



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL**

*Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e  
não lavada para utilização em concreto à base de cimento  
Portland*

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**CEZAR LUIZ LANG  
ORIENTADORA: JANAÍDE CAVALCANTE ROCHA  
FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2006**

*Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para  
utilização em concreto à base de cimento Portland*

CEZAR LUIZ LANG

Dissertação julgada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Especialidade em ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo  
programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

---

Prof. Dr. GLICÉRIO TRICHÊS – Coordenador da PPGEC

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. JANAÍDE CAVALCANTE ROCHA (UFSC) - Orientadora

**Banca examinadora:**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. GILMENE BIANCO (CNPQ/PQ)

---

Prof. Dr. GILSON MORALES (UEL)

---

Prof. Dr. WELLINGTON LONGUINI REPETTE (UFSC)

A minha grande família, de parte da esposa e  
minha, suporte a uma vida feliz. As minhas  
filhas Maria Gabriela e Marielle e esposa  
Maria Teresa, razões de minha existência.

“Na pesquisa, uma pequena luz pode ser muito... devemos sempre procurar pequenos avanços de modo que cumulativamente, com o passar do tempo, possamos ganhar avanços maiores”. (Koontz, H. e O'Donnell C.).

## AGRADECIMENTOS

Depois de tanto esforço, sacrifício e dedicação olho para trás e vejo que a execução deste trabalho só foi possível graças a ajuda de muita gente. Foram tantos, mas destacarei apenas aqueles das horas mais difíceis.

Começo com minha casa, onde contei e sei que sempre posso contar com o apoio irrestrito de minhas filhas Maria Gabriela e Marielle. Minha esposa Maria Teresa, confidente, inspiradora... acho que co-autora também – é nela que me encontro é com ela que me realizo.

À professora Janaíde Cavalcante Rocha, minha querida orientadora, a quem aprendi a admirar pelo talento, inteligência e competência. Sua presença foi sentida nos momentos decisivos, onde o trabalho tomou rumo. Ter o nome ao lado de pessoa tão distinta será sempre motivo de muito orgulho.

À Unochapecó pela iniciativa do curso, aos professores Antonio Edésio Jungles e Cláudio Alcides Jacoski que habilmente coordenaram o Curso e jamais faltaram com apoio e amizade.

Ao professor Leonardo de Brito Andrade da UFSC, que foi elemento fundamental na condução dos ensaios no Grupo ValoRes.

Ao técnico do Laboratório de Materiais da Unochapecó, Fabio Luiz Morandini, que não só ajudou-me nos ensaios, mas também muito me ensinou.

Aos Professores avaliadores do exame de qualificação, Professora Gilmene Bianco e Professor Wellington Longuini Repette pelas valiosas instruções e observações. Ao Professor Gilson Morales e professores Gilmene e Wellington pela participação na comissão examinadora da defesa.

Aos demais professores do Curso, Denise Antunes da Silva, Hugo Lucini, Humberto Ramos Roman, Luis Alberto Gómez, Luiz Fernando Heineck, Luiz Prudêncio Junior, Margaret Jobim, Norberto Hochheim, Philippe Jean Paul Gleize e Tatiana Amaral.

Às empresas que deram suporte logístico e apoio: Planaterra, representada pelos engenheiros Moacir Tiecher e Eduardo Lari Rosetto e senhor Ari Pecinatto; Concrechap, engenheiro Renato Luiz Marcon e Unochapecó, Prof. Mauro Leandro Menegotto.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais da UFSC, Luiz, Renato e Roque e do Laboratório do GrupoValoRes da UFSC, Niubis, Fernando e Nilton.

Aos colegas do Curso, pelo companheirismo, incentivo e amizade.

Que o Grande Arquiteto do Universo abençoe a todos!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>4</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
4.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DA AREIA BRITADA .....	5
4.1.1 O Basalto .....	5
4.1.2 Produção da Areia Britada .....	7
4.1.2.1 Tipos de britadores .....	8
4.1.2.1.1 Britador de mandíbula .....	8
4.1.2.1.2 Britadores giratórios e de cone .....	9
4.1.2.1.3 Britadores de rolo .....	9
4.1.2.1.4 Moinhos de martelo .....	9
4.1.2.1.5 Impactores de rocha contra metal .....	9
4.1.2.1.6 Impactores de rocha contra rocha .....	11
4.1.2.2 Lavagem em planta .....	12
4.2 EFEITOS DA COMINUIÇÃO DA ROCHA NO CONCRETO .....	14
4.2.1 Características Físicas .....	14
4.2.2 Efeito Filer .....	19
4.2.3 Efeito Pozolânico .....	21
4.3 EFEITOS DA AREIA BRITADA NO CONCRETO FRESCO .....	23
4.3.1 Trabalhabilidade .....	23
4.3.2 Pega .....	25
4.3.3 Exsudação .....	26
4.3.4 Retração Plástica .....	27
4.4 EFEITOS DA AREIA BRITADA NO CONCRETO ENDURECIDO .....	31
4.4.1 Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade .....	31
4.4.2 Porosidade e Permeabilidade .....	33
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
5.1 MATERIAL .....	38
5.2 MÉTODOS .....	38
5.2.1 Caracterização do Processo de Produção .....	39
5.2.1.1 Extração .....	39
5.2.1.2 Britagem .....	40
5.2.1.3 Lavagem em planta .....	42
5.2.2 Coleta e Redução das Amostras .....	46
5.2.2.1 Coleta das amostras .....	46
5.2.2.2 - Reduções de amostra para realização dos ensaios .....	47
5.2.3 Ensaio para Caracterização dos Materiais Utilizados .....	48
5.2.3.1 Composição granulométrica .....	48

5.2.3.2	Massa unitária .....	49
5.2.3.3	Absorção, massa específica, massas específicas na condição “sss” e aparente .....	49
5.2.3.4	Teor de materiais pulverulentos .....	50
5.2.3.5	Inchamento de agregado miúdo .....	51
5.2.3.6	Avaliação das impurezas orgânicas em agregado miúdo .....	51
5.2.4	Elaboração do Diagrama de Dosagem .....	52
5.2.4.1	Determinação do teor ideal de argamassa .....	54
5.2.4.2	Determinação do teor de aditivo .....	56
5.2.4.3	Realização das misturas experimentais .....	57
5.2.4.3.1	Dosagens dos concretos .....	57
5.2.4.3.2	Preparo e manuseio dos concretos .....	58
5.2.4.4	Moldagem e cura dos corpos-de-prova .....	60
5.2.4.5	Determinação da massa específica e teor de ar dos concretos .....	61
5.2.4.6	Traçado do diagrama de dosagem .....	62
5.2.5	Desempenho do Concreto no Estado Fresco .....	62
5.2.5.1	Perda de abatimento .....	63
5.2.5.2	Pega .....	63
5.2.5.3	Exsudação .....	64
5.2.5.4	Retração plástica .....	65
5.2.6	Avaliação do Comportamento no Estado Endurecido .....	66
5.2.6.1	Módulo de elasticidade .....	66
5.2.6.2	Resistência à compressão axial .....	68
5.2.6.3	Absorção, índice de vazios e massa específica.....	69
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
6.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	71
6.1.1	Cimento .....	71
6.1.2	Aditivo .....	72
6.1.3	Brita .....	72
6.1.4	Composição Granulométrica das Areias .....	75
6.1.5	Inchamento das Areias .....	79
6.1.6	Avaliação das Impurezas Orgânicas nas Areias .....	82
6.1.7	Demais Características Físicas das Areias Britadas .....	82
6.2	DOSAGEM .....	83
6.2.1	Determinação do Teor Ideal de Argamassa .....	83
6.2.2	Determinação do Teor de Aditivo .....	84
6.2.3	Realização das Misturas Experimentais e Traçado dos Diagramas de Dosagem.....	85
6.3	COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO.....	89
6.3.1	Perda de Abatimento .....	89
6.3.2	Pega .....	92
6.3.3	Exsudação .....	96
6.3.4	Retração Plástica .....	98
6.4	COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO .....	103
6.4.1	Resistência à Compressão Axial .....	103
6.4.2	Módulo de Elasticidade .....	107
6.4.3	Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica .....	112
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>114</b>
<b>8</b>	<b>PERSPECTIVAS .....</b>	<b>117</b>

**9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 118**  
**10 APÊNDICE..... 124**

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS ÓXIDOS DAS AMOSTRAS DE BASALTO.....	6
TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CLASSIFICADOR .....	42
TABELA 3 - FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DA MASSA UNITÁRIA E MASSAS ESPECÍFICAS DOS AGREGADOS .....	50
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS DE CONCRETO PARA AS DOSAGENS .....	58
TABELA 5 - QUANTIDADES DE MATERIAIS PARA REALIZAÇÃO DE UM LOTE DE ENSAIOS .....	59
TABELA 6 - FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DA ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS DE CONCRETO ENDURECIDO .....	70
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO PORTLAND II – F 32 – VALORES MÉDIOS .....	71
TABELA 8 - DADOS TÉCNICOS DO ADITIVO POLIFUNCIONAL PARA CONCRETO .....	72
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO E LIMITES DA NORMA.....	73
TABELA 10 - QUADRO RESUMO CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS DA BRITA ..	74
TABELA 11 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS BRITADAS E LIMITES DA NORMA .....	75
TABELA 12 - QUADRO RESUMO CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AREIAS BRITADAS .....	82
TABELA 13 - TRAÇO INICIAL E ACRÉSCIMOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR IDEAL DE ARGAMASSA COM AREIA BRITADA LAVADA E NÃO LAVADA.....	83
TABELA 14 - TRAÇO INICIAL E ACRÉSCIMOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ADITIVO PARA AS MISTURAS COM AREIA BRITADA LAVADA E NÃO LAVADA .....	84
TABELA 15 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS DE CONCRETO .....	85
TABELA 16 - COMPOSIÇÕES DAS MISTURAS DE CONCRETO (POR m <sup>3</sup> ) .....	86
TABELA 17 - VALORES DO ABATIMENTO DO CONCRETO A PARTIR DO CONTATO DO CIMENTO COM A ÁGUA .....	89
TABELA 18 - TEMPOS DE INÍCIO E FIM DA PEGA .....	92
TABELA 19 - FATORES QUE PODEM TER INFLUENCIADO A EXSUDAÇÃO..	97
TABELA 20 - RETRAÇÃO PLÁSTICA TOTAL SOFRIDA PELO CONCRETO ....	98
TABELA 21 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS .....	103
TABELA 22 - VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS AL E NL AOS 28 DIAS .....	109
TABELA 23 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS MISTURAS DE CONCRETO AOS 28 DIAS CONFORME A NBR 9778 .....	112

## LISTA DAS FIGURAS

FIGURA 1 - PRINCIPAIS ELEMENTOS QUÍMICOS QUE FORMAM AS ROCHAS ÍGNEAS .....	5
FIGURA 2 - MAPA DA FORMAÇÃO ROCHOSA BRASILEIRA .....	7
FIGURA 3 - COMPONENTES BÁSICOS DO BRITADOR DE IMPACTO ROCHA CONTRA METAL .....	10
FIGURA 4 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FUNCIONAMENTO DO BRITADOR DE IMPACTO DE EIXO VERTICAL ROCHA CONTRA ROCHA .....	12
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FUNCIONAMENTO DO CLASSIFICADOR DO TIPO ROTAROTATIVO.....	14
FIGURA 6 - IMAGEM 10X1 DA FRAÇÃO 0,075 mm DE BASALTO .....	16
FIGURA 7 - ASPECTO GERAL DA PEDREIRA .....	40
FIGURA 8 - ASPECTO GERAL DO BRITADOR .....	41
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DO BRITADOR .....	41
FIGURA 10 - DETALHE DA MÁQUINA DE LAVAGEM .....	42
FIGURA 11 - OPERAÇÃO DE LIMPEZA DO TANQUE DE DECANTAÇÃO .....	43
FIGURA 12 - RESÍDUO RETIRADO DO TANQUE DE DECANTAÇÃO .....	44
FIGURA 13 - VISTA GERAL DO EQUIPAMENTO DE LAVAÇÃO DA AREIA .....	45
FIGURA 14 - PILHA DE AREIA BRITADA .....	45
FIGURA 15 - COLETA DAS AREIAS E BRITA .....	46
FIGURA 16 - EQUIPAMENTO REPARTIDOR DE AMOSTRAS .....	48
FIGURA 17 - MISTURADOR E APARATO PARA DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA.....	53
FIGURA 18 - PROCEDIMENTO DE CAPEAMENTO DAS AMOSTRAS .....	68
FIGURA 19 - APARELHAGEM PARA DETERMINAÇÃO DE CARGA DE COMPRESSÃO AXIAL .....	69
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO .....	74
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO (AL E NL) E LIMITES DA NBR 7211 .....	76
FIGURA 22 - PERCENTUAIS DE FALTA OU EXCESSO DE MATERIAL NAS PENEIRAS .....	77
FIGURA 23 - PROPORÇÕES DOS MATERIAIS RETIRADOS NO PROCESSO DE LAVAGEM .....	78
FIGURA 24 - CURVA DE INCHAMENTO MÉDIOS PARA A AREIA BRITADA LAVADA .....	80
FIGURA 25 - CURVA DE INCHAMENTO MÉDIOS PARA A AREIA BRITADA NÃO LAVADA .....	81
FIGURA 26 - DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA CONCRETOS COM AREIA LAVADA .....	87
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA CONCRETOS COM AREIA NÃO LAVADA .....	88
FIGURA 28 - PERDA DE ABATIMENTO PARA AS MISTURAS AL 35 E NL 35..	90
FIGURA 29 - PERDA DE ABATIMENTO PARA AS MISTURAS AL 50 E NL 50...	90
FIGURA 30 - PERDA DE ABATIMENTO PARA AS MISTURAS AL 65 E NL 65 ..	91
FIGURA 31 - EVOLUÇÃO DA PEGA NOS CONCRETOS AL 35 E NL 35 .....	93
FIGURA 32 - EVOLUÇÃO DA PEGA NOS CONCRETOS AL 50 E NL 50.....	93

FIGURA 33 - EVOLUÇÃO DA PEGA NOS CONCRETOS AL 65 E NL 65.....	94
FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PEGA PARA TODAS AS MISTURAS.....	95
FIGURA 35 - DIFERENÇAS RELATIVAS ENTRE AS MISTURAS AL E NL 35, 50 E 65 PARA OS FATORES DE MATERIAL PULVERULENTO EM RELAÇÃO AOS SÓLIDOS TOTAIS, ÁGUA ABSORVIDA PELOS AGREGADOS EM RELAÇÃO À ÁGUA TOTAL E AR APRISIONADO ACIDENTALMENTE.....	97
FIGURA 36 - EVOLUÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA ACUMULADA NOS CONCRETOS AL 35 E NL 35.....	99
FIGURA 37 - EVOLUÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA ACUMULADA NOS CONCRETOS AL 50 E NL 50.....	99
FIGURA 38 - EVOLUÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA ACUMULADA NOS CONCRETOS AL65 E NL65.....	100
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS DE RETRAÇÃO MÁXIMA DAS AMOSTRAS, PARA AS MISTURAS AL E NL 35, 50 E 65....	101
FIGURA 40 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS DO TEMPO NECESSÁRIO PARA OCORRER A RETRAÇÃO MÁXIMA DAS AMOSTRAS, PARA AS MISTURAS AL E NL 35, 50 E 65.....	102
FIGURA 41 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA AOS 7, 28 E 91 DIAS PARA TODAS AS MISTURAS.....	104
FIGURA 42 - PERCENTUAL DE DIFERENÇA DA RESISTENCIA ENTRE AS MISTURAS NL E AL AOS 7, 28 E 91 DIAS.....	105
FIGURA 43 - TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO DOS CONCRETOS AL 35 E NL 35 .....	108
FIGURA 44 - TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO DOS CONCRETOS AL 50 E NL 50 .....	108
FIGURA 45 - TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO DOS CONCRETOS AL 65 E NL 65 .....	109
FIGURA 46 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS AL E NL AOS 28 DIAS .....	110
FIGURA 47 - PERCENTUAL DE DIFERENÇA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ENTRE AS MISTURAS NL E AL AOS 28 DIAS.....	111
FIGURA 48 - REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS AMOSTRAS DE AL E NL AOS 28 DIAS .....	112
FIGURA 49 - PERCENTUAL DE DIFERENÇA DA ABSORÇÃO E DOS VAZIOS ENTRE OS CONCRETOS NL E AL AOS 28 DIAS .....	113

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_3A$	- Aluminato tricálcico
C-S-H	- Representação genérica dos silicatos de cálcio hidratados
cv	- Cavalo-vapor
cm	- Centímetro
$cm^2/g$	- Centímetro quadrado por grama
$dm^3$	- Decímetro cúbico
$\varnothing$	- Diâmetro
pH	- Escala ácido-base
g	- Grama
$g/cm^3$	- Grama por centímetro cúbico
GPa	- Gigapascal
$^{\circ}C$	- Grau Celsius
$Ca(OH)_2$	- Hidróxido de cálcio
H	- Hora
l	- Litro
#	- Malha de peneira
®	- Marca registrada
MPa	- Megapascal
MPa/s	- Megapascal por segundo
$m^3$	- Metro cúbico
$m^3/ano$	- Metro cúbico por ano
$m^3/h$	- Metro cúbico por hora
$m^2$	- Metro quadrado
$m^2/kg$	- Metro quadrado por quilograma
$\mu m$	- Micrômetro
ml	- Mililitro
ml/kg	- Mililitro por quilograma
mm	- Milímetro
mm/m	- Milímetro por metro
$mm/m^3$	- Milímetro por metro cúbico
mm/mm	- Milímetro por milímetro
mm/min	- Milímetro por minuto
min	- Minuto
nm	- Nanômetro
$Cr_2O_3$	- Óxido crômico
$Al_2O_3$	- Óxido de alumínio
CaO	- Óxido de cálcio
FeO	- Óxido de ferro
MgO	- Óxido de magnésio
MnO	- Óxido de manganês
$K_2O$	- Óxido de potássio
$Na_2O$	- Óxido de sódio
$TiO_2$	- Óxido de titânio
$Fe_2O_3$	- Óxido férrico
$\pm$	- Para mais ou para menos
ppm	- Parte por milhão

$P_2O_5$	- Pentóxido de fósforo
%	- Percentagem
"	- Polegada
KN	- Quilo Newton
Kg	- Quilograma
$kg/dm^3$	- Quilograma por decímetro cúbico
$kg/kg$	- Quilograma por quilograma
$kg/m^3$	- Quilograma por metro cúbico
kg/ml	- Quilograma por mililitro
$SiO_2$	- Sílica
$C_3S$	- Silicato tricálcico
Tf	- Tonelada-força

## LISTA DE ABREVIATURAS

A	- Absorção
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	- Areia Lavada
a	- Altura que o líquido sobe no tempo t
NL	- Areia não lavada
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
BS	- <i>British Standards</i>
s	- Coeficiente de absorção
k	- Coeficiente de capilaridade
ii	- Coeficiente de inchamento
CV	- Coeficiente de variação
c	- Constante que relaciona a capilaridade (k) e a absorção (s)
C	- Consumo de cimento por volume
CP	- Corpo-de-prova
DP	- Desvio padrão
$\epsilon_{30}$	- Deformação específica do corpo-de-prova sob 30% da carga máxima de compressão
$\epsilon_{0,5}$	- Deformação específica do corpo-de-prova sob carga de compressão igual a 0,5 MPa
Da	- Densidade da água
$\gamma_{cr}$	- Densidade do concreto no estado fresco
EPUSP	- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
INSA	- <i>Institut National des Sciences Appliquées de Lyon</i>
RILEM	- <i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
LMCC	- Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC
LRMTCU	- Laboratório de Resistência dos Materiais e Tecnologia do Concreto da Unochapecó
ValoRes	- Laboratório de Grupo de Pesquisa de Valorização de Resíduos da UFSC
Ma	- Massa de água
Mm	- Massa de agregado miúdo seco
Mg	- Massa de agregado graúdo seco
Mi	- Massa cápsula+agregado do material com umidade h
Mf	- Massa cápsula+agregado do material com umidade h seco em estufa
mm	- Massa da amostra seca em estufa
ms	- Massa da amostra na condição saturada com superfície seca
msa	- Massa da amostra saturada submersa em água
Mca	- Massa da cápsula
Mf	- Massa cápsula+agregado do material com umidade h seco em estufa
Mc	- Massa de cimento
$\gamma$	- Massa específica
$\gamma_a$	- Massa específica aparente

$\gamma_m$	- Massa específica do agregado miúdo;
$\gamma_g$	- Massa específica do agregado graúdo
$\gamma_c$	- Massa específica do cimento;
$\gamma_{cs}$	- Massa específica do concreto endurecido seco
$\gamma_{sc}$	- Massa específica do concreto endurecido saturado
$\gamma_{rc}$	- Massa específica real do concreto endurecido
$\gamma_{cf}$	- Massa específica do concreto fresco
$\gamma_{ca}$	- Massa específica do concreto fresco sem considerar o ar incorporado
$\gamma_s$	- Massa específica "sss"
$m_1$	- Massa frasco + agregado
$m_2$	- Massa frasco + agregado + água
$\gamma_u$	- Massa unitária
$\gamma_{us}$	- Massa unitária do agregado seco em estufa
$\gamma_h$	- Massa unitária do agregado com umidade h
Min	- Minuto
$E_{c28}$	- Módulo de elasticidade aos 28 dias
NBR	- Norma Brasileira
NRMCA	- <i>National Ready Mixed Concrete Association</i>
$a_r$	- Proporção de areia
$p_r$	- Proporção de brita
$p$	- Proporção total de agregados
$m$	- Relação agregado/cimento
$a/c$	- Relação água/cimento
$F_c$	- Resistência do concreto
sss	- Saturado com superfície seca
t	- Tempo
$\sigma_{0,5}$	- Tensão igual a 0,5 MPa
$\sigma_{30}$	- Tensão no corpo-de-prova a 30% da carga máxima de compressão
$\alpha$	- Teor de argamassa (%)
th	- Teor de umidade (%)
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
URA	- Umidade relativa do ar
USGS	- <i>United States Geological Survey</i>
USA	- <i>United States of America</i>
UNOCHAPECÓ	- Universidade Comunitária Regional de Chapecó
ValoRes	- Valorização de Resíduos (Grupo de trabalho da UFSC)
i	- Volume do líquido absorvido por uma seção transversal na unidade de tempo t
V	- Volume do frasco
$V_a$	- Volume da água adicionada ao frasco
$V_p$	- Volume do recipiente padronizado (15 ou 20 dm <sup>3</sup> )

## RESUMO

A utilização da areia britada em misturas à base de cimento Portland, é uma das alternativas para substituição parcial ou total da areia de rio, devido ao menor custo do transporte ou por questões ligadas ao meio ambiente. Como um produto do processo de britagem, a areia britada apresenta elevado teor de material pulverulento (partículas de dimensão inferior a 0,075 mm). Para atender à prescrição da Norma Brasileira 7211/05, que limita o teor de material pulverulento no concreto, a areia britada passa por um processo de lavagem na planta de britagem, cujo objetivo é reduzir a quantidade de pó do produto. Esse material retirado é descartado em aterros.

O objetivo desta pesquisa foi comparar o desempenho de concretos à base de cimento Portland com a utilização de areia britada lavada e não lavada de origem basáltica. Para isso, foram realizadas análises para determinar as características físicas das areias britadas e efetuada a comparação antes e após a lavagem. Com misturas de concreto contendo areia britada lavada e não lavada, foram construídos diagramas de dosagem e verificada a diferença do comportamento no estado fresco e endurecido.

Pelos resultados obtidos, considerando-se o método de dosagem e levando-se em conta os parâmetros adotados para caracterização de uso em concreto estrutural, a areia britada não lavada mostrou-se mais adequada, embora não atendendo aos limites de teor de material pulverulento da Norma Brasileira 7211/05.

Palavras-chave: Areia Britada; Material Pulverulento; Concreto.

## ABSTRACT

The use of crushed sand in mixtures to Portland cement is one of the alternatives for partial or total substitution from river sand, due to the lesser cost of transport or environmental issues. As a product from rock-crusher process, the crushed sand presents high-micro fines content (particles below 0,075 mm). To be in attendance to the prescription from Brazilian Norm 7211/05, that limits the proportion of powder material in the concrete, the crushed sand passes to washing process in the rock-crusher plant, whose objective is reduce the amount of dust from the product. This material removed is discarded in earth embankment.

The objective from this research was compare the performance of the concrete from Portland cement with washed and not washed basaltic crushed sand. To attend this target, analyses had been carried through to determine the physical characteristics from crushed sands and made a comparison between before and after washing. With concrete mixtures contend washed and not washed crushed sand, diagrams of dosage had been constructed and verified the difference from the behavior in the fresh and hardened states.

For the obtained results, considering the dosage method and premises adopted to characterization from use in structural concrete, the not washed crushed sand revealed more adequate, even so not attend at the range limits of powders from Brazilian Norm 7211/05.

Key-words: Crushed Sand; Crusher Dust; Concrete.

## 1 INTRODUÇÃO

O material fino de britagem é um subproduto das pedreiras oriundo da cominuição de rocha para produção de agregado graúdo para concreto. Classificado por peneiramento é todo aquele passante em malha quadrada de 4,8 mm.

No Brasil o material possui várias denominações, como pó-de-pedra, areia industrial e areia artificial. A comunidade científica internacional tende a denominar de areia britada, que será a adotada no presente trabalho.

Na construção civil a areia britada tem sido empregada em misturas de cimento Portland por indústrias de pré-moldados e concreteiras. É também usada em misturas de concreto asfáltico e aplicada em camadas de sub-base.

Nas misturas à base de cimento Portland é utilizada como agregado miúdo, substituindo ao todo ou em parte a areia extraída de rios. Esta substituição pode ser vantajosa devido ao fato das jazidas de areia de rio estarem distantes de muitos centros consumidores, e o transporte encarecer o produto nesses locais. Como a quantidade de material utilizada no concreto é grande, a proximidade produtor-consumidor passa a ser importante. Há ainda as questões ambientais envolvidas, decorrentes desta movimentação e da exploração das jazidas.

A areia britada gerada no processo de produção dos britadores, contém em geral alto teor de material pulverulento (partículas de tamanho inferior a 0,075 mm). A Norma Brasileira (NBR) 7211 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a exemplo de outras normas internacionais como a *British Standards* (BS) 882 e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C 33, limita a presença de material pulverulento no concreto. Em sua edição de 2005, limita em 10% ou 12% em relação à massa de agregado miúdo, para concreto submetido ou protegido do desgaste superficial, respectivamente. Para atender a exigência da Norma, a areia britada passa por um processo de lavagem na planta de britagem, cujo objetivo é reduzir a quantidade de pó do produto. Esse material retirado é descartado em aterros.

De forma geral, a avaliação do agregado para utilização na construção civil passa pelo entendimento em três esferas de conhecimento, ou seja, as características físicas do material, o processo de produção e a tecnologia de materiais, as quais combinam-se e interagem. Há uma interdependência entre a caracterização física e a tecnologia de produção, pois o processo de manufatura depende da avaliação do tipo

de rocha a ser industrializada. Similarmente, uma otimização na proporção dos componentes do concreto deverá ser adaptada às características do agregado, fornecidos parcialmente pela rocha em seu estado natural e pelos parâmetros determinados no processamento. E, finalmente, as exigências para o uso do produto final são em geral decisivas para a escolha do tipo de rocha a explorar bem como do processo de produção a ser adotado.

Este trabalho determinou características da areia britada de origem basáltica, lavada e não lavada, que podem influenciar na qualidade do concreto, identificou o processo de produção das areias e analisou seu desempenho na composição de concretos à base de cimento Portland.

Dentro das limitações dos fatores pesquisados, foi possível verificar se a lavagem do material o torna mais adequado para o uso em concreto.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar a areia britada lavada e não lavada para uso em concreto, através da análise do desempenho de concretos com o uso desses materiais.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as características físicas das areias britadas.
- Verificar a diferença das areias antes e após a lavagem.
- Construir diagramas de dosagem para as areias britadas.
- Verificar o comportamento do concreto com as areias britadas no estado fresco.
- Verificar o comportamento do concreto com as areias britadas no estado endurecido.

### 3 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa tem por objetivo contribuir para o avanço do conhecimento na aplicação dos finos de britagem como agregado no concreto. É um material alternativo à areia extraída de rios, tradicionalmente utilizada para este fim. Assim, há razões de ordem ambiental, econômica e técnica, que interagem entre si, tais como:

- exaustão de jazidas de areia de rio e suas grandes distâncias de muitos centros consumidores;
- possibilidade de ampliação do mercado no ramo de britagem;
- melhoria das características do concreto.

Devido às indicações normatizadas que estabelecem limites à presença de materiais pulverulentos nas misturas de concreto e incertezas sobre a influência destes no produto final, os finos de britagem passam por um processo de lavagem. Os equipamentos utilizados para este fim utilizam água, que carrega grande parte do material pulverulento. O resíduo assim retirado é depositado a céu aberto e periodicamente descartado em aterros.

A viabilização do aproveitamento dos finos de britagem sem a necessidade de lavagem traria benefícios evidentes. É possível estimar-se a quantidade de material pulverulento que está envolvida neste processo. A produção nacional de brita no ano 2000 era avaliada em 76 milhões de m<sup>3</sup>/ano (PINHEIRO, 2000), gerando uma produção média de finos na ordem de 10 a 15% (NEVES; LIMA, 2001). Como o material pulverulento gerado fica em torno de 20% do fino (CAMARINI; ISHIKAWA, 2004) e levando-se em conta que após o processo de lavagem mecânica este material apresenta teor de pulverulentos em torno de 6% (TERRA, 2000), na lavagem estão, portanto, envolvidos em torno de 1,5 milhão de m<sup>3</sup>/ano de material pulverulento.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DA AREIA BRITADA

#### 4.1.1 O Basalto

De acordo com a WIKIPÉDIA (2006d), o basalto é uma rocha ígnea eruptiva, de granulação fina, afanítica, isto é, os cristais não são vistos à vista desarmada, podendo, ainda, conter grandes quantidades ou ser constituído integralmente de vidro (material amorfo). Esta rocha é constituída principalmente de plagioclásio e piroxênio e, em muitos casos, de olivina. Como minerais acessórios encontram-se vários minerais, sendo os óxidos de ferro e titânio os mais freqüentes.

As rochas vulcânicas são divididas tipicamente em quatro tipos básicos de acordo com a quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), conforme mostrado na figura 1.

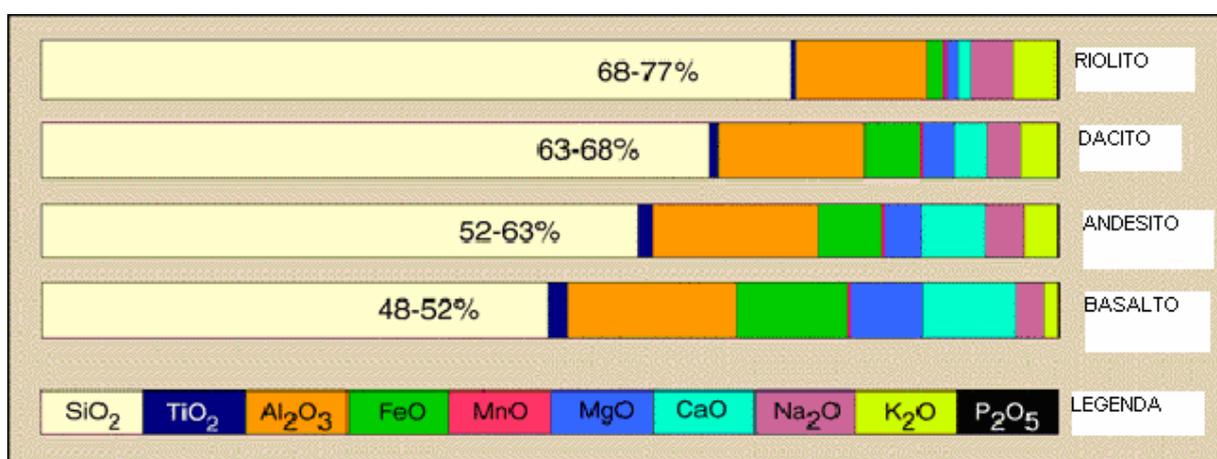


FIGURA 1 - Principais elementos químicos que formam as rochas ígneas

FONTE: U.S. Geological Survey USGS (2006a)

A tabela 1 mostra as composições dos óxidos constituintes do basalto de amostras coletadas em diferentes partes do Globo. Os ensaios com rochas vulcânicas coletadas na Turquia (Anatolian) foram realizados por KORKANÇ e TUGRUL (2004), utilizando o método do Plasma Acoplado por Indução. As amostras de basaltos coletados na Islândia (Reykjavik), (USGS, 2006b) e nos USA (Hawaii), (USGS, 2006c), foram ensaiadas em laboratórios independentes que utilizaram métodos próprios de análise.

TABELA 1 – Composição dos elementos óxidos das amostras de basalto

Oxido (%)	Turquia	Turquia	Turquia	Islândia	USA
SiO <sub>2</sub>	49,17	48,36	49,69	47,96	49,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,91	16,05	15,48	15,50	13,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,74	8,49	8,21	11,30*	12,30*
MgO	9,31	9,12	9,14	9,70	7,23
CaO	10,70	10,69	11,02	13,30	11,40
Na <sub>2</sub> O	3,33	3,34	3,05	1,82	2,22
K <sub>2</sub> O	0,68	0,67	1,00	0,03	0,52
TiO <sub>2</sub>	1,12	1,29	1,01	0,96	2,73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,36	0,32	0,35	0,021	0,27
MnO	0,15	0,14	0,14	0,175	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,048	0,049	0,055	-	-

NOTA: \*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Total

Conforme o grau de saturação em sílica (SiO<sub>2</sub>), as rochas ígneas classificam-se como básicas, intermediárias ou ácidas, cujos teores de sílica situam-se entre 44% a 52%, 52% a 60% e mais do que 60%, respectivamente (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2006). No estado de Santa Catarina, a partir da Serra Geral em direção ao oeste, a ocorrência absolutamente predominante é de rochas de caráter básico. Há ocorrências de caráter intermediário nas proximidades de Chapecó, Irani e Vargeão, situadas na região oeste (SANTA CATARINA, 1987).

O basalto é produzido principalmente nas erupções que ocorrem: (a) nas cristas meso-oceânicas, que são o foco da expansão do assoalho oceânico e dão origem às chamadas placas tectônicas, assim, a maior parte do embasamento oceânico é constituído de basaltos; (b) em menor volume, embora mais evidentes, em erupções vulcânicas como em algumas das ilhas do arquipélago do Havaí e (c) em enormes derrames que formaram grandes platôs continentais, como, por exemplo, no norte da Sibéria, no planalto de Decan, na Índia (FREE SOFTWARE FOUNDATION, 2006). No Brasil, há um dos maiores derrames basálticos do mundo, localizado na Bacia do Paraná, e outro de menor porte na região norte, conforme pode ser visualizado na figura 2.

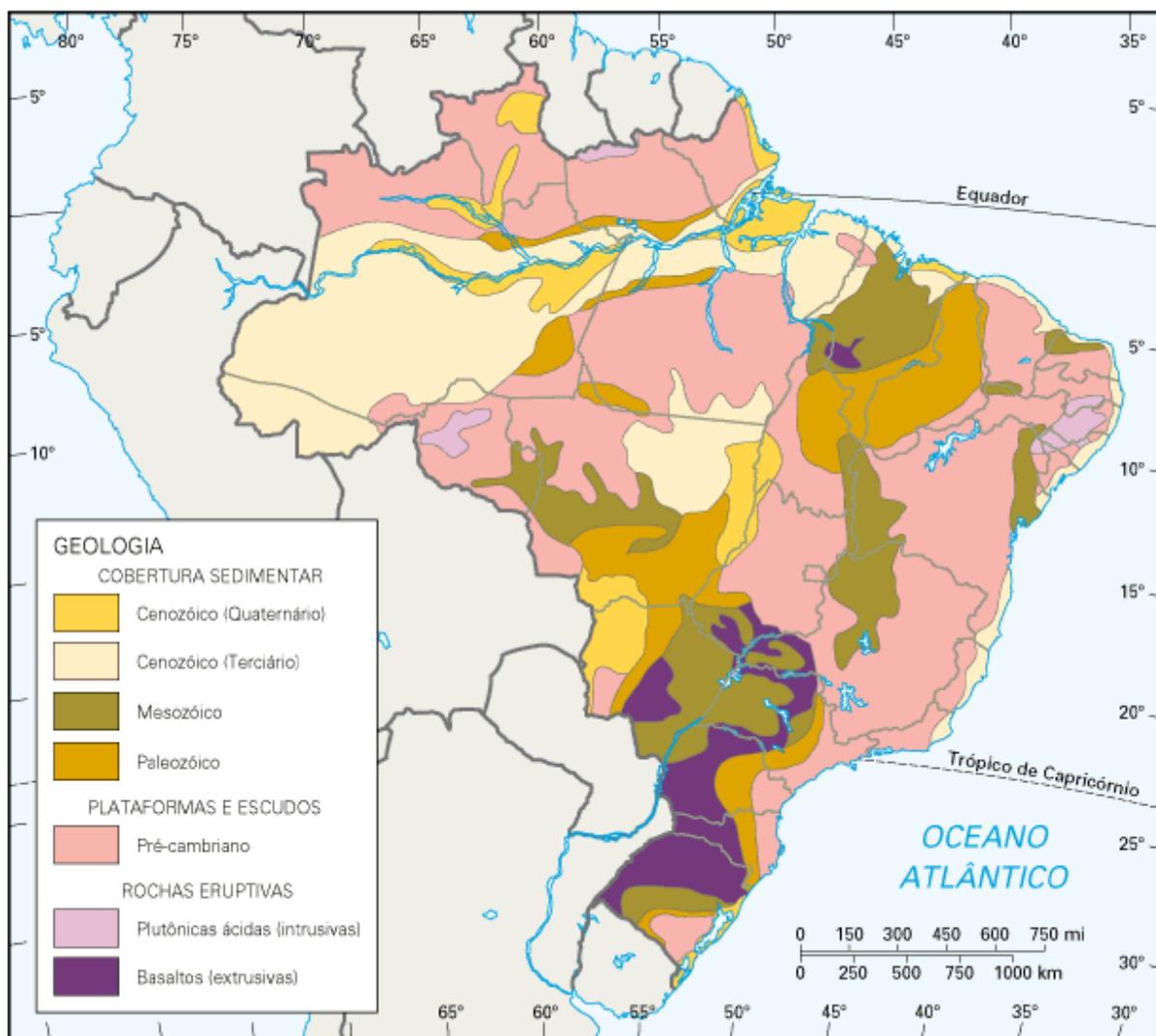


FIGURA 2 - Mapa da formação rochosa brasileira

FONTE: Guia Internet Brazil (2006)

#### 4.1.2 Produção da Areia Britada

A areia britada é um subproduto na produção de brita que possui dimensões inferiores a 4,8 mm na classificação por peneiramento. A quantidade de material gerado é de 10 a 15% do volume total (NEVES; LIMA, 2001), podendo chegar até 20% do material britado (PRUDÊNCIO; COELHO; GUTSTEIN, 1995).

PAUL et al. (2003) relataram os fatores que influenciam a britagem e seus princípios de funcionamento. A britagem de agregados é essencialmente uma operação de redução de tamanho, que é influenciada pela:

- natureza da rocha-mãe, seu tipo e características;
- resistência à britagem da rocha, isto é, a energia requerida;
- taxa de abrasão, ou seja, a característica de desgaste da rocha sujeita à fratura pelo metal;
- natureza do equipamento utilizado na produção de agregados.

A redução de tamanho é atingida pelos mecanismos de impacto, compressão, atrito e abrasão. Todos os britadores usam um ou mais desses mecanismos.

#### 4.1.2.1 Tipos de britadores

De acordo com PAUL et al. (2003), os britadores de rocha disponíveis atualmente podem ser agrupados como:

##### 4.1.2.1.1 Britador de mandíbula

Trabalha através da quebra do material principalmente pela ação da força de compressão, aplicada através do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície de britagem móvel contra outra fixa. São os mais empregados em britagem primária, por possuírem grande abertura de entrada.

É sabido que a britagem por compressão, usando forças de esmagamento do material, produz fraturas nos planos de clivagem. Como as fraturas de clivagem ocorrem ao longo de planos de fraqueza ou inclusões, caracterizando uma grande presença unidirecional, o produto é usualmente de uma natureza alongada e lamelar. A graduação do produto deste britador é muito grossa e com má distribuição das frações finas.

#### 4.1.2.1.2 Britadores giratórios e de cone

Nesses britadores a redução de tamanho é obtida principalmente pela combinação da compressão e atrito. Para otimização do resultado de atrito, é essencial que mantenham a alimentação afogada. O produto desses britadores é superior aos de mandíbula, com melhor proporcionalidade de dimensões das partículas, melhor graduação e aumento da percentagem de finos. Contudo, o desgaste de componentes exige um maior controle quanto ao formato das partículas, textura e distribuição granulométrica para manter a qualidade de produção.

#### 4.1.2.1.3 Britadores de rolo

Essas máquinas atuam principalmente por compressão, utilizando o princípio de fratura por clivagem. Com uma abertura muito estreita e sem um alívio físico possível (como o movimento de retorno do queixo nos britadores de mandíbula), esses britadores são hábeis para produzir produtos de tamanhos pequenos. Contudo, considerando as características de abrasão do material, o uso de britadores de rolo pode ser oneroso. A graduação não é constante devido ao desgaste desigual dos rolos.

#### 4.1.2.1.4 Moinhos de martelo

A redução do material se dá principalmente pelo impacto dos martelos girando a alta velocidade e pela colisão do material arremessado pelos martelos contra as placas de impacto. É recomendado especialmente para a produção de materiais finos (SVEDALA FAÇO, 1994).

#### 4.1.2.1.5 Impactores de rocha contra metal

Utiliza principalmente o princípio do impacto na operação de redução de tamanho. Neste equipamento, um consolo metálico (martelo) arremessa a rocha

violentamente contra as placas de impacto, causando o estilhaço do material. Este processo é repetido tantas vezes quanto se desejar a redução de tamanho. O tamanho é controlado pelo ajuste da fenda entre o rotor e as placas de impacto. A figura 3 ilustra os componentes básicos deste tipo de máquina.

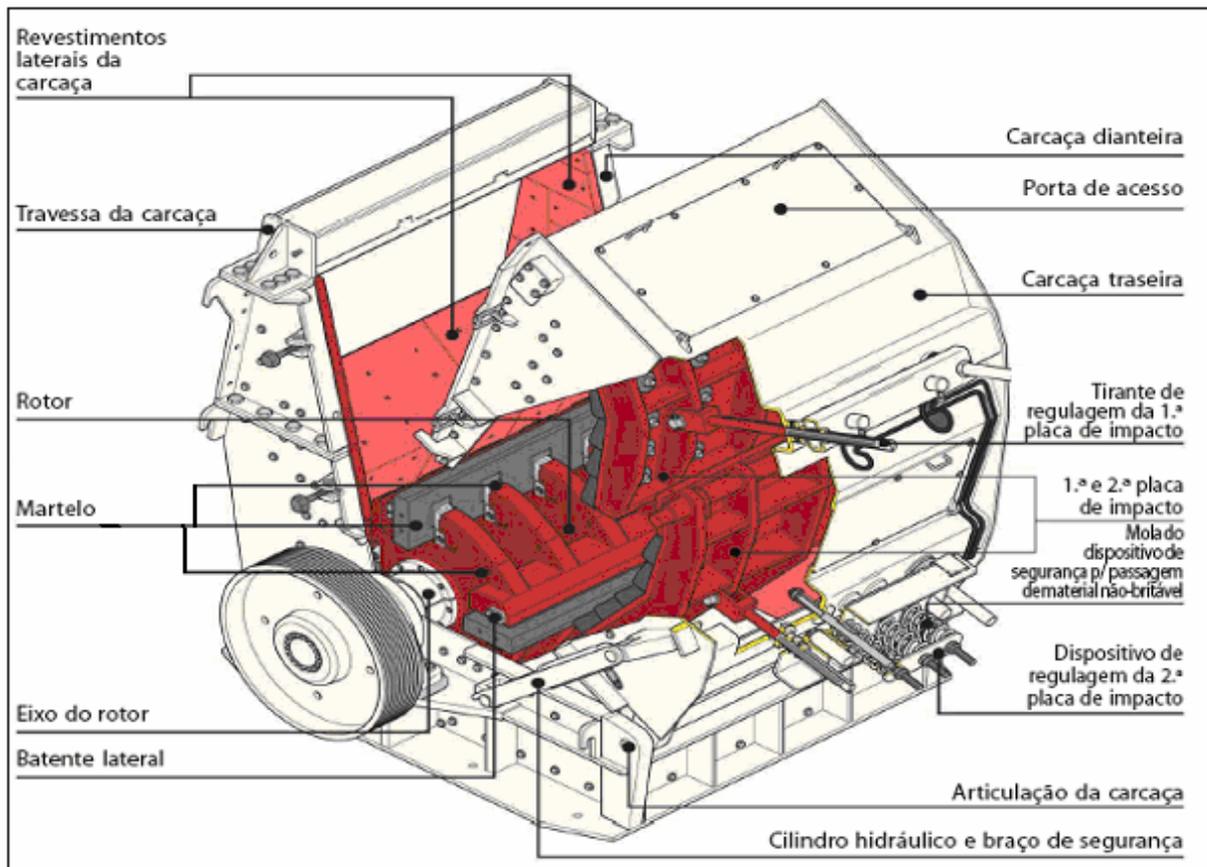


FIGURA 3 – Componentes básicos do britador de impacto rocha contra metal

FONTE: Svedala Faço (1994)

Como britadores secundários, aceitam tamanhos relativamente maiores de rochas e atingem relações de redução muito altas, visto que em um dos estágios eles conseguem fracionar blocos. A distribuição granulométrica pode ser mais estável onde as máquinas são providas com uma trilha graduada para descarga, pois assim o material sofre maior atrito e menor abrasão, influenciando o processo de redução de tamanho. A britagem é basicamente obtida através de grande energia de impacto da rocha no metal. Operando com rochas de elevada dureza, a manutenção da

granulometria ao longo do uso é grandemente influenciada pelo desgaste progressivo dos componentes da máquina, cuja reposição é em geral onerosa.

#### 4.1.2.1.6 Impactores de rocha contra rocha

O impactor de eixo vertical utiliza em sua operação, os quatro modos de operação de redução de tamanho: impacto, compressão, atrito e abrasão. Ao reproduzir a ação da natureza, pode produzir um produto bem graduado, altamente formatado e com uma superior textura de superfície devido ao alto grau de abrasão. Conforme a especificação técnica da SIMPLEX (2003), este equipamento tem o rotor montado em um eixo vertical para prover a força centrífuga que gera o processo de redução da partícula. O material alimentado no britador é centralizado antes de entrar no rotor. O rotor então o acelera a altas velocidades e o arremessa para a câmara de britagem. Na trajetória e dentro da câmara de britagem as partículas colidem umas contra as outras. A figura 4 mostra o esquema do funcionamento.

São estas contínuas colisões que geram a redução das partículas. Como uma máquina de estágio ternário de britagem, é necessária a utilização de britadores primários e secundários para proporcionar um tamanho de alimentação de 25 mm para uma máquina pequena e de 50 mm para as maiores. Contudo, apesar da necessidade de dois estágios de pré-seleção, este sistema de britagem é mais econômico, se considerado o custo de uso com menor desgaste de componentes. Os impactores são a série mais moderna de britadores historicamente em uso.



FIGURA 4 - Ilustração esquemática do funcionamento do britador de impacto de eixo vertical rocha contra rocha

FONTE: Svedala Faço (1994)

#### 4.1.2.2 Lavagem em planta

Para realização da lavagem em planta são utilizados classificadores, que são extensivamente aplicados em instalações de produção de areia por dragagem de rio ou cava, de areia da britagem de agregados, de lavagem de materiais contaminados por matéria orgânica e argila, de separação de minerais de diferentes densidades e granulometrias entre outras.

Por ser uma solução simples e econômica para classificar e desaguar materiais sólidos em suspensão com finos até 0,075 mm, embora originado há longa data, o classificador do tipo rotativo é largamente empregado em unidades de britagem.

De acordo com a especificação técnica da SIMPLEX (2003), sua concepção construtiva incorpora uma caixa receptora em um tanque com sistema interno de sedimentação de baixa turbulência. Isso permite a decantação gradativa dos sólidos ao fundo da caixa, controlada pela colocação ou retirada de canaletas de drenagem de água, dispostas em toda a superfície superior, proporcionando controle preciso da faixa de corte desejada. Sua roda com caçambas de coleta, recupera, mediante lento e suave movimento de giro, a fração sólida depositada no fundo do tanque e retira a água através de telas resistentes ao desgaste, com fendas de abertura entre 1 mm e 6 mm. O processo de drenagem natural da água pela gravidade, é substancialmente acelerado pela ação de uma câmara de vácuo situada por trás de cada caçamba. O vácuo é criado naturalmente, na medida em que a roda eleva cada caçamba acima do nível da polpa no tanque, sendo este vácuo mantido até que a borda inferior de cada defletor da região em depressão saia da água. Mesmo ocorrendo em instantes, este processo de desaguamento é suficientemente eficiente a ponto de reduzir a umidade da polpa à faixa de 15% a 20%, permitindo sua descarga e transporte por um transportador de correia inclinado. Após descarregado e o material desaguado pelo chute de saída, as caçambas continuam seu movimento de entrada no tanque para iniciar novo ciclo. A figura 5 mostra um esquema da máquina com as principais etapas do funcionamento.

O controle do processo, conforme a especificação técnica da SIMPLEX (2003), se dá mediante abertura ou tapamento dos defletores internos do tanque, cuidadosamente dispostos nos caminhos preferenciais dos sólidos, bem como pelo ajuste das canaletas superficiais de drenagem de água. Assim, o operador pode controlar com precisão a turbulência e velocidade de ascensão da polpa no tanque, ou seja, ajustar a granulometria de corte desejado para a sua aplicação específica, retendo finos até 0,075 mm ou descartando sólidos até 0,6 mm ou qualquer dimensão intermediária. Adicionalmente os Classificadores Rotativos podem ser equipados com sistemas automáticos de variação de velocidade de giro no acionamento da roda, permitindo contínua e total adequação da capacidade de recuperação, em relação às variações de volume e carga de material sendo alimentado.

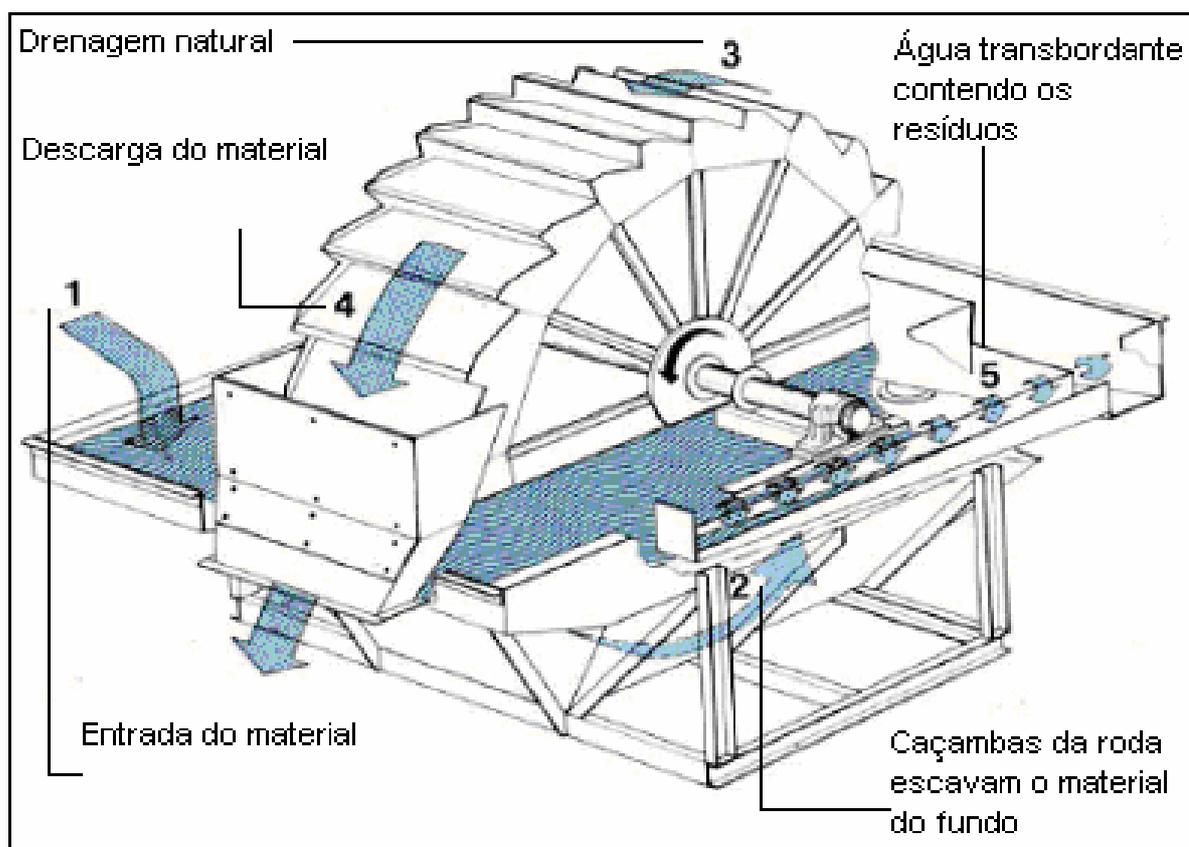


FIGURA 5 - Ilustração esquemática do funcionamento do classificador do tipo rotativo

FONTE: Svedala Faço (1994)

## 4.2 EFEITOS DA COMINUIÇÃO DA ROCHA NO CONCRETO

### 4.2.1 Características Físicas

A forma, tamanho e textura da superfície das partículas da areia britada dependem da natureza e grau de estratificação do depósito de rocha, do tipo de planta de britagem utilizada e a relação na redução do tamanho (PRUDÊNCIO; COELHO; GUTSTEIN, 1995). Muitas propriedades do agregado dependem das propriedades da rocha-mãe (composição química e mineralógica, classificação petrográfica, massa específica, dureza, resistência, estabilidade física e química, estrutura de poros e cor), enquanto outras como a absorção, podem mudar devido ao processo de britagem.

O desempenho do concreto contendo areia britada, com relação às propriedades mecânicas e à durabilidade, depende da composição e volume da pasta, natureza da interface pasta-agregado e características físicas das partículas de areia, como forma, textura, granulometria e conteúdo de material pulverulento (DONZA; CABRERA; IRASSAR, 2002).

MEHTA e MONTEIRO (1994), definem a textura superficial pelo grau de quanto a superfície do agregado é lisa, áspera ou celular, e a forma indicada para determinação é baseada em avaliação visual.

A NBR 7225 (ABNT, 1993) classifica as partículas, quanto ao formato, em alongadas, cúbicas, lamelares e quadráticas, de acordo com relações entre suas dimensões. Com relação às arestas e cantos, as partículas podem ser angulosas ou arredondadas.

A figura 6 apresenta o material pulverulento de basalto proveniente da britagem com impactor rocha contra rocha, coletado na região de Londrina (PR). É possível observar que, de forma geral, as partículas apresentam formato cúbico com arestas e cantos angulosos.

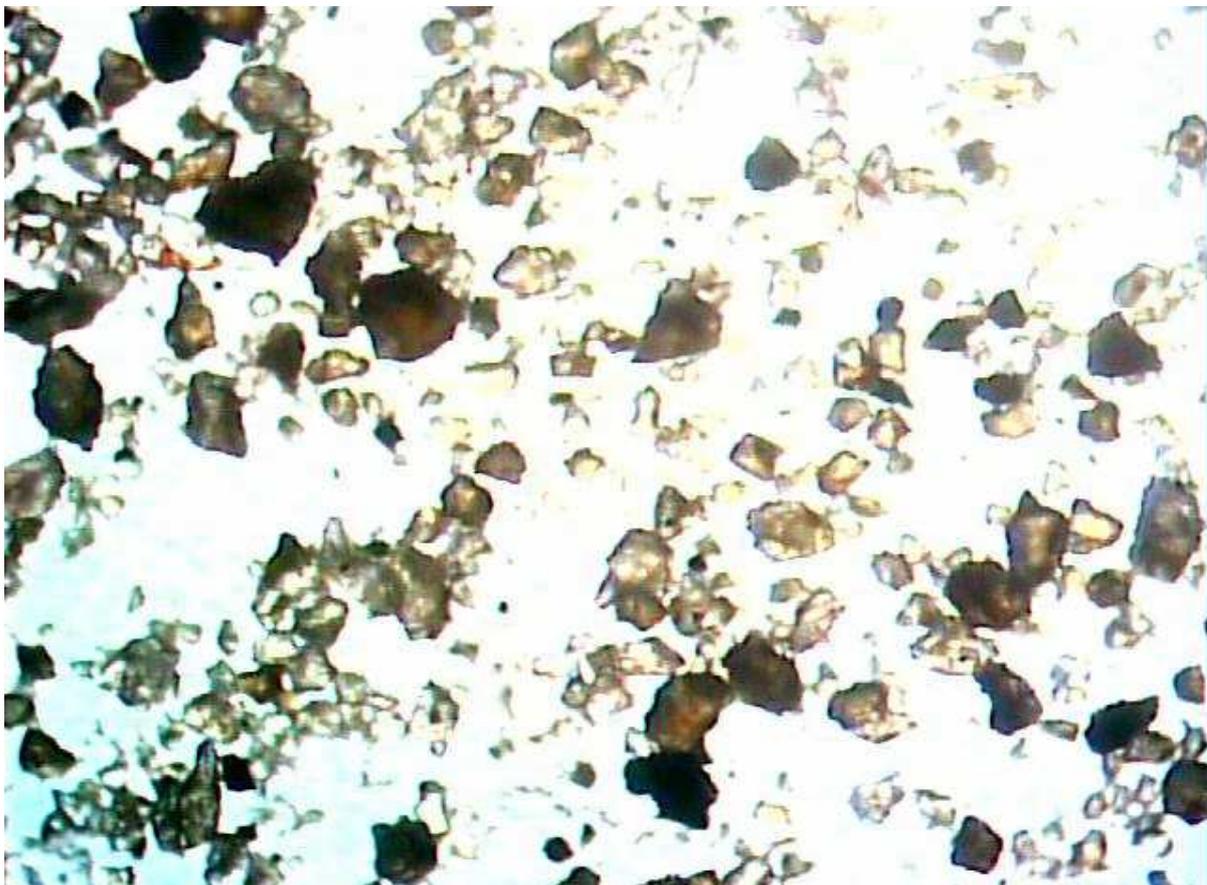


FIGURA 6 - Imagem 10x1 da fração 0,075 mm de basalto

FONTE: Grupo Gerar - Gestão de Resíduos / UEL - autor: Thiago Melanda Mendes

O formato menos arredondado e textura mais áspera das partículas das areias britadas em relação às de areia de rio, causam efeito tanto positivo quanto negativo no concreto.

O efeito negativo é a má trabalhabilidade do concreto, devido ao atrito entre suas próprias partículas (PRUDÊNCIO; COELHO; GUTSTEIN, 1995). Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a forma e textura superficial dos agregados têm grande influência mais nas propriedades do concreto no estado fresco, pois comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas, requerem mais pasta de cimento para produzirem misturas trabalháveis e, por fim, aumentam o custo do concreto. QUIROGA e FOWLER (2004) também observaram que tais partículas diminuem a densidade de empacotamento devido ao

aumento de vazios. Em misturas de mesma granulometria, as areias com densidade de empacotamento maior desenvolveram melhor trabalhabilidade.

O efeito positivo da forma e textura das areias britadas é o aumento de resistência do concreto, causado pelo intertravamento da pasta e partículas do agregado (DONZA; CABRERA; IRASSAR, 2002).

Do ponto de vista somente da textura, de acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) ela afeta a resistência do concreto, particularmente à flexão, pelo menos nas primeiras idades. A textura mais áspera parece favorecer a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta e o agregado. Contudo, em idades mais avançadas, com o desenvolvimento de uma forte aderência química, o efeito da textura superficial pode não ser tão importante.

De acordo com NEVILLE (1997) a superfície específica do agregado determina a quantidade de água necessária para a molhagem completa dos sólidos. Assim, uma mistura com agregados maiores terá menor necessidade de água. As partículas menores de 150  $\mu\text{m}$  não necessitam de molhagem como as partículas maiores e aparentemente parecem atuar como lubrificantes na mistura. Até certo limite, QUIROGA e FOWLER (2004) confirmaram a existência de uma relação não linear da demanda de água pela presença de microfinos das areias britadas. Seus ensaios concluíram que em geral, há um aumento da demanda da água com quantidades crescentes de microfinos, mas em misturas com até 15% de microfinos a demanda de água aumentou lentamente e acima disso aumentou rapidamente.

BEDERINA et al. (2005) pesquisando efeitos reológicos da adição de filer em argamassas, realizaram ensaios fazendo variar a proporção de filer nas misturas. Observaram que a trabalhabilidade do concreto dependeu dos teores de água e de filer. O aumento da relação  $a/c$  (água/cimento) elevou consideravelmente a trabalhabilidade. O aumento no teor de filer elevou a trabalhabilidade até que uma proporção ótima filer/areia foi alcançada, quando passou a diminuir. Este efeito foi mais pronunciado quando a proporção de água era pequena e a areia continha uma proporção elevada de grãos finos. O trabalho executado por CHAUCHE (1993) apud BEDERINA et al. (2005) mostrou que antes que os vazios estejam inteiramente preenchidos, os grãos da areia circulam com dificuldade e o baixo teor de filer serve apenas para restringir seu movimento. A influência da proporção da água pareceu confirmar esta hipótese. Por outro lado, uma vez que os vazios se tornaram totalmente

preenchidos, o aumento na concentração de filler contribuiu para melhorar a trabalhabilidade da argamassa, facilitando o movimento dos grãos da areia.

A origem dos microfinos tem um papel significativo no comportamento do concreto fresco. Se inertes, a origem tem pequeno efeito na resistência à compressão e flexão. Em misturas similares com adições de pó de calcário, granito e basalto, QUIROGA e FOWLER (2004) observaram que os microfinos de pedra calcária requereram menos superplastificante do que os de granito e basalto, mesmo quando os microfinos de calcário foram compostos de partículas mais finas do que os outros dois. HO et al. (2002) chegaram à igual conclusão, apontando como razão dos finos do granito ou basalto tenderem a apresentar forma mais angulosa do que as partículas da pedra calcária.

No estado endurecido, a pesquisa de QUIROGA e FOWLER (2004) mostrou que os microfinos de basalto produziram misturas com resistência levemente mais elevada do que o restante das misturas (pedra calcária e granito) que tiveram resistência mais ou menos idêntica.

A granulometria é o estudo da distribuição do tamanho dos grãos componentes, e para o concreto, a granulometria contínua da areia é altamente positiva, pois permite um melhor preenchimento de vazios e mais baixa demanda de água para uma dada consistência (CARNEIRO; CINCOTTO, 1997). Por outro lado, de acordo com QUIROGA e FOWLER (2004), a granulometria ideal dos agregados pode ser alcançada pela otimização de critérios previamente selecionados, como por exemplo: para a consistência, para a densidade de empacotamento, para a viscosidade plástica ou para a uniformidade. As proporções correspondentes para cada um desses critérios dependem também da forma e textura dos agregados e dos teores de água e cimento. Em geral, as misturas otimizadas para a consistência máxima são muito grossas, propensas à segregação e apresentam baixa trabalhabilidade devido à falta de finos.

De acordo com QUIROGA e FOWLER (2004) a granulometria é a característica do agregado que mais afeta o concreto fresco. É importante, na medida em que, estando relacionada à trabalhabilidade, sua variabilidade importa em diferentes valores de consistência e, conseqüentemente, da relação a/c. Variando apenas a granulometria dos agregados em misturas de concreto, os autores

observaram diferenças na consistência. Em misturas que incluíram microfinos, as diferenças foram maiores.

No concreto endurecido, QUIROGA e FOWLER (2004) concluíram que à exceção das misturas muito duras, difíceis de adensar ou as misturas muito fluidas, sujeitas à segregação, a granulometria mostrou baixa correlação com a resistência à compressão e à flexão.

Embora sejam sugeridas curvas granulométricas (por exemplo, granulometria contínua, descontínua e máxima compactação) que apontam para a melhoria das propriedades do concreto, a granulometria ideal para cada concreto depende de fatores intrínsecos, como forma, textura, origem mineral entre outros e extrínsecos, como por exemplo, requisitos de trabalhabilidade e espaços a preencher. Há também o aspecto da disponibilidade de determinada fonte de agregado, cujas características precisam ser adaptadas a cada caso. Portanto, no entender de LEVY (2001), a utilização da curva granulométrica como parâmetro para seleção de um agregado a ser utilizado na produção de concreto, não pode ser adotada como critério absoluto. Ao invés disso, deve ser entendida como critério orientativo, para prever a trabalhabilidade do concreto a ser produzido com determinado agregado.

#### 4.2.2 Efeito Filer

A fração fina da areia britada, cujas partículas têm diâmetro inferior a 0,075 mm, é classificada como material pulverulento. Em misturas cimentícias, é considerada uma adição mineral que pode ou não provocar reação pozolânica. CAMARINI e ISHIKAWA (2004) sugerem que essas partículas de origem granítica são adição não pozolânica, indicando que a indução da aceleração da hidratação do cimento através do efeito filer, atua nas propriedades mecânicas da argamassa. De acordo com UCHIKAWA; HANEHARA e HIRAO (1996) o efeito filer ocorre quando o pó mineral uniformemente distribuído na parte matriz do concreto preenche os poros, dificulta a segregação, reduz o tamanho dos produtos de reação da hidratação e inibe a deposição de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Como resultado os poros capilares de diâmetro de 100 nm e 50 nm são reduzidos e é inibida a formação da zona de transição. Devido a esse efeito, foi

observado o acréscimo na resistência do concreto com utilização de areias britadas em substituição à areia de rio (CABRERA; DONZA; IRASSAR, 2000).

Em ensaios realizados com a substituição de pó mineral por parte do agregado miúdo, UCHIKAWA; HANEHARA e HIRAO (1996), observaram que para quase todos os concretos preparados com a presença de pó, o volume total de poros foi quase igual àquele do concreto sem adições. Mas, as relações do diâmetro para o volume total de poros foram diferentes entre si. O volume de poros de diâmetro grande (100 nm ou mais) foi menor no concreto com adição de pó do que no concreto sem adições enquanto que o de poros capilares (de 6 a 50 nm) e poros do gel (com 6 nm ou menos) foram maiores. Isso porque a presença do pó densifica a estrutura do concreto fresco e seqüencialmente, no estado endurecido, pelo efeito de engavetamento do pó, inibe o movimento de poros da solução, a deposição de cristais grandes de  $\text{Ca(OH)}_2$  e a formação da zona de transição.

A finura e natureza das adições minerais estão associadas à resistência das argamassas. Utilizando adições não pozolânicas de calcário e quartzo, LAWRENCE; CYR e RINGOT (2005) verificaram que para todos os tempos de hidratação testados, a resistência à compressão aumentou com a finura da adição usada. Graficamente, segue uma evolução logarítmica, e é conseqüência de vários fenômenos físicos, sendo os dois principais o efeito da distribuição de tamanho das partículas (efeito filer) e o efeito devido à nucleação heterogênea. O efeito filer implica uma modificação da porosidade inicial da mistura, que pode ser relacionada às variações da densidade e do teor de ar de misturas frescas de argamassas. Como não verificaram variação significativa desses parâmetros para as argamassas com quartzo e calcário, o efeito filer não pode explicar o aumento na resistência dessas argamassas. A nucleação heterogênea é provavelmente o principal efeito físico responsável para o aumento na resistência associado com a finura das adições minerais usadas. É um processo físico que conduz a uma ativação química da hidratação do cimento. Relaciona-se à nucleação de hidratos em partículas minerais estranhas, as quais catalizam o processo de nucleação pela redução da barreira de energia. A intensidade do processo depende da finura das partículas minerais da adição (a diminuição do tamanho de partícula favorece a nucleação), da quantidade de adição mineral usada (a probabilidade para os locais de nucleação estarem próximos das partículas de cimento aumenta com a

quantidade de partículas estranhas) e da afinidade do pó mineral para os hidratos do cimento (relacionada à natureza do mineral usado).

CYR; LAWRENCE e RINGOT (2005) revelam que o efeito da nucleação heterogênea passa a ser percebido quando a adição mineral possui superfície específica acima de 100 m<sup>2</sup>/kg. Em ensaios com argamassas, com a adição atendendo a esta condição de finura, a quantidade que gerou a máxima resistência à compressão variou de 25 a 35% em relação ao cimento, dependendo da natureza do pó mineral.

#### 4.2.3 Efeito Pozolânico

NEVILLE (1997) fornece a definição de pozolana da ASTM 618-94, como um material pulverizado de composição silicosa ou sílico-aluminosa que, não sendo por si só cimentício, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e na presença de umidade, formando compostos com propriedades cimentícias.

Quando a mistura cimentícia contém uma adição pozolânica, combina duas ações: efeito químico e fenômenos físicos (CYR; LAWRENCE; RINGOT, 2005). O efeito químico, ou a reação pozolânica, ocorre com o hidróxido de cálcio produzido pelas reações de hidratação do cimento e a sílica amorfa presente na adição mineral, gerando C-S-H (ISAIA; GASTALDINI; MORAES, 2003). Os fenômenos físicos ocorrem principalmente devido aos efeitos da distribuição de tamanho das partículas (efeito filler) e devido à nucleação heterogênea (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2005).

ISAIA; GASTALDINI e MORAES (2003), descrevem um exemplo da combinação de efeitos. Mecanismos físicos propiciam maior quantidade de locais de nucleação que dão início às reações de hidratação. O resultado final é uma maior quantidade de produtos hidratados e, conseqüentemente, um consumo mais elevado do hidróxido de cálcio (atividade pozolânica). Com isso, é obtido um ganho unitário de resistência (por consumo de cimento na mistura) ou o realce de outras variáveis ligadas à durabilidade. A ação física salienta a química, e o desempenho global do concreto é aumentado.

De acordo com UCHIKAWA; HANEHARA e HIRAO (1996), a combinação de efeitos pode ser percebida no concreto, principalmente, pelo enchimento de poros, a prevenção do movimento da solução de poros e alteração da zona de transição pasta-

agregado. Conseqüentemente, a adição de pozolanas no cimento resulta no aumento da resistência mecânica e na durabilidade quando comparada à pasta sem adição.

É sabido que a resistência do concreto está fortemente correlacionada com o volume de poros capilares de 50 nm ou mais, causados principalmente pela zona da transição. Segundo UCHIKAWA; HANEHARA e HIRAO (1996), a resistência corresponde ao volume de poros capilares, não obstante o tipo do pó mineral e a idade do concreto. Em concreto com a utilização de pozolana, o volume de poros de grande diâmetro é reduzido pelo enchimento com o próprio pó ou por estruturas de C-S-H geradas pela reação pozolânica que ocorrem em seus interiores. Como resultado, o volume de poros capilares de 50 nm ou mais é menor e os poros de gel de 6 nm ou menos é maior do que no concreto sem a adição.

A densificação da mistura pela presença do pó mineral no concreto, de acordo com UCHIKAWA; HANEHARA e HIRAO (1996), reduz o espaço da água livre. Nesse espaço menor, é dificultada a deposição dos produtos da hidratação que são formados no processo de pega e endurecimento do concreto. Conseqüentemente, a quantidade bem como o tamanho dos hidratos produzidos, é reduzida. Em torno do agregado, a deposição de  $\text{Ca(OH)}_2$  é notavelmente reduzida pela inibição do movimento da solução de poros para o agregado, acompanhada da diminuição da relação a/c efetiva e pelo consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  na reação pozolânica.

O efeito da atividade pozolânica é observado nas primeiras idades (por exemplo, sílica ativa) até diversos meses (algumas cinzas volantes ou pozolanas naturais), dependendo principalmente da quantidade e solubilidade da sílica amorfa no material (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2005). No concreto com a adição de pozolana, UCHIKAWA; HANEHARA e HIRAO (1996) observaram que na idade de 28 dias bem como aos 91 dias, o teor de água combinada é mais elevado e o de  $\text{Ca(OH)}_2$  é mais baixo. Isto sugere que a reação pozolânica prossegue no tempo, produzindo C-S-H.

O tamanho da partícula tem forte influência na reação pozolânica. Em estudos com argamassas, TASDEMIR (2003) e LAWRENCE; CYR e RINGOT (2005) concluíram que a finura das adições minerais conduz a um aumento da atividade pozolânica para qualquer tempo de hidratação.

Assim, para a otimização da resistência mecânica quando usado cimento com adições de pozolanas, segundo ISAIA; GASTALDINI e MORAES (2003), é preciso uma combinação compatível de quantidades mínimas de material sólido por unidades do

volume de pasta de cimento. Isso pode ser obtido por meio das reações de hidratação (água combinada), das reações pozolânicas (consumo de hidróxido de cálcio) ou da ação física de redução da porosidade. Portanto, para a otimização é necessária a ação híbrida, combinada e sinérgica entre três efeitos: a hidratação, os pozolânicos e os físicos.

### 4.3 EFEITOS DA AREIA BRITADA NO CONCRETO FRESCO

#### 4.3.1 Trabalhabilidade

De acordo com QUIROGA e FOWLER (2004) a definição de trabalhabilidade é um tanto nebulosa, pois, dependendo do autor, assume significados diferentes. Para eles, trabalhabilidade é definida pela norma da ASTM C 125, que trata da terminologia relacionada ao concreto e agregados para concreto, como a propriedade que determina o esforço requerido para manipular uma quantidade de concreto fresco com perda mínima da homogeneidade. Os autores associam ao termo, dois outros: consistência e reologia, os quais dizem respeito ao comportamento de fluxo. O U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1994) define-a como a propriedade do concreto ou da argamassa recentemente misturados, que determina a facilidade e a homogeneidade com que podem ser misturados, lançados, adensados e acabados. Associa a trabalhabilidade à consistência, definida como a mobilidade ou a habilidade relativa do concreto fresco de fluir.

Pela grande abrangência do termo, a trabalhabilidade é afetada por muitos fatores internos e externos, em relação à mistura propriamente dita, tais como:

- fatores internos: granulometria, forma das partículas e proporções de agregado; quantidade e qualidade dos materiais cimentícios; presença ou não de aditivos incorporadores de ar e químicos; relação a/c;
- fatores externos: condições do ambiente; finalidade do uso, dimensões e armadura da peça; tipo de mistura e de transporte; modo de lançamento e adensamento.

A relação da consistência com a trabalhabilidade e a praticidade de execução do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998b), tornaram este ensaio de uso prático em aplicações de laboratório e de campo, muito usado como indicador de trabalhabilidade. Entretanto, ao ser referido a trabalhabilidade em seu aspecto lato, o ensaio de consistência possui, portanto, muitas limitações. Entre elas, as citadas por QUIROGA e FOWLER (2004), de não oferecer nem a classificação qualitativa como a aptidão para a compactação ou acabamento, nem resultados quantitativos para valores como a viscosidade.

A manutenção da consistência ou fluidez é característica cardinal responsável pela qualidade do concreto. O ensaio de perda de abatimento (ABNT, 1992), mede a diminuição na fluidez ao longo do tempo.

De acordo com NEVILLE (1997), a perda de abatimento ocorre porque parte da água da mistura é absorvida pelo agregado (se não estiver saturado), parte é perdida por evaporação, e parte é removida pelas reações iniciais. Segundo CHANDRA e BJORNSTROM (2002) essas reações iniciais do cimento envolvem processos químicos e físicos, sendo em maior grau a coagulação física de partículas do cimento. Secundariamente, ocorrem processos químicos, através da reação do aluminato tricálcico com a gipsita. O produto desta reação é uma estrutura cristalina que se distribui na massa.

A temperatura ambiente elevada, a umidade relativa do ar baixa e a elevação da velocidade do vento podem conduzir a problemas na mistura, lançamento e cura do concreto, os quais afetam adversamente suas propriedades e vida útil. Conforme o U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1994) a maioria destes problemas relaciona-se ao aumento da taxa da evaporação da água do concreto recentemente misturado e em temperatura mais elevada, ao aumento da taxa de hidratação do cimento. Os efeitos prejudiciais podem incluir aumentos na: demanda de água, taxa da perda de abatimento, taxa da pega, tendência para a retração plástica e dificuldade do controle do teor de ar incorporado.

O uso de aditivo químico aumenta a trabalhabilidade de uma mistura de concreto, mas, de acordo com PAPAYIANNI et al. (2005), a manutenção do efeito não se prolonga além de 30 a 60 minutos. Em suas pesquisas sobre a influência do tipo de superplastificante em concretos com areia de rio e pedra britada, com respeito à perda de abatimento, concluiu que, em termos gerais, concretos com superplastificante

resultam em uma diminuição de abatimento de 15 cm para 7-8 cm após 1 hora. Além disso, quanto menor a dosagem de superplastificante na mistura, mais rapidamente o concreto perdeu abatimento. Artifícios como adição dos aditivos durante o lançamento ou em doses fracionadas podem reter a trabalhabilidade por um período mais longo.

Conforme PAPAYIANNI et al. (2005), embora os aditivos não reajam por ação química nos produtos hidratados, afetam a microestrutura do gel do cimento e do concreto. A porosidade e a exsudação diminuem significativamente e, em menor intensidade, a retração por secagem e as deformações por fluência. Assim, além do aumento da resistência, há também um aumento da durabilidade do concreto. O desempenho do aditivo vai depender do tipo do superplastificante utilizado, da composição da mistura do concreto, do momento da adição e das condições de temperatura durante a mistura e concretagem.

#### 4.3.2 Pega

A pega é outra forma de mensuração do processo de solidificação de uma mistura de concreto fresco. A pega inicial limita o tempo de manuseio do concreto, enquanto o final da pega indica o início do desenvolvimento da resistência mecânica (NEVILLE, 1997). Os tempos de pega do concreto são influenciados pela relação a/c, início e temperatura de cura, dosagem, fonte e tipo de adições e composição do cimento (KRUML, 1990 *apud* BROOKS; MEGAT JOHARI; MAZLOOM, 2000).

Utilizando adições minerais para substituir parcialmente o cimento em concretos, BROOKS; MEGAT JOHARI e MAZLOOM (2000) observaram que, de forma geral, as adições minerais testadas tiveram efeito de retardar os tempos de pega do cimento. Este retardo foi principalmente atribuído ao efeito combinado de um teor mais baixo de cimento e de uma dosagem efetiva mais elevada de superplastificante relativo à massa de cimento, visto que parte do cimento foi substituída pelas adições minerais. De modo geral os superplastificantes provocaram o retardo nos tempos de pega dos concretos, e a extensão do retardo dependeu do tipo e da dosagem do superplastificante, do tipo de cimento e da temperatura. Nesta pesquisa, o superplastificante e as adições minerais tiveram efeito de dispersão nas partículas do cimento, dificultando seus contatos. Esta ação provocou o retardamento da pega, pois

o endurecimento da pasta do cimento é conhecido como resultante de duas etapas fundamentais: a coagulação, que estabelece os contatos entre partículas e a formação dos hidratos nas zonas de contato, que tornam rígida a estrutura de coagulação. Além disso, a adsorção do superplastificante sobre a superfície das partículas do cimento também provocou o retardo da hidratação, ao atingir particularmente o silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), responsáveis pela resistência nas primeiras idades do concreto.

Em estudo com areias britadas de variadas origens com ou sem microfinos, QUIROGA e FOWLER (2004) concluíram que os aditivos químicos podem ser usados para melhorar a trabalhabilidade ou reduzir a demanda da água de misturas de concreto com teor de microfinos até 20% do agregado miúdo, sem afetar outras características do concreto tais como o tempo de pega, resistência e retração por secagem. Com dosagens acima do máximo recomendado pelos fabricantes, os tempos de pega foram retardados.

#### 4.3.3 Exsudação

Segundo NEVILLE (1997), a exsudação é uma forma de segregação, na qual parte da água de mistura tende a subir para a superfície de um concreto recém lançado. Ela ocorre devido à incapacidade dos sólidos constituintes da mistura em reterem a água quando sedimentam e pela água possuir menor massa específica entre os componentes do concreto. O fenômeno pode causar efeitos na zona de interface pasta-agregado, alteração da permeabilidade e retração do concreto.

De acordo com o mesmo autor, as argamassas devem apresentar a propriedade de retenção de água na mistura, para que mantenham a trabalhabilidade requerida durante a sua aplicação, minimizando, desta forma, a exsudação. Como a água deve molhar a superfície dos grãos do agregado e do aglomerante, a capacidade de retenção de água da argamassa está ligada à superfície específica de seus constituintes.

Em ensaios com o uso areia britada de origem granítica lavada, PRUDÊNCIO; COELHO e GUTSTEIN (1995) observaram que os concretos utilizando areia britada apresentaram menor grau de retenção de água em relação ao concreto confeccionado

com areia padrão. Entretanto, indicam que o problema pode ser corrigido incorporando-se ao concreto aditivo específico.

Com o uso de areia britada de granito não lavada, CAMARINI e ISHIKAWA (2004) realizaram estudo experimental cujas amostras foram coletadas de 7 pedreiras. Além destas, foram utilizadas amostras de areia de rio, de cava e areia normal brasileira. Os valores obtidos no ensaio de retenção de água em todas argamassas foram praticamente idênticos, variando entre 85% e 91% para as misturas com areia britada e 86% a 89% para as demais, apesar das areias britadas apresentarem teores de material pulverulento de 8 a 16 vezes maiores do que as demais areias testadas. Na mesma pesquisa foi realizado o ensaio de ar aprisionado, que também afeta a trabalhabilidade e exsudação. Os teores de ar aprisionado variaram entre 0,47% e 8,36% para as argamassas com areia britada e para as argamassas com areia de rio e de cava variaram entre 9,50% e 10,05%. Embora as argamassas com areia britada tenham apresentado valores mais baixos, o que poderia favorecer a exsudação e diminuir a trabalhabilidade, para a finalidade de assentamento de blocos de concreto, mostraram trabalhabilidade similar às preparadas com as outras areias.

Em estudo realizado com a adição de pó proveniente de corte de rocha de granito em concretos, GONÇALVES; MOURA e DAL MOLIN (2002) observaram que houve um incremento na coesão e consistência e diminuição da exsudação nas misturas. Este comportamento deveu-se, principalmente, ao efeito das pequenas partículas de pó difundidas pela mistura, que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água. Isso pode ser comprovado pela dificuldade apresentada na homogeneização da mistura. PAUL et al. (2003) também observaram que, até certo limite, quanto mais alta a percentagem de material mais fino do que 75  $\mu\text{m}$  na areia britada, menor a taxa de exsudação típica.

#### 4.3.4 Retração Plástica

A retração plástica é um fenômeno que leva à diminuição do volume de misturas cimentícias enquanto estas não endureceram. Desde a sua confecção e ao longo de sua existência, de acordo com MOKAREM (2002), o concreto apresenta variação de seu volume devido à aplicação de cargas e da retração. Quando

carregado, o concreto apresenta uma deformação elástica reversível e uma pequena deformação inelástica, denominada fluência. A fluência do concreto é composta por dois componentes, a fluência básica ou deformação sob carga constante sem ganho ou perda na mistura e fluência de secagem. A fluência de secagem é dependente do tempo de deformação da amostra sob carregamento constante menos a soma da retração de secagem e a fluência básica. A deformação do concreto na ausência de cargas aplicadas é geralmente denominada retração. Existem quatro principais tipos de retração:

- a) por secagem: que pode ser definida como a alteração volumétrica devida à perda de água na mistura do concreto no estado endurecido;
- b) autógena: que é associada com a perda de água pelos poros capilares devido à hidratação do cimento (HOLT, 1998 *apud* MOKAREM, 2002). Este tipo de retração tende a aumentar quanto mais alta a temperatura e o conteúdo de cimento;
- c) por carbonatação: que é causada por reação química de vários produtos de hidratação do cimento com o dióxido de carbono presente no ar. Este tipo de retração é usualmente limitado à superfície do concreto (DILGER, 1997 *apud* MOKAREM, 2002);
- d) plástica: que é devida à perda de água da mistura do concreto antes do endurecimento. Esse deslocamento de água para fora da peça deve-se normalmente à evaporação da água da superfície ou à sucção desta por uma superfície de contato com o concreto.

WITTMAN (1976) *apud* KRONLOF; LEIVO e SIPARI (1995) afirmou que a retração plástica está relacionada à pressão capilar no concreto enquanto fresco. O deslocamento da água da mistura forma uma rede de capilares que gera uma pressão negativa suficiente para causar contrações horizontais e verticais. Esta pressão ocorre durante as primeiras horas do concreto e depende da umidade relativa, temperatura, velocidade do vento, espaço entre as partículas sólidas na superfície do concreto e permeabilidade.

ALMUSALLAM et al. (1998) concluíram que frente a exposição do concreto à ação da temperatura, umidade do ar e velocidade do vento, o conteúdo de cimento e a relação a/c afetam significativamente os parâmetros que controlam a retração plástica.

Em seus ensaios, utilizaram concretos curados ao ar livre sob as mesmas condições ambientais fazendo variar apenas as relações a/c. Verificaram que, com o aumento da relação a/c, a exsudação cresceu e prolongou-se por mais tempo. Além disso, a evaporação decresceu e foi mais rápida. Já em amostras com a mesma relação a/c e diferentes quantidades de cimento, a evaporação cresceu quase linearmente e foi mais rápida quanto maior foi o conteúdo de cimento.

Pesquisando as alterações de volume nos planos horizontal e vertical, KRONLOF; LEIVO e SIPARI (1995) realizaram estudos com amostras compostas por argamassas de cimento, areia e água enquanto frescas. Das análises, observaram que:

- numa típica medida de volume e comportamento da pressão capilar de uma mistura base na condição plástica, a evaporação e o adensamento começam imediatamente após o lançamento. O adensamento durante os primeiros 120 minutos deve-se somente à sedimentação das partículas. Durante este tempo, a superfície é coberta por um filme de água. Após 120 minutos, o volume de evaporação excede aquele devido ao adensamento, indicando a secagem da superfície. Nesse momento a pressão de capilaridade tem início devida à ascensão da água, induzindo conseqüente adensamento (retração vertical) e retração horizontal. Quanto mais tarde a ação da pressão acontecer, mais resistente estará o concreto e maior a probabilidade da pressão ser aliviada pela penetração de ar dentro dos poros ao invés de retração horizontal ou fissuras;
- a cura com quantidades crescentes de água não diminuiu a pressão capilar, mas provocou um retardo em seu desenvolvimento. Quanto maior o retardo menor a retração horizontal observada, devido ao desenvolvimento de resistência da argamassa. Com o aumento da quantidade de água utilizada, praticamente não ocorreu retração horizontal. Sendo assim, a cura com água é um adequado meio para redução da retração. A quantidade de água necessária dependerá das condições de secagem e desenvolvimento da resistência;
- mesmo uma pressão de capilaridade muito baixa pode induzir uma significativa retração;

- a pressão capilar e a retração horizontal da argamassa com adição de plastificante tiveram comportamento atípico, com medidas quase que aleatórias. Plotadas em relação ao tempo, a pressão capilar não se desenvolveu continuamente e não foi observada uma clara linha de comportamento enquanto a retração alternou entre períodos de valores negativos e positivos. A razão apontada para o fenômeno foi a fissuração da amostra.

A abertura das fissuras é o principal efeito no concreto gerado pela retração plástica, e seu controle é de fundamental importância, uma vez que existe uma relação entre este parâmetro e a durabilidade do sistema. Além de comprometer a integridade estrutural do material, a fissuração causada por retração pode também comprometer a durabilidade das peças, aumentando a possibilidade de ocorrência da corrosão da armadura e a deterioração da pasta cimentícia, por difusão da umidade e de agentes agressivos (NAGATAKI; GOMI, 1998 *apud* MELO NETO et al. 2003). STANG (1992) *apud* TANESI e FIGUEIREDO (1999) observou que quanto maior a abertura da fissura, maior a concentração de tensão nas suas extremidades. A concentração de tensões promove a continuidade de processo de aumento da abertura de fissuras. A Norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003c) recomenda que no estado limite último de utilização a abertura de fissuras não deve exceder valores da ordem de 0,2 a 0,4 mm, em função da classe de agressividade ambiental.

Na prática, conforme TANESI e FIGUEIREDO (1999), a retração do concreto é restringida, situação que favorece o surgimento de fissuras plásticas. Essas barreiras à alteração de volume, motivadas pela presença de agregado, armadura, contato com outra superfície entre outros, geram tensões internas na massa de concreto que ao superarem a sua resistência induzem à fissuração. O surgimento dessas fissuras é mais pronunciado nas primeiras horas, pois a resistência do concreto é muito baixa. Embora pequenas, com a aplicação de cargas e efeitos ambientais se tornam pontos de início de uma fissuração mais pronunciada e facilitam a propagação das mesmas. Essas fissuras são comumente observadas na superfície horizontal de estruturas. De acordo com a *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA) (1998), as fissuras de retração plástica são causadas por uma rápida perda de água para a superfície do concreto antes dele endurecer. A situação crítica existe quando a taxa de evaporação

da superfície da mistura excede a da subida da água de exsudação que pode repô-la. A água retirada abaixo da superfície do concreto ascende entre as partículas finas de cimento e agregado causando uma força de tensão que se desenvolve nos níveis de superfície. Se a superfície do concreto começou a endurecer e tem desenvolvido suficiente resistência à tensão para resistir às forças de tensão, as fissuras não se formam. Se a superfície seca muito rapidamente, o concreto pode ainda ser plástico, e fissuras não se desenvolvem neste momento; mas as fissuras plásticas irão formar-se tão logo o concreto endureça um pouco mais. Este comportamento é corroborado por ALMUSALLAM et al. (1998), ao afirmar que como a fissuração por retração plástica está relacionada à taxa de exsudação e evaporação, tanto a composição do concreto como as condições ambientais, são fatores que a influenciam.

#### 4.4 EFEITOS DA AREIA BRITADA NO CONCRETO ENDURECIDO

##### 4.4.1 Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

O desempenho do concreto contendo areia britada, com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade, depende da composição e volume da pasta, natureza da interface pasta-agregado e características físicas das partículas de areia, como forma, textura, granulometria e conteúdo de pó (DONZA; CABRERA; IRASSAR, 2002).

GOLÇALVES (2005) comparou concretos produzidos com areia normalizada a outros confeccionados com areia britada granítica lavada. Em composições similares, constatou menores valores de resistência à compressão nos concretos com areia britada, independente da relação a/c. Embora a areia britada tenha apresentado menor índice de vazios (ou maior empacotamento granular seco), possuía uma granulometria mais grossa. Por esta razão, houve a formação de uma zona de interface pasta-agregado mais fraca, promovendo uma redução da resistência à compressão.

Em pesquisa que objetivou conhecer os efeitos de diferentes tipos de agregado miúdo em concretos, DONZA; CABRERA e IRASSAR (2002), realizaram a comparação de misturas contendo areias britadas não lavadas de granito, calcário e dolomita, com o concreto produzido com areia de rio. Os autores diferenciam os fatores que afetam as

resistências mecânicas de concretos de alta resistência e convencionais. Em relação aos de alta resistência, concluíram que tais concretos podem ser produzidos usando areia britada como agregado miúdo em substituição à areia de rio, com similar ou melhor resistência mecânica. Nesses concretos, a forma e textura das partículas de areia britada têm um importante efeito no intertravamento da pasta e partículas de agregado. Em concretos convencionais (20 a 40 MPa), embora estas propriedades possam causar um aumento na demanda de água, a pasta de cimento hidratada e a zona de transição em volta do agregado são relativamente fracas. Conseqüentemente, é a relação a/c que controla as propriedades mecânicas desses concretos para o mesmo grau de hidratação.

De acordo com TOPÇU e UGURLU (2003) o conteúdo de pó (nesta pesquisa consideradas as partículas de diâmetro inferior a 0,15 mm) promove o aumento na tensão de compressão e flexão do concreto. Esta conclusão resultou de pesquisa que objetivou determinar como a quantidade de filler mineral pode afetar as propriedades do concreto. Utilizaram areia britada de calcário como agregado miúdo em misturas de concreto com conteúdos de cimento de 200, 275 e 350 kg/m<sup>3</sup>. O pó de origem calcária adicionado variou de 0 a 15%. Verificaram que em todas as misturas com adição de pó até 15%, os valores de resistência à compressão superaram, ou no mínimo igualaram, aqueles sem a presença de pó.

Quanto ao módulo de elasticidade do concreto, de acordo com NEVILLE (1997), o concreto endurecido é um material composto que consiste em três fases: pasta hidratada do cimento, agregado e uma zona interfacial de transição. Esta abordagem é devida ao comportamento não exatamente elástico do concreto.

Em estudo da contribuição de cada fase para o módulo de elasticidade do concreto com agregado de 70 GPa, LI et al. (1999) concluíram que a pasta hidratada do cimento é a principal responsável. Secundariamente, o módulo de elasticidade será majorado com ações como:

- a) com relação ao agregado, aumentar seu tamanho máximo até determinado limite ou usá-lo com maior índice de empacotamento granular;
- b) a redução da espessura da zona de transição, com o uso de incorporação de adições minerais, agregado com maior índice de empacotamento granular e redução da relação a/c.

GOLÇALVES (2005) realizou ensaios em concretos produzidos com areia normalizada, de rio e britada lavada granítica. Embasado em análise estatística dos resultados obtidos, afirmou que não há interação entre o módulo de elasticidade e o tipo de agregado miúdo, estando o fenômeno relacionado apenas à relação a/c. Entretanto, DONZA; CABRERA e IRASSAR (2002), em testes de misturas contendo areias britadas não lavadas de granito, calcário e dolomita, observaram que em misturas de igual relação de volume pasta/agregado e mesma origem dos agregados graúdos, aos 28 dias, a evolução do módulo de elasticidade está fortemente relacionada à textura e forma do agregado miúdo. Somente em idades mais avançadas do concreto (medidas realizadas com um ano), a correlação desaparece, e os valores do módulo de elasticidade tendem a aproximar-se.

#### 4.4.2 Porosidade e Permeabilidade

A durabilidade do concreto é freqüentemente associada ao transporte de agentes dissolvidos. Tal transporte pode ser avaliado em termos da permeabilidade. Sabe-se que o transporte ocorre através de uma rede contínua de poros, que existem na matriz cimentícia do concreto (poros de gel, poros capilares pequenos e grandes, grandes vazios, microfissuras e descontinuidades associados com as instabilidades dimensionais que ocorrem durante a cura), no agregado e na região interfacial pasta-agregado (ROY et al., 1993).

Segundo BROWN et al. (1993), a análise das fontes da porosidade e de sua conectividade pode freqüentemente fornecer os meios para compreender os mecanismos pelos quais os agentes agressivos podem penetrar no concreto. Isto se deve à estrutura dos poros que definem o trajeto ao longo dos quais o líquido vaporiza ou move-se preferencialmente.

De acordo com NEVILLE (1997) são três os mecanismos de transporte dentro do material cimentício: difusão ou migração, processo através do qual um líquido, gás ou íon pode passar através do concreto sob ação de um gradiente de concentração. Similarmente na migração, a passagem acontece sob ação de um campo elétrico, causada por uma diferença de potencial; escoamento, propriedade que um meio poroso possui de deixar um fluido passar devido a uma pressão diferencial; e

absorção, processo pelo qual um fluido pode penetrar no concreto por sucção capilar e preencher os espaços vazios.

BROWN et al. (1993) afirmam que, de modo geral, a permeabilidade depende da porosidade total. Mais importante, entretanto, a permeabilidade depende da maneira em que a porosidade total é distribuída. A porosidade, por sua vez, é relacionada ao empacotamento original do cimento, das adições minerais e das partículas de agregados, à relação água/sólidos e à reologia. Tudo isso está relacionado ao grau de dispersão dos sólidos originalmente presentes e às condições de cura.

Na matriz cimentícia a porosidade total e suas distribuições determinam a permeabilidade, mas somente poros com os diâmetros maiores do que 50 nm, contribuem significativamente à permeabilidade. Nos poros de gel (diâmetro de um poro estável de gel é de aproximadamente 2 nm) a porosidade reside nos produtos de hidratação que se acumulam entre a fase líquida e os grãos anidros do cimento. Devido a isso, a porosidade do gel tem um efeito principal nas taxas de hidratação e somente um efeito menor nos processos do transporte que envolve líquidos. Os poros capilares pequenos (aproximadamente entre 2 e 50 nm) são de uma escala de tamanho de forma que as interações eletrostáticas entre as paredes do poro e o líquido se estendem sobre uma fração significativa da área de seção transversal. Como consequência disso é possível que os processos de transporte através de poros com diâmetros nesta escala sejam impedidos por efeitos eletrostáticos (BROWN et al., 1993).

HANZIC e ILIC (2003) buscaram uma relação entre a capilaridade e a absorção de líquidos para o concreto convencional, em três tipos de mistura: sem aditivos, com agente incorporador de ar e com plastificante.

O coeficiente de capilaridade foi obtido através de radiografia com nêutrons (ou neutronografia) e a absorção pelo método gravimétrico, utilizando como fluidos água e óleo combustível. Para os cálculos utilizaram as relações:

a) capilaridade:  $k = a/\sqrt{t}$ , onde  $k$  é o coeficiente de capilaridade e  $a$  é a altura que o líquido sobe no tempo  $t$ ; (1)

b) absorção:  $s = i/\sqrt{t}$ , onde  $s$  é o coeficiente de absorção e  $i$  é o volume do líquido absorvido por uma seção transversal na unidade de tempo  $t$ ; (2)

c) correlação:  $c = k/s$ , onde  $c$  é a constante que relaciona a capilaridade ( $k$ ) e a absorção ( $s$ ). (3)

A validade das equações foi verificada com o traçado dos gráficos dos resultados dos ensaios que empregaram como fluídos água e óleo combustível. Os resultados obtidos para amostras testadas com óleo combustível, conforme era esperado, resultaram em linhas retas, cujas inclinações determinaram o coeficiente de capilaridade e de absorção. Para a água, as equações foram válidas somente para o tempo inferior a 60 horas, pois além deste tempo ocorreu uma variação significativa da linearidade, justificada pela ação de nova hidratação, que causou a obstrução de poros e conseqüentemente retardou o movimento da água através do concreto.

Observaram que o concreto com agente incorporador de ar absorveu consideravelmente mais fluído do que o concreto com plastificante, mas a altura que o fluído subiu foi aproximadamente a mesma. Embora o concreto com plastificante tenha densidade 20% mais elevada, o concreto com agente incorporador de ar, é caracterizado por bolhas de ar uniformemente distribuídas (diâmetro de 0,01 a 0,3 mm). Estas bolhas causam aumentos no volume absorvido de líquido, mas diminuem simultaneamente a ascensão capilar devido à desconexão da rede de capilares.

Concluíram que, se dois materiais em combinação com determinado líquido tiverem a absorção similar, não significa necessariamente que terão a capilaridade similar e vice-versa. Com água, a correlação entre o coeficiente da capilaridade e a absorção foi de  $5,5 \pm 0,6$ ,  $5,8 \pm 0,6$  e  $7,1 \pm 0,7$  para os concretos pesquisados sem aditivos, com um agente incorporador de ar e com um plastificante, respectivamente. Com óleo combustível, os valores foram aproximadamente 50% mais elevados.

GOLÇALVES (2005) efetuou estudos de durabilidade em concretos produzidos com diferentes tipos de areia: normalizada, de rio e britada granítica lavada. Foram realizadas as avaliações da porosidade total através da NBR 9778/90, da estrutura de poros através de porosimetria por intrusão de mercúrio e da absorção por sucção capilar conforme a NBR 9779/95. Os resultados obtidos foram:

→ em todos os concretos testados, quanto menor foi a relação a/c e maior o teor cimento, menor a porosidade total medida. Este comportamento ocorre porque o incremento no consumo de cimento, conduz à formação de uma quantidade maior de hidratos na mistura, o que provoca uma maior densificação da matriz e, conseqüentemente, um decréscimo da porosidade;

- os valores de porosidade total em concretos contendo areia britada e normalizada foram similares, enquanto que na areia de rio foram menores. Embora a areia britada possuísse maior índice de empacotamento granular, o que provocou a redução na porosidade total, ela apresentou granulometria mais grossa. Este tipo de granulometria deu lugar à formação de uma zona de interface pasta-agregado mais fraca, o que acabou prevalecendo e provocando o incremento na porosidade total;
- a estrutura de poros foi quantificada em termos percentuais da porosidade total. A mistura com areia de rio apresentou maior percentual de macroporos e menor de mesoporos em relação às outras duas, que, entre si, praticamente não apresentaram variação. Assim, as misturas contendo areia normalizada e britada apresentaram estrutura de poros mais refinada que a mistura contendo areia de rio, mas com um volume total de poros superior;
- a absorvidade foi menor quanto menor foi a relação a/c e maior o teor de cimento, em todos os concretos testados. Com o aumento na concentração de sólidos e do volume de cimento, houve um incremento da quantidade de produtos hidratados. Conseqüentemente, ocorreu a diminuição na porosidade total com a formação de uma menor quantidade de vazios capilares, sendo responsável pela diminuição da absorvidade;
- os concretos contendo areia britada e normalizada apresentaram maiores valores de absorvidade, em relação aos concretos contendo areia de rio. Isso ocorre porque os concretos contendo areia britada e normalizada mostraram maiores valores de porosidade total, embora apresentando estrutura de poros mais refinada. Acontece que o refinamento está em níveis de macro para mesoporos os quais, mesmo em menor grau, também contribuem para a permeabilidade;
- como foi verificado, o tipo de areia utilizado no concreto influencia na quantidade, tamanho e na continuidade da estrutura de poros capilares das misturas. Isto acontece devido às características de tamanho, forma, distribuição granulométrica e textura do agregado miúdo.

ÇELIK e MARAR (1996) realizaram estudo cujo objetivo foi avaliar o efeito do pó ou finos (partículas menores do que 0,075 mm), em misturas de concreto. Para tanto, utilizaram areia britada de rocha calcária com percentagem de finos variando de 0 a 30%. Para a absorção, o valor mínimo foi obtido quando o teor de pó na areia foi de 15%. Teores mais altos elevaram a absorção medida. Isso se explica porque o pó de pedra britada age como um enchimento na mistura e contribui para reduzir a absorção do concreto. A permeabilidade à água do concreto diminuiu quando o teor de pó aumentou. A razão para isso é que, quanto maior o teor de pó adicionado ao concreto, mais passagens da água e canais foram bloqueados, o que levou a uma redução na sua permeabilidade.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 MATERIAL

Para a confecção do concreto, objeto da presente pesquisa, foram utilizados os materiais abaixo descritos:

a) cimento e aditivo químico

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo Portland CP II – F 32, comercializado com o nome Votoran, fabricado pela Cimento Rio Branco S/A. O aditivo, um aditivo polifuncional para concreto, comercializado com o nome Mastermix 433 N, fabricado pela MBT Brasil – Degussa Construction Chemicals.

A escolha desses produtos deveu-se ao fato de serem de uso corrente entre as empresas construtoras da região.

b) água

Proveniente da rede de abastecimento pública (Concessionária Casan).

c) brita (agregado graúdo) e Areia britada lavada e não lavada (agregado miúdo)

Foram obtidos das instalações de prospecção e britagem de basalto de uma empresa privada, instalada no interior do município de Guatambu, estado de Santa Catarina.

### 5.2 MÉTODOS

a) Cimento e Aditivo

Foram caracterizados segundo laudos técnicos fornecidos pelos fabricantes.

#### b) Brita

Foi submetida aos ensaios de: composição granulométrica; massas específica e unitária; massas específicas na condição “sss” (saturado com superfície seca) e aparente; teor de materiais pulverulentos e absorção.

#### c) Areia britada Lavada e Não Lavada.

Foram realizados ensaios de: composição granulométrica; massas específica e unitária; massas específicas na condição “sss” e aparente; teor de materiais pulverulentos; inchamento de agregado miúdo; determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo e absorção.

d) Critérios gerais para secagem das amostras em estufa e para o cálculo das médias

A secagem dos materiais foi efetuada em estufa, mantida temperatura constante de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ , por no mínimo 24 horas. Após este período foram efetuadas pesagens a intervalos de uma hora até não haver variação entre três medidas consecutivas. Os materiais foram então mantidos tampados e armazenados à temperatura ambiente até sua utilização.

Para determinação dos resultados finais dos ensaios foram seguidas as recomendações da NBR 7221 (ABNT, 1982a). Para cada ensaio, foi calculada a média aritmética entre os resultados obtidos com cada amostra, abandonando-se para o cálculo da média os resultados que diferiram 10% ou mais da média. Quando mais de dois resultados se afastaram 10% ou mais da média, os ensaios foram considerados inválidos, sendo repetidos com novas amostras.

### 5.2.1 Caracterização do Processo de Produção

#### 5.2.1.1 Extração

A jazida, mostrada na figura 7, é explorada à céu aberto a partir de um afloramento de rocha basáltica. Inicialmente é realizada a decapagem do solo, ou seja, a retirada do material orgânico e rocha de alteração. Para a extração da rocha sã,

utilizam-se técnicas de desmonte com explosivos. Com base em um planejamento, furos previamente abertos são carregados e detonados. O material de dimensões satisfatórias é retirado em caminhões que alimentam o britador primário. Os fragmentos maiores recebem nova carga de explosivos até atingirem a redução desejada.



FIGURA 7 - Aspecto geral da pedreira

#### 5.2.1.2 Britagem

No britador, mostrado na figura 8, o material segue por processo de britagem primária a quaternária e classificação por peneiramento. A produção é contínua, assegurada por meio de estoque de material (pulmão) entre as fases de britagem. Todo o transporte interno é realizado por correias transportadoras. O fluxograma apresentado na figura 9 retrata o processamento do material, com destaque para a britagem quaternária, composta por impactor de eixo vertical rocha contra rocha.



FIGURA 8 - Aspecto geral do britador

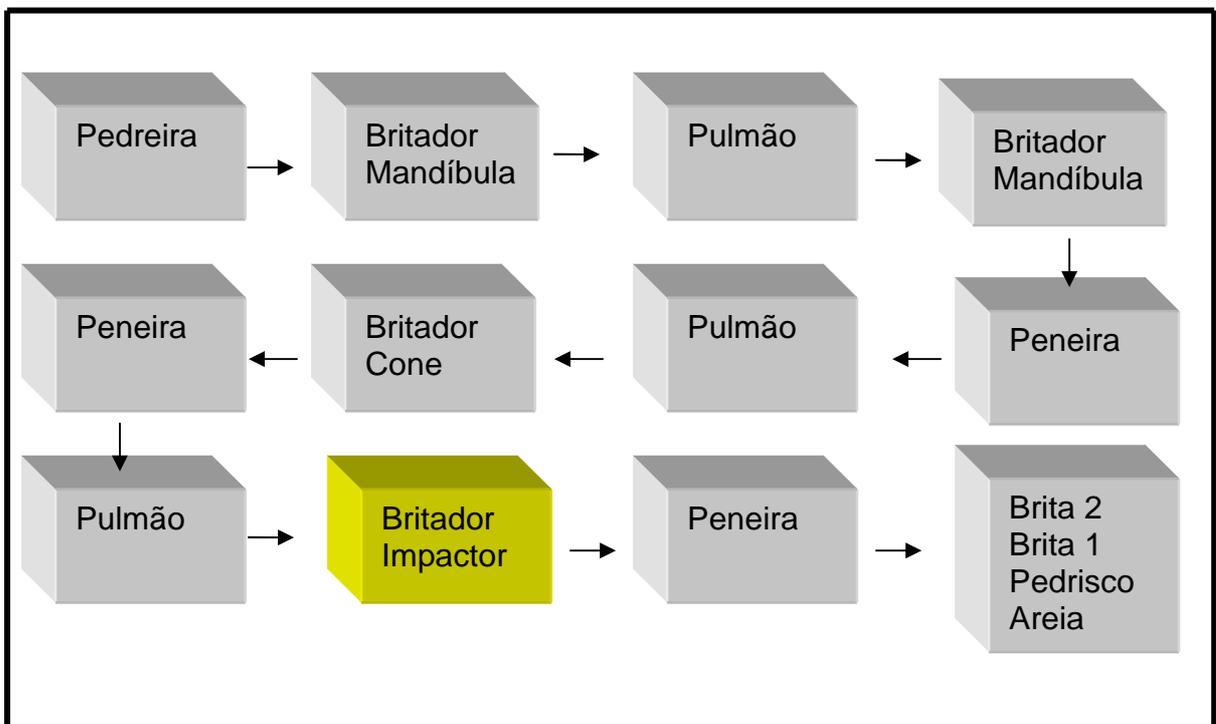


FIGURA 9 - Fluxograma de produção do britador

### 5.2.1.3 Lavagem em planta

É realizada por um classificador rotativo da marca Simplex modelo 730, mostrado na figura 10, cujas especificações técnicas encontram-se na tabela 2.

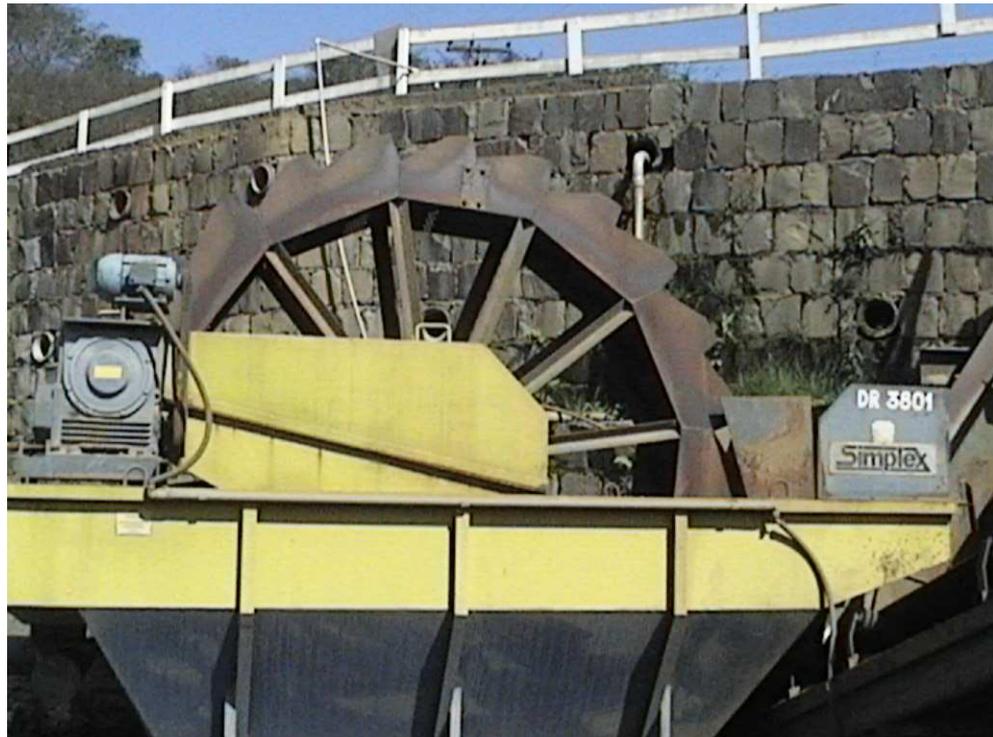


FIGURA 10 - Detalhe da máquina de lavagem

TABELA 2 - Especificações técnicas do classificador

Detalhes Técnicos		Valores
Diâmetro da roda	mm	3000
Superfície de decantação	m <sup>2</sup>	4,9
Comprimento de transbordamento	m	5,7
Volume de água no tanque	l	4980
Potencia do motor	cv	3
Produção à velocidade normal	m <sup>3</sup> /h	44
Produção máxima de pico	m <sup>3</sup> /h	49
Vazão de água	m <sup>3</sup> /h	110

A água do processo é reutilizada formando um circuito fechado. A cada três dias é realizada a limpeza dos dois tanques de decantação de capacidade 40 m<sup>3</sup> cada um, mostrado na figura 11, para retirada do material depositado. Este material, exibido na figura 12, é depositado nas instalações da própria pedreira e, periodicamente, é descartado em aterros.



FIGURA 11 - Operação de limpeza do tanque de decantação



FIGURA 12 - Resíduo retirado do tanque de decantação

Mas, a pureza da água de lavagem influencia no controle da granulometria. Em uma unidade semelhante, PRUDÊNCIO JR et al. (1995) observaram que, mesmo que esta água passe por tanques de decantação, ocorre uma contaminação progressiva pelo pó em suspensão, o que tornou necessário fazer limpezas nos tanques em curtos períodos.

Para solucionar o problema, na usina pesquisada, é adicionado produto químico à base de sulfato de alumínio no tanque decantação. A dosagem do decantador é em torno de  $20 \text{ ml/m}^3$  ao dia, sendo aumentada quando do início das operações após a limpeza dos tanques. Assim, além da gradual contaminação da água e regulagens da máquina conforme indicações do fabricante, a vazão de água e a quantidade de produto decantador, influenciam no processo. A manutenção da qualidade é atingida com o suporte de informações fornecidas pelo laboratório anexo às instalações de britagem. As figuras 13 e 14 mostram respectivamente o equipamento de lavagem em operação e o aspecto do material depositado.



FIGURA 13 - Vista geral do equipamento de lavação da areia



FIGURA 14 - Pilha de areia britada

## 5.2.2 Coleta e Redução das Amostras

### 5.2.2.1 Coleta das amostras

Foi obtido um lote de amostra de cada material a ser caracterizado: areia britada lavada, areia britada não lavada e brita número 1. Cada lote pesou aproximadamente 480 kg, quantidade suficiente para realização de todos os ensaios previstos na pesquisa.

Para as coletas, foram seguidas as instruções da NBR NM 26 (ABNT, 2001a). Realizadas em dia de expediente normal, após a usina de britagem estar em funcionamento por mais de 4 horas, cada amostra foi recolhida em bolsa plástica que interceptou o fluxo completo da descarga da correia transportadora. Para cada lote foram retiradas 15 amostras parciais de aproximadamente 32 kg, em intervalos de 10 minutos. A figura 15 ilustra a etapa de coleta dos materiais na usina de britagem.



FIGURA 15 - Coleta das areias e brita

Após as coletas, as amostras devidamente identificadas foram armazenadas em barricas cilíndricas de diâmetro 50 cm e altura 100 cm, forradas internamente com material plástico. Depois de tampadas, as barricas foram transportadas ao Laboratório de Resistência dos Materiais e Tecnologia do Concreto da Universidade Comunitária Regional de Chapecó (Unochapecó) para armazenagem e posteriores análises.

#### 5.2.2.2 - Reduções de amostra para realização dos ensaios

A redução das amostras seguiu os procedimentos descritos na NBR NM 27 (ABNT, 2001b). Foi utilizado separador mecânico que pode ser visto na figura 16. Todo o material coletado foi repartido, de forma a manter a representatividade. Distribuindo-se os produtos uniformemente sobre o aparelho, a redução de amostra obedeceu ao seguinte esquema:

100  
 50/50  
 25/25-25/25  
 12,5/12,5-12,5/12,5  
 ...6,25/6,25-6,25/6,25-6,25...  
 ...12-3,12/3,12-3,12/3,12-3,12/3,12-3...  
 ... 1,56-1,56/1,56-1,56/1,56-1,56/1,56-1,56/1,56-1,56...  
 ...,78-0,78/0,78-0,78/0,78-0,78/0,78-0,78/0,78-0,78/0,78-0,78...  
 ... 0,39/0,39-0,39/0,39-0,39/0,39-0,39/0,39-0,39/0,39-0,39/0,39-...

As amostras foram assim repartidas, até a sua redução à quantidade necessária a cada ensaio. Para cada teste foram tomadas duas amostras, M1 e M2, uma de cada extremo da repartição da amostra total. Nos ensaios com amostra única, M1 e M2 foram juntadas. Para ensaios que exigiram quantidade exata, a repartição reuniu uma porção de material pouco acima desta necessidade. Foi então realizada homogeneização manual da amostra através da rolagem do material em encerado e retirado aos poucos, aleatoriamente, a quantidade excedente.

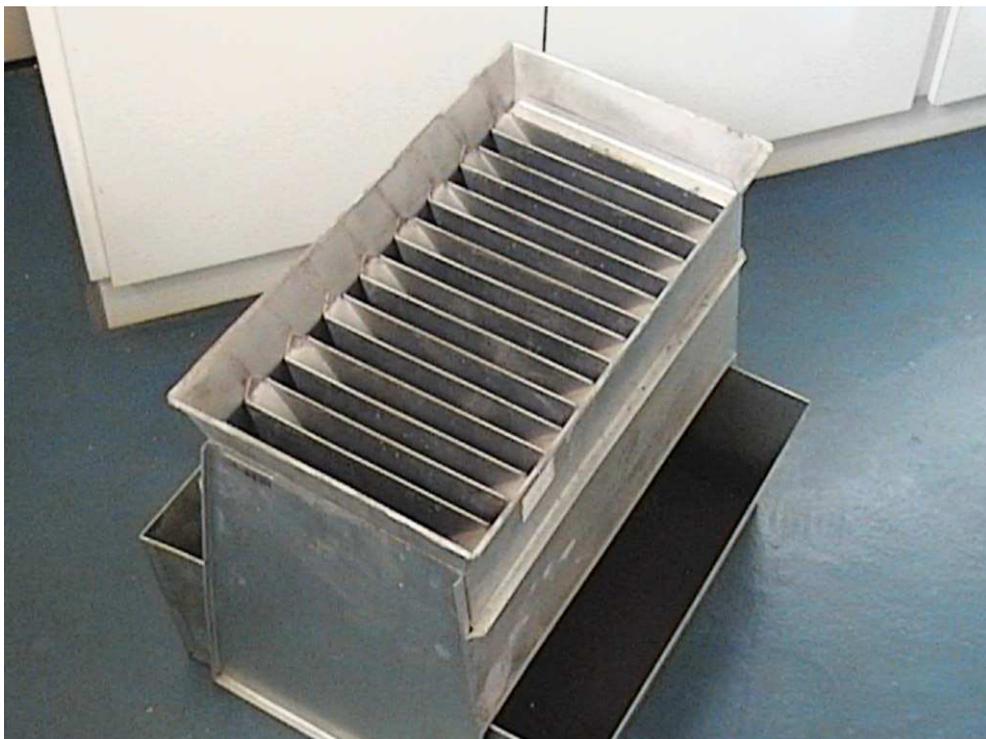


FIGURA 16 - Equipamento repartidor de amostras

### 5.2.3 Ensaios para Caracterização dos Materiais Utilizados

Foram efetuados no Laboratório de Resistência dos Materiais e Tecnologia do Concreto da Unochapecó (LRMTCU). Durante os ensaios foram feitas leituras horárias da umidade relativa do ar (URA) e temperatura ambiente.

#### 5.2.3.1 Composição granulométrica

Os ensaios, cinco para cada material, foram realizados de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987b). As quantidades de material ensaiado para cada teste foram de 1,5 kg para as areias e 3 kg para a brita.

O peneiramento foi realizado com agitador de peneiras eletromecânico para análise granulométrica, marca Solotest equipado com caixilho das peneiras  $\varnothing 8'' \times 2''$ .

Como ocorreu a retenção de parte do material mais fino entre as partículas maiores, os ensaios foram repetidos com a utilização das amostras previamente

submetidas ao ensaio para determinação do teor de material pulverulento. A partir desses resultados determinou-se o diâmetro máximo e o módulo de finura, de acordo com as prescrições da NBR 7211 (ABNT, 2005).

#### 5.2.3.2 Massa unitária

Os ensaios para determinação da massa unitária (massa específica no estado solto), dois para cada material, foram determinados de acordo com a NBR 7251 (ABNT, 1982b). Todos os exames foram executados com pelo menos o dobro da quantidade necessária. Os materiais foram previamente secos em estufa. Para evitar a segregação das amostras, antes do enchimento do recipiente de medidas padronizadas, era realizada homogeneização manual da amostra através da rolagem do material em encerado. A fórmula de cálculo é dada na tabela 3. As amostras de areia britada lavada e não lavada foram utilizadas na seqüência para o ensaio de inchamento (5.3.5).

#### 5.2.3.3 Absorção, massa específica, massas específicas na condição “sss” e aparente

Os ensaios para determinação da absorção, massa específica (massa específica excluindo-se os vazios permeáveis), massa específica na condição “sss” (saturada com superfície seca) e aparente (massa específica seca, incluindo-se os vazios permeáveis) da brita foram executados de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2003b). Para as areias britadas a base foi a NBR NM 52 (ABNT, 2003a), exceto a absorção, determinada conforme a ASTM C128, *apud* Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2000).

Foram ensaiadas 5 amostras de cada material, cada uma com 4 kg para a brita e 1kg para as areias. As fórmulas de cálculo são mostradas na tabela 3.

TABELA 3 -Fórmulas para o cálculo da massa unitária e massas específicas dos agregados

<b>Característica</b>	<b>Areias Britadas</b>	<b>Brita</b>
<b>Massa Unitária</b>	$\gamma_u = mm/V_p$ (4)	$\gamma_u = mm/V_p$ (5)
<b>Massa específica</b>	$\gamma = mm/[(V - V_a) - (m_s - mm)/D_a]$ (6)	$\gamma = mm/(m_s - m_{sa})$ (7)
<b>Massa específica “sss”</b>	$\gamma_s = m_s / (V - V_a)$ (8)	$\gamma_s = m_s / (m_s - m_{sa})$ (9)
<b>Massa específica aparente</b>	$\gamma_a = mm / (V - V_a)$ (10)	$\gamma_a = mm/(mm - m_{sa})$ (11)
<b>Absorção</b>	$A = 100 \times (m_s - mm)/mm$ (12)	$A = 100 \times (m_s - mm)/mm$ (13)

Onde:

$mm$  = massa da amostra seca em estufa;

$m_s$  = massa da amostra na condição saturada superfície seca;

$m_{sa}$  = massa da amostra saturada submersa em água;

$V_p$  = volume do recipiente padronizado (15 ou 20 dm<sup>3</sup>);

$V$  = Volume do frasco;

$V_a$  = volume da água adicionada ao frasco =  $(m_2 - m_1) / D_a$ ;

$m_2$  = massa frasco + agregado + água;

$m_1$  = massa frasco + agregado;

$D_a$  = densidade da água.

#### 5.2.3.4 Teor de materiais pulverulentos

Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7219 (ABNT, 1987c). Foram ensaiadas cinco amostras de cada material, em quantidades de 1,5 kg para as areias e 3 kg para a brita.

### 5.2.3.5 Inchamento de agregado miúdo

Os ensaios foram executados conforme a NBR 6467 (ABNT, 1987a). Foram realizadas duas provas para cada areia, com as amostras utilizadas para o ensaio de massa unitária (5.3.2). A homogeneização foi realizada no misturador empregado nos ensaios de dosagem, adaptado com tampa removível na boca de alimentação, a fim de evitar perdas de material pulverulento. Para o traçado do gráfico que correlaciona umidade e grau de inchamento, foram utilizadas as fórmulas:

$$(I) \text{ th} = [(M_i - M_f) / (M_f - M_{ca})] \times 100 \quad (14)$$

$$(II) \text{ ii} = \gamma_{us} \times (100 + \text{th}) / (\gamma_h \times 100) \quad (15)$$

Onde:

th = teor de umidade (%);

M<sub>i</sub> = massa cápsula+agregado do material com umidade h;

M<sub>f</sub> = massa cápsula+agregado do material com umidade h seco em estufa;

M<sub>ca</sub> = massa da cápsula;

ii = coeficiente de inchamento;

γ<sub>us</sub> = massa unitária do agregado seco em estufa;

γ<sub>h</sub> = massa unitária do agregado com umidade h.

### 5.2.3.6 Avaliação das impurezas orgânicas em agregado miúdo

Os ensaios das areias foram realizados de acordo com a NBR 7220 (ABNT, 1987d). Foram ensaiadas duas amostras de 200 g de cada material, retiradas de lotes de 400 g previamente separados.

#### 5.2.4 Elaboração do Diagrama de Dosagem

Os procedimentos foram efetuados no LRTCUC. Durante os ensaios foram feitas leituras horárias da URA e temperatura ambiente.

A busca do proporcionamento adequado dos componentes das misturas foi um procedimento necessário devido às particularidades dos materiais componentes da mistura e dos critérios de aplicação, os quais estão ligados ao desempenho global do concreto, no aspecto de sua resistência, durabilidade e trabalhabilidade.

Foram realizados estudos experimentais de dosagem para a areia britada lavada e para a não lavada, com os demais materiais componentes da mistura sendo os mesmos para ambos. O método adotado foi o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP), que parte do princípio que são necessários três pontos para poder montar um diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão, relação a/c, traço e consumo de cimento.

Este estudo de dosagem partiu de parâmetros que orientaram algumas decisões iniciais, tais como:

- a) definição do tamanho máximo de agregado: foi adotado 25 mm, que está no limite máximo do atendimento as prescrições da norma NBR 6118 (ABNT, 2003c), para uma vasta gama de aplicações em concretos convencionais;
- b) definição do abatimento: foi adotado de 90 mm por atender a maioria das aplicações previstas em Norma para concretos estruturais. Foi pressuposto que a aplicação do concreto será especialmente para atender a edificações que utilizem concreto preparado em obra, com transporte e lançamento não bombeado;
- c) relação a/c: objetivou-se que todas as misturas atendam aos requisitos de qualidade referidos na NBR 6118 (ABNT, 2003c), ou seja, até 0,65 para a mistura com maior relação a/c. Assim, para a primeira mistura (1:5), chamada de mistura de traço médio, será adotado a/c igual a 0,55;
- d) condição dos agregados quanto à umidade: considerados secos. Após a homogeneização e separação para os ensaios de dosagem, foram conservados em embalagens fechadas. Para todas as dosagens foram retiradas previamente duas amostras para determinação do teor de

umidade. Em todas as relações a/c apresentadas está inclusa esta umidade.

Para a homogeneização das misturas foi utilizada uma betoneira de capacidade 120 litros, mostrada na figura 17.



FIGURA 17 - Misturador e aparato para determinação da consistência

As pesagens dos materiais foram realizadas em balanças eletrônicas; até 10 kg foi utilizada balança com sensibilidade de 0,1 g e acima disso uma balança de capacidade 50 kg e sensibilidade 1 g. Para a determinação da umidade dos agregados, foi empregada estufa de secagem equipada com termostato hidráulico para controle de temperatura e termômetro acoplado para sua leitura.

#### 5.2.4.1 Determinação do teor ideal de argamassa

O estudo experimental seguiu as recomendações de HELENE e TERZIAN (1992), e iniciou com a avaliação preliminar de uma mistura em betoneira de traço 1:5,0 (cimento/agregados secos totais, em massa). Esta fase do estudo assume grande importância, pois a falta de argamassa na mistura acarreta porosidade no concreto ou falhas de concretagem. O excesso proporciona um concreto de melhor aparência mas aumenta o custo por metro cúbico, como também o risco de fissuração por origem térmica e de retração por secagem.

A obtenção do teor ideal de argamassa é realizada por tentativas e observações práticas. Nesta pesquisa, iniciou-se com teor de 53%, com adição de água necessária para atingir o abatimento de 90 mm, tanto para as misturas AL (Areia Lavada) como NL (Areia Não Lavada). Como para ambas as misturas, o teor inicial não satisfaz as observações práticas para a definição do teor ideal, foram realizados acréscimos sucessivos de argamassa na mistura, através do lançamento de cimento e areia, de forma a elevar o teor de argamassa de 2 em 2%, até a obtenção da proporção satisfatória. Para isso, com a quantidade de agregado graúdo fixa, foram acrescentadas quantidades pré-determinadas de cimento e areia. A quantidade de água foi variável de forma a manter o abatimento em  $90 \pm 10$ mm. Os materiais de cada tentativa foram previamente separados, pesados e identificados, de forma a dar agilidade aos ensaios.

A execução do traço experimental 1:5,0, seguiu os passos recomendados pelos autores:

- a) imprimou-se a betoneira com uma porção de concreto (aproximadamente 6 kg) traço 1:2:3 (cimento:areia:brita) e relação a/c de 0,55, para o primeiro uso. Deixou-se o material excedente cair livremente, quando a betoneira estava com a abertura para baixo e em movimento;
- b) a introdução dos materiais de modo individual obedeceu à seguinte ordem: com o misturador parado, introduzido 80% da água e o agregado graúdo; acionado o misturador e introduzido o agregado miúdo, o cimento e o restante da água;
- c) depois de lançados na betoneira os materiais da tentativa inicial (teor de argamassa 53%, traço 1:2,18:2,82) com alguma quantidade de água, misturou-se durante 3 minutos. A seguir realizou-se uma parada com

manuseio de uma colher de pedreiro para verificação da consistência. Se muito consistente, era acrescentada nova quantidade de água, com o uso de proveta graduada, e misturado novamente por mais 3 minutos. Quando julgado satisfatório, era realizado o ensaio do abatimento do cone. Este procedimento foi repetido até atingir o abatimento de 90mm. Se ultrapassado, a mistura era desprezada. Mesmo com teor de argamassa abaixo do satisfatório, o objetivo do ensaio de abatimento foi a obtenção aproximada da consistência que deveria ser mantida na mistura, para as observações práticas com os teores de argamassa testados na seqüência.

Para a definição do teor ideal de argamassa, em cada tentativa, foram efetuadas observações práticas através da realização dos procedimentos descritos a seguir:

- a) com a betoneira desligada, utilizando uma colher de pedreiro, foi retirado o material aderido nas pás e superfície interna, acumulando-o na região inferior da cuba, introduzindo em seguida os agregados soltos para o interior da mistura;
- b) foi nivelada a superfície do concreto com auxílio da colher de pedreiro e observado se esta ficou compacta e sem vazios ou áspera. Além disso, foi introduzida a colher de pedreiro e realizado movimento para frente e para trás no sentido de sua maior dimensão, de modo a formar uma cava na mistura. Foi realizada a mesma observação na superfície das cavas;
- c) foi introduzida novamente a colher de pedreiro no concreto e retirada uma parte do mesmo, levantando-a até a região superior da cuba da betoneira. Com o material nesta posição, foi verificado se havia desprendimento de agregado graúdo da massa, o que indicaria falta de argamassa na mistura. Após esta observação, foi solta a porção de concreto que estava sobre a colher e verificado se a mesma caía de modo compacto e homogêneo, o que indicaria teor de argamassa ideal;
- d) quando as misturas apresentaram-se adequadas, com base no procedimento descrito no item anterior, ou seja, sem vazios na superfície, sem desprendimento de agregados e queda do concreto de modo homogêneo e compacto, determinou-se o abatimento de tronco de cone

(NBR NM 67, ABNT (1998b)). Quando abaixo de 90mm, era acrescentado água após o material ser retornado à betoneira, que misturava por mais 3 minutos, para uma nova avaliação;

- e) satisfeito o abatimento de 90mm, estando ainda o concreto com formato de tronco de cone, foi observado se a superfície lateral do concreto estava compacta, sem apresentar vazios. Além disso, bateu-se suavemente na lateral inferior do mesmo, com o auxílio de uma haste de socamento, com o objetivo de verificar sua queda. Foi verificado que a mesma se realizava de modo homogêneo, sem desprendimento de porções, confirmando que o concreto estava com o teor de argamassa considerado bom;
- f) não foi observada água proveniente da mistura ao redor da base do concreto com formato de tronco de cone. Esta ocorrência indicaria uma tendência de exsudação de água na mistura por falta de finos, que poderia ser corrigida com o aumento do teor de argamassa.

Segundo HELENE e TERZIAN (1992), o teor final depende ainda de um fator externo que é a possibilidade de perda de argamassa no processo de transporte e lançamento. Para as condições previstas para uso dos concretos ensaiados nesta pesquisa, ou seja, para atender a edificações que utilizem concreto preparado em obra, com transporte e lançamento não bombeado, foi adotado o acréscimo de 2%.

#### 5.2.4.2 Determinação do teor de aditivo

A realização desta etapa ocorreu porque os resultados das relações a/c encontrados no item anterior ficaram acima de 0,55 para as duas areias.

A determinação da quantidade de aditivo necessária foi realizada por tentativas, de forma similar à determinação do teor ideal de argamassa. Iniciou-se com a mistura de teor ideal de argamassa determinada no item anterior (63% e traço 1:2,78:2,22) com a relação a/c de 0,55 e 4 ml de aditivo por kg de cimento, tanto para as misturas AL como NL. Com o equipamento limpo, cada mistura foi realizada com imprimação, alimentação do misturador e tempo de mistura como no item anterior. A seguir foi realizado o teste do abatimento (ABNT, 1998b). Como para ambas as

misturas, o abatimento foi menor do que 90 mm, foram realizados acréscimos sucessivos do teor de aditivo na mistura de 2 em 2 ml de aditivo por kg de cimento, de forma a elevar o abatimento, até a obtenção da proporção satisfatória. Para possibilitar a introdução do aditivo diluído em água, foi necessário aumentar gradativamente o volume da mistura, e adotou-se o acréscimo de 1 kg de cimento com as quantidades proporcionais dos demais componentes, de modo que as proporções entre as tentativas permanecessem inalteradas. Os materiais de cada tentativa foram previamente separados, pesados e identificados, de forma a dar agilidade aos ensaios.

### 5.2.4.3 Realização das misturas experimentais

#### 5.2.4.3.1 Dosagens dos concretos

Nesta etapa do estudo, com base nas informações obtidas nos itens 5.2.4.1 e 5.2.4.2, além da mistura de traço 1:5 (traço normal), foram produzidos mais dois traços auxiliares, com os traços definidos em 1:3,5 (traço rico) e em 1:6,5 (traço pobre), possibilitando assim a montagem dos diagramas de dosagem para a areia britada lavada e não lavada.

As proporções foram determinadas pelas fórmulas propostas no método de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992):

$$\alpha = (1 + a_r) / (1 + a_r + p_r) \quad (16)$$

$$p = (a_r + p_r) \quad (17)$$

Onde:

$\alpha$  = teor de argamassa (63%);

$a_r$  = proporção de areia;

$p_r$  = proporção de brita ;

$p$  = proporção total de agregados (3,5; 5,0 ou 6,5).

Na tabela 4 são mostradas as características de mistura dos traços denominados normal 1:5, um dito pobre 1:6,5 e outro rico 1:3,5, todos baseados nos resultados obtidos nos itens anteriores. Os dois novos traços mantiveram fixo o abatimento do tronco de cone e os teores de argamassa e de aditivo, determinados para o traço 1:5.

TABELA 4 - Características das misturas de concreto para as dosagens

Característica	Relação Cimento:Agregado					
	1:3,5		1:5,0		1:6,5	
	AL	NL	AL	NL	AL	NL
<b>Código da mistura</b>	AL 35	NL 35	AL 50	NL 50	AL 65	NL 65
<b>Teor de argamassa (%)</b>	63	63	63	63	63	63
<b>Areia Britada (kg/kg de cimento)</b>	1,835	1,835	2,78	2,78	3,725	3,725
<b>Brita (kg/kg de cimento)</b>	1,665	1,665	2,22	2,22	2,775	2,775
<b>Relação a/c</b>	verificar	verificar	0,55	0,55	verificar	verificar
<b>Aditivo (kg/kg de cimento)</b>	0,011	0,0066	0,011	0,0066	0,011	0,0066
<b>Abatimento (mm)</b>	90	90	90	90	90	90

#### 5.2.4.3.2 Preparo e manuseio dos concretos

As misturas foram preparadas de acordo com as indicações da NBR NM 79 (ABNT, 1996a) e as amostras para ensaios retiradas conforme as prescrições da NBR NM 33 (ABNT 1998a).

Para cada lote de ensaios, foram processados aproximadamente 0,04 m<sup>3</sup> de concreto. Esta quantidade é em torno de 20% maior que a necessária para a realização dos ensaios de perda de abatimento, determinação da massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade e outras características. Assim, as misturas tiveram a composição da tabela 5.

TABELA 5 - Quantidades de materiais para realização de um lote de ensaios

<b>Material Componente</b>	<b>AL 35</b>	<b>NL 35</b>	<b>AL 50</b>	<b>NL 50</b>	<b>AL 65</b>	<b>NL 65</b>
<b>Cimento (kg)</b>	21,00	21,00	16,00	16,00	13,00	13,00
<b>Areia (AL ou NL) (kg)</b>	38,53	38,53	44,48	44,48	48,42	48,42
<b>Brita (kg)</b>	34,96	34,96	35,52	35,52	36,07	36,07
<b>Aditivo (ml)</b>	210	126	160	96	130	78
<b>Água (l)</b>	verificar	verificar	8,80	8,80	verificar	verificar

Para cada mistura foi previamente realizado ensaio de determinação da umidade dos agregados conforme a NBR 6467 (ABNT, 1987a). Como a relação a/c foi considerada para os materiais secos, foi aumentada a quantidade de agregado e diminuída a quantidade de água correspondente à umidade encontrada. Além disso, foi descontado da água o teor de líquido do aditivo. Para realização das misturas os materiais foram previamente separados, pesados, identificados e conservados fechados.

Com o equipamento limpo, cada mistura foi realizada com imprimação do misturador como nos itens anteriores. Após, foi obedecida a seguinte seqüência:

- a) com o misturador parado introduziu-se 80% da água e o agregado graúdo; acionado o misturador, introduziu-se o agregado miúdo, o cimento e o restante da água onde o aditivo estava diluído;
- b) findo o carregamento, deixou-se o misturador funcionando por 3 minutos, seguidos por 3 minutos de repouso e por 2 minutos de mistura final, cobrindo-se a parte aberta do misturador durante o período de repouso;
- d) com auxílio da concha, retirou-se aleatoriamente a quantidade necessária para realizar dois ensaios de consistência, que foram executados simultaneamente;
- e) se a consistência era maior do que 90 mm, a mistura era desprezada. Se inferior era adicionada mais água e realizada uma re-mistura por 3 minutos;
- f) quando atingida a consistência de 90 mm, despejou-se de altura mínima o conteúdo da betoneira no carrinho de mistura, previamente limpo e umedecido, remisturando-o com uma colher de pedreiro. Com o auxílio de

uma concha retirou-se, aleatoriamente, as quantidades necessárias ao preenchimento dos moldes para os ensaios mencionados adiante.

O preparo e manipulação dos concretos para os ensaios de retração plástica, exsudação e tempo de pega foram executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Não foi realizado controle ou mensuração de URA e temperatura ambiente. Por terem sido realizados em data posterior à determinação das relações  $a/c$  para cada tipo de mistura, naquela ocasião foi necessário apenas a avaliação prévia do teor de umidade dos agregados. Com o equipamento misturador limpo, procedeu-se da mesma forma acima, à exceção dos itens “d” e “e”.

As demais misturas foram preparadas e manipuladas no LRMTCU, com leituras horárias da URA e temperatura ambiente.

#### 5.2.4.4 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

A moldagem e cura das amostras obedeceu aos preceitos da NBR 5738 (ABNT, 1994a). De cada mistura foram retirados 17 corpos-de-prova em moldes cilíndricos de diâmetro 10cm e altura 20cm. Os moldes foram preenchidos em duas camadas, e cada uma delas adensadas manualmente com 12 golpes do soquete. O tempo entre a descarga da betoneira e o enchimento do último molde de cada lote foi cronometrado, e em nenhum caso ultrapassou os 10 minutos.

Nas primeiras 24 horas foram mantidos ao ar livre e cobertos com plástico. Após este período, depois de desmoldados e identificados foram imersos e conservados em tanque com solução de água saturada de cal hidratada. Foi mantido no meio líquido termômetro equipado para determinação da temperatura máxima e mínima, cujas leituras foram feitas a cada dois dias.

#### 5.2.4.5 Determinação da massa específica e teor de ar dos concretos

A determinação da massa específica e teor de ar dos concretos no estado fresco foram baseados na norma NBR 9833 (ABNT, 1987f). Para a massa específica de cada um dos concretos foram tomadas 10 amostras moldadas conforme o item anterior, as quais serviram posteriormente para os ensaios no estado endurecido.

O teor de ar aprisionado ou incorporado aos concretos foi determinado pela expressão:

$$\text{Teor de ar (\%)} = (1 - \gamma_{cf} / \gamma_{ca}) \times 100 \quad (18)$$

Onde:

$\gamma_{cf}$  é a massa específica do concreto fresco determinada da forma acima;

$\gamma_{ca}$  é a massa específica do concreto fresco sem considerar o ar incorporado, calculada pela expressão:

$$\gamma_{ca} = (M_c + M_m + M_g + M_a) / ((M_c/\gamma_c) + (M_m/\gamma_m) + M_g/\gamma_g) + M_a \quad (19)$$

Onde:

$M_c$  = massa de cimento;

$M_m$  = massa de agregado miúdo seco;

$M_g$  = massa de agregado graúdo seco;

$M_a$  = massa de água;

$\gamma_c$  = massa específica do cimento;

$\gamma_m$  = massa específica (sss) do agregado miúdo;

$\gamma_g$  = massa específica (sss) do agregado graúdo.

#### 5.2.4.6 Traçado do diagrama de dosagem

Com base nos dados obtidos e as resistências aos 7, 28 e 91 dias apresentadas na tabela 21, foram construídas correlações que deram origem aos diagramas de dosagem para cada tipo de areia, na forma mostrada por HELENE e TERZIAN (1992). Os diagramas de dosagem correlacionam:

- a) relação a/c com resistência;
- b) relação a/c com relação agregado/cimento;
- d) relação consumo de cimento/volume com relação agregado/cimento.

As relações consumo de cimento/volume foram determinadas a partir das quantidades de materiais necessários para obter 1 m<sup>3</sup> de concreto (HELENE; TERZIAN, 1992; NEVILLE, 1997):

$$C = \gamma_{cf} / (1 + a_r + p_r + a/c) \quad (20)$$

Onde:

C = consumo de cimento em kg por m<sup>3</sup> de concreto;

$\gamma_{cf}$  = massa específica do concreto fresco;

$a_r$  = proporção de areia;

$p_r$  = proporção de brita ;

a/c = relação água/cimento.

#### 5.2.5 Desempenho do Concreto no Estado Fresco

Os ensaios de perda de abatimento foram efetuados no LRMTCU, com leituras horárias da URA e temperatura ambiente. Os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Grupo de Pesquisa de Valorização de Resíduos (ValoRes) da UFSC, com controle da URA e temperatura ambiente.

#### 5.2.5.1 Perda de abatimento

A perda de abatimento foi determinada de acordo com orientações da norma NBR 10342 (ABNT, 1992b).

Os ensaios de cada um dos seis tipos de concretos pesquisados foram realizados na seqüência do procedimento de preparo e manipulação dos concretos, descrito no item 5.2.4.3.2. A primeira leitura foi considerada aquela de quando atingida a consistência de 90 mm. Entre esta e segunda leitura, foram retiradas as amostras de concreto referidas no item 5.2.4.4.

A cada marca de tempo de 15 minutos após a primeira leitura, foram realizados dois ensaios. O material utilizado no primeiro ensaio era reservado e depois de realizado o segundo, todo o material era retornado à betoneira.

A seguir era misturado novamente por 1 minuto e ficava em repouso. Dois minutos antes da próxima marca de tempo, era novamente misturado por 2 minutos.

#### 5.2.5.2 Pega

O ensaio de pega dos concretos seguiu o procedimento da norma francesa NF EM 196-3 (1990) – *Détermination du temps de prise des ciments – CERIB fiche 34*, apud ANDRADE (2004), que visa a determinação dos tempos de início e fim de pega de pastas e argamassas.

A principal aparelhagem para os ensaios, também mostrada na norma NBR 11581 (ABNT, 1991), constou do aparelho de Vicat e o molde tronco-cônico com base vidrada. A norma francesa prevê a adição de uma massa extra de 700g acoplada na parte superior do aparelho de Vicat.

Os seis tipos de concretos testados foram preparados e manipulados no LMCC, conforme o item 5.2.4.3.2, e imediatamente encaminhados à sala climatizada do grupo ValoRes.

Para obter uma mistura com características compatíveis com o procedimento da norma francesa citada, o concreto foi re-misturado manualmente e retirada aleatoriamente uma quantidade de material que foi submetida a peneiramento através da peneira de malha 4,8 mm, conforme recomendação da NBR 9832 (ABNT 1992a).

Após obter o dobro da quantidade necessária foi preenchido o molde tronco-cônico com auxílio de uma espátula, de forma a não ficarem vazios.

Ainda segundo esta norma, o início de pega ocorre quando a distância entre a agulha e a placa de base do molde tronco-cônico for de  $4 \pm 1$  mm. O fim de pega ocorre 15 minutos após não ocorrer penetração superior a 0,5 mm.

A primeira leitura foi realizada duas horas após o primeiro contato do cimento com a água, e as subseqüentes ocorreram em intervalos de 15 minutos.

A avaliação foi realizada em ambiente climatizado com temperatura de  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar de  $60 \pm 5\%$ .

#### 5.2.5.3 Exsudação

O ensaio foi realizado com base nas normas NM 102 (ABNT, 1996b) e MR 6 – *Tendency of water to separate from mortars (bleeding)*, do *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)*, adaptado por ANDRADE (2004).

Como este ensaio foi conduzido paralelamente ao de determinação do tempo de pega, o material preparado e manipulado no LMCC serviu para ambos. Depois de remisturado manualmente, foi retirada aleatoriamente a quantidade necessária para o ensaio, acomodada em um molde prismático com dimensões de 14x19 cm e altura de 10cm. O material foi colocado em camada única até aproximadamente 90% da altura do molde sendo após adensado com 50 golpes do soquete metálico.

A tentativa de coleta de água da superfície da amostra foi realizada em intervalos de 10 minutos com o uso de uma pêra insufladora. Um minuto antes, o molde era levemente inclinado ( $\pm 10^\circ$ ) para concentrar a água de exsudação em um mesmo local. O ensaio foi encerrado quando cessou a presença de água.

A avaliação foi realizada em ambiente controlado e mantido à temperatura de  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar de  $60 \pm 5\%$ .

#### 5.2.5.4 Retração plástica

No Brasil não existe normalização específica de ensaio para a determinação da retração plástica em argamassas ou concretos. O ensaio foi conduzido com a utilização de um equipamento para a medição da retração plástica montado no grupo de pesquisa de valorização de resíduos – ValoRes – da UFSC, em conjunto com o *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon* – INSA Lyon - França.

O mesmo concreto preparado e manipulado no LMCC mencionado nos dois itens precedentes foi utilizado neste ensaio, conduzido paralelamente àqueles.

De cada um dos seis tipos de concretos testados foram moldados corpos-de-prova no formato de uma viga de seção quadrada, com lados iguais a 7 cm e comprimento de 50 cm. O molde, na posição horizontal, foi preenchido pela face superior, que ficou aberta. A moldagem foi realizada com auxílio de uma espátula, de forma a não ficarem espaços vazios no corpo-de-prova no qual foram feitas as medidas da retração.

ANDRADE (2004) descreve o aparato de ensaio acima mencionado e seu funcionamento:

- a) o molde é constituído por placas metálicas revestidas internamente em nylon de 5 mm de espessura. As laterais são móveis com 10 mm de espessura. A base, onde está assentado o conjunto, tem 20 mm de espessura e dimensões de 150x660 mm;
- b) durante a moldagem, a amostra é ancorada no molde através de quatro parafusos-âncora, situados nas placas metálicas das extremidades longitudinais, sendo uma fixa e outra móvel;
- c) a variação sofrida pela amostra é medida através da movimentação da placa metálica móvel;
- d) nesta placa é fixada uma haste metálica que passa dentro de um selenóide, fixado no aparato de ensaio e ligado a uma fonte. A movimentação da amostra sofrendo a retração faz variar a corrente elétrica com a passagem da haste pelo selenóide. Um multímetro digital da marca Hewlett-Packard, modelo 34401 A, registra continuamente a variação da corrente elétrica;
- e) os dados de variação de voltagem são coletados automaticamente do multímetro através de sua conexão a um equipamento digital de aquisição

de dados. Este equipamento, da marca Hewlett-Packard, modelo 34970 A (*Data Logger*), é conectado a um computador. Ali, esses dados são processados em um programa fornecido pela Hewlett-Packard denominado Agilent BenchLink Data Logger 1.5, que os transforma em valores dimensionais.

As placas laterais somente são retiradas ao iniciar a pega do sistema, pois poderia ocorrer uma deformação na amostra devido ao concreto ainda estar no estado fresco. Assim, este ensaio foi realizado simultaneamente aos ensaios de tempo de pega e exsudação. Foram executados em sala climatizada, no grupo ValoRes, em temperatura de  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar de  $60 \pm 5\%$ .

As medidas foram realizadas até as primeiras 17 a 20 horas de idade dos concretos.

#### 5.2.6 Avaliação do Comportamento no Estado Endurecido

Os ensaios de módulo de elasticidade foram executados no LMCC. Não foi realizado controle ou mensuração de URA e temperatura ambiente.

Os ensaios de resistência à compressão foram efetuados no LRMTCU, com leituras horárias da URA e temperatura ambiente.

##### 5.2.6.1 Módulo de elasticidade

A verificação do comportamento tensão *versus* deformação e a obtenção do módulo de elasticidade dos concretos fabricados foram realizadas de acordo com a norma NBR 8522 (ABNT, 2003d).

Das amostras moldadas e curadas conforme o item 5.2.4.4, foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada uma das seis misturas, aos 28 dias de idade, totalizando portanto, 12 amostras.

Dois dias antes do ensaio as amostras foram retiradas do tanque de cura e transportadas do LRMTCU para o LMCC, envoltas em panos úmidos dentro de caixas

de isopor fechadas. No dia seguinte foram retiradas das caixas e mantidas protegidas e cobertas com material plástico.

No dia do ensaio foram capeadas com enxofre somente em sua extremidade irregular, pois para que uma parte do equipamento de medida da deformação fosse fixada na amostra, uma de suas extremidades não pode ser capeada.

Os ensaios foram executados numa prensa de marca Shimadzu de capacidade 1000 kN, com controle de deslocamentos, a uma velocidade de 0,01 mm/min. Os deslocamentos longitudinais foram medidos através de dois transdutores elétricos montados na zona central da amostra. O deslocamento longitudinal final é considerado como sendo a média entre a medida detectada por cada um. A aquisição dos sinais correspondentes à carga e ao deslocamento foi realizada usando-se um sistema composto pelo condicionador da marca Shimadzu e um microcomputador dotado de programa com capacidade de aquisição de cinco leituras por milissegundo.

Com os resultados dos ensaios, foram traçados os diagramas tensão-deformação. O cálculo do valor do módulo de elasticidade foi determinado através da equação:

$$E_{c28} = \frac{\sigma_{30} - \sigma_{0,5}}{\epsilon_{30} - \epsilon_{0,5}} \quad (21)$$

Onde:

$E_{c28}$  = módulo de elasticidade aos 28 dias;

$\sigma_{30}$  = tensão no corpo-de-prova a 30% da carga máxima de compressão;

$\sigma_{0,5}$  = tensão igual a 0,5 MPa;

$\epsilon_{30}$  = deformação específica do corpo-de-prova sob 30% da carga máxima de compressão;

$\epsilon_{0,5}$  = deformação específica do corpo-de-prova sob carga de compressão igual a 0,5 MPa.

### 5.2.6.2 Resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão dos concretos seguiu os procedimentos de norma NBR 5739 (ABNT, 1994b).

Das amostras moldadas e curadas conforme o item 5.2.4.4, foram ensaiados 5 corpos-de-prova para cada uma das seis misturas, aos 7, 28 e 91 dias de idade, totalizando portanto, 90 amostras.

Um dia antes do ensaio as amostras foram retiradas do tanque de cura e mantidas cobertas com material plástico. No dia do ensaio foram capeadas na base e topo com enxofre, aplicado com auxílio de dispositivo capeador, mostrado na figura 18.



FIGURA 18 - Procedimento de capeamento das amostras

Os ensaios foram executados numa prensa eletrohidráulica de marca Solotest, modelo 1.501.120, de capacidade 100 Tf, mostrada na figura 19. São ligados ao equipamento um indicador eletrônico que mantém no mostrador a carga máxima atingida pelo corpo-de-prova e uma bomba eletrohidráulica, de modo a aplicar a carga continuamente com velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s.



FIGURA 19 - Aparelhagem para determinação de carga de compressão axial

### 5.2.6.3 Absorção, índice de vazios e massa específica

Estes ensaios foram realizados de acordo com o preconizado pela norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 1987e) sem fervura.

As amostras foram ensaiadas aos 28 dias de idade, utilizando-se três corpos-de-prova de cada uma das seis misturas, rompidos no ensaio de resistência à compressão (item 5.2.6.2).

A porosidade total é determinada através da relação entre a massa da amostra seca em estufa a 105°C até constância de massa e saturada em água, num intervalo de 72 horas, sem levar em consideração a velocidade de absorção. A partir do ensaio de porosidade total obtém-se o volume de poros da amostra acessível a água, não diferenciando os tipos de poros presentes.

As fórmulas de cálculo são mostradas na tabela 6.

TABELA 6 - Fórmulas para o cálculo da absorção, índice de vazios e massa específica das amostras de concreto endurecido

Característica	Fórmula
<b>Absorção</b>	$A = [(ms - mm) / mm] \times 100$ (22)
<b>Índice de vazios</b>	$lv = [(ms - mm) / (ms - msa)] \times 100$ (23)
<b>Massa específica Seca</b>	$\gamma_{cs} = mm / (ms - msa)$ (24)
<b>Massa específica Saturada</b>	$\gamma_{sc} = ms / (ms - msa)$ (25)
<b>Massa específica Real</b>	$\gamma_{rc} = mm / (mm - msa)$ (26)

Onde:

mm = massa da amostra seca;

ms = massa da amostra saturada com superfície seca;

msa = massa da amostra saturada submersa.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Os ensaios realizados no LRMTCU deram-se em ambiente com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e Umidade Relativa do Ar de  $56 \pm 5\%$ .

#### 6.1.1 Cimento

A tabela 7 mostra os dados da caracterização física e química do cimento utilizado na pesquisa, fornecidos pelo fabricante.

TABELA 7 - Características do cimento Portland II – F 32 – valores médios

ENSAIOS FÍSICOS	Unidade	valor	ENSAIOS QUÍMICOS	Unidade	Valor
Material retido #200	%	1,77	Perda ao fogo	%	4,59
Material retido #325	%	13,45	SiO <sub>2</sub>	%	17,43
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3.582	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,40
Água de consistência	%	25,89	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,53
Início de pega	Horas	03:45	CaO	%	60,49
Fim de pega	Horas	04:46	MgO	%	6,03
Expansibilidade a quente	mm	0,42	K <sub>2</sub> O	%	0,99
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,08	Na <sub>2</sub> O	%	0,09
Resistência R <sub>3</sub>	MPa	27,93	SO <sub>3</sub>	%	3,43
Resistência R <sub>7</sub>	MPa	33,09	Resíduo insolúvel	%	1,17
Resistência R <sub>28</sub>	MPa	39,47	CO <sub>2</sub>	%	3,64

FONTE: Laudo técnico da Cimento Rio Branco S/A

### 6.1.2 Aditivo

A função básica do aditivo utilizado é a dispersão das partículas coloidais. A tabela 8 apresenta as especificações do produto, fornecidas pelo fabricante.

TABELA 8 - Dados técnicos do aditivo polifuncional para concreto

Função principal	Polifuncional
Base química	Lignosulfonatos
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho claro
Densidade	1,095 a 1,135 g/cm <sup>3</sup>
pH	8 a 10
Sólidos	26 a 28%
Denominação comercial	Mastermix® 433 N

FONTE: Prospecto da Degussa®

### 6.1.3 Brita

A tabela 9 mostra a distribuição granulométrica da brita utilizada na pesquisa e a figura 20 a sua representação gráfica. Também são mostrados os intervalos de percentagem retida acumulada para classificação do agregado graúdo, dados pela NBR 7211 (ABNT, 2005), em que os resultados do ensaio ficaram contidos. Desta forma, a brita testada ficou classificada na Zona Granulométrica 9,5/25.

Na tabela 10 é exposto um resumo com os demais resultados de ensaios a que foi submetida a brita.

TABELA 9 - Composição granulométrica do agregado graúdo e limite da norma

PENEIRAS		Abertura	BRITA		NBR 7211 - Lim. acumulado	
Normalizada	Auxiliar		Retida	Acumulada	Lim. Inferior	Lim. Superior
Número	Número	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)
	1"	25,40	0	0	0	5
$\frac{3}{4}$ "		19,00	7,15	7,15	2	15
	$\frac{1}{2}$ "	12,70	53,05	60,20	40	65
$\frac{3}{8}$ "		9,51	26,30	86,50	80	100
4		4,76	13,05	99,55	95	100
8		2,38	0,05	99,60		
16		1,19	0,02	99,62		
30		0,595	0,01	99,63		
50		0,297	0,01	99,64		
100		0,149	0,02	99,66		
	Fundo	0	0,34	100		

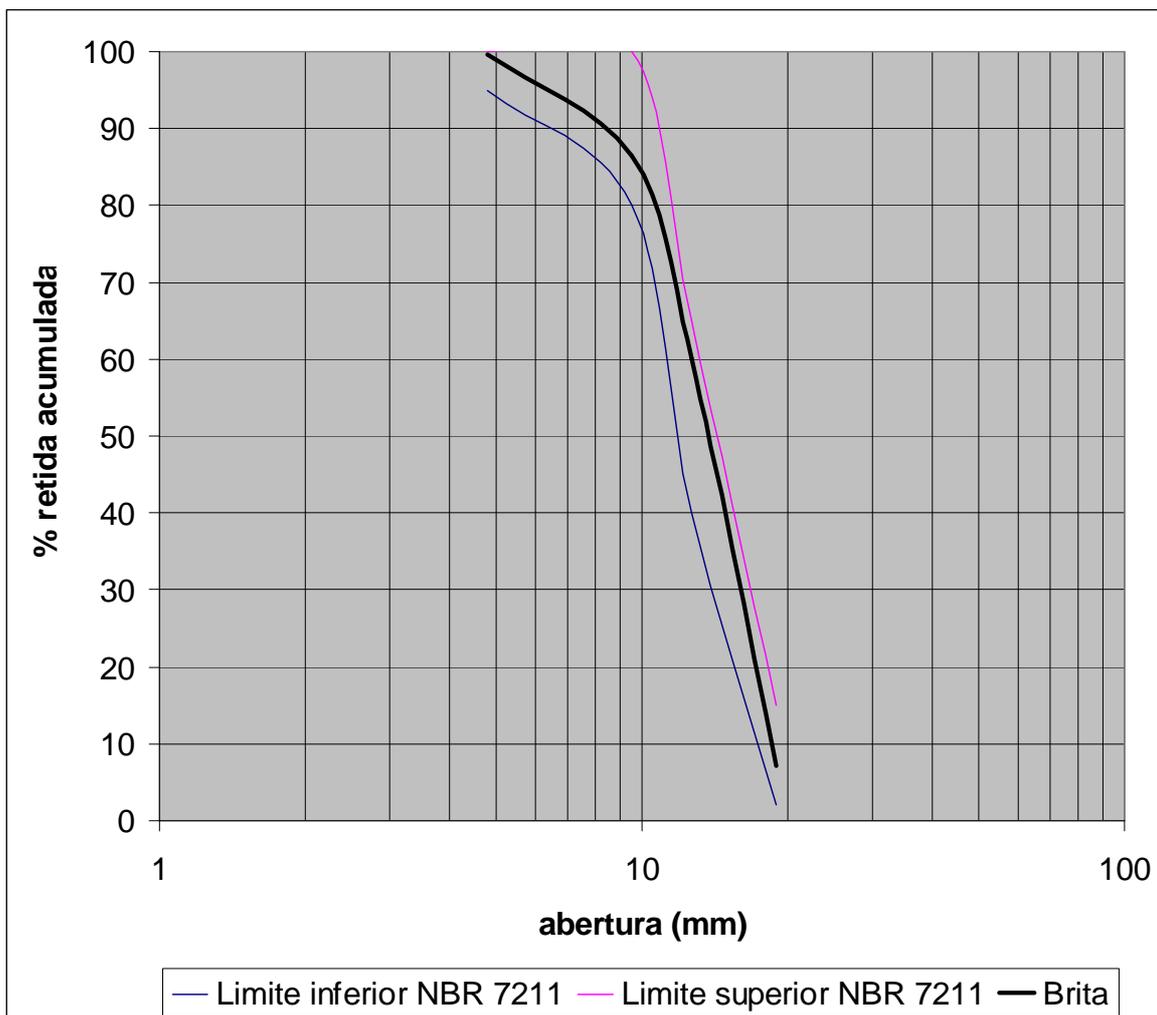


FIGURA 20 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

TABELA 10 - Quadro resumo caracterizações físicas da brita

Característica	Método	Unidade	Valor
<b>Dimensão máxima</b>	NBR 7211	mm	25
<b>Módulo de finura</b>	NBR 7211	-	6,91
<b>Massa específica</b>	NBR NM 53	g/cm <sup>3</sup>	2,93
<b>Massa específica (sss)</b>	NBR NM 53	g/cm <sup>3</sup>	2,86
<b>Massa específica aparente</b>	NBR NM 53	g/cm <sup>3</sup>	2,83
<b>Massa unitária (estado solto)</b>	NBR 7251	g/cm <sup>3</sup>	1,55
<b>Teor de material pulverulento</b>	NBR 7219	%	0,34
<b>Absorção</b>	NBR NM 53	%	1,27

#### 6.1.4 Composição Granulométrica das Areias

A distribuição granulométrica das areias utilizadas na pesquisa é mostrada na tabela 11 e sua representação gráfica na figura 21. Também são mostrados os intervalos de percentagem retida acumulada para classificação do agregado miúdo, dados pela NBR 7211 (ABNT, 2005), em que os resultados dos ensaios ficaram mais próximos. Conforme esta norma, esses limites determinam a Zona Utilizável, que é uma expansão das fronteiras da região denominada Zona Ótima.

TABELA 11 - Composição granulométrica das areias britadas e limites da norma

PENEIRAS		Abertura	AREIA LAVADA (AL)		AREIA NÃO LAVADA (NL)		NBR 7211 Limite retido acumulado	
Normalizada	Auxiliar		Retida	Acumulada	Retida	Acumulada	Inferior	Superior
Número	Número	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	¼"	6,30	0	0	0	0	0	7
4		4,76	0,61	0,61	0,56	0,56	0	10
8		2,38	25,70	26,31	23,60	24,16	0	25
	10	2,00	6,70	33,01	6,17	30,33		
16		1,19	25,85	58,86	23,75	54,08	5	50
30		0,595	16,45	75,31	15,13	69,21	15	70
50		0,297	11,60	86,91	10,65	79,86	50	95
100		0,149	4,40	91,31	4,11	83,97	85	100
	200	0,075	2,96	94,27	2,81	86,78		
	Fundo		5,73	100	13,22	100		

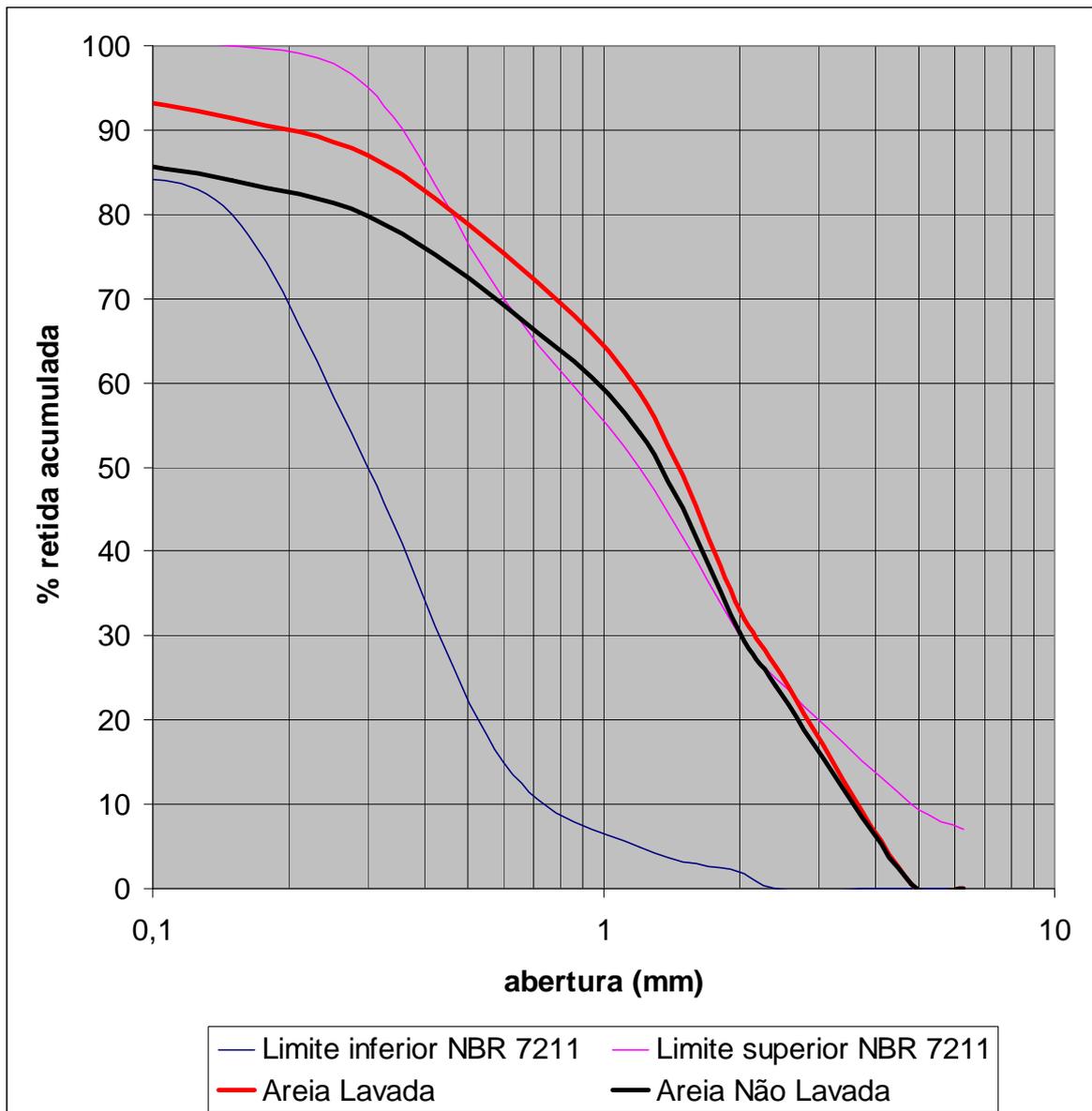


FIGURA 21 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (AL e NL) e limites da NBR 7211

Pela observação do gráfico de distribuição granulométrica é possível comprovar que, embora próximas ao limite superior, ambas as areias não se enquadram nos limites normalizados.

Analisando as quantidades retidas em cada peneira da série, observa-se que quando o objetivo é a busca de uma granulometria contínua, tomando-se por base a média entre os limites da NBR 7211, tanto AL como NL possuem deficiências. Considerando-se valores aproximados, há um excesso de material retido nas peneiras 8 (2,4 mm) e 16 (1,2 mm), de 10% e 15%, respectivamente, em relação ao volume

total. Há uma falta de 5% nas frações mais grossas (4,8 ou 6,3 mm), de 5% de material retido na peneira 50 (0,3 mm) e 15% na peneira 100 (0,15 mm). Esta situação é ilustrada na figura 22.

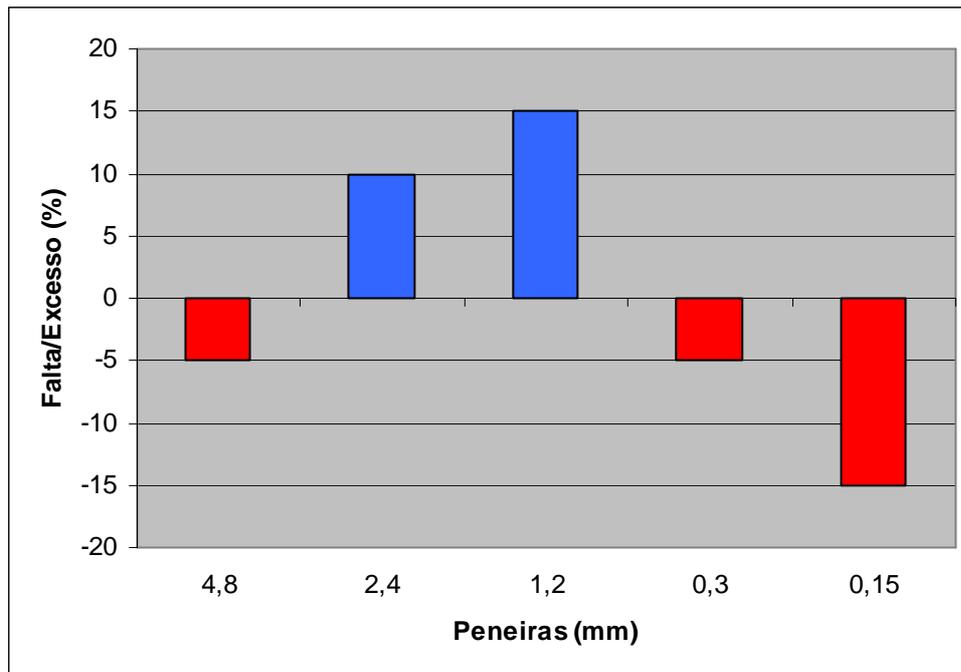


FIGURA 22 - Percentuais de falta ou excesso de material nas peneiras

Uma vez que o teor de material pulverulento (passante na peneira 200) da NL é 13,22% e da AL 5,73%, a lavagem em planta é eficiente na medida em que obtém uma redução acima de 55%, possibilitando a utilização do material em atendimento aos limites preconizados pela NBR 7211 (ABNT, 2005). Pela avaliação da distribuição granulométrica antes e após a lavagem, é possível verificar que: 91% de todo o material retirado no processo de lavagem é composto de pulverulentos; 5% é de material entre 0,075 e 0,149 mm (retido na peneira 200); 3% é entre 0,149 e 0,297 mm (retido na peneira 100) e 1% é de grãos maiores. A figura 23 ilustra essa situação. Conseqüentemente, considerando-se o alvo da lavagem os finos passantes na peneira 200, há uma perda no processo de 9%.

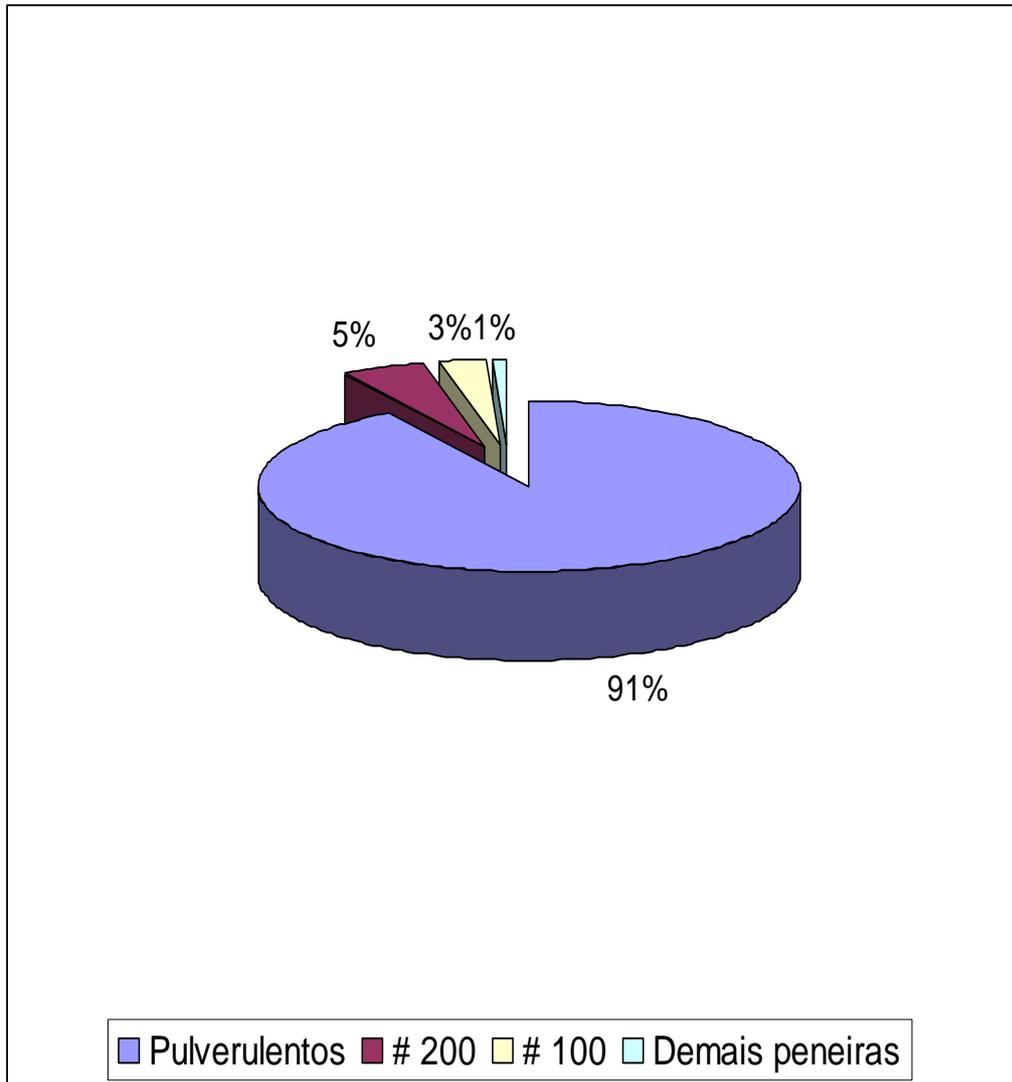


FIGURA 23 - Proporções dos materiais retirados no processo de lavagem

A lavagem, como processo para redução da quantidade de materiais pulverulentos é imprescindível, pois as partículas maiores conseguem reter grande parte da fração fina. Foi verificado nesta pesquisa que o peneiramento das amostras de areia realizado nos moldes da NBR 7217 (ABNT, 1987b) apresentaram aproximadamente 50% do teor de material pulverulento determinado conforme a NBR 7219 (ABNT, 1987c). Conseqüentemente, mesmo com um peneiramento realizado daquela forma, a areia britada ainda não atenderia o teor máximo preconizado pela NBR 7211 (ABNT, 2005) para o concreto submetido ao desgaste superficial.

A determinação de valores financeiros envolvidos na lavagem em planta tem as mesmas dificuldades de qualquer sistema de apropriação de despesas, pois envolve

custos fixos, variáveis, diretos e indiretos. Para tanto, seria necessário estudo pormenorizado de todo o processo produtivo e da contabilidade de custos, que não é o escopo desta pesquisa. Apenas levando-se em conta os custos diretos, como perdas além dos finos, energia elétrica (máquina, bomba de recirculação e correia transportadora), aditivo químico, operador do sistema e manutenção, o valor da operação de classificação chega a 10,73% do preço de mercado atual praticado pela areia britada.

Os resultados dos cálculos do módulo de finura são apresentados na tabela 12 juntamente com o resumo da caracterização física das areias britadas. Verifica-se que o valor para a NL foi cerca de 8% menor do que para a AL. Por originar-se no parâmetro da média, o módulo de finura mostrou sua limitação quanto à classificação das areias, como era de se esperar, mas teve significado na medida em que detectou tratar-se de material com maior presença de finos.

#### 6.1.5 Inchamento das Areias

Os resultados dos ensaios para determinação do inchamento foram plotados nos gráficos mostrados nas figuras 24 e 25. Seguindo as instruções da NBR 6467 (ABNT, 1987a), a umidade crítica e coeficiente de inchamento médio foram obtidos geometricamente, através do traçado de retas auxiliares.

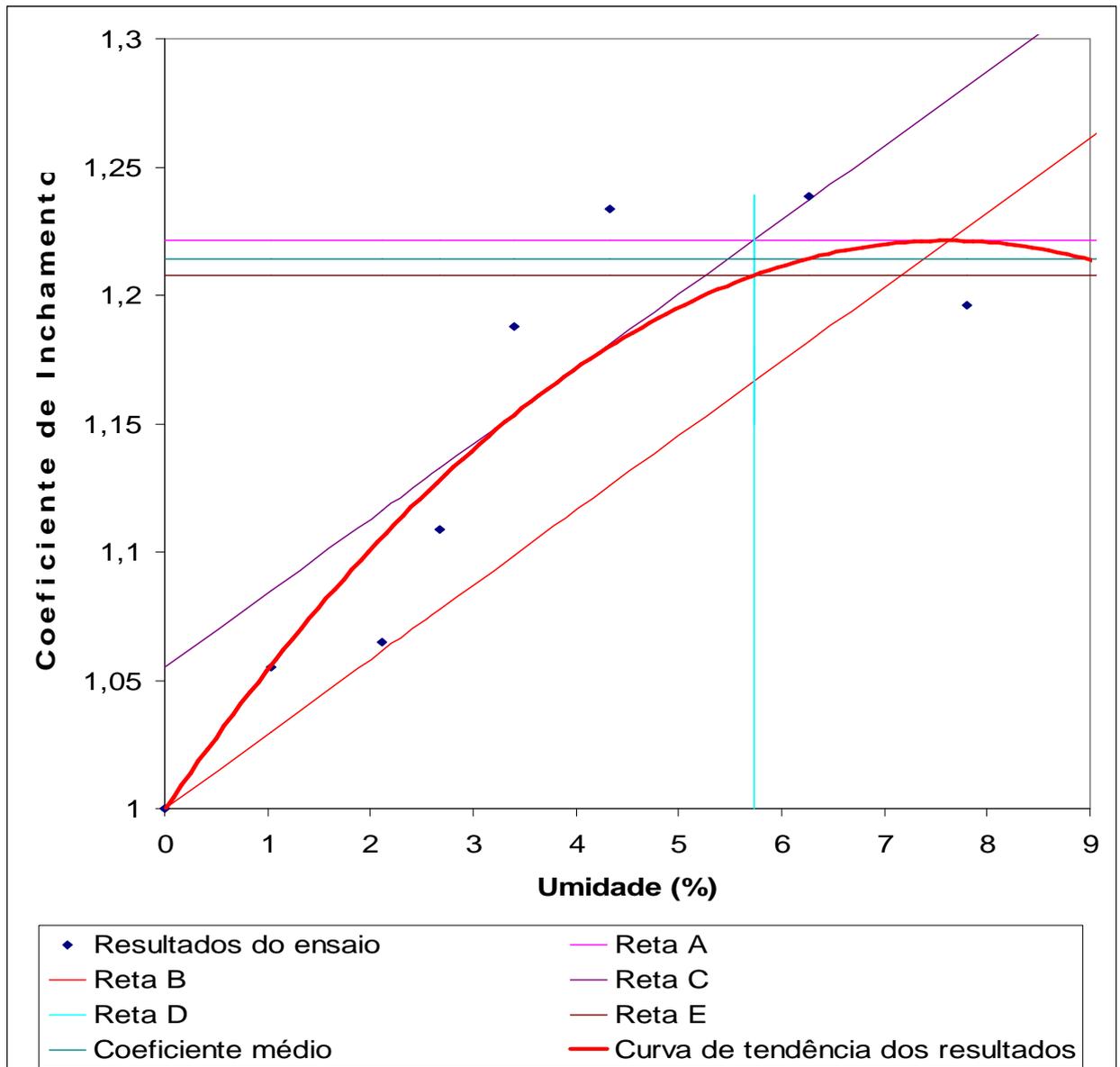


FIGURA 24 - Curva de inchamento médio para a areia britada lavada

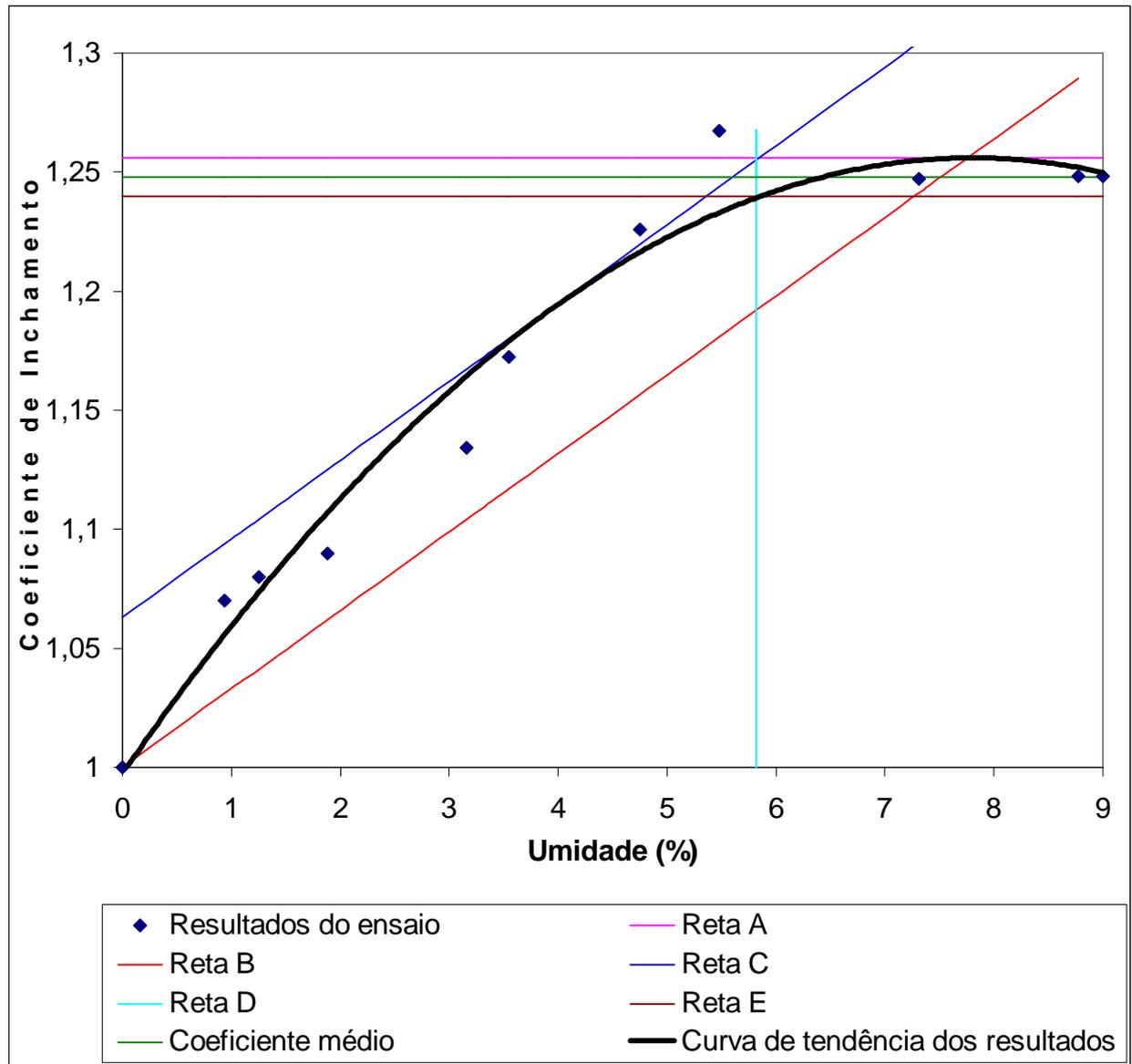


FIGURA 25 - Curva de inchamento médio para a areia britada não lavada

A água livre aderente aos grãos provoca um afastamento entre eles, resultando no inchamento do conjunto. O inchamento da areia NL foi pouco mais de 3% superior ao da AL, o que era esperado, pois quando as partículas são mais finas, o fenômeno é mais pronunciado.

Embora o fenômeno do inchamento não altere a quantificação dos materiais em massa, na quantificação em volume resulta uma menor massa ocupando o mesmo volume em uma caixa de medida. Desta forma, a validade prática do inchamento é, na dosagem por volume, possibilitar informação para a correção do volume aparente do agregado miúdo.

### 6.1.6 Avaliação das Impurezas Orgânicas nas Areias

No ensaio para avaliação das impurezas orgânicas em agregado miúdo, as soluções padrão e aquelas que estiveram em contato com as amostras da AL e da NL, não apresentaram diferenças de coloração. Portanto, em termos de ácido tânico, a presença de matéria orgânica é inferior a 300 ppm.

### 6.1.7 Demais Características Físicas das Areias Britadas

A tabela 12 mostra o resumo dos resultados encontrados e o método utilizado para execução de cada ensaio.

TABELA 12 - Quadro resumo caracterização física das areias britadas

<b>Característica</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>	<b>AL</b>	<b>NL</b>
<b>Diâmetro máximo</b>	NBR 7211	mm	4,8	4,8
<b>Módulo de finura</b>	NBR 7211	-	3,39	3,12
<b>Massa específica</b>	NBR NM 52	g/cm <sup>3</sup>	2,95	2,96
<b>Massa específica (sss)</b>	NBR NM 52	g/cm <sup>3</sup>	2,79	2,80
<b>Massa específica aparente</b>	NBR NM 52	g/cm <sup>3</sup>	2,72	2,72
<b>Massa unitária (estado solto)</b>	NBR 7251	g/cm <sup>3</sup>	1,62	1,67
<b>Teor de material pulverulento</b>	NBR 7219	%	5,73	13,22
<b>Impurezas orgânicas</b>	NBR 7220	-	Isenta	Isenta
<b>Umidade crítica</b>	NBR 6467	%	5,73	5,85
<b>Coefficiente de Inchamento médio</b>	NBR 6467	-	1,21	1,25
<b>Absorção</b>	ASTM C128	%	2,81	2,96

## 6.2 DOSAGEM

Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura de  $27 \pm 3^\circ\text{C}$  e URA de  $54 \pm 6\%$ .

### 6.2.1 Determinação do Teor Ideal de Argamassa

Tanto para a mistura contendo AL quanto para aquela com NL foram necessárias 5 tentativas para determinar o teor ideal de argamassa, que foi de 61% para ambas. O teor final ficou em 63%, incluída a previsão de perdas de argamassa. Assim, as misturas apresentarão uma quantidade de agregado miúdo maior que a de gráudo, embora usualmente os traços de concreto misturados em obra apresentem situação inversa.

A tabela 13 mostra os quantitativos utilizados em todas as tentativas. Os números já levam em conta os teores de umidade da brita, que era 0,2%, da AL de 3,5% e da NL 3,0%.

TABELA 13 - Traço inicial e acréscimos para determinação do teor ideal de argamassa com areia britada lavada e não lavada

Tentativa	Teor	Traço (Cim:Ar:Br)	Quantidade de Materiais (kg)			Água (ml) para Abatimento 90 mm		Relação a/c	
	(%)		Cimento	Areia	Brita	Areia Lavada	Não Lavada	Areia Lavada	Não Lavada
Inicial	53	1:2,18:2,82	10,64	23,19	30,00	7340	7020	0,69	0,66
2ª.	55	1:2,30:2,70	0,47	2,36	0,0	150*	140*	0,67*	0,64*
3ª.	57	1:2,42:2,58	0,52	2,59	0,0	220*	180*	0,66*	0,63*
4ª.	59	1:2,54:2,46	0,57	2,84	0,0	200*	200*	0,64*	0,62*
5ª.	61	1:2,66:2,34	0,62	3,12	0,0	300	290	0,64	0,61

NOTA: \* Valores sem confirmação do ensaio de abatimento.

### 6.2.2 Determinação do Teor de Aditivo

Foram realizadas 4 tentativas para o concreto contendo AL e 2 para aquele com NL. A tabela 14 mostra os quantitativos utilizados nessas tentativas. Os números já consideram o teor de líquido do aditivo além dos teores de umidade da brita que era 0,2%, da AL 3,5% e da NL 3,0%. Os teores de aditivo encontrados foram de 10 ml/kg para o concreto contendo AL e 6 ml/kg e para aquele com NL.

TABELA 14 - Traço inicial e acréscimos para determinação do teor de aditivo para as misturas com areia britada lavada e não lavada

Tentativa	Quantidade de materiais (kg)				Aditivo (ml)	Abatimento (mm)	
	Cimento	Areia	Brita	Água		Areia Lavada	Não Lavada
Inicial	12,82	34,10	30,00	7,01	51,3	60	80
2ª.	1,00	2,66	2,34	0,53	31,6	65	90
3ª.	1,00	2,66	2,34	0,52	35,7	80	-
4ª.	1,00	2,66	2,34	0,52	39,6	90	-

A necessidade de aditivo era esperada, pois de acordo com DONZA; CABRERA e IRASSAR (2002), o efeito da areia britada no concreto fresco apresenta algumas desvantagens comparadas com a areia de rio. As areias britadas requerem uma dosagem mais elevada de aditivo para superar a adversidade da forma angulosa e textura áspera das partículas. Os autores recomendam que para cada tipo de areia e teor cimento na mistura, as dosagens ótimas sejam estudadas.

A redução de água de amassamento aproximada segundo o fabricante do aditivo, é na faixa de 8 a 15%. Nesta pesquisa, as reduções foram de 9,8% para as misturas com NL e 14% para aquelas com AL.

### 6.2.3 Realização das Misturas Experimentais e Traçado dos Diagramas de Dosagem

A tabela 15 apresenta um resumo das características e proporções das misturas estudadas. Também são mostrados os teores de ar incorporado e as massas específicas dos concretos recém misturados, além das relações a/c obtidas nos ensaios de dosagem para o abatimento de 90 mm, as quais atenderam os limites máximos da NBR 6118 (ABNT, 2003c).

TABELA 15 - Resumo das características das misturas de concreto

Característica	Relação Cimento:Agregado					
	1:3,5		1:5,0		1:6,5	
Tipo de areia	AL	NL	AL	NL	AL	NL
Código da mistura	AL35	NL35	AL50	NL50	AL65	NL65
Teor de argamassa (%)	63	63	63	63	63	63
Areia Britada (kg/kg de cimento)	1,835	1,835	2,78	2,78	3,725	3,725
Brita (kg/kg de cimento)	1,665	1,665	2,22	2,22	2,775	2,775
Relação a/c	0,43	0,43	0,55	0,55	0,65	0,65
Aditivo (kg/kg de cimento)	0,0112	0,0067	0,0112	0,0067	0,0112	0,0067
Abatimento (mm)	90	90	90	90	90	90
Massa específica (fresco) (kg/m <sup>3</sup> )	2421	2443	2412	2432	2399	2421
Teor de ar aprisionado (%)	1,98	1,24	2,46	1,80	3,41	2,68

Na tabela 16 são mostradas as composições das misturas estudadas, a partir dos dados acima determinados e do cálculo do consumo de cimento com a fórmula apresentada no item 5.2.4.6.

TABELA 16 - Composições das misturas de concreto (por m<sup>3</sup>)

Material Componente	Código da mistura					
	AL 35	NL 35	AL 50	NL 50	AL 65	NL 65
Cimento (kg)	491	495	368	371	294	297
Areia Britada (kg)	901	909	1023	1032	1096	1106
Brita (kg)	817	825	817	824	817	824
Água (kg)	207	211	199	202	189	192
Aditivo (kg)	5,50	3,32	4,12	2,49	3,30	1,99

Os diagramas de dosagem para concretos AL e NL são apresentados nas figuras 26 e 27, respectivamente. As equações para a resistência ( $F_c$ ), relação agregado/cimento ( $m$ ) e consumo de cimento ( $C$ ), foram obtidas a partir das curvas de tendência exibidas pelos gráficos, no formato sugerido pelo método de dosagem adotado.

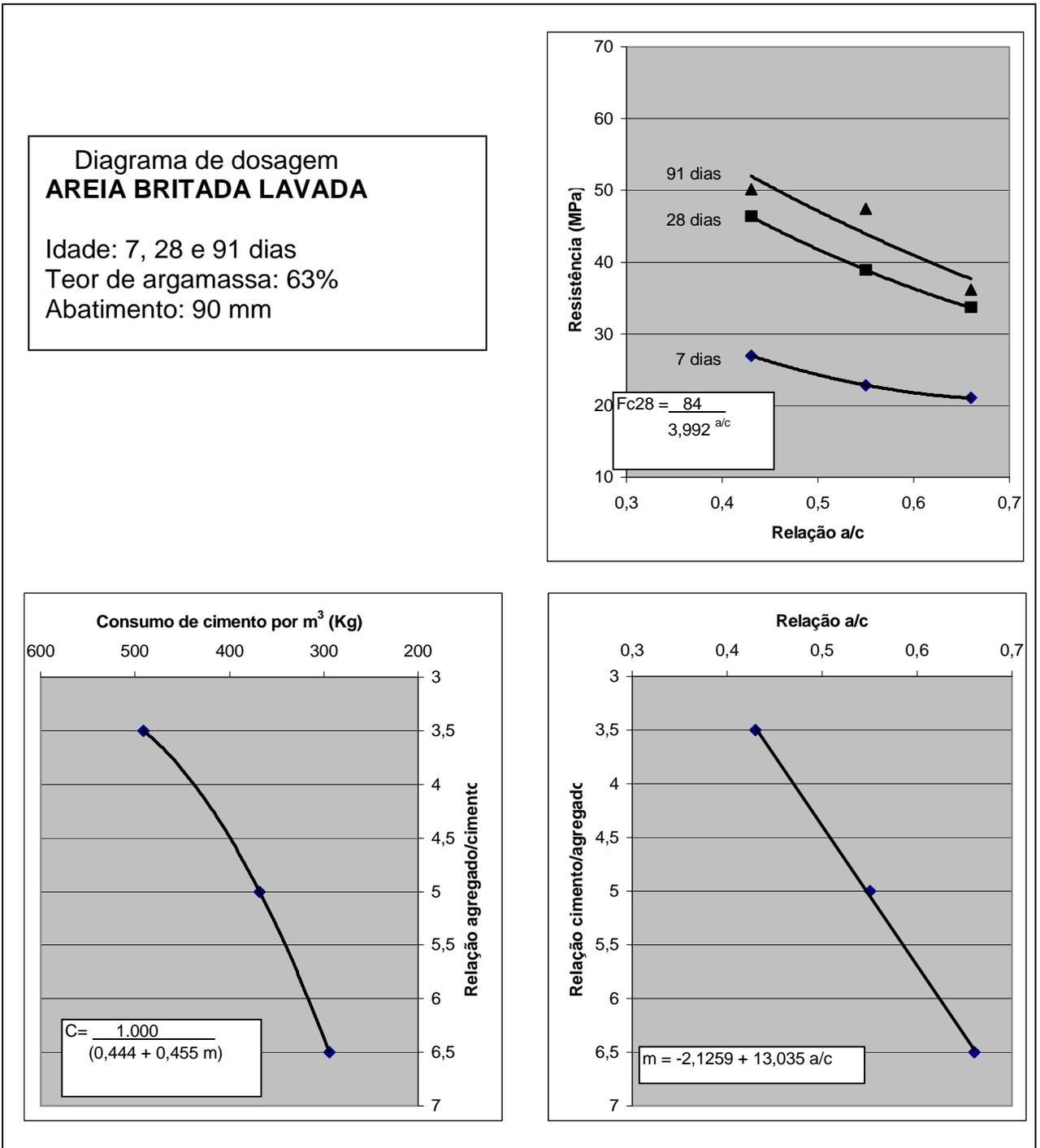


FIGURA 26 - Diagrama de dosagem para concretos com areia lavada

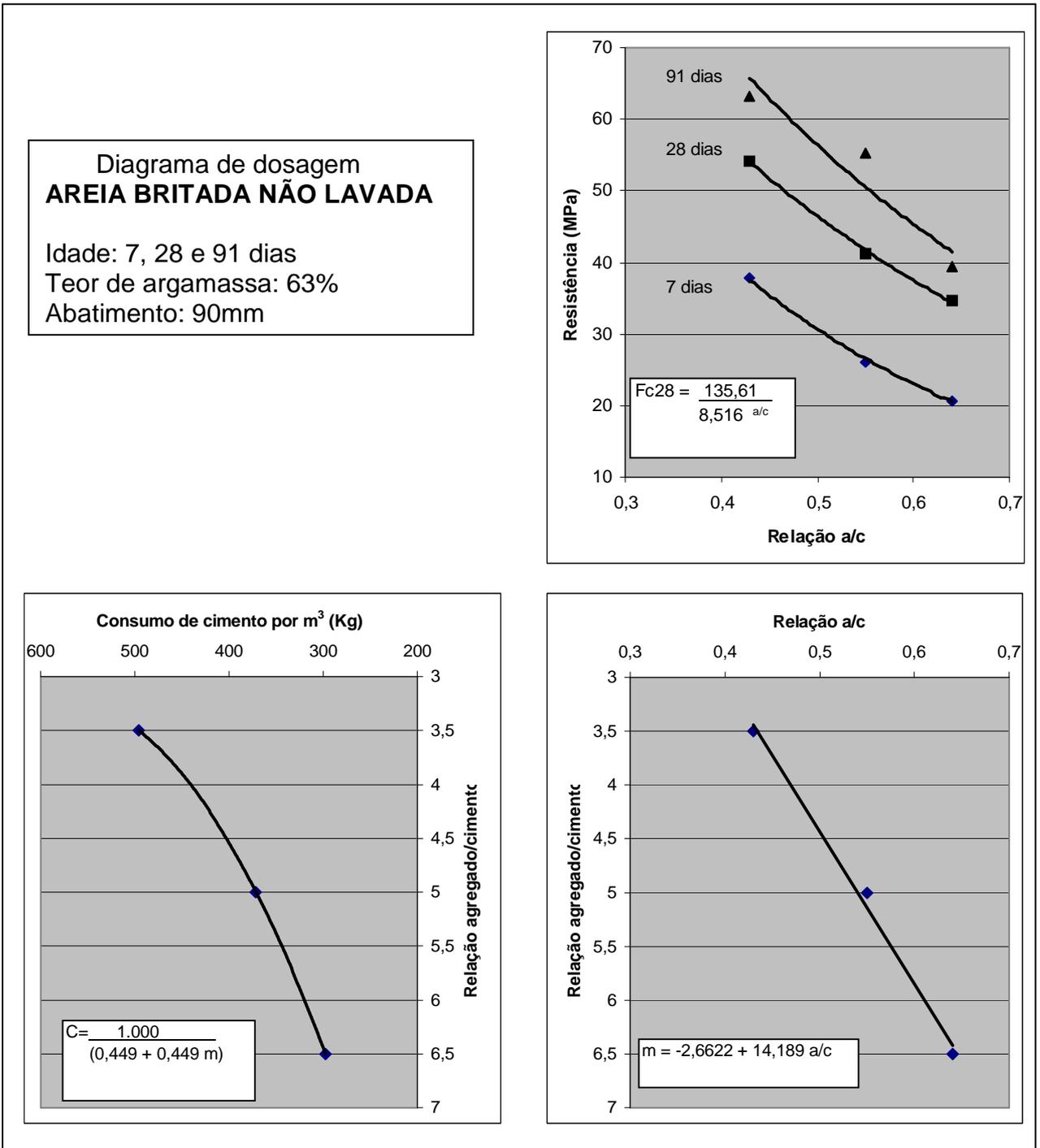


FIGURA 27 - Diagrama de dosagem para concretos com areia não lavada

## 6.3 COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO

### 6.3.1 Perda de Abatimento

Os resultados dos ensaios de perda de abatimento de todas as misturas de concreto pesquisadas encontram-se na Tabela 17. As figuras 28, 29 e 30 ilustram o desenvolvimento da perda de abatimento ao longo do tempo para cada família de concreto.

TABELA 17 - Valores do abatimento do concreto a partir do contato do cimento com a água

Tempo (min)	Abatimento (mm)					
	AL 35	NL 35	AL 50	NL 50	AL 65	NL 65
0	90	90	90	90	90	90
15	90	80	80	80	80	70
30	80	70	65	60	60	50
45	65	55	45	40	40	40
60	55	45	40	35	30	35
75	45	45	40	35	30	30
90	40	35	40	30	30	25
105	35	30	30	25	30	25
120	30	20	25	20	20	20

Durante os ensaios a temperatura esteve em  $27 \pm 3^{\circ}\text{C}$  e a URA em  $54 \pm 6\%$ . A norma NBR 10342 (ABNT, 1992b) prescreve que, para efeitos comparativos, esses parâmetros não devem apresentar variações superiores a  $2^{\circ}\text{C}$  e  $5\%$ , respectivamente. Uma vez que as condições de temperatura e umidade relativa do ar têm influência nos resultados, a extrapolação dos dados para outras pesquisas deve, portanto, ser vista com cautela, considerando-se as condições climáticas existentes no momento do ensaio.

Por outro lado, dentro da mesma experiência, as comparações são válidas, pois os ensaios foram realizados em curto intervalo de tempo, onde as variações, tanto da umidade quanto da temperatura, mantiveram-se próximas.

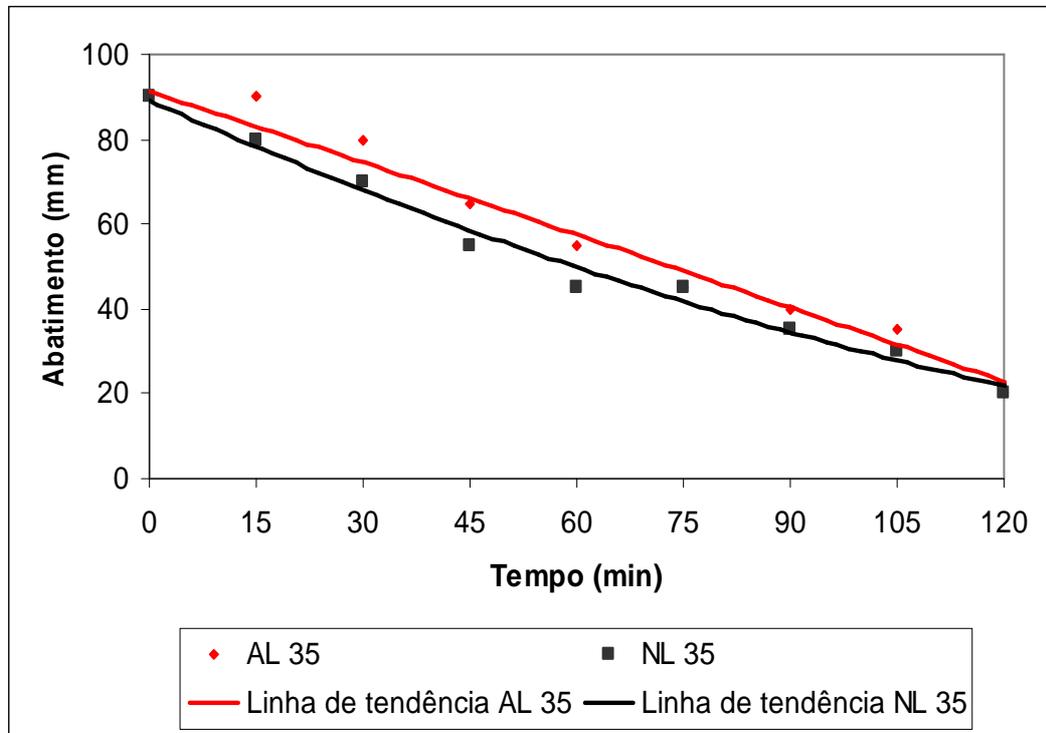


FIGURA 28 - Perda de abatimento para as misturas AL 35 e NL 35

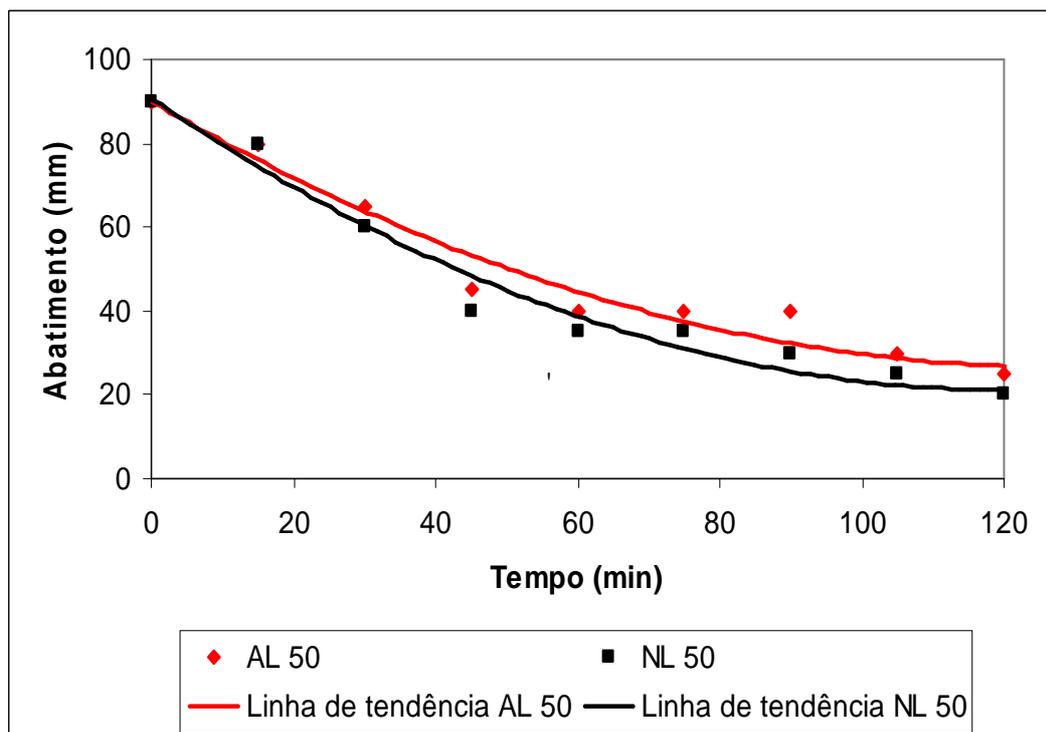


FIGURA 29 - Perda de abatimento para as misturas AL 50 e NL 50

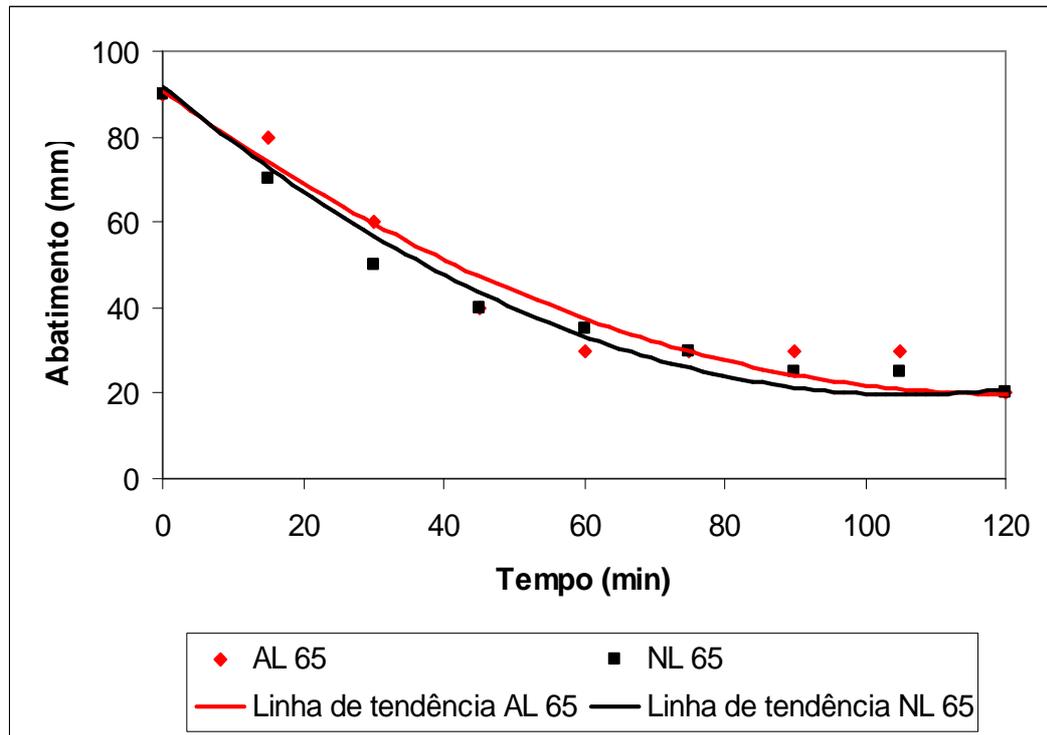


FIGURA 30 - Perda de abatimento para as misturas AL 65 e NL 65

A perda de abatimento demonstra uma tendência de ser mais rápida nas misturas com menor teor de cimento, tanto para as misturas AL como NL.

A provável causa desse fenômeno é a ação global do plastificante. A proporção de plastificante em relação à quantidade de cimento é a mesma para os concretos AL e NL dentro de suas respectivas séries. Entretanto, em relação ao volume total de sólidos da mistura, a quantidade de plastificante é maior nos concretos com maior teor de cimento. As misturas ricas (AL e NL 35) contêm volumes de aditivo 33% maiores que as normais (AL e NL 50) enquanto nestas os volumes são 25% maiores que nas pobres (AL e NL 65).

A taxa de perda de abatimento aos 30 minutos para todas as misturas variou de 11% (para AL 35) a 44% (para NL 65); aos 60 minutos de 39% (para AL 35) a 67% (para AL 65).

Resultados semelhantes foram encontrados por PAPAYIANNI et al. (2005), que constataram que o uso de aditivo químico aumenta a trabalhabilidade de uma mistura de concreto, mas, a manutenção do efeito não se prolonga além de 30 a 60 minutos.

Em concretos com areia de rio ou areia britada com superplastificante, comprovaram que a diminuição do abatimento após 60 minutos variou de 45 a 53%.

Comparativamente, todas as misturas NL (teor 6 ml de plastificante por kg de cimento) perderam abatimento mais rapidamente que os pares AL (teor 10 ml de plastificante por kg de cimento). Esse comportamento foi anteriormente observado por PAPAYIANNI et al. (2005), ao verificarem que quanto menor a dosagem de superplastificante na mistura, mais rapidamente o concreto perdeu abatimento.

### 6.3.2 Pega

A tabela 18 mostra os resultados dos ensaios de pega e as figuras 31, 32 e 33 mostram a evolução dos tempos de pega.

TABELA 18 - Tempos de início e fim da pega

Mistura	Pega (min)		
	Início	Fim	Intervalo
AL 35	300	630	330
NL 35	240	480	240
AL 50	300	615	315
NL 50	240	450	210
AL 65	255	555	300
NL 65	180	390	210

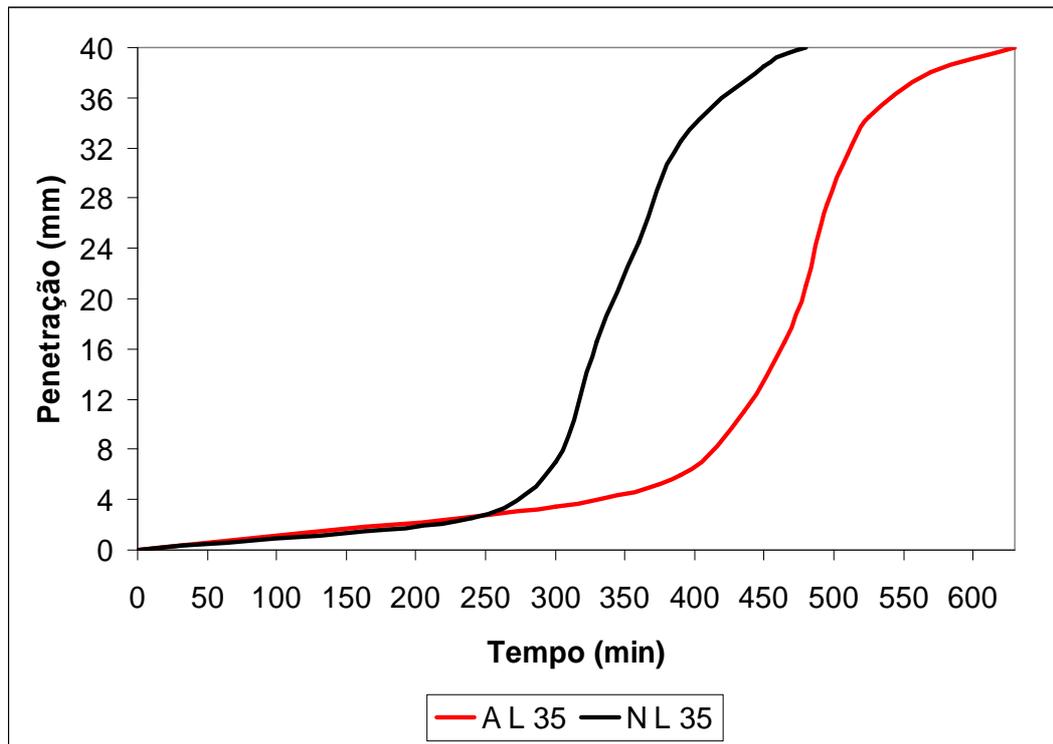


FIGURA 31 - Evolução da pega nos concretos AL 35 e NL 35

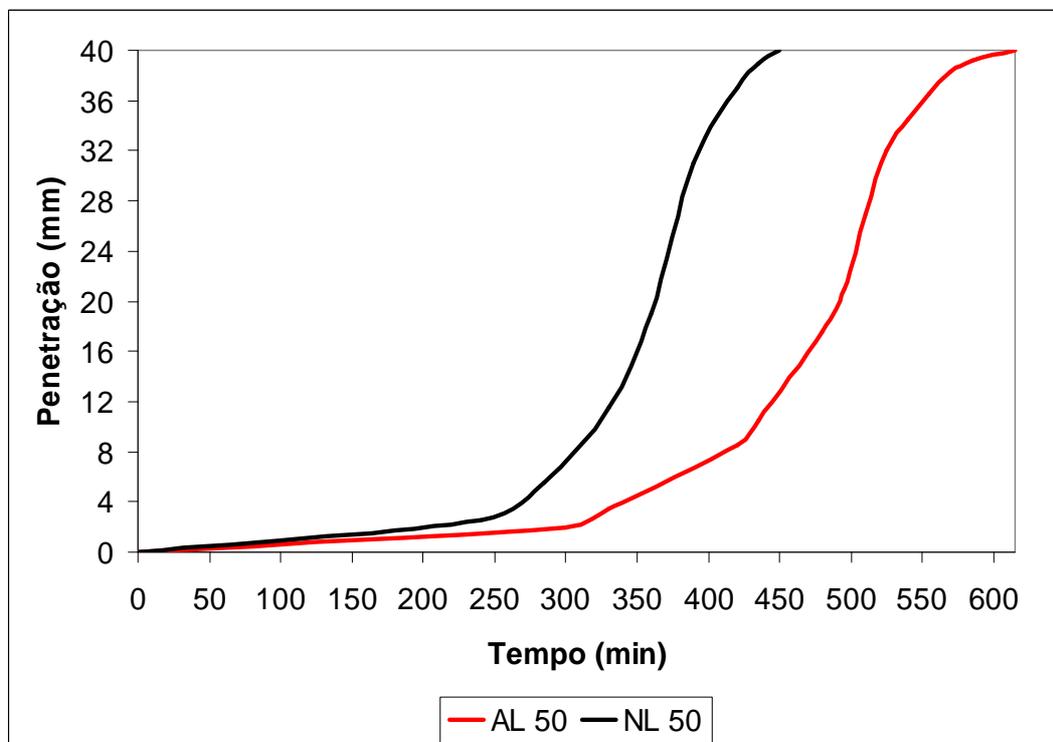


FIGURA 32 - Evolução da pega nos concretos AL 50 e NL 50

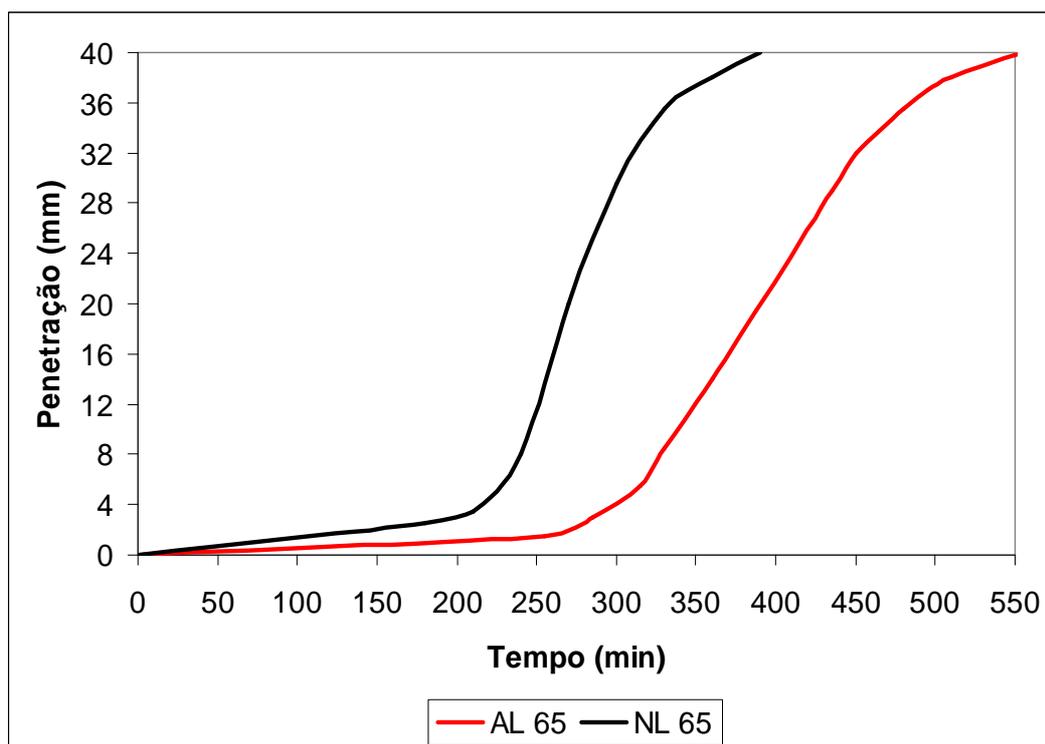


FIGURA 33 - Evolução da pega nos concretos AL 65 e NL 65

De modo geral, a menor relação a/c aliada ao maior teor de cimento, deveriam fazer com que os tempos de pega fossem menores nas misturas AL e NL 35 e a partir delas, as demais apresentassem valores crescentes.

Na comparação entre os pares de concreto AL e NL, era esperado que não exibissem diferença significativa, pois em pesquisa anterior QUIROGA e FOWLER (2004) constataram que a concentração até 20% de materiais pulverulentos no agregado miúdo não afeta significativamente os tempos de pega. No entanto, nos resultados desta pesquisa, os tempos de início e fim de pega, foram decrescentes no sentido das misturas com maior relação a/c e menor teor de cimento, conforme ilustrado na figura 34. Além disso, todas as misturas NL mostraram tempos de pega consideravelmente mais baixos que seus pares AL. Isso indica que ocorreu um retardo no tempo de pega para todas as misturas.

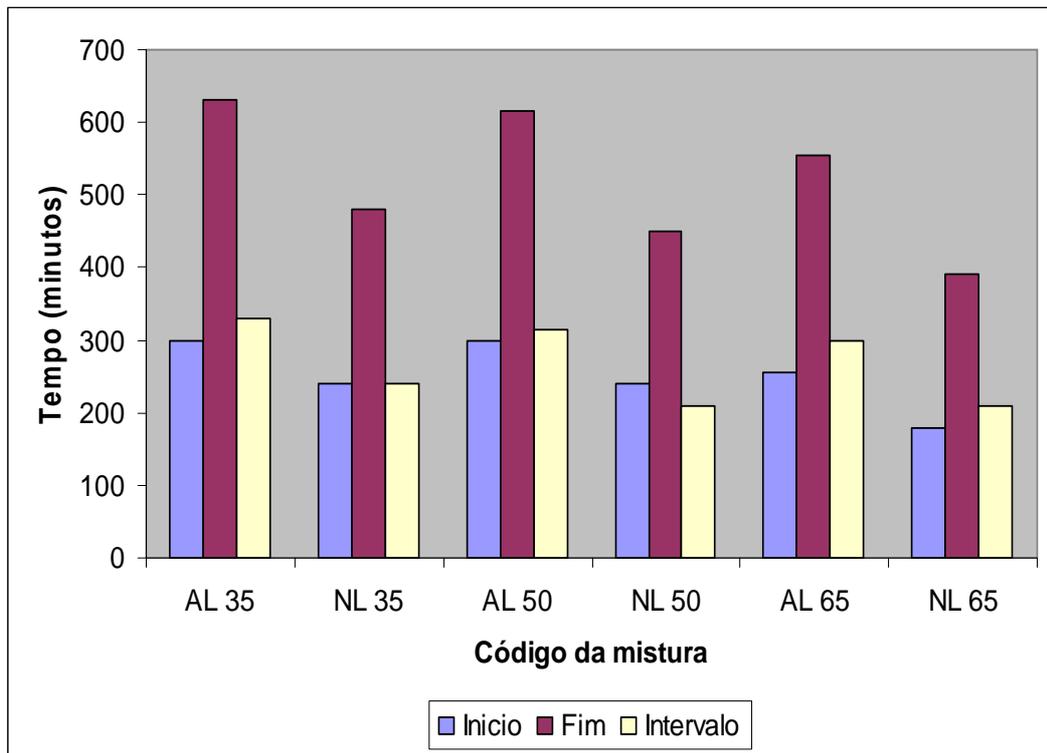


FIGURA 34 - Comparação entre os tempos de início, fim e intervalo de pega para todas as misturas

A faixa de teor de dosagem do aditivo recomendada pelo fabricante é de 0,33% a 1,12% em massa, para o cimento. Embora dentro do preconizado, as dosagens utilizadas de 0,67% para os concretos NL e 1,12% para AL afetaram os tempos de pega.

O grau de retardo baixo nas misturas NL e pronunciado para as misturas AL, confirma a observação realizada por BROOKS; MEGAT JOHARI e MAZLOOM (2000), de que a extensão do retardo depende da dosagem do aditivo.

O retardo significativo nos tempos de pega para as misturas AL pode estar relacionado à dosagem de aditivo no limite superior. Este efeito havia sido observado por QUIROGA e FOWLER (2004) com aditivos em geral e especificamente para os superplastificantes à base de lignosulfonatos por PAPAYIANNI et al. (2005).

### 6.3.3 Exsudação

Não houve formação de água de exsudação na superfície das amostras, exceção às misturas AL 65 e NL 65. Estas apresentaram vestígios visuais de água em sua face superior a tempo da primeira coleta, mas em quantidade tão pequena que não foi possível realizar a coleta da forma prevista no ensaio.

Mesmo nas condições de laboratório em que foram realizados os ensaios, com os principais condicionantes que regulam a evaporação da água (temperatura, URA e velocidade do vento) sob controle, ocorreu uma evaporação em níveis muito baixos. Como não foram observados indícios de secagem superficial precoce (formação de “pele” ou fissuras superficiais), isso leva a crer que ocorreu alguma exsudação, mesmo que ínfima.

Este comportamento em comum para misturas desiguais pode ser explicado pela atuação de vários fatores, atuando diferentemente em cada par de misturas. Alguns favoravelmente num sentido ou no outro, de modo que, combinadamente, levaram à quase inexistência de exsudação em todas as misturas.

A relação a/c mais baixa leva à tendência de redução da exsudação nos pares de concreto AL e NL35, diminuída no sentido das misturas AL e NL 65.

Todas as misturas tiveram a exsudação reduzida por efeito do aditivo, pois de acordo com o U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1994), a utilização de aditivo a base de lignosulfatos, reduz a exsudação. Contudo, segundo a mesma fonte, o retardo da pega induz a exsudação e, portanto, causou efeito contrário, especialmente nas misturas AL onde o retardo foi maior.

Além dessas considerações, na tabela 19 são mostrados outros fatores e sua quantificação: a relação entre o material pulverulento e os sólidos totais para cada mistura; a capacidade de absorção de água pelos agregados em função de seus índices de absorção e o teor de ar aprisionado acidentalmente nos concretos em seu estado fresco. Para o cálculo da absorção de água pelos agregados não foi levado em conta a umidade em que se encontravam na hora da mistura, pois esses valores já foram descontados da água efetivamente misturada.

TABELA 19 - Fatores que podem ter influenciado a exsudação

MISTURA	Relação materiais pulverulentos/sólidos (%)	Água da mistura absorvida pelos agregados (%)	Teor de ar aprisionado (%)
AL 35	24,7	17,2	1,97
NL 35	27,7	17,7	1,24
AL 50	19,4	19,6	2,46
NL 50	22,9	20,3	1,81
AL 65	16,3	21,8	3,42
NL 65	20,0	22,6	3,26

Na figura 35 são mostradas as diferenças relativas entre as misturas para cada um dos fatores listados na tabela 19, sendo adotado 100% para o valor mais baixo de cada fator.

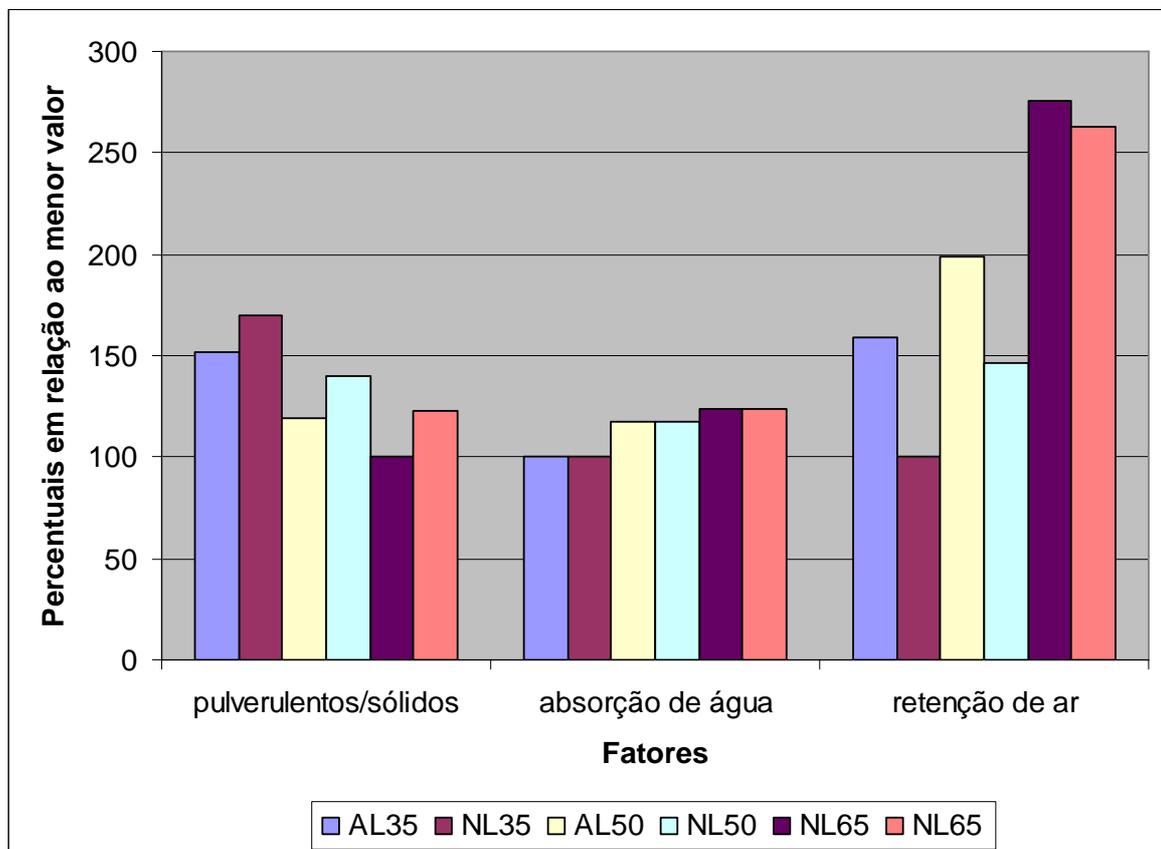


FIGURA 35 - Diferenças relativas entre as misturas AL e NL 35, 50 e 65 para os fatores de material pulverulento em relação aos sólidos totais, água absorvida pelos agregados em relação à água total e ar aprisionado acidentalmente

Com os dados da tabela 19 e a observação do comportamento dos fatores na figura 35, pode-se inferir que:

- a) a quantidade de material pulverulento (partículas menores do que 75  $\mu\text{m}$ ), que variou de 16,3% a 24,7%, provocou uma tendência favorável à não ocorrência de exsudação nos pares de concreto AL e NL 35, decrescendo no sentido dos pares AL e NL 65. Segundo GONÇALVES; MOURA e DAL MOLIN (2002), uma quantidade maior de partículas finas difundidas em toda a mistura, atua como barreira física ao movimento ascendente da água;
- b) os percentuais entre 18,6% a 23,1% de toda a água contida nas misturas pode ter sido absorvida pelos agregados. Com isso ficou diminuída a água livre e conseqüentemente houve uma tendência mais favorável à ausência de exsudação nos pares de concreto AL e NL 65, decrescendo no sentido dos pares AL e NL 35;
- c) o teor de ar aprisionado no intervalo de 1,24% a 3,41% provocou melhores condições de não ocorrência de exsudação nos pares de concreto AL e NL 65, decrescendo no sentido de AL e NL 35. Segundo NEVILLE (1997) aparentemente as bolhas de ar mantêm as partículas em suspensão, de modo que se reduz a sedimentação e a água não é expelida da mistura.

#### 6.3.4 Retração Plástica

Os resultados da retração plástica máxima dos corpos de prova estão representados na tabela 20, e as figuras 35, 36 e 37 mostram a evolução da retração plástica ao longo do tempo.

TABELA 20 - Retração plástica total sofrida pelo concreto

Mistura	Retração ( $\text{mm/mm} \times 10^{-6}$ )
AL 35	649,1
NL 35	630,8
AL 50	623,9
NL 50	329,7
AL 65	615,6
NL 65	222,1

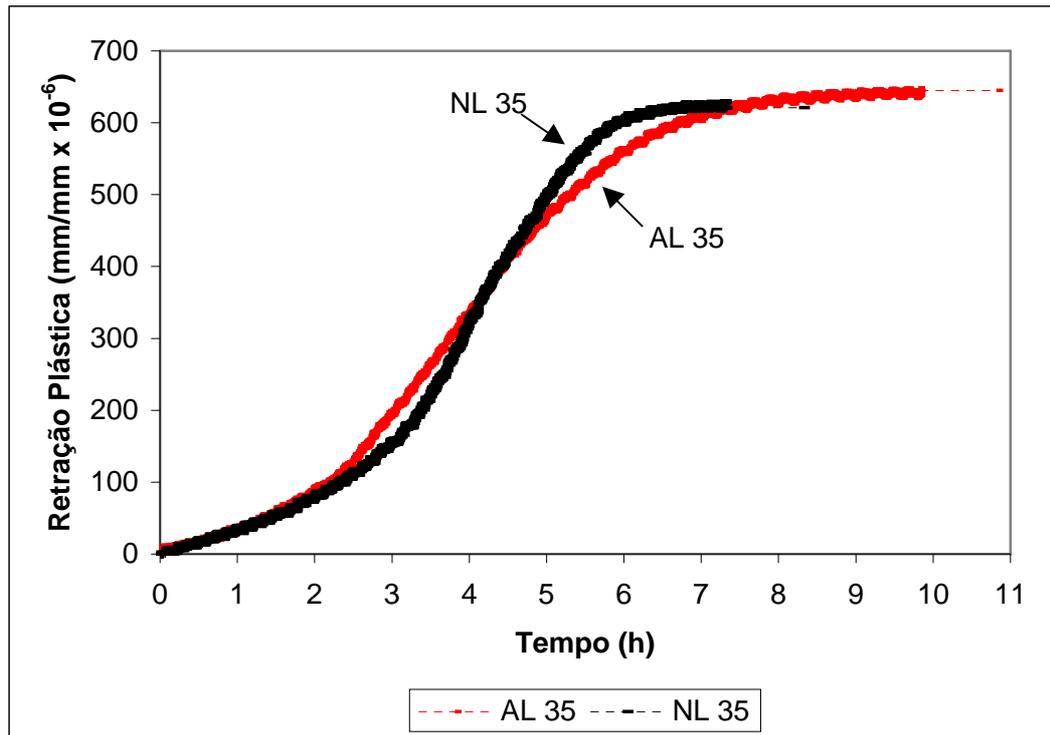


FIGURA 36 - Evolução da retração plástica acumulada nos concretos AL 35 e NL 35

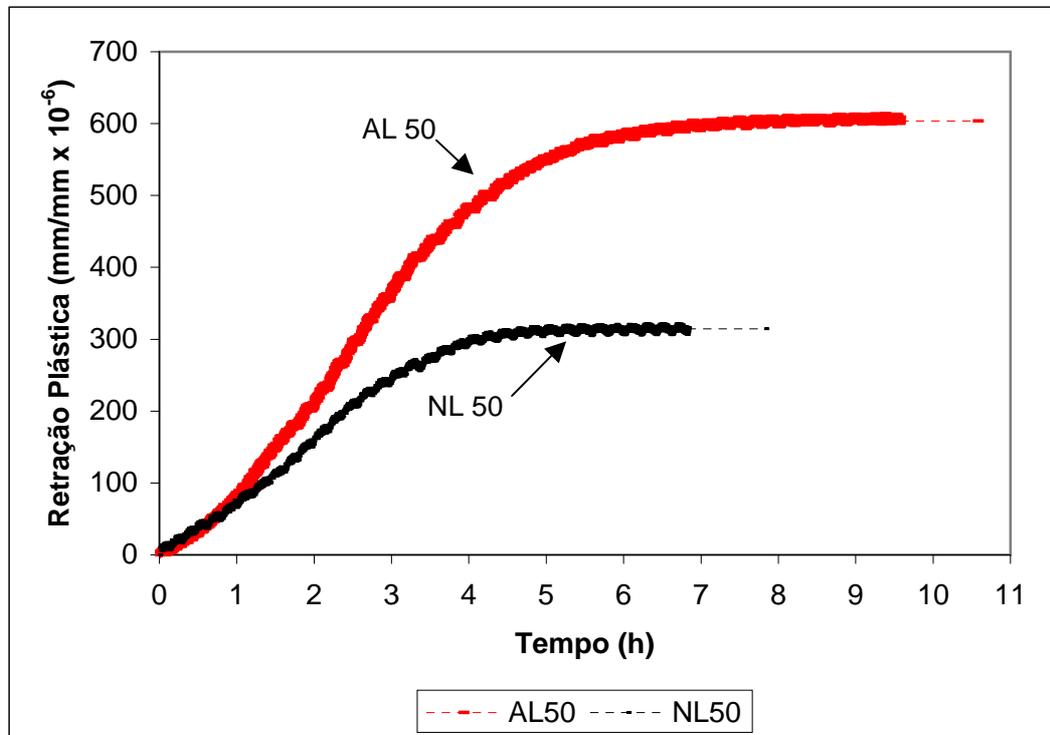


FIGURA 37 - Evolução da retração plástica acumulada nos concretos AL 50 e NL 50

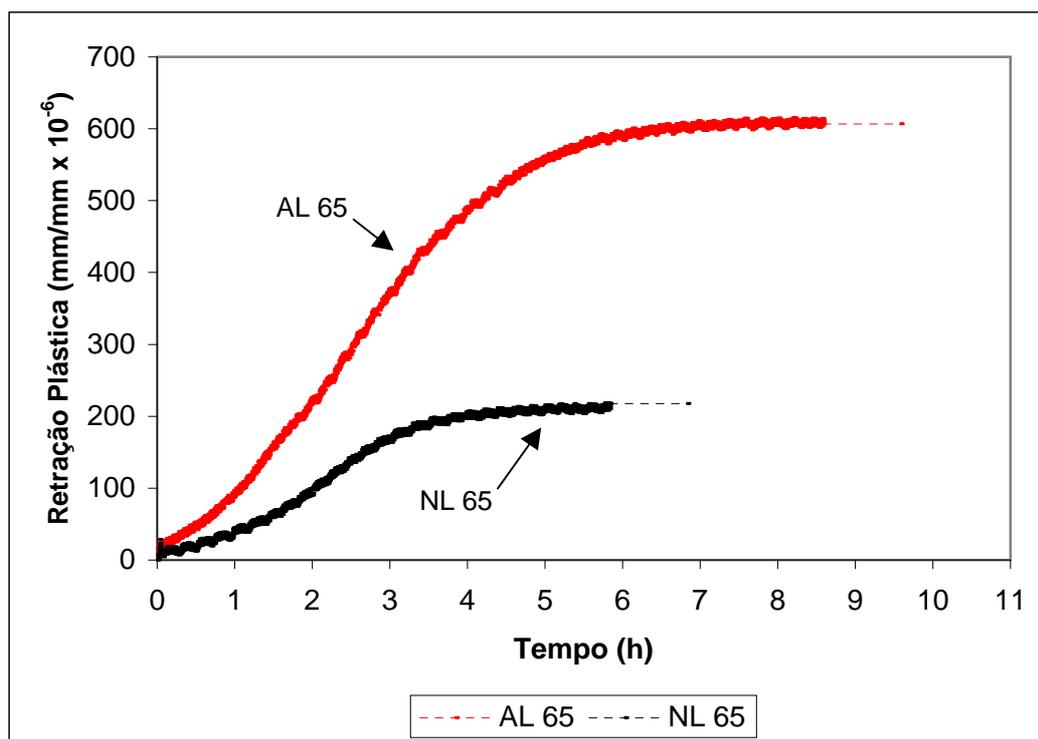


FIGURA 38 - Evolução da retração plástica acumulada nos concretos AL 65 e NL 65

Como observação importante, deve ser informado que o tempo máximo gasto com a manipulação da mistura e moldagem dos corpos de prova variou de 20 a 40 minutos. Assim, visando a padronização, para a retração máxima mostrada na tabela 20 e o traçado dos gráficos acima, as medidas de retração iniciaram em 40 minutos após o contato da água com o cimento.

Analisando-se os gráficos 36, 37 e 38, é possível observar que todas as misturas apresentaram forma característica similar, com a retração evoluindo de modo praticamente linear com o tempo e após um determinado período, apresentando tendência estacionária. A escalada dos valores da retração retrata a diminuição volumétrica do concreto, devida à tensão capilar pela saída de água da mistura no estado fresco. A fase de estabilidade reflete o equilíbrio de forças, com o desenvolvimento de rigidez no processo de endurecimento.

Entre as diferentes misturas de cada grupo, observa-se na figura 39 que o valor máximo da retração foi decrescente no sentido de AL 35 para AL 65 bem como de NL 35 para NL 65.

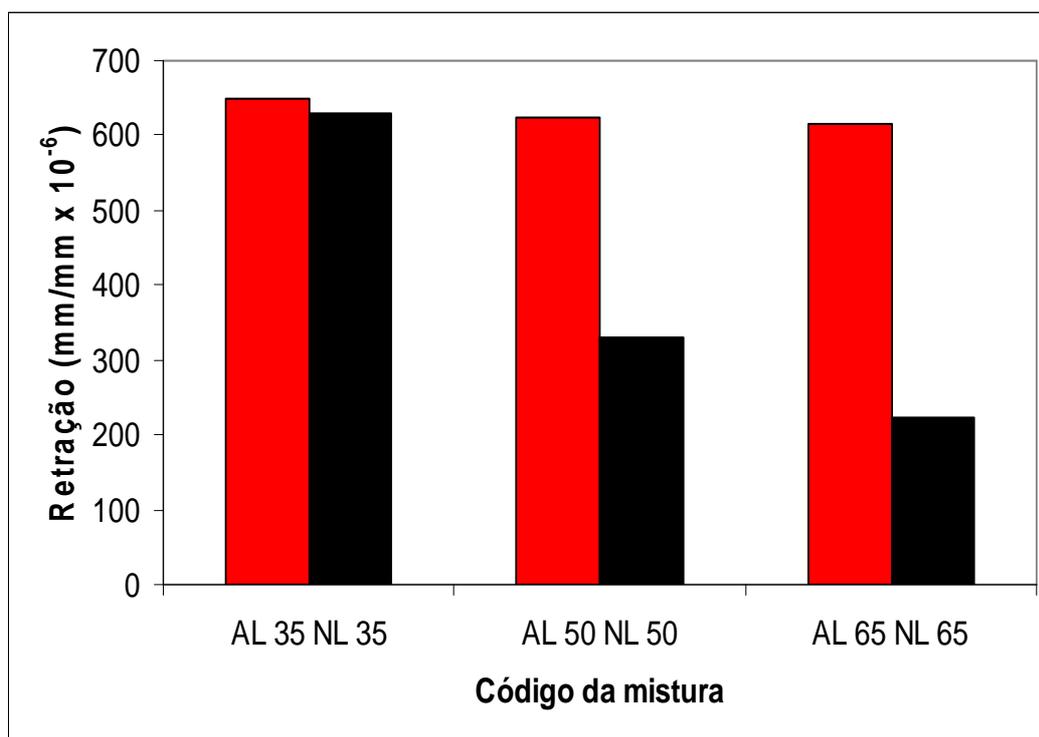


FIGURA 39 – Comparação dos valores obtidos de retração máxima das amostras para as misturas AL E NL 35, 50 E 65

Esse comportamento pode ser explicado pela ocorrência de dois fatores concorrentes: um deles é que no mesmo sentido do decréscimo da retração houve um aumento da relação  $a/c$  nas misturas. Dessa forma, a maior quantidade de água que ascendeu da mistura para atender a quantidade evaporada, pode ter gerado uma tensão capilar menor; o outro fator é a maior relação agregado/cimento, pois uma menor quantidade de partículas de cimento reduz o processo de hidratação do cimento que por si só provoca redução dimensional da mistura. ALMUSALLAM et al. (1998) demonstraram experimentalmente, que em concretos curados ao ar livre sob as mesmas condições, mas com relações  $a/c$  diferentes, a exsudação cresceu quanto maior foi a relação  $a/c$ ; paralelamente a evaporação decresceu. Além disso, a evaporação decresceu com menor conteúdo de cimento. Tal combinação de aumento da exsudação com diminuição da evaporação favorecem a diminuição da retração.

A figura 39 mostra também que as misturas AL apresentaram valores máximos de retração maiores que seus pares NL. Da mesma forma, o tempo necessário para atingir esses valores ocorreu entre 7 a 9 horas para as misturas AL e 5 a 7 horas para as misturas NL, como pode ser visto na figura 40.

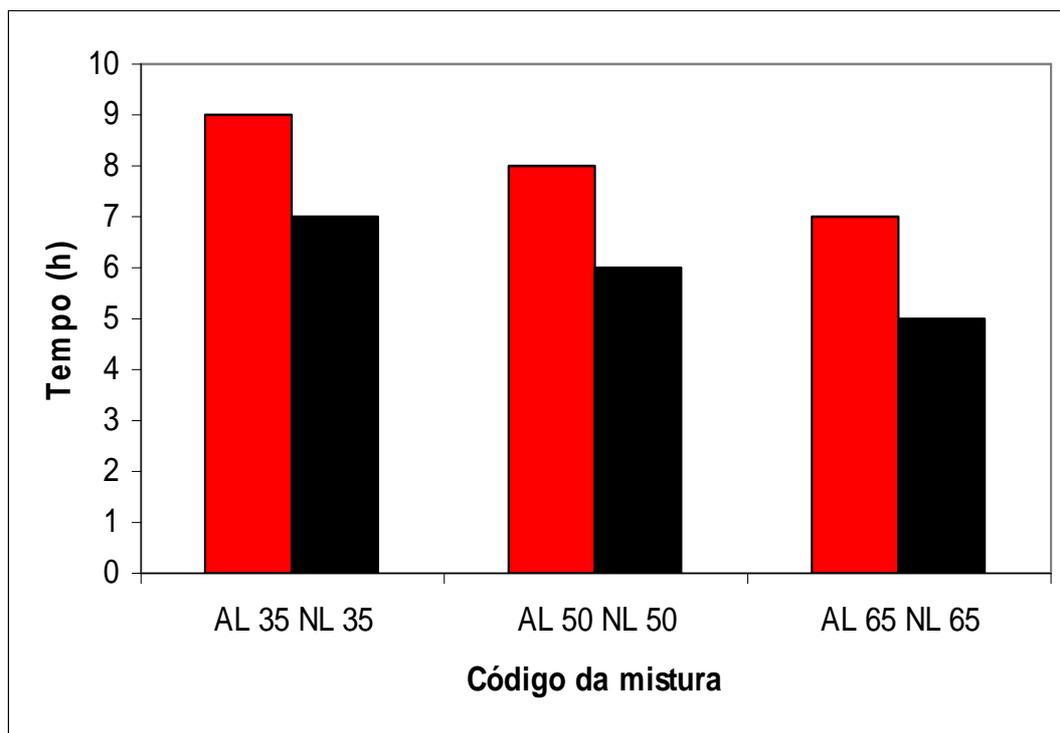


FIGURA 40 – Comparação dos valores obtidos do tempo necessário para ocorrer a retração máxima das amostras para as misturas AL e NL 35, 50 e 65

Como a retração plástica está relacionada à saída de água da mistura e à taxa de evaporação, em iguais condições de exposição (mesma evaporação), era de se esperar uma maior retração nas misturas NL, pois o maior teor de materiais pulverulentos na mistura diminui a exsudação (taxa de saída de água). Por outro lado, o tempo entre o início e fim da pega foi maior para todas as misturas AL. Dessa forma, mesmo sofrendo maior tensão de deformação, as misturas NL apresentaram resistência mais cedo, contendo o processo de retração. O desenvolvimento da resistência, portanto, explica a diferença do valor da retração máxima e o tempo para atingi-la apresentada entre os pares de mistura AL e NL. KRONLOF; LEIVO e SIPARI (1995) corroboram este fato ao observarem que quanto mais tarde ocorreu o endurecimento da argamassa, mais se prolongou a ação da pressão capilar.

Além dos dados acima, pode-se fazer algumas observações de caráter prático, a partir de observações e resultados dos ensaios:

- a) nas condições de laboratório desta pesquisa, não foram observadas fissuração das amostras, comprovado pela ausência de comportamento atípico da retração, conforme relatado na experiência de KRONLOF; LEIVO

e SIPARI (1995). Além disso, de acordo com MANNIS (1993) apud KRONLOF; LEIVO e SIPARI (1995), valores menores do que 1 mm/m em concreto convencional, conforme os apresentados pelos corpos de prova testados, provavelmente não causam fissuração plástica.

- b) na presente pesquisa a retração medida foi a retração livre. Na prática, a retração é mais ou menos restringida e isso aumenta a possibilidade de fissuração (TANESI; FIGUEIREDO, 1999). Além disso, circunstâncias ambientais de elevação da temperatura, diminuição da umidade do ar e aumento da velocidade do vento, também criam condições mais favoráveis à ocorrência de fissuração (ALMUSALLAM et al., 1998).

## 6.4 COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO

### 6.4.1 Resistência à Compressão Axial

A temperatura do meio líquido em que foram curadas as amostras para os primeiros 7 dias foi de  $22 \pm 2$  °C; dos 7 aos 28,  $23 \pm 2$  °C e dos 28 aos 91 dias foi de  $24 \pm 2$  °C, conforme verificação dos registros realizados nos períodos.

Na tabela 21 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova rompidos aos 7, 28 e 91 dias. A ilustração dos dados é mostrada na figura 41.

TABELA 21 - Resistência à compressão axial dos concretos

Código da Mistura	Idade		
	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
<b>AL35</b>	26,95	46,30	50,12
<b>NL35</b>	37,77	54,21	63,23
<b>AL50</b>	22,84	38,88	47,42
<b>NL50</b>	26,15	41,35	55,34
<b>AL65</b>	21,02	33,61	36,16
<b>NL65</b>	20,74	34,62	39,49

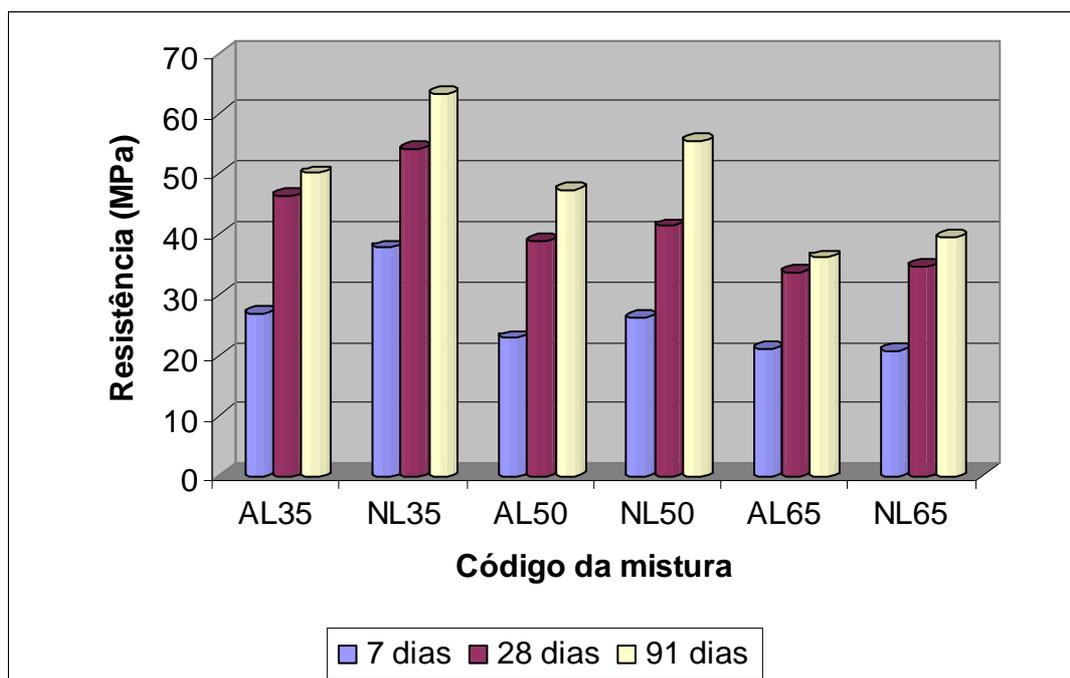


FIGURA 41 - Evolução da resistência aos 7, 28 e 91 dias para todas as misturas

De uma forma geral, os concretos apresentaram resultados esperados. Tanto os concretos AL quanto NL mostraram tendência de crescimento da resistência no sentido das amostras com maior idade, composições com maior conteúdo de cimento e menor relação  $a/c$ .

A figura 42 estampa os percentuais de diferença entre as resistências dos pares de mistura aos 7, 28 e 91 dias.

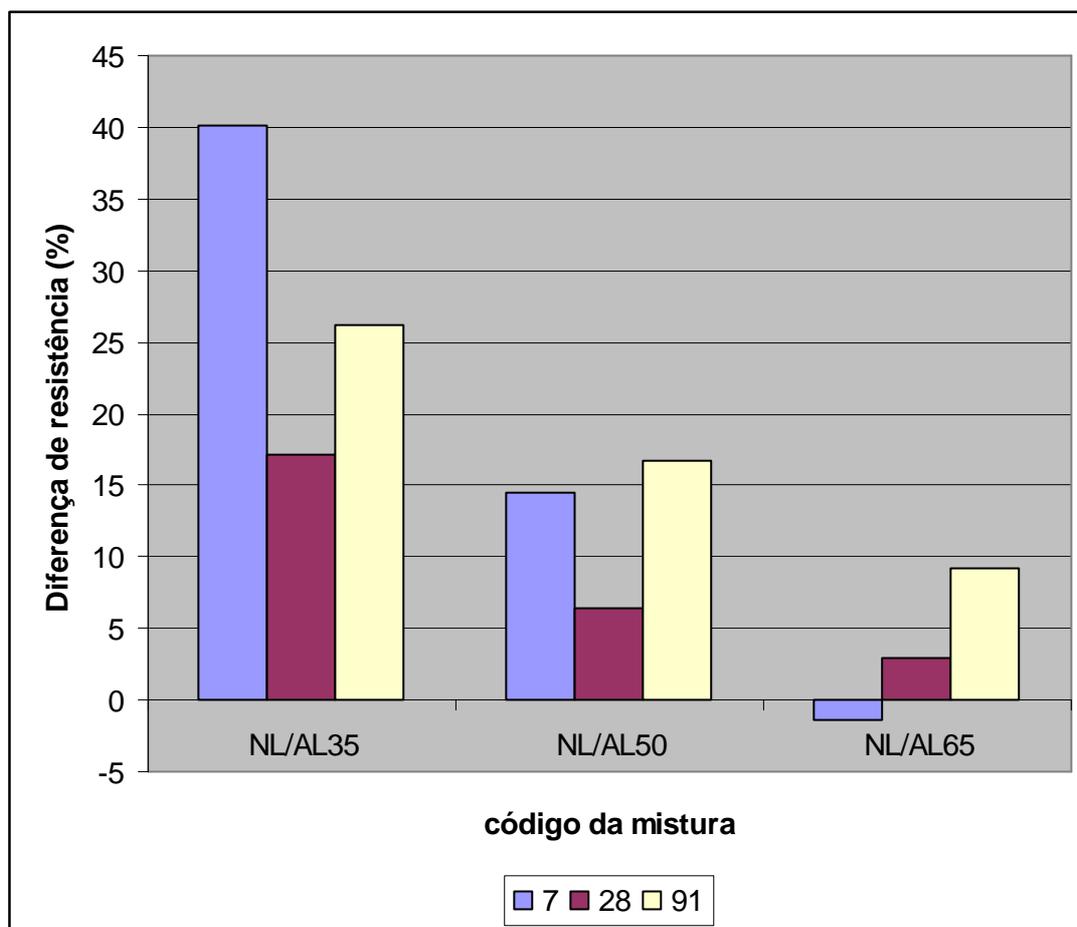


FIGURA 42 - Percentual de diferença da resistência entre as misturas NL e AL aos 7, 28 e 91 dias

As misturas AL apresentaram valores de resistência mais baixa que seus pares de NL, em todas as idades, exceto na comparativa aos 7 dias.

Alguns fatores que estão relacionados à resistência do concreto ao interagirem podem ser os responsáveis pelos valores mais elevados de resistência nas misturas NL:

- a) os teores de ar aprisionado no concreto fresco, apresentados na tabela 15, são menores para todas as misturas NL, e conseqüentemente, a massa específica é maior. A diferença no volume de vazios nas misturas é devida principalmente à compacidade dos materiais componentes e à ação do aditivo. A massa unitária, mostrada na tabela 12, é de  $1,67 \text{ g/cm}^3$  para a NL e de  $1,62 \text{ g/cm}^3$  para AL, o que indica que a NL possui maior compacidade, proporcionando conseqüentemente, menor volume de vazios à mistura.

Mas, esta diferença está limitada à 3%. Portanto, a ação do aditivo, em dosagem maior nas misturas AL, pode ser a principal responsável pela diferença de ar incorporado entre as misturas AL e NL. PAPAYIANNI et al. (2005), em pesquisa sobre a influência do tipo de superplastificante no concreto, observaram que na maioria das misturas a inclusão do aditivo produziu aumento no índice de vazios do concreto fresco. De qualquer forma, a diferença de ar aprisionado abaixo de 0,74% para todos os pares de mistura, não consegue justificar sozinha a diferença entre as resistências, especialmente entre AL e NL35, que aos 28 dias atingiu 17%. Segundo NEVILLE (1997), o efeito de um teor de ar de 0,74%, dentro dos intervalos apresentados pelos concretos ensaiados, poderia reduzir a resistência em torno de 4%.

- b) a absorção de água pelos agregados é maior nas misturas NL do que nas AL. Assim, a relação a/c efetiva dos concretos NL ficou menor. Os resultados dos ensaios de absorção dos agregados, apresentados na tabela 12, mostram que a absorção da NL é 2,96%, enquanto que de AL é 2,81%. Assim, comparativamente, a diferença na relação a/c limitou-se de 0,3% a 0,5%, dependendo do par analisado. Portanto, também esta ínfima diferença, bem como cumulativamente à relativa ao teor de ar aprisionado, não são capazes de explicar as diferenças de resistência entre os concretos AL e NL.
- c) de acordo com a revisão da literatura, a principal causa provável é a intensificação dos efeitos físicos (fíler e nucleação heterogênea) causados pela diferença de teor de material pulverulento.

A nucleação heterogênea é provavelmente o principal efeito físico envolvido. De acordo com LAWRENCE; CYR e RINGOT (2005), é um processo que conduz a uma ativação química da hidratação do cimento. Relaciona-se à nucleação de hidratos em partículas minerais estranhas, as quais catalizam o processo de nucleação pela redução da barreira de energia. A intensidade do processo depende da finura das partículas minerais da adição (a diminuição do tamanho de partícula favorece a nucleação), da afinidade do pó mineral para os hidratos do cimento (relacionada à natureza do mineral usado). Além disso, depende da quantidade de cimento e da

adição mineral usada (a probabilidade para os locais de nucleação estarem próximos das partículas de cimento fica assim aumentada), o que pode explicar porque as diferenças da resistência entre os concretos NL e AL foram maiores nas misturas mais ricas.

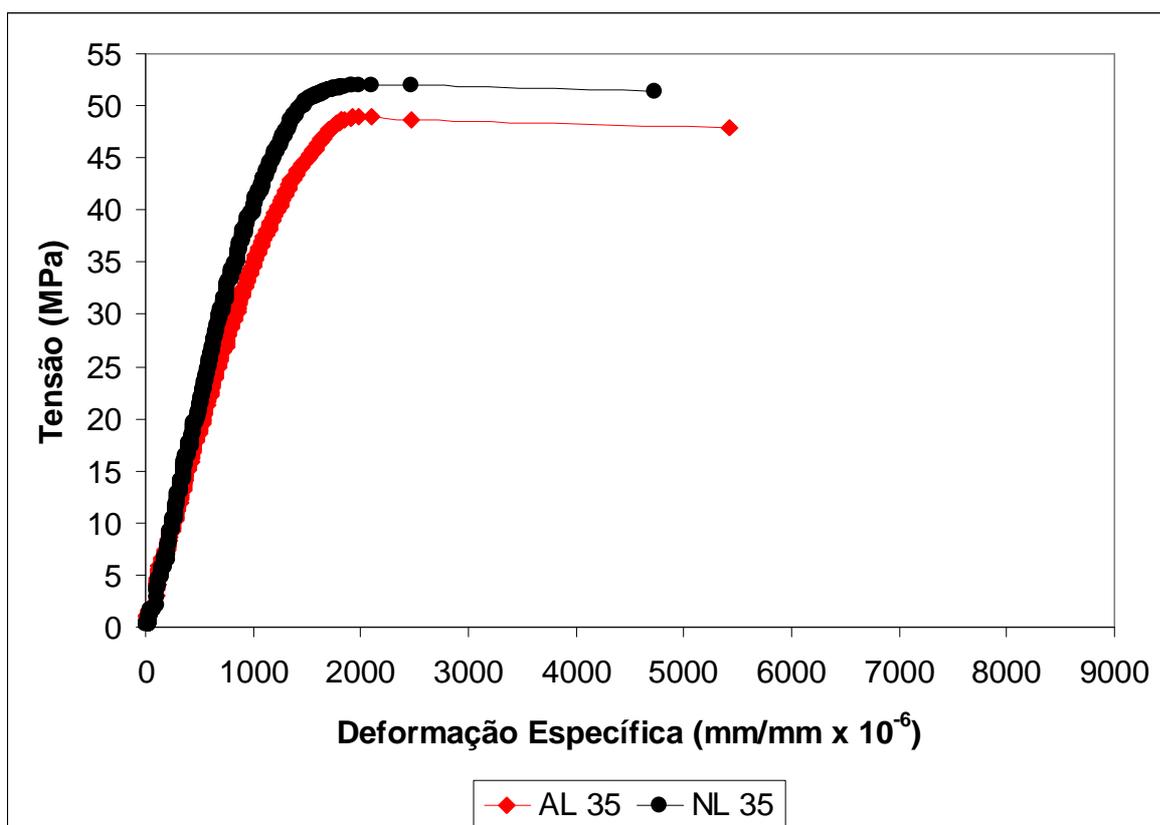
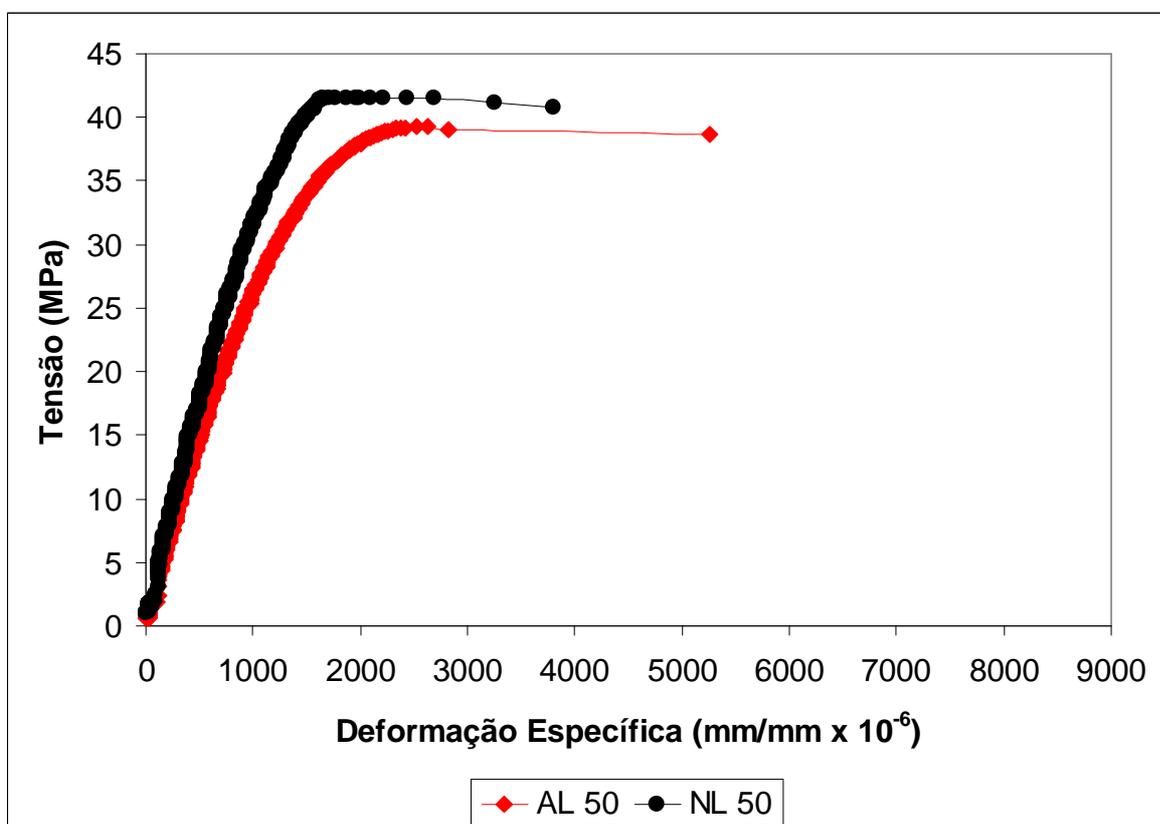
O efeito filler pode ter influenciado em menor intensidade, pois não houve variação significativa na porosidade inicial das misturas, a qual pode ser relacionada às variações da massa específica e do teor de ar de misturas frescas. De acordo com UCHIKAWA; HANEHARA e HIRAO (1996) o efeito filler ocorre quando o pó mineral uniformemente distribuído na parte matriz do concreto preenche os poros, dificulta a segregação, reduz o tamanho dos produtos de reação da hidratação e inibe a deposição de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Como resultado os poros capilares de diâmetro de 100nm e 50nm são reduzidos e é inibida a formação da zona de transição.

Os efeitos físicos citados produzem uma melhora nas fases pasta de cimento hidratada e zona de transição, intensificada nas misturas NL. É nelas que reside a diferença de resistência entre os concretos AL e NL, pois segundo DONZA; CABRERA e IRASSAR (2002), em concretos convencionais, as fases pasta de cimento hidratada e a zona de transição, governam a resistência do concreto.

#### 6.4.2 Módulo de Elasticidade

A temperatura do meio líquido em que foram curadas as amostras foi de  $22,5 \pm 2$  °C , conforme verificação dos registros realizados no período.

As figuras 43, 44 e 45 espelham comparativamente o comportamento tensão *versus* deformação dos corpos de prova testados aos 28 dias, para misturas similares.

FIGURA 43 - Tensão *versus* deformação dos concretos AL 35 e NL 35FIGURA 44 - Tensão *versus* deformação dos concretos AL 50 e NL 50

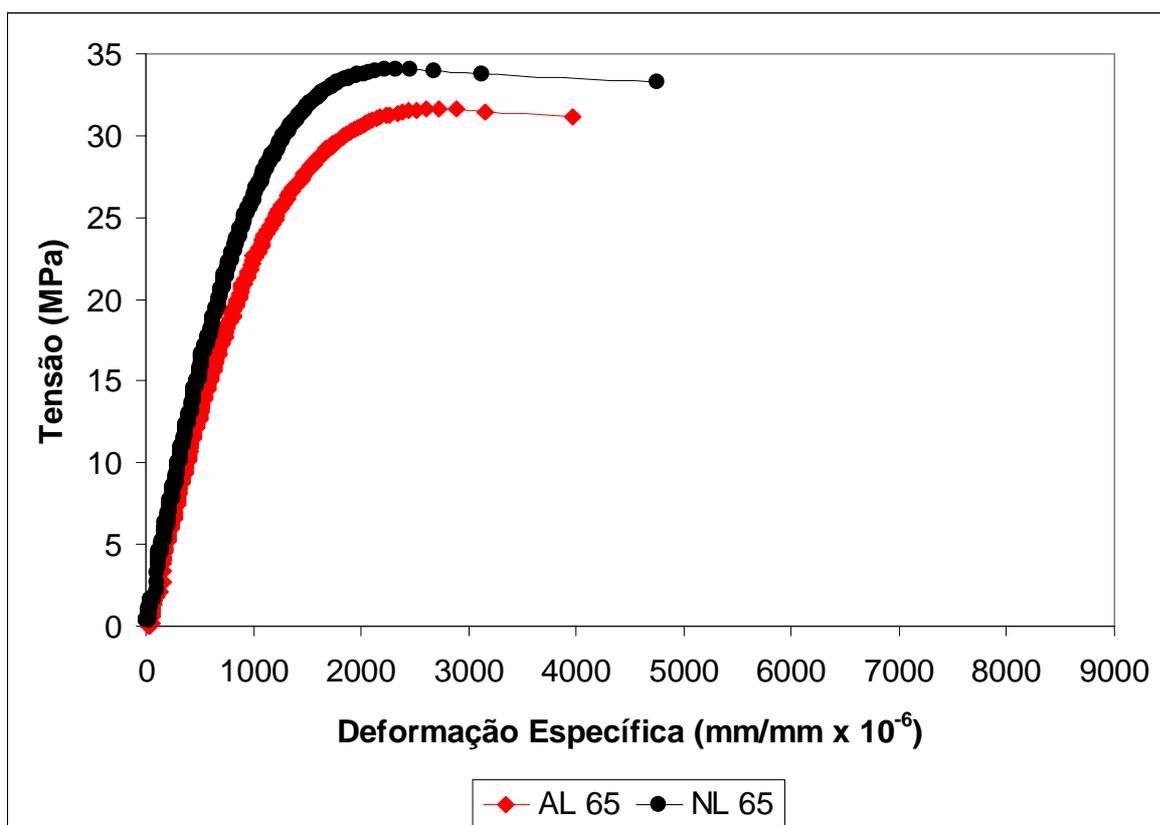


FIGURA 45 - Tensão versus deformação dos concretos AL 65 e NL 65

Na tabela 22 é apresentado o valor do módulo de elasticidade de cada mistura, obtido com os resultados dos ensaios e a metodologia de cálculo descrita anteriormente. A figura 46 ilustra esses valores.

TABELA 22 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade dos concretos AL e NL aos 28 dias

Código da mistura	Módulo de Elasticidade (GPa)
AL35	37,82
NL35	41,51
AL50	30,06
NL50	35,59
AL65	24,44
NL65	29,87

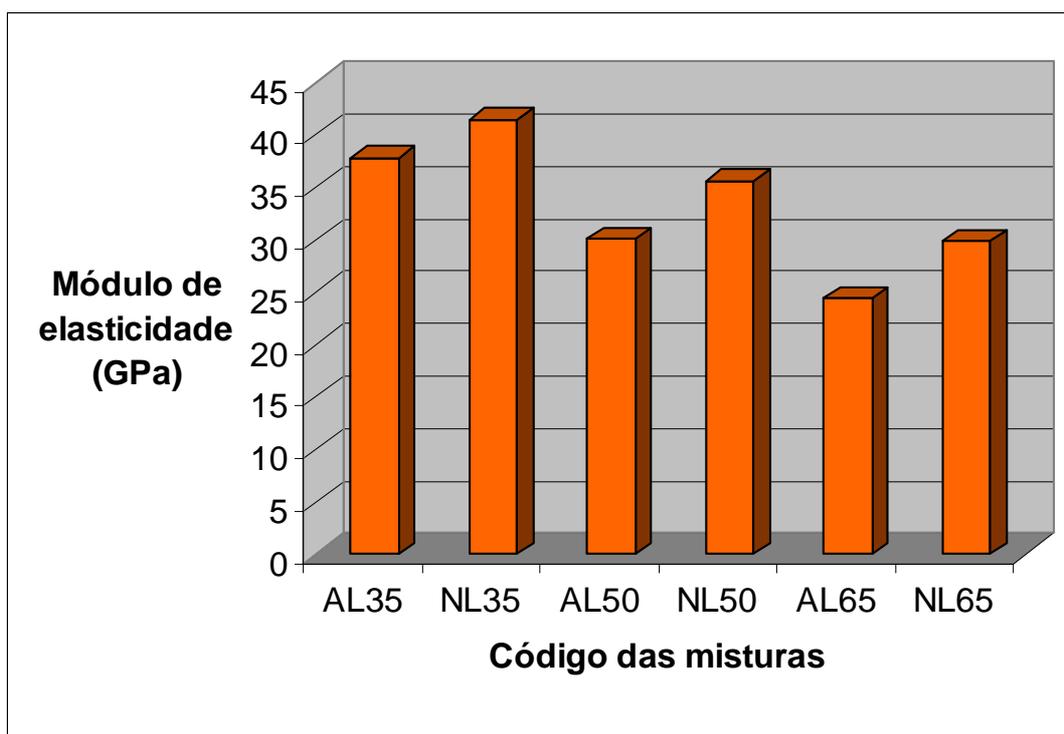


FIGURA 46 - Módulo de elasticidade dos concretos AL e NL aos 28 dias

De uma forma geral, os concretos apresentaram resultados esperados. Assim como nos ensaios de resistência à compressão, tanto os concretos AL quanto NL mostraram tendência de crescimento do módulo de elasticidade no sentido das composições com maior conteúdo de cimento e menor relação  $a/c$ .

Na figura 47 são ilustradas as diferenças percentuais entre os pares de mistura AL e NL.

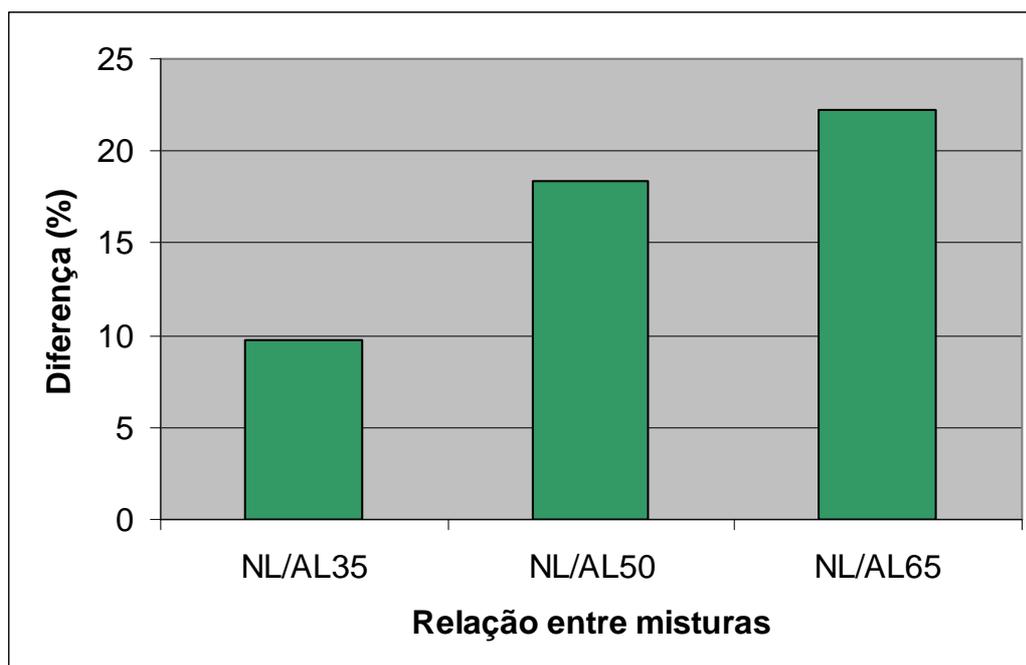


FIGURA 47 - Percentual de diferença do módulo de elasticidade entre as misturas NL e AL aos 28 dias

Sob mesma tensão, a deformação das amostras de concreto AL são maiores do que as NL, conseqüentemente os módulos de elasticidade dos concretos AL são menores do que NL.

Embora os valores do módulo de elasticidade em todas as misturas NL tenham sido maiores que os de AL, como observado nos ensaios de resistência à compressão, as diferenças entre as resistências à compressão foram maiores quanto mais rica a mistura. Para o módulo de elasticidade observou-se o contrário.

Segundo NEVILLE (1997) não há dúvida que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, mas não existe um acordo sobre a forma exata dessa dependência. Comparando resultados de ensaios às correlações normalizadas entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, LEVY (2001) encontrou diferenças maiores para resistências à compressão mais elevadas. A partir das observações acima, pode-se constatar que as correlações entre esses dois fenômenos que conduzem a valores de módulo de elasticidade menores aproximam os resultados, atenuando a diferença entre eles, ao passo que correlações que conduzem a valores maiores realçam essa diferença. Nessas circunstâncias, pode então haver uma inversão na tendência, como constado nesta pesquisa.

### 6.4.3 - Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica

O meio líquido em que foram curadas as amostras apresentou temperatura de  $22,5 \pm 2$  °C , conforme verificação dos registros realizados no período.

A tabela 23 mostra os resultados obtidos com amostras de 28 dias de idade que são ilustrados na figura 48.

TABELA 23 - Características físicas das misturas de concreto aos 28 dias conforme a NBR 9778

Característica	Unidade	AL 35	NL 35	AL 50	NL 50	AL 65	NL 65
Absorção de água por imersão	%	4,94	4,42	5,86	5,35	5,97	5,52
Índice de vazios	%	12,01	10,92	13,90	12,90	14,12	13,21
Massa Específica Seca	kg/dm <sup>3</sup>	2,43	2,47	2,37	2,41	2,37	2,39
Massa Específica Saturada	kg/dm <sup>3</sup>	2,55	2,58	2,51	2,54	2,51	2,52
Massa Específica Real	kg/dm <sup>3</sup>	2,77	2,77	2,76	2,77	2,75	2,76

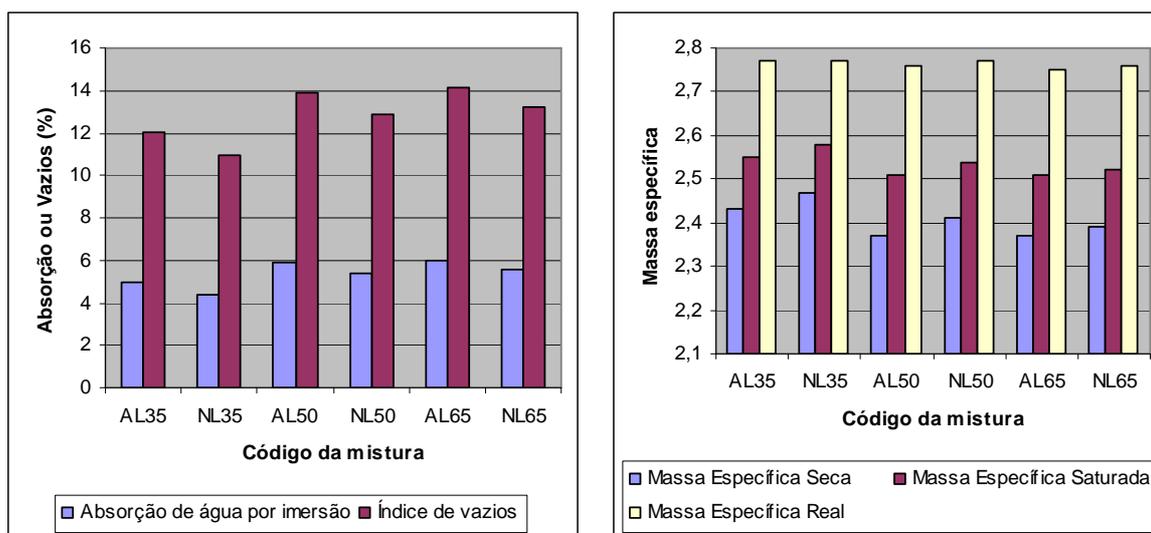


FIGURA 48 - Representação dos resultados dos ensaios das amostras de AL e NL aos 28 dias

Todas as misturas NL apresentaram percentuais de absorção e vazios inferiores aos pares AL. Conseqüentemente, a massa específica seca e massa específica saturada foram maiores para os pares de concreto NL.

Esses resultados estão em concordância com os encontrados no ensaio de resistência à compressão, pois esta é inversamente proporcional à porosidade total, ligada ao índice de vazios (NEVILLE, 1997).

A diferença do teor total de material pulverulento dos agregados em relação ao agregado miúdo pode ser apontada como fator que influenciou a porosidade. As misturas AL e NL apresentam em torno de 6,0% e 13,5%, respectivamente, de fração abaixo de 75  $\mu\text{m}$ . Em pesquisa anterior, ÇELIK e MARAR (1996) já haviam observado que com a adição de pó até 15% foi atingido um valor mínimo para a absorção.

Na figura 49 é ilustrada a diferença percentual entre absorção e vazios do concreto, entre os pares de mistura AL e NL aos 28 dias.

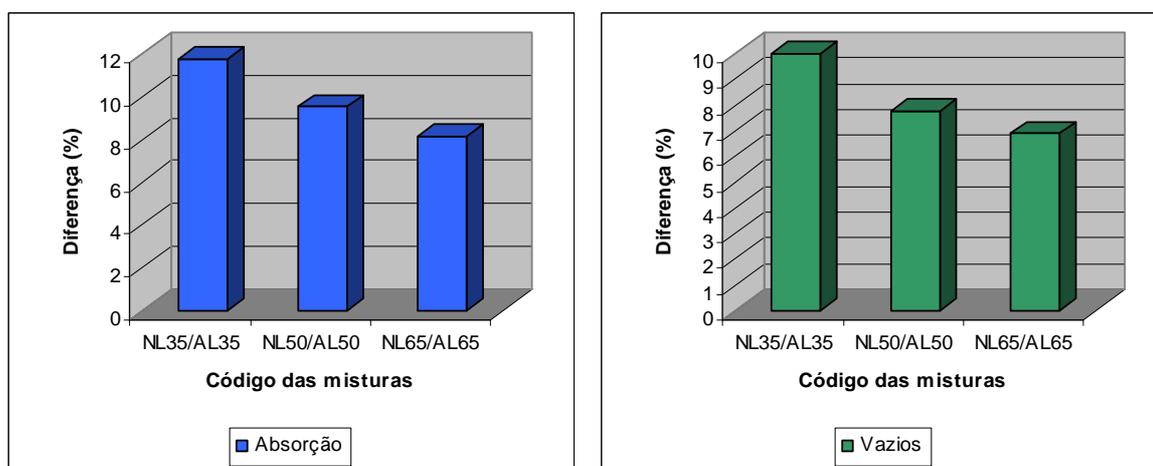


FIGURA 49 - Percentual de diferença da absorção e dos vazios entre os concretos NL e AL aos 28 dias

As diferenças entre absorção e volume de vazios totais foram maiores quanto mais rica a mistura. Essa mesma tendência, observada nos resultados do ensaio de resistência à compressão, corrobora as análises já realizadas.

## 7 CONCLUSÕES

Das características físicas, observou-se que:

-as classificações granulométricas da AL e NL não se enquadram aos limites prescritos pela NBR 7211. Para apresentarem granulometria contínua, tanto a AL quanto a NL necessitam de correção no processo produtivo de forma a reduzir as quantidades retidas nas peneiras 8 e 16 e elevar o material retido nas peneiras 4, 50 e 100;

-no material pulverulento não foram detectadas impurezas orgânicas acima do nível preconizado pela NBR 7220. Mesmo com peneiramento da NL realizado conforme a NBR 7217, não se obteve a redução da fração passante na peneira 200 para o limite máximo da norma NBR 7211 para o concreto submetido ao desgaste superficial;

-a AL e a NL apresentaram valores de índices de absorção que podem interferir nas propriedades do concreto fresco. Conforme observado nesta pesquisa, podem ter influenciado na exsudação e retração plástica.

Da análise dos materiais antes e após a lavagem, constatou-se que:

-o processo de lavagem em planta, realizado com classificador rotativo, mostrou-se eficaz na medida em que reduziu o teor de material pulverulento da areia britada, determinado pela NBR 7219, de 13,22% (NL) para 5,73% (AL), tornando possível sua utilização em atendimento à NBR 7211. O processo de classificação retirou, além de parte do material pulverulento, porções de outras frações granulométricas acima desta. A soma destas quantidades chegou a 9% de todo o material processado.

Da dosagem dos concretos com AL e NL, verificou-se que:

-o teor de argamassa de 63% para as famílias de concreto AL e NL determinado no método de dosagem, conduz a misturas com maior quantidade de areia do que brita, o que é pouco usual em obras;

-com o método de dosagem adotado, para um abatimento de 90mm, a família de concretos AL necessitou de maior quantidade de água na mistura do que NL. Como as relações a/c nas misturas AL50 e NL50 ultrapassaram a meta pretendida visando famílias de concreto que atendam aos limites preconizados pela NBR 6118, foi necessário a utilização de aditivo redutor de água. A dosagem para AL 50 foi mais alta

e reduziu a água de amassamento em 14%. Com dosagem mais baixa, NL 50 que reduziu 9,8% a relação a/c.

No concreto no estado fresco, observou-se que:

- as famílias de mistura AL perderam abatimento menos rapidamente que as NL, devido ao efeito da maior dosagem de plastificante;

- foram observados retardos nos tempos de pega nas famílias de concreto AL e NL, mais pronunciados nas misturas AL. As dosagens utilizadas de 0,67% para os concretos NL e 1,12% para AL, embora dentro dos teores de aditivo preconizados pelo fabricante, provocaram tal efeito colateral;

- foi observada a quase inexistência de exsudação em todas as misturas. Este comportamento em comum para misturas desiguais pode ser explicado pela ação de vários fatores, atuando diferentemente em cada par de misturas. Alguns favoravelmente num sentido ou no outro, de modo que, combinadamente, mostraram resultado semelhante.

- as misturas AL apresentaram valores máximos de retração maiores que seus pares NL principalmente devido ao maior efeito de retardo da pega observado nos concretos AL, que conseqüentemente, demoraram mais para desenvolver resistência e equilibrar as tensões de retração.

No concreto no estado endurecido, observou-se que:

- as misturas NL apresentaram maior resistência à compressão do que os pares AL em quase todas as idades. Os resultados apontam que a principal causa é a intensificação dos efeitos físicos causados pela diferença de teor de material pulverulento. A nucleação heterogênea é provavelmente o principal efeito físico envolvido;

- o módulo de elasticidade dos concretos AL aos 28 dias é menor do que os NL. Os resultados dos ensaios mostraram que sob mesma tensão, as deformações das amostras de concreto AL são maiores do que as NL. O percentual de diferença entre o módulo de elasticidade dos concretos NL e AL apresentou tendência de crescimento da mistura rica para a pobre;

- todas as misturas NL apresentaram percentuais de absorção e vazios inferiores aos pares AL. Conseqüentemente, a massa específica seca e massa específica saturada foram maiores para os pares de concreto NL. Esses resultados

estão em concordância com os encontrados no ensaio de resistência à compressão, pois esta é inversamente proporcional à porosidade total, ligada ao índice de vazios.

Face ao acima exposto e levando em consideração o método de dosagem e parâmetros adotados, a areia britada não lavada, embora não atendendo aos limites de teor de materiais pulverulentos da NBR 7211, mostrou-se mais adequada ao uso em concreto.

## 8 PERSPECTIVAS

Como sugestões para futuras pesquisas, visando a comparativa da areia britada lavada e não lavada ou aprofundando questões levantadas nesta pesquisa, são propostos os temas abaixo:

- avaliação da areia britada lavada e não lavada frente a outros métodos de dosagem, tipos de cimento e aditivos;
- identificação e quantificação dos efeitos do teor de material pulverulento nas propriedades do concreto;
- viabilidade do aproveitamento do pó resultante do processo de britagem que é carregado pelo vento;
- avaliação do processo de britagem visando a oferta de produtos mais diversificados para atender demandas específicas;
- avaliação do processo de nucleação nos concretos com finos;
- avaliação do potencial de desenvolvimento da pozolanicidade dos finos;
- avaliação do concreto quanto à durabilidade.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de ensaios de agregados, concreto fresco e concreto endurecido**. São Paulo, 2000. Manual técnico.

ALMUSALLAM, A. A. et al. Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments. **Construction and Building Materials**, Amsterdam e Londres, v. 12, p. 353-358, 1998.

ANDRADE, L. B. **Metodologia para avaliação para uso de cinzas pesadas de termoeletricas como agregado natural para o concreto**. Florianópolis, 2004. 268 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados – amostragem. NBR NM 26. Rio de Janeiro, 2001a. 10 p.

\_\_\_\_\_. Agregados – redução de amostra de campo para ensaio de laboratório. NBR NM 27. Rio de Janeiro, 2001b. 7 p.

\_\_\_\_\_. Concreto – amostragem de concreto fresco. NBR NM 33. Rio de Janeiro, 1998a. 4 p.

\_\_\_\_\_. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.

\_\_\_\_\_. Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2003b. 8 p.

\_\_\_\_\_. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio. NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998b. 8 p.

\_\_\_\_\_. Concreto – Preparação de concreto em laboratório. NBR NM 79. Rio de Janeiro, 1996a, 8 p.

\_\_\_\_\_. Concreto – Determinação da exsudação. NBR NM 102. Rio de Janeiro, 1996b. 3p.

\_\_\_\_\_. Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Procedimentos. NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994a. 9 p.

\_\_\_\_\_. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994b, 4 p.

\_\_\_\_\_ Projeto de estruturas de concreto – procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003c, 170 p.

\_\_\_\_\_ Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – método de ensaio. NBR 6467. Rio de Janeiro, 1987a. 5 p.

\_\_\_\_\_ Agregados para concreto – Especificação. NBR 7211. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

\_\_\_\_\_ Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987b. 5 p.

\_\_\_\_\_ Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos – Método de ensaio. NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987c. 2 p.

\_\_\_\_\_ Agregados – Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo – Método de ensaio. NBR 7220. Rio de Janeiro, 1987d. 3 p.

\_\_\_\_\_ Ensaio de qualidade de areia. NBR 7221. Rio de Janeiro, 1982a. 2 p.

\_\_\_\_\_ Materiais de pedra e agregados naturais. NBR 7225. Rio de Janeiro, 1993. 4 p.

\_\_\_\_\_ Agregado no estado solto – determinação da massa unitária – método de ensaio. NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982b. 3 p.

\_\_\_\_\_ Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. NBR 8522. Rio de Janeiro, 2003d, 9 p.

\_\_\_\_\_ Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão– índice de vazios e massa específica. NBR 9778. Rio de Janeiro, 1987e, 3 p.

\_\_\_\_\_ Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração. NBR 9832. Rio de Janeiro, 1992a. 3p.

\_\_\_\_\_ Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987f. 6 p.

\_\_\_\_\_ Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio. NBR 10342. Rio de Janeiro, 1992b. 2 p.

\_\_\_\_\_ Cimento portland – Determinação dos tempos de pega. NBR 11581. Rio de Janeiro, 1991. 3p.

BEDERINA, M. et al. Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 35, p. 1172-1179, 2005.

BROOKS, J. J.; MEGAT JOHARI, M. A.; MAZLOOM, M. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. **Cement & Concrete Composites**, Amsterdam e Londres, v. 22, p. 293–301, 2000.

BROWN, P. W. et al. Porosity/permeability relationships. In: ROY, D. M. et al. **Concrete microstructure porosity and permeability**. Washington, DC: Strategic Highway Research Program - National Research Council, 1993. p. 43-75.

CABRERA, O. A.; DONZA, H. A.; IRASSAR, E. F. Efecto del curado em los hormigones de alta performance. In: CONGRESO DE INGENIERIA 2000, v. 1, 2000, Buenos Aires. **Anais....**

CAMARINI, G.; ISHIKAWA, P. H. Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. In: CONFERENCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, v. 1, 2004, São Paulo. **Anais....**

CARNEIRO, A.; CINCOTTO M. A importância da diversidade granulométrica. **Téchne**, n. 27, p. 29-31, mar./abr. 1997.

CHANDRA, S.; BJORNSTROM, J. Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars—Part II. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam e Londres, v. 32, p. 1613–1619, 2002.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. **Cement and Concrete Research**. Amsterdam e Londres, 2005. Article in press

ÇELIK, T.; MARAR K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and concrete research**. Amsterdam e Londres, v. 26, p. 1121-1130, 1996.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR E. F. High-strength concrete with different fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 32, p. 1755-1761, 2002.

FREE SOFTWARE FOUNDATION. **Wikipédia**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Basalto>> Acesso em 09 mar. 2006.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Rio de Janeiro, 2005. 273 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) -Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência da utilização do resíduo de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, jan./mar. 2002.

GUIA INTERNET BRAZIL. **GuiaNet.** Disponível em: <<http://www.guianet.com.br/brasil/mapageologia.htm> > Acesso em 09 mar. 2006.

HANZIC, L.; ILIC R. Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete. **Cement and concrete research.** Amsterdam e Londres, v. 33, p. 1385-1388, 2003.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** 1. ed. São Paulo: PINI, 1992.

HO, D. W. S. et al. The use of quarry dust for SCC applications. **Cement and Concrete Research,** Amsterdam, v. 32, p. 505-511, 2002.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites.** Amsterdam e Londres, v. 25, p. 69-76, 2003.

KORKANÇ, M.; TUGRUL, A. Evaluation of selected basalts from Nigde, Turkey, as source of concrete aggregate. **Engineering geology.** Amsterdam e Londres, v. 75, p. 291-307, 2004.

KRONLOF, A.; LEIVO, M.; SIPARI, P. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. **Cement and Concrete Research.** Amsterdam e Londres, v. 25, p. 1747-1754, 1995.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. **Cement and Concrete Research.** Amsterdam e Londres, v. 35, p. 1092-1105, 2005.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** São Paulo, 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LI, G. et al. Effective Young's modulus estimation of concrete. **Cement and Concrete Research,** Amsterdam, v. 29, p. 1455-1462, 1999.

MELO NETO, A. A. de; REPETTE, W. L.; CINCOTTO, M. A. **Influência do teor de ativador e da idade de exposição na retração por secagem de argamassas com cimentos de escória ativada com silicato de sódio.** São Paulo: USP-Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica, 2003. 13 p. Boletim Técnico.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1 ed. São Paulo: Pini, 1994.

MOKAREM, D. W. **Development of concrete shrinkage performance specifications.** Blacksburg, Virginia, 2002. 236 f. Dissertation (**Doctor of Philosophy In Civil and Environmental Engineering**) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

NEVES, L.; LIMA, J. R. B. **Aplicação dos finos gerados pela produção de pedras britadas graníticas no concreto pré-misturado em substituição às areias naturais.** São Paulo, 2001. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NRMCA – NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. Plastic Shrinkage craking. **Concrete in practice.** Silver Spring, Maryland, 1998. 2 p.

PAPAYIANNI, I. et al. Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures. **Cement and Concrete Composites.** Amsterdam e Londres, v. 27, p. 217-222, 2005.

PAUL K, P. et al.. **An alternative to natural sand.** Kerala, Índia, 2003. 137 f. Monografia (B. Tech. degree in Civil Engineering) – Departament of Civil Engineering, Mahatma Gandhi University.

PINHEIRO, T. T. Materiais de construção. Setor otimista com o aumento da produção. **Brasil Mineral,** São Paulo, n. 190, p. 20-22, dez. 2000.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; COELHO, A. H.; GUTSTEIN, D. Metodologia para obtenção de agregado miúdo artificial a partir de processamento do pó-de-pedra. In: ENTAC 95, 1995, Rio de Janeiro.

QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. **The effects of aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete.** Austin: The University of Texas at Austin - International Center for Aggregates Research, 2004.

ROY, D. M. et al. Concrete microstructure and its relationships to pore structure, permeability, and general durability. In: ROY, D. M. et al. **Concrete microstructure porosity and permeability.** Washington, DC: Strategic Highway Research Program - National Research Council, 1993. p. 25-42.

SANTA CATARINA. Coordenadoria de Recursos Minerais. **Mapa geológico do Estado de Santa Catarina.** Florianópolis, 1987.

SIMPLEX. **Especificação de produto.** Lagoa Santa, 2003. Relatório técnico.

SVEDALA FAÇO. **Manual de britagem.** São Paulo, 1994. Relatório técnico.

TERRA, L. E. M. **Finos de pedreira para confecção de concreto estrutural: práticas recomendadas.** São Paulo, 2000, p. 65-71. In: 3º. Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, São Paulo, 2000.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP).** São Paulo: USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica, 1999. 25 p. Boletim Técnico.

TASDEMIR, C. Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. **Cement and Concrete Research**. Amsterdam e Londres, v. 33, p. 1637-1642, 2003.

TOPÇU, I. B.; UGURLU, A. Effect of use mineral filler on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**. Amsterdam, v. 33, p. 1071-1075, 2003.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; HIRAO, H. Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate. **Cement and Concrete Research**. Amsterdam e Londres, v. 26, p. 101-111, 1996.

UNIVERSIDADE DE BRASILIA. **Glossário geológico ilustrado**. Disponível em: <[www.unb.br/ig/glossario/verbete/rocha\\_acida.htm](http://www.unb.br/ig/glossario/verbete/rocha_acida.htm)> Acesso em 09 mar. 2006.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and design - Standard practice for concrete for civil works structures**. Washington, DC, 1994. 106 p. Engineer manual.

USGS - U.S. Geological Survey of the U.S. Department of the Interior. **Photo glossary of volcano terms**. Disponível em: <<http://volcanoes.usgs.gov/Products/Pglossary/basalt.html>> Acesso em: 15 mar. 2006a.

USGS - U.S. Geological Survey of the U.S. Department of the Interior. **Certificate of analysis - Icelandic Basalt, BIR-1**. Disponível em: <[http://minerals.cr.usgs.gov/geo\\_chem\\_stand/icelandic.pdf](http://minerals.cr.usgs.gov/geo_chem_stand/icelandic.pdf)> Acesso em: 15 mar. 2006b.

USGS - U.S. Geological Survey of the U.S. Department of the Interior. **Certificate of analysis - Basalt, Hawaiian Volcanic Observatory, BHVO-2**. Disponível em: <[http://minerals.cr.usgs.gov/geo\\_chem\\_stand/basaltbhvo2.pdf](http://minerals.cr.usgs.gov/geo_chem_stand/basaltbhvo2.pdf)> Acesso em: 15 mar. 2006c.

WIKIPÉDIA. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Basalto>> Acesso em 10 jan. 2006d.

## APÊNDICE

TABELA A1 - Massa específica das amostras de concreto fresco

AMOSTRA	CÓDIGO DA MISTURA					
	AL 35	AL 50	AL 65	NL 35	NL 50	NL 65
1 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.410	2.388	2.382	2.430	2.418	2.410
2 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.410	2.390	2.382	2.431	2.419	2.411
3 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.411	2.392	2.386	2.431	2.421	2.412
4 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.413	2.394	2.388	2.432	2.422	2.413
5 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.422	2.413	2.389	2.432	2.423	2.415
6 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.425	2.425	2.391	2.454	2.441	2.423
7 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.426	2.426	2.413	2.454	2.442	2.430
8 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.430	2.429	2.417	2.455	2.442	2.432
9 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.432	2.431	2.420	2.455	2.444	2.433
10 (Kg/m <sup>3</sup> )	2.433	2.431	2.421	2.456	2.444	2.433
Média (Kg/m <sup>3</sup> )	2.421	2.412	2.399	2.443	2.432	2.421
Média-10%(Kg/m <sup>3</sup> )	2.179	2.171	2.159	2.199	2.188	2.179
Média+10%(Kg/m <sup>3</sup> )	2.663	2.653	2.639	2.687	2.675	2.663
Média** (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.421</b>	<b>2.412</b>	<b>2.399</b>	<b>2.443</b>	<b>2.432</b>	<b>2.421</b>
DP	9,39	18,74	16,59	12,46	11,71	9,98
CV (%)	0,39	0,78	0,69	0,51	0,48	0,41

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A2 – Pega das amostras de concreto AL e NL 35

Tempo (min)	Penetração da agulha (mm)	
	AL 35	NL 35
240		3,0
255		4,0
270		6,5
285		6,5
300	3,0	7,0
315	4,0	11,0
330	5,0	17,0
345	6,0	18,5
360	7,0	20,0
375	8,0	27,5
390	8,5	32,5
405	9,0	33,0
420	9,5	34,0
435	10,0	35,5
450	11,5	38,5
465	13,0	38,5
480	21,0	40,0
495	27,5	
510	31,5	
525	34,5	
540	35,5	
555	35,5	
570	36,5	
585	37,0	
600	38,0	
615	38,0	
630	40,0	

TABELA A3 – Pega das amostras de concreto AL e NL 50

Tempo (min)	Penetração da agulha (mm)	
	AL 50	NL 50
240		3,0
255		3,0
270		3,5
285		8,0
300	3,5	10,5
315	3,5	14,0
330	4,5	18,0
345	5,5	18,5
360	8,0	20,0
375	12,0	22,5
390	12,5	25,0
405	12,5	31,0
420	13,0	35,0
435	15,5	37,5
450	17,5	40,0
465	17,5	
480	18,0	
495	19,0	
510	20,0	
525	21,5	
540	26,0	
555	32,0	
570	35,0	
585	37,0	
600	38,0	
615	40,0	

TABELA A4 – Pega das amostras de concreto AL e NL 65

Tempo (min)	Penetração da agulha (mm)	
	AL 65	NL 65
180		2,5
210		3,5
225		8,5
240		17,0
255	3,5	17,5
270	4,5	18,0
285	7,5	27,0
300	8,5	29,5
315	11,0	31,0
330	11,5	31,5
345	13,0	34,0
360	15,5	35,0
375	23,5	37,5
390	25,5	40,0
405	25,5	
420	26,0	
435	26,5	
450	26,5	
465	34,0	
480	34,0	
495	36,0	
510	37,0	
525	37,5	
540	38,5	
555	40,0	

TABELA A5 – Retração plástica das amostras de concreto AL e NL 35

Tempo (h)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	
	AL 35	NL 35
0,30	7,82	13,37
0,60	19,20	15,90
0,90	27,82	29,67
1,20	47,44	44,12
1,50	63,59	57,91
1,80	81,34	69,83
2,10	92,35	82,69
2,40	123,74	98,05
2,70	153,82	129,59
3,00	197,55	158,07
3,30	236,90	191,33
3,60	281,02	244,6
3,90	325,27	298,25
4,20	372,19	368,75
4,50	416,43	414,12
4,80	446,13	460,70
5,10	478,18	511,44
5,40	516,08	547,35
5,70	544,30	589,21
6,00	565,09	605,77
6,30	577,68	609,36
6,60	592,55	618,63
6,90	612,80	621,68
7,20	618,09	623,79
7,33		630,80
7,50	626,17	
7,80	626,84	
8,10	633,20	
8,40	633,60	
8,70	634,93	
9,00	638,10	
9,30	643,53	
9,60	648,90	
9,83	649,10	

TABELA A6 – Retração plástica das amostras de concreto AL e NL 50

Tempo (h)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	
	AL 50	NL 50
0,30	22,27	27,43
0,60	45,72	36,85
0,90	69,05	66,12
1,20	108,01	81,48
1,50	155,03	110,36
1,80	186,83	140,72
2,10	234,00	168,54
2,40	271,63	202,59
2,70	321,73	226,46
3,00	369,68	252,53
3,30	417,00	268,71
3,60	441,38	286,60
3,90	470,38	298,65
4,20	505,11	299,06
4,50	515,44	307,13
4,80	537,31	315,68
5,10	557,57	316,22
5,40	565,92	317,79
5,70	573,61	320,17
6,00	583,94	325,21
6,30	585,39	327,20
6,60	589,91	328,47
6,83		329,70
6,90	593,89	
7,20	596,12	
7,50	600,25	
7,80	603,94	
8,10	608,59	
8,40	610,45	
8,70	612,22	
9,00	617,53	
9,30	621,82	
9,58	623,90	

TABELA A7 – Retração plástica das amostras de concreto AL e NL 65

Tempo (h)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	
	AL 65	NL 65
0,30	38,15	10,87
0,60	58,43	28,22
0,90	79,22	31,14
1,20	117,12	46,11
1,50	154,61	68,99
1,80	193,17	83,08
2,10	237,69	110,36
2,40	280,09	131,85
2,70	332,69	153,04
3,00	372,44	164,17
3,30	410,73	186,69
3,60	456,99	193,84
3,90	471,54	194,11
4,20	504,95	201,41
4,50	532,38	201,80
4,80	551,33	206,84
5,10	565,63	208,41
5,40	572,91	215,71
5,70	591,07	219,39
5,83		222,10
6,00	592,40	
6,30	595,57	
6,60	597,29	
6,90	601,79	
7,20	603,27	
7,50	609,49	
7,80	609,61	
8,10	611,94	
8,40	614,13	
8,58	615,60	

TABELA A8 - Resistência à compressão axial das amostras de concreto AL 35

Amostra	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
1	25,72	44,71	42,09*
2	25,79	45,14	48,05
3	26,93	45,85	48,36
4	29,35	47,68	51,68
5	32,06*	48,11	52,38
Média	27,97	46,30	48,51
Média – 10%	25,17	41,67	43,66
Média + 10%	30,77	50,93	53,36
<b>Média**</b>	<b>26,95</b>	<b>46,30</b>	<b>50,12</b>
D.P.**	1,69	1,52	2,23
C.V. (%)**	6,29	3,29	4,45

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A9 - Resistência à compressão axial das amostras de concreto NL 35

Amostra	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
1	35,83	49,21	57,91
2	35,94	54,46	58,24
3	38,85	53,11	63,31
4	40,44	55,31	67,85
5	43,14*	58,94	68,84
Média	38,84	54,21	63,23
Média – 10%	34,96	48,79	56,91
Média + 10%	42,72	59,63	69,55
<b>Média**</b>	<b>37,77</b>	<b>54,21</b>	<b>63,23</b>
D.P.**	2,27	3,53	5,15
C.V. (%)**	6,00	6,51	8,14

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A10 - Resistência à compressão axial das amostras de concreto AL 50

Amostra	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
1	21,02	35,44	45,12
2	21,68	37,60	46,03
3	22,67	38,26	46,23
4	24,00	40,78	48,81
5	24,83	42,31	50,92
Média	22,84	38,88	47,42
Média – 10%	20,56	34,99	42,68
Média + 10%	25,12	42,77	52,16
<b>Média**</b>	<b>22,84</b>	<b>38,88</b>	<b>47,42</b>
D.P.**	1,58	2,70	2,39
C.V. (%)**	6,92	6,95	5,04

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A11 - Resistência à compressão axial das amostras de concreto NL 50

Amostra	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
1	25,17	39,11	52,96
2	25,40	39,44	53,76
3	26,70	40,98	54,30
4	26,72	45,88	56,37
5	26,77	47,59*	59,32
Média	26,15	42,60	55,34
Média – 10%	23,54	38,34	49,81
Média + 10%	28,77	46,86	60,88
<b>Média**</b>	<b>26,15</b>	<b>41,35</b>	<b>55,34</b>
D.P.**	0,80	3,13	2,56
C.V. (%)**	3,04	7,56	4,62

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A12 - Resistência à compressão axial das amostras de concreto AL 65

Amostra	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
1	18,95	32,35	35,04
2	20,90	32,68	35,07
3	21,09	32,72	36,34
4	21,13	34,49	37,09
5	23,02	35,81	37,26
Média	21,02	33,61	36,16
Média – 10%	18,92	30,25	32,54
Média + 10%	23,12	36,97	39,78
<b>Média**</b>	<b>21,02</b>	<b>33,61</b>	<b>36,16</b>
D.P. **	1,44	1,49	1,07
C.V. (%)**	6,86	4,43	2,95

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A13 - Resistência à compressão axial das amostras de concreto NL 65

Amostra	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
1	17,36*	34,13	37,33
2	18,16	34,20	37,38
3	20,84	34,21	37,47
4	21,91	35,03	42,21
5	22,05	35,52	43,08
Média	20,06	34,62	39,49
Média – 10%	18,06	31,16	35,54
Média + 10%	22,07	38,08	43,44
<b>Média**</b>	<b>20,74</b>	<b>34,62</b>	<b>39,49</b>
D.P. **	1,80	0,63	2,89
C.V. (%)**	8,69	1,81	7,33

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A14 - Tensão e deformação das amostras de concreto AL 35

	Corpo-de-prova 1		Corpo-de-prova 2	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )
	2	75	2	50
	4	175	4	100
	6	200	6	150
	8	250	8	200
	10	275	10	250
	12	350	12	300
	14	375	14	350
	16	400	16	425
	18	475	18	450
	20	550	20	525
	22	600	22	575
	24	650	24	650
	26	700	26	700
	28	750	28	775
	30	825	30	825
	32	875	32	875
	34	950	34	975
	36	975	36	1025
	38	1125	38	1150
	40	1175	40	1225
	42	1250	42	1350
	43,08	1275	44	1425
			46	1650
			48,5	1975
Deformação a 30%	<b>12,924</b>	<b>350</b>	<b>14,55</b>	<b>350</b>
Módulo de Elasticidade(GPa)	<b>35,49714</b>		<b>40,14286</b>	
Módulo de Elasticidade Médio(GPa)	<b>37,82</b>			

TABELA A15 - Tensão e deformação das amostras de concreto NL 35

	Corpo-de-prova 1		Corpo-de-prova 2	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )
	2	75	2	100
	4	125	4	150
	6	175	6	175
	8	225	8	200
	10	250	10	275
	12	300	12	325
	14	325	14	350
	16	350	16	425
	18	400	18	500
	20	450	20	550
	22	500	22	575
	24	550	24	650
	26	625	26	700
	28	650	28	725
	30	675	30	775
	32	750	32	825
	34	800	34	900
	36	850	36	925
	38	900	38	1000
	40	925	40	1075
	42	1000	42	1100
	44	1050	44	1175
	46	1100	46	1250
	48	1150	48	1325
	50	1250	50,25	1500
	52	1300		
	54	1375		
	56,85	1500		
Deformação a 30%	<b>17,055</b>	<b>375</b>	<b>15,075</b>	<b>375</b>
Módulo de Elasticidade(GPa)	<b>44,14667</b>		<b>38,86667</b>	
Módulo de Elasticidade Médio(GPa)	<b>41,50667</b>			

TABELA A16 - Tensão e deformação das amostras de concreto AL 50

	Corpo-de-prova 1		Corpo-de-prova 2	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )
	2	100	2	75
	4	150	4	125
	6	200	6	175
	8	275	8	250
	10	350	10	300
	12	425	12	350
	14	500	14	425
	16	575	16	525
	18	675	18	575
	20	775	20	650
	22	850	22	750
	24	950	24	850
	26	1075	26	950
	28	1200	28	1075
	30	1325	30	1200
	32	1475	32	1350
	34	1675	34	1600
	36	2000	35,87	2000
	37,35	2625		
Deformação a 30%	<b>11,205</b>	<b>375</b>	<b>10,761</b>	<b>325</b>
Módulo de Elasticidade(GPa)	<b>28,54667</b>		<b>31,57231</b>	
Módulo de Elasticidade Médio(GPa)	<b>30,05949</b>			

TABELA A17 - Tensão e deformação das amostras de concreto NL 50

	Corpo-de-prova 1		Corpo-de-prova 2	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )
	2	50	2	75
	4	100	4	125
	6	150	6	150
	8	225	8	225
	10	275	10	250
	12	300	12	350
	14	350	14	400
	16	400	16	450
	18	450	18	500
	20	500	20	550
	22	550	22	650
	24	625	24	700
	26	675	26	725
	28	725	28	850
	30	800	30	925
	32	875	32	975
	34	925	34	1100
	36	975	36	1225
	38	1150	38	1375
	40	2075	40	1475
	41,42	2600	41,89	2425
Deformação a 30%	<b>12,426</b>	<b>325</b>	<b>12,567</b>	<b>350</b>
Módulo de Elasticidade(GPa)	<b>36,69538</b>		<b>34,47714</b>	
Módulo de Elasticidade Médio(GPa)	<b>35,58626</b>			

TABELA A18 - Tensão e deformação das amostras de concreto AL 65

	Corpo-de-prova 1		Corpo-de-prova 2	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )
	2	125	2	125
	4	175	4	175
	6	225	6	250
	8	300	8	300
	10	400	10	375
	12	475	12	450
	14	550	14	500
	16	650	16	600
	18	700	18	700
	20	800	20	750
	22	925	22	900
	24	1050	24	975
	26	1200	26	1100
	28	1350	28	1275
	30	1550	30	1550
	32	1775	30,74	1850
	34	2225		
	35,61	2600		
Deformação a 30%	<b>10,683</b>	<b>425</b>	<b>9,222</b>	<b>350</b>
Módulo de Elasticidade(GPa)	<b>23,96</b>		<b>24,92</b>	
Módulo de Elasticidade Médio(GPa)	<b>24,44</b>			

TABELA A19 - Tensão e deformação das amostras de concreto NL 65

	Corpo-de-prova 1		Corpo-de-prova 2	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm x 10 <sup>-6</sup> )
	2	100	2	75
	4	150	4	125
	6	200	6	175
	8	250	8	250
	10	350	10	300
	12	400	12	375
	14	475	14	425
	16	550	16	500
	18	625	18	600
	20	700	20	675
	22	800	22	775
	24	900	24	850
	26	1000	26	975
	28	1125	28	1100
	30	1300	30	1275
	32	1550	32	1550
	33,59	2150	34,46	2325
Deformação a 30%	<b>10,077</b>	<b>0,000325</b>	<b>10,338</b>	<b>0,000325</b>
Módulo de Elasticidade(GPa)	<b>29,46769</b>		<b>30,27077</b>	
Módulo de Elasticidade Médio(GPa)	<b>29,86923</b>			

TABELA A20 - Absorção, índice de vazios e massas específicas das amostras de concreto endurecido AL E NL 35

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
M	2.017,00	2.999,00	3804,6	3.774,00	3.826,50	2025,5
Ms	2.107,97	3.160,05	3992,5	3.921,94	4.007,11	2119,08
msa	1.273,38	1.930,66	2430	2.420,00	2.493,19	1266,82
<b>Absorção (%)</b>	4,51	5,37	4,94	3,92	4,72	4,62
Média (%)	4,94			4,42		
Média-10% (%)	4,45			3,98		
Média+10% (%)	5,43			4,86		
Média** (%)	<b>4,94</b>			<b>4,42</b>		
DP	0,43			0,44		
CV (%)	8,70			9,86		
<b>Índice de vazios (%)</b>	10,90	13,10	12,03	9,85	11,93	10,98
Média (%)	12,01			10,92		
Média-10% (%)	10,81			9,83		
Média+10% (%)	13,21			12,01		
Média** (%)	<b>12,01</b>			<b>10,92</b>		
DP	1,10			1,04		
CV (%)	9,16			9,54		
<b><math>\gamma_{cs}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,42	2,44	2,43	2,51	2,53	2,38
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,43			2,47		
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,19			2,23		
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,67			2,72		
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,43</b>			<b>2,47</b>		
DP	0,01			0,08		
CV (%)	0,49			3,37		
<b><math>\gamma_{sc}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,53	2,57	2,56	2,61	2,65	2,49
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,55			2,58		
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,30			2,32		
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,81			2,84		
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,55</b>			<b>2,58</b>		
DP	0,02			0,08		
CV (%)	0,89			3,26		
<b><math>\gamma_{rc}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,71	2,81	2,77	2,79	2,87	2,67
Média(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,76			2,78		
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,49			2,50		
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	3,04			3,05		
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,76</b>			<b>2,78</b>		
DP	0,05			0,10		
CV (%)	1,72			3,62		

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A21 - Absorção, índice de vazios e massas específicas das amostras de concreto endurecido AL e NL 50

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
m	3.737,28	3.530,83	3520	3.790,73	3.812,35	3799
ms	3.934,98	3.756,80	3.727,33	3.972,69	4.033,09	4.006,43
msa	2.330,26	2.256,32	2.279,51	2.402,75	2.443,92	2.437,40
<b>Absorção (%)</b>	5,29	6,40	5,89	4,80	5,79	5,46
Média (%)	5,86			5,35		
Média-10% (%)	5,27			4,82		
Média+10% (%)	6,45			5,89		
Média** (%)	<b>5,86</b>			<b>5,35</b>		
DP	0,56			0,23		
CV (%)	9,48			4,36		
<b>Índice de vazios (%)</b>	12,32	15,06	14,32	11,59	13,89	13,22
Média (%)	13,90			12,90		
Média-10% (%)	12,51			11,61		
Média+10% (%)	15,29			14,19		
Média** (%)	<b>13,90</b>			<b>12,90</b>		
DP	1,42			1,18		
CV (%)	10,20			9,17		
<b><math>\gamma_{cs}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,33	2,35	2,43	2,41	2,40	2,42
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,37			2,41		
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,13			2,17		
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,61			2,65		
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,37</b>			<b>2,41</b>		
DP	0,05			0,01		
CV (%)	2,26			0,47		
<b><math>\gamma_{sc}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,45	2,50	2,57	2,53	2,54	2,55
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,51			2,54		
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,26			2,29		
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,76			2,79		
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,51</b>			<b>2,54</b>		
DP	0,06			0,01		
CV (%)	2,45			0,46		
<b><math>\gamma_{rc}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,66	2,77	2,84	2,73	2,79	2,79
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,75			2,77		
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,48			2,49		
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	3,03			3,05		
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,75</b>			<b>2,77</b>		
DP	0,09			0,03		
CV (%)	3,33			1,19		

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes

TABELA A22 - Absorção, índice de vazios e massas específicas das amostras de concreto endurecido AL e NL 65

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
M	3.709,64	3.697,00	3723,92	3783	3.798,79	3.847,13
Ms	3.911,82	3.915,49	3.967,84	3.992,58	4.029,00	4.037,95
Msa	2.338,47	2.357,06	2.393,16	2.409,66	2.443,55	2.430,39
<b>Absorção (%)</b>	5,45	5,91	6,55	5,54	6,06	4,96
Média (%)	5,97		5,52			
Média-10% (%)	5,37		4,97			
Média+10% (%)	6,57		6,07			
Média** (%)	<b>5,97</b>		<b>5,52</b>			
DP	0,55		0,78			
CV (%)	9,25		14,09			
<b>Índice de vazios (%)</b>	12,85	14,02	15,49	13,24	14,52	11,87
Média (%)	14,12		13,21			
Média-10% (%)	12,71		11,89			
Média+10% (%)	15,53		14,53			
Média** (%)	<b>14,12</b>		<b>13,21</b>			
DP	1,32		1,33			
CV (%)	9,37		10,03			
<b><math>\gamma_{cs}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,36	2,37	2,36	2,39	2,40	2,39
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,36		2,39			
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,13		2,15			
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,60		2,63			
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,36</b>		<b>2,39</b>			
DP	0,01		0,00			
CV (%)	0,31		0,13			
<b><math>\gamma_{sc}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,49	2,51	2,52	2,52	2,54	2,51
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,51		2,53			
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,26		2,27			
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,76		2,78			
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,51</b>		<b>2,53</b>			
DP	0,02		0,01			
CV (%)	0,70		0,59			
<b><math>\gamma_{rc}</math> (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,71	2,76	2,80	2,75	2,80	2,72
Média (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,75		2,76			
Média-10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	2,48		2,48			
Média+10%(Kg/dm <sup>3</sup> )	3,03		3,03			
Média** (Kg/dm <sup>3</sup> )	<b>2,75</b>		<b>2,76</b>			
DP	0,05		0,04			
CV (%)	1,69		1,59			

\*valores distantes \*\*desconsiderando-se valores distantes