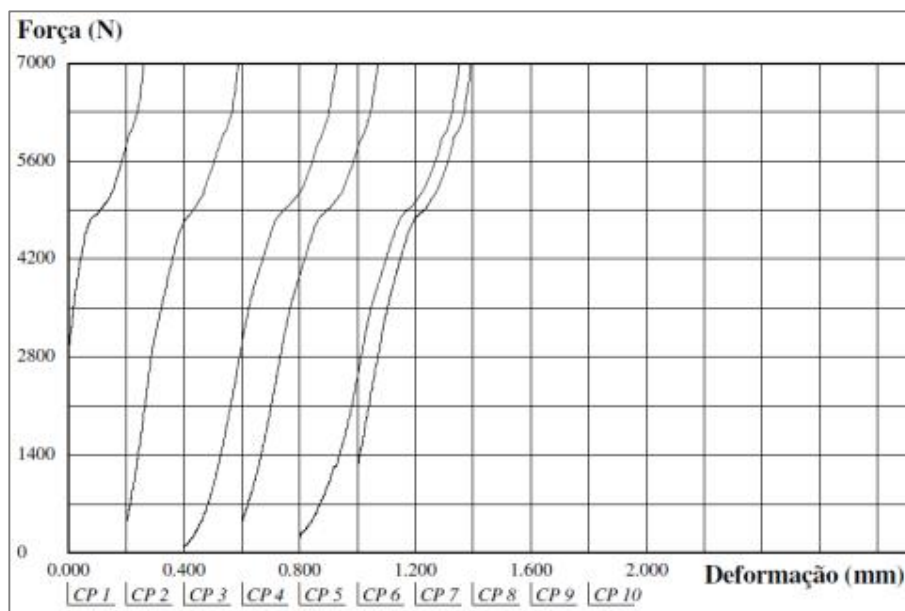
0,30 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 01	9388,92	957,41	22,01
CP 02	8916,97	909,28	20,90
CP 03	8123,68	828,39	19,04
CP 04	8344,59	850,91	19,56
CP 05	8716,13	888,80	20,43
CP 06	8394,80	856,03	19,68
Média	8647,52	881,80	20,27
Mediana	8555,47	872,42	20,06
Mínimo	8123,68	828,39	19,04
Máximo	9388,92	957,41	22,01
Amplitude	1265,24	129,02	2,97
Desvio padrão	459,79	46,89	1,08
Coef. var. (%)	5,32%	5,32%	5,32%

Tabela 23. Resultados ensaio de flexão com tratamento classificatório/estatístico.

0,30 %. Idade: 28 dias			
Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 02	8916,97	909,28	20,90
CP 04	8344,59	850,91	19,56
CP 05	8716,13	888,80	20,43
CP 06	8394,80	856,03	19,68
Média	8593,12	876,26	20,14
Mediana	8555,47	872,42	20,06
Mínimo	8344,59	850,91	19,56
Máximo	8916,97	909,28	20,90
Amplitude	572,38	58,37	1,34
Desvio padrão	271,48	27,69	0,64
Coef. var. (%)	3,16%	3,16%	3,16%

Tabela 24. Critérios utilizados para eliminação de resultados.

0,30 %. Idade: 28 dias		
Corpo de prova	Critério utilizado	Observações
CP 01	Estatístico	Acima do desvio padrão
CP 03	Estatístico	Abaixo do desvio padrão

**Figura 8. Gráfico tensão (MPa) e deformação (mm) 0,30 % – 28 dias.**

Anexo D - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

Tabela 1. Resultados do ensaio do concreto de **referência** – 28 dias.

LAME LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS			CONCRETO - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO				
			MÓDULO TANGENTE INICIAL - NBR 8522/08				
Dados			Extensômetro Digital				
Registro	1.0088.13		Comprimento das bases de medida:		50,00	mm	
Data do ensaio:	15/1/2013		Número de bases de medida:		2		
Idade da amostra (dias):	28		Sensibilidade do aparelho de medida:		0,0001	mm	
Cura/armazenamento:	Câmara Úmida		Calibração do extensômetro:		OK		
Corpo de prova:	1		Metodologia de ensaio:		A		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):		94,2	MPa	
Altura:	98	mm	Resistência à compressão obtida (fe):		84,3	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação		Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)				
Limite inferior	100	0,5	30,41		39,5	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	5.658	28,3	733,76				
Delta da tensão (MPa)		27,8					
Delta da deformação (micro-strain)		703,35					
Relação (fe/fc)		0,89					
Corpo de prova:	3		Metodologia de ensaio:		A		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):		94,2	MPa	
Altura:	98	mm	Resistência à compressão obtida (fe):		99,9	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação		Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)				
Limite inferior	100	0,5	3,80		40,9	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	5.658	28,3	682,44				
Delta da tensão (MPa)		27,8					
Delta da deformação (micro-strain)		678,64					
Relação (fe/fc)		1,06					
Corpo de prova:	3		Metodologia de ensaio:		A		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):		94,1	MPa	
Altura:	98	mm	Resistência à compressão obtida (fe):		111,4	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação		Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)				
Limite inferior	100	0,5	13,31		41,5	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	5.658	28,3	682,44				
Delta da tensão (MPa)		27,8					
Delta da deformação (micro-strain)		669,13					
Relação (fe/fc)		1,18					
Média das deformações (micro-strain)			684				
Dispersão máxima entre a média das deformações			3%				
Módulo de elasticidade médio das amostras (GPa)			40,6				

Registro da amostra	Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força Máxima (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura	Data de Ruptura	Hora de Ruptura	Idade (Dias)
1.0088.12	1	50,0	97,9	184.977	94,2	Tipo D	15/01	9:25	28

Tabela 2. Resultados do ensaio do concreto com adição de 0,10% de NTC – 28 dias.

LAME LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS			CONCRETO - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO			
Dados			Extensômetro Digital			
Registro	1.0089.13		Comprimento das bases de medida:	50,00	mm	
Data do ensaio:	16/1/2013		Número de bases de medida:	2		
Idade da amostra (dias):	28		Sensibilidade do aparelho de medida:	0,0001	mm	
Cura/armazenamento:	Câmara Úmida		Calibração do extensômetro:	OK		
Corpo de prova:	1		Metodologia de ensaio:	A		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):	102,2	MPa	
Altura:	99	mm	Resistência à compressão obtida (fe):	90,4	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação	Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)			
Limite inferior	101	0,5	26,61	40,3	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	6.163	30,7	775,58			
Delta da tensão (MPa)		30,2				
Delta da deformação (micro-strain)		748,97				
Relação (fe/fc)		0,88				
Corpo de prova:	3		Metodologia de ensaio:	A		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):	102,2	MPa	
Altura:	98	mm	Resistência à compressão obtida (fe):	81,0	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação	Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)			
Limite inferior	101	0,5	17,11	39,3	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	6.163	30,7	785,09			
Delta da tensão (MPa)		30,2				
Delta da deformação (micro-strain)		767,98				
Relação (fe/fc)		0,79				
Média das deformações (micro-strain)			754			
Dispersão máxima entre a média das deformações			2%			
Módulo de elasticidade médio das amostras (GPa)			40,0			

Registro da amostra	Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força Máxima (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura	Data de Ruptura	Hora de Ruptura	Idade (Dias)
1.0089.13	1	50,1	98,4	201.508	102,2	Tipo D	16/01	10:50	28

Tabela 3. Resultados do ensaio do concreto com adição de 0,20% de NTC – 28 dias.

LAME LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS			CONCRETO - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO MÓDULO TANGENTE INICIAL - NBR 8522/08				
Dados			Extensômetro Digital				
Registro	1.0090.13		Comprimento das bases de medida:		50,00	mm	
Data do ensaio:	17/1/2013		Número de bases de medida:		2		
Idade da amostra (dias):	28		Sensibilidade do aparelho de medida:		0,0001	mm	
Cura/armazenamento:	Câmara Úmida		Calibração do extensômetro:		OK		
Corpo de prova:	1		Metodologia de ensaio:		A		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):		63,5	MPa	
Altura:	99	mm	Resistência à compressão obtida (fe):		69,2	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação		Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)				
Limite inferior	101	0,5	32,32		39,3	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	3.860	19,1	503,75				
Delta da tensão (MPa)		18,6					
Delta da deformação (micro-strain)		471,43					
Relação (fe/fc)		1,09					
Corpo de prova:	3		Metodologia de ensaio:		a		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):		63,5	MPa	
Altura:	98	mm	Resistência à compressão obtida (fe):		85,7	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação		Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)				
Limite inferior	100	0,5	456,22		39,0	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	3.799	19,1	931,46				
Delta da tensão (MPa)		18,6					
Delta da deformação (micro-strain)		475,24					
Relação (fe/fc)		1,35					
Corpo de prova:	3		Metodologia de ensaio:		A		
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):		63,5	MPa	
Altura:	99	mm	Resistência à compressão obtida (fe):		79,2	MPa	
Carregamento	Força	Tensão	Deformação		Módulo de deformação tangente inicial		
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)				
Limite inferior	100	0,5	5,70		39,3	GPa	
Limite superior (0,3 fc)	3.814	19,1	477,14				
Delta da tensão (MPa)		18,6					
Delta da deformação (micro-strain)		471,44					
Relação (fe/fc)		1,25					
Média das deformações (micro-strain)			473				
Dispersão máxima entre a média das deformações			1%				
Módulo de elasticidade médio das amostras (GPa)			39,2				

Registro da amostra	Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força Máxima (N)	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura	Data de Ruptura	Hora de Ruptura	Idade (Dias)
1.0090.13	1	50,1	98,9	125.188	63,5	Tipo C	17/01	10:15	28

Tabela 4. Resultados do ensaio do concreto com adição de 0,30% de NTC – 28 dias.

LAME LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS			CONCRETO - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO MÓDULO TANGENTE INICIAL - NBR 8522/08					
Dados			Extensômetro Digital					
Registro	1.0091.13		Comprimento das bases de medida:	50,00	mm			
Data do ensaio:	18/1/2013		Número de bases de medida:	2				
Idade da amostra (dias):	28		Sensibilidade do aparelho de medida:	0,0001	mm			
Cura/armazenamento:	Câmara Úmida		Calibração do extensômetro:	OK				
Corpo de prova:	1		Metodologia de ensaio:	A				
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):	105,4	MPa			
Altura:	99	mm	Resistência à compressão obtida (fe):	91,8	MPa			
Carregamento	Força	Tensão	Deformação	Módulo de deformação tangente inicial				
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)					
Limite inferior	101	0,5	43,72	35,8				
Limite superior (0,3 fc)	6.356	31,6	912,45					
Delta da tensão (MPa)		31,1					GPa	
Delta da deformação (micro-strain)		868,73						
Relação (fe/fc)		0,87						
Corpo de prova:	3		Metodologia de ensaio:	A				
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):	105,4	MPa			
Altura:	100	mm	Resistência à compressão obtida (fe):	83,6	MPa			
Carregamento	Força	Tensão	Deformação	Módulo de deformação tangente inicial				
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)					
Limite inferior	101	0,5	22,81	35,7				
Limite superior (0,3 fc)	6.356	31,6	893,44					
Delta da tensão (MPa)		31,1					GPa	
Delta da deformação (micro-strain)		870,63						
Relação (fe/fc)		0,79						
Corpo de prova:	3		Metodologia de ensaio:	A				
Diâmetro:	50	mm	Resistência à compressão prevista (fc):	105,4	MPa			
Altura:	99	mm	Resistência à compressão obtida (fe):	78,2	MPa			
Carregamento	Força	Tensão	Deformação	Módulo de deformação tangente inicial				
	kgf	MPa	Específica (x 10 ⁻⁶)					
Limite inferior	101	0,5	28,51	34,5				
Limite superior (0,3 fc)	6.356	31,6	929,56					
Delta da tensão (MPa)		31,1					GPa	
Delta da deformação (micro-strain)		901,05						
Relação (fe/fc)		0,74						
Média das deformações (micro-strain)			880					
Dispersão máxima entre a média das deformações			2%					
Módulo de elasticidade médio das amostras (GPa)			35,4					

Registro da amostra	Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força Máxima (N)	Fator de Correção	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura	Data de Ruptura	Hora de Ruptura	Idade (Dias)
1.0091.13	1	50,1	99,4	207.831	1,00	105,4	Tipo C	18/01	8:32	28

Anexo E - Resultados do ensaio de retração

As tabelas a seguir apresentam o resultado das medições dos corpos de prova destinados ao ensaio de retração. O período de medição se deu entre os dias 14 de janeiro a 08 de fevereiro de 2013.

A média da temperatura no interior da câmara de retração foi de 24,8°C e a umidade relativa do ar se manteve na faixa de 45 a 52%.

Os resultados gerados pelo quarto corpo de prova da adição de 0,20% não puderam ser coletados, pois o exemplar se quebrou ao ser desmoldado.

Data de medição: 14 de janeiro de 2013.

Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%				
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	0,036	0,342	0,148	0,231	a	0,544	-0,130	0,075	0,162	a	-0,037	0,223	0,160	Perdido	a	0,181	0,259	0,018	0,357
b	0,046	0,355	0,151	0,232	b	0,641	-0,040	0,078	0,124	b	-0,035	0,327	0,135		b	0,128	0,259	0,037	0,387
c	0,079	0,338	0,154	0,231	c	0,623	-0,103	0,122	0,139	c	-0,036	0,298	0,098		c	0,098	0,243	0,048	0,345
d	0,050	0,351	0,144	0,266	d	0,664	-0,125	0,095	0,119	d	-0,036	0,282	0,139		d	0,127	0,230	0,011	0,315
média	0,053	0,347	0,149	0,240	média	0,618	-0,100	0,093	0,136	média	-0,036	0,283	0,133	média	0,134	0,248	0,029	0,351	

Data de medição: 17 de janeiro de 2013.

Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%				
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	0,012	0,350	0,132	0,230	a	0,543	-0,156	0,085	0,063	a	-0,077	0,232	0,149	Perdido	a	0,008	0,252	-0,092	0,327
b	0,019	0,364	0,130	0,227	b	0,568	-0,153	0,094	0,105	b	0,012	0,266	0,117		b	-0,023	0,264	-0,062	0,382
c	0,051	0,341	0,134	0,229	c	0,627	-0,126	0,134	0,021	c	-0,069	0,305	0,170		c	-0,054	0,245	-0,068	0,381
d	0,045	0,353	0,130	0,226	d	0,576	-0,156	0,108	0,075	d	0,021	0,278	0,128		d	-0,034	0,230	-0,087	0,341
média	0,032	0,352	0,132	0,228	média	0,579	-0,148	0,105	0,066	média	-0,028	0,270	0,141	média	-0,026	0,248	-0,077	0,358	

Data de medição: 21 de janeiro de 2013.

Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%				
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	0,027	0,352	0,188	0,234	a	0,552	-0,160	0,096	0,041	a	-0,080	0,242	0,128	Perdido	a	-0,038	0,270	-0,120	0,335
b	0,039	0,380	0,168	0,260	b	0,575	-0,171	0,102	0,018	b	-0,092	0,256	0,116		b	-0,065	0,284	-0,086	0,370
c	0,041	0,344	0,120	0,237	c	0,631	-0,154	0,140	-0,017	c	-0,079	0,345	0,089		c	-0,075	0,263	-0,096	0,330
d	0,027	0,358	0,109	0,233	d	0,589	-0,174	0,113	0,032	d	-0,094	0,290	0,114		d	-0,080	0,265	-0,131	0,303
média	0,034	0,359	0,146	0,241	média	0,587	-0,165	0,113	0,019	média	-0,086	0,283	0,112	média	-0,065	0,271	-0,108	0,335	

Data de medição: 22 de janeiro de 2013.																				
Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%					
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Perdido	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,004	0,350	0,117	0,236	a	0,553	-0,175	0,096	0,037	a	-0,096	0,242	0,130	a		-0,040	0,264	-0,124	0,335	
b	0,001	0,357	0,111	0,244	b	0,576	-0,166	0,106	-0,004	b	-0,087	0,264	0,118	b		-0,071	0,273	-0,091	0,376	
c	0,033	0,344	0,125	0,241	c	0,628	-0,159	0,145	-0,020	c	-0,097	0,312	0,094	c		-0,085	0,256	-0,105	0,331	
d	0,019	0,351	0,107	0,265	d	0,592	-0,176	0,118	0,028	d	-0,094	0,291	0,108	d		-0,084	0,239	-0,134	0,295	
média	0,012	0,351	0,115	0,247	média	0,587	-0,169	0,116	0,010	média	-0,094	0,277	0,113	média	-0,070	0,258	-0,114	0,334		
Data de medição: 24 de janeiro de 2013.																				
Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%					
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Perdido	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	0,036	0,342	0,148	0,231	a	0,544	-0,130	0,075	0,162	a	-0,037	0,223	0,160	a		0,181	0,259	0,018	0,357	
b	0,046	0,355	0,151	0,232	b	0,641	-0,040	0,078	0,124	b	-0,035	0,327	0,135	b		0,128	0,259	0,037	0,387	
c	0,079	0,338	0,154	0,231	c	0,623	-0,103	0,122	0,139	c	-0,036	0,298	0,098	c		0,098	0,243	0,048	0,345	
d	0,050	0,351	0,144	0,266	d	0,664	-0,125	0,095	0,119	d	-0,036	0,282	0,139	d		0,127	0,230	0,011	0,315	
média	0,053	0,347	0,149	0,240	média	0,618	-0,100	0,093	0,136	média	-0,036	0,283	0,133	média	0,134	0,248	0,029	0,351		
Data de medição: 25 de janeiro de 2013.																				
Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%					
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Perdido	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,013	0,353	0,104	0,232	a	0,549	-0,185	0,097	0,023	a	-0,103	0,240	0,122	a		-0,082	0,254	-0,132	0,313	
b	0,040	0,360	0,098	0,231	b	0,596	-0,121	0,112	0,086	b	-0,109	0,257	0,115	b		-0,074	0,267	-0,098	0,324	
c	0,061	0,347	0,106	0,287	c	0,623	-0,172	0,138	-0,031	c	-0,068	0,305	0,091	c		-0,096	0,254	-0,109	0,295	
d	0,012	0,354	0,096	0,231	d	0,585	-0,163	0,114	0,017	d	-0,109	0,288	0,103	d		-0,095	0,230	-0,147	0,264	
média	0,025	0,354	0,101	0,245	média	0,588	-0,160	0,115	0,024	média	-0,097	0,273	0,108	média	-0,087	0,251	-0,122	0,299		

Data de medição: 28 de janeiro de 2013.

Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%				
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,014	0,355	0,104	0,242	a	0,554	-0,189	0,106	0,018	a	-0,113	0,259	0,127	Perdido	a	-0,089	0,261	-0,139	0,297
b	-0,017	0,361	0,096	0,240	b	0,581	-0,189	0,119	-0,019	b	-0,114	0,276	0,118		b	-0,084	0,286	-0,084	0,303
c	0,024	0,348	0,107	0,245	c	0,633	-0,179	0,146	-0,036	c	-0,116	0,311	0,094		c	-0,104	0,269	-0,119	0,284
d	0,006	0,354	0,103	0,240	d	0,594	-0,188	0,122	0,011	d	-0,111	0,292	0,106		d	-0,101	0,240	-0,153	0,267
média	0,000	0,355	0,103	0,242	média	0,591	-0,186	0,123	-0,007	média	-0,114	0,285	0,111	média	-0,095	0,264	-0,124	0,288	

Data de medição: 30 de janeiro de 2013.

Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%				
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,021	0,356	0,089	0,240	a	0,558	-0,192	0,101	0,011	a	-0,104	0,247	0,122	Perdido	a	-0,104	0,256	-0,146	0,292
b	-0,021	0,361	0,083	0,242	b	0,577	-0,101	0,120	-0,017	b	-0,109	0,260	0,117		b	-0,069	0,271	-0,119	0,301
c	0,021	0,349	0,090	0,245	c	0,627	-0,183	0,147	0,002	c	-0,114	0,310	0,096		c	-0,111	0,267	-0,124	0,280
d	0,001	0,355	0,082	0,271	d	0,682	-0,193	0,120	0,013	d	-0,116	0,292	0,107		d	-0,110	0,238	-0,161	0,267
média	-0,005	0,355	0,086	0,250	média	0,611	-0,167	0,122	0,002	média	-0,111	0,277	0,111	média	-0,099	0,258	-0,138	0,285	

Data de medição: 01 de fevereiro de 2013.

Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%				
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,024	0,356	0,094	0,243	a	0,555	-0,201	0,132	0,006	a	-0,122	0,248	0,116	Perdido	a	-0,106	0,260	-0,149	0,292
b	-0,023	0,366	0,081	0,244	b	0,575	-0,193	0,116	-0,030	b	-0,108	0,262	0,185		b	-0,101	0,294	-0,112	0,304
c	0,012	0,351	0,089	0,249	c	0,626	-0,190	0,144	-0,041	c	-0,090	0,317	0,095		c	-0,098	0,255	-0,105	0,283
d	-0,004	0,358	0,081	0,244	d	0,594	-0,200	0,120	0,003	d	-0,057	0,293	0,109		d	-0,050	0,237	-0,152	0,261
média	-0,010	0,358	0,086	0,245	média	0,588	-0,196	0,128	-0,016	média	-0,094	0,280	0,126	média	-0,089	0,262	-0,130	0,285	

Data de medição: 04 de fevereiro de 2013.																				
Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%					
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Perdido	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,014	0,372	0,103	0,370	a	0,576	-0,184	0,115	0,020	a	-0,109	0,259	0,124			a	-0,091	0,267	-0,136	0,299
b	0,006	0,378	0,099	0,376	b	0,591	-0,185	0,137	-0,016	b	-0,108	0,366	0,120			b	-0,082	0,284	-0,103	0,324
c	0,030	0,394	0,105	0,367	c	0,641	-0,171	0,158	-0,033	c	-0,109	0,345	0,097			c	-0,097	0,269	-0,116	0,351
d	0,020	0,370	0,096	0,371	d	0,609	-0,182	0,133	0,012	d	-0,090	0,301	0,113			d	-0,096	0,246	-0,149	0,268
média	0,011	0,379	0,101	0,371	média	0,604	-0,181	0,136	-0,004	média	-0,104	0,318	0,114		média	-0,092	0,267	-0,126	0,311	
Data de medição: 06 de fevereiro de 2013.																				
Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%					
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Perdido	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,018	0,380	0,089	0,269	a	0,563	-0,196	0,114	0,005	a	-0,123	0,253	0,129			a	-0,108	0,263	-0,148	0,297
b	-0,026	0,378	0,081	0,265	b	0,584	-0,192	0,124	-0,030	b	-0,124	0,281	0,116			b	-0,105	0,277	-0,116	0,314
c	0,008	0,362	0,089	0,271	c	0,633	-0,188	0,157	-0,046	c	-0,124	0,317	0,093			c	-0,112	0,263	-0,123	0,292
d	-0,011	0,365	0,081	0,272	d	0,598	-0,197	0,131	-0,003	d	-0,123	0,296	0,108			d	-0,110	0,241	-0,159	0,270
média	-0,012	0,371	0,085	0,269	média	0,595	-0,193	0,132	-0,019	média	-0,124	0,287	0,112		média	-0,109	0,261	-0,137	0,293	
Data de medição: 08 de fevereiro de 2013.																				
Referência					Adição de 0,10%					Adição de 0,20%					Adição de 0,30%					
Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04	Perdido	Dim.	CP01	CP02	CP03	CP04
a	-0,031	0,374	0,087	0,262	a	0,570	-0,199	0,112	0,008	a	-0,124	0,261	0,122			a	-0,108	0,274	-0,147	0,304
b	-0,026	0,372	0,078	0,261	b	0,589	-0,196	0,123	-0,029	b	-0,124	0,279	0,199			b	-0,105	0,286	-0,116	0,315
c	0,020	0,364	0,088	0,264	c	0,637	-0,190	0,157	-0,045	c	-0,110	0,320	0,100			c	-0,112	0,276	-0,127	0,297
d	0,014	0,368	0,077	0,261	d	0,606	-0,198	0,133	-0,001	d	-0,123	0,304	0,114			d	-0,112	0,248	-0,156	0,277
média	-0,006	0,370	0,083	0,262	média	0,601	-0,196	0,131	-0,017	média	-0,120	0,291	0,134		média	-0,109	0,271	-0,137	0,298	

Anexo F – Testes estatísticos

As tabelas a seguir apresentam os cálculos relativos as análises estatísticas empregadas nos ensaios.

Adição NTC	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) AOS 28 DIAS						Variância
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	
ref.	101,5	85,5	81,9	106,7	87,4	82,3	111,5
soma	545,2						
média (MPa)	90,9						
0,10%	61,1	88,7	90,8	107,5	85,0	59,3	345,9
soma	492,4						
média (MPa)	82,1						
0,20%	88,3	80,2	65,6	92,6	87,2	92,9	106,3
soma	506,9						
média (MPa)	84,5						
0,30%	73,7	73,2	68,4	78,1	81,3	77,2	20,5
soma	451,9						
média (MPa)	75,3						
Soma das somas	1996,4						
Soma das médias	332,7						
	Níveis	Dados digitados					
Cps por nível	6						
n	24						
% adição	4						
Análise de Variância							
TC	166063,88						
SQT	3664,49						
SQG	743,46						
SQR	2921,02						
Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal		Ftab	
Adições	743,46	3	247,82	1,70	<	3,10	
Erro	2921,02	20	146,05	Efeito não significativo			
Total	3664,49	23					
Teste de Tukey							
	ref	0,10%	0,20%	0,30%			
Grupos	1	2	3	4			
Médias	90,9	82,1	84,5	75,3			
Fonte	SQ	gl	QM	F			
Grupos	2921,02	3	146,05				
Erro	3664,49	20					
K	4	grupos					
QM erro	20	gl					
q crit	3,96						
MSw	146,05	n	24				
alpha	0,05	Médias: 90,9 82,1 84,5 75,3					
HSD =	9,77	Rol médias: 75,3 82,1 84,5 90,9					
		IV	II	III	I		
		75,3	82,1	84,5	90,9		
IV	75,3	0,0	6,8	9,2	15,6		
II	82,1		0,0	2,4	8,8		
III	84,5			0,0	6,4		
I	90,9				0,0		

Adição NTC	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa) AOS 28 DIAS						Variância	
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6		
ref.	21,6	21,9	23,4	23,0	24,7	25,2	2,1	
soma	139,8							
média (MPa)	23,3							
0,10%	23,0	21,8	23,1	24,9	25,3	24,4	1,8	
soma	142,4							
média (MPa)	23,7							
0,20%	22,2	23,1	20,6	21,8	22,5	22,7	0,8	
soma	132,9							
média (MPa)	22,1							
0,30%	22,0	20,9	19,0	19,6	20,4	19,7	1,2	
soma	121,6							
média (MPa)	20,3							
Soma das somas	536,6							
Soma das médias	89,4							
	Níveis						Dados digitados	
Cps por nível	6							
n	24							
% +	4							
Análise de Variância								
TC	11997,93							
SQT	72,08							
SQG	42,89							
SQR	29,19							
Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal		Ftab		
adições	42,89	3	14,30	9,80	>	3,10		
Erro	29,19	20	1,46	Efeito significativo				
Total	72,08	23						
Teste de Tukey								
	ref	0,10%	0,20%	0,30%				
Grupos	1	2	3	4				
Médias	23,3	23,7	22,1	20,3				
Fonte	SQ	gl	QM	F				
Grupos	29,19	3	1,46					
Erro	72,08	20						
K	4	grupos						
QM erro	20	gl						
q crit	3,96							
MSw	1,46	n	24					
alpha	0,05	Médias:	23,3	23,7	22,1	20,3		
HSD =	0,98	Rol médias:	20,3	22,1	23,3	23,7		
		IV	II	III	I			
		20,3	22,1	23,3	23,7			
IV	20,3	0,0	1,8	3,0	3,4			
II	22,1		0,0	1,2	1,6			
III	23,3			0,0	0,4			
I	23,7				0,0			

Adição NTC	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) AOS 28 DIAS			Variância	
	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	CP 3 (MPa)		
ref.	39,5	40,9	41,5	1,1	
soma	121,9				
média (MPa)	40,6				
0,10%	40,3	39,3	40,5	0,4	
soma	120,1				
média (MPa)	40,0				
0,20%	39,3	39,0	39,3	0,0	
soma	117,6				
média (MPa)	39,2				
0,30%	35,8	35,7	34,5	0,5	
soma	106,0				
média (MPa)	35,3				
Soma das somas	465,6				
Soma das médias	155,2				
	Níveis	Dados digitados			
Cps por nível	3				
n	12				
% +	4				
Análise de Variância					
TC	18065,28				
SQT	55,22				
SQG	51,18				
SQR	4,04				
Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	Ftab
adições	51,18	3	17,06	33,78	>
Erro	4,04	8	0,51	Efeito significativo	
Total	55,22	11			
Teste de Tukey					
	ref	0,10%	0,20%	0,30%	
Grupos	1	2	3	4	
Médias	40,6	40,0	39,2	35,3	
Fonte	SQ	gl	QM	F	
Grupos	4,04	3	0,51		
Erro	55,22	8			
K	4	grupos			
QM erro	8	gl			
q crit	6,83				
MSw	0,51	n	12		
alpha	0,05		Médias:	40,6	40,0
HSD =	1,40		Rol médias:	35,3	39,2
		IV	II	III	I
		35,33333	39,2	40,03333	40,63333
IV	35,3	0,0	3,87	4,70	5,30
II	39,2		0,00	0,83	1,43
III	40,0			0,00	0,60
I	40,6				0,00