

CLÁUDIA VALÉRIA GÁVIO COURA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO
POR MÁRMORE TRITURADO NA CONFEÇÃO DE CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção

Orientador: Prof. FATHI AREF IBRAHIM DARWISH – Ph.D.

Co-Orientadora: Prof^{fa}. MARIA TERESA GOMES BARBOSA – D.Sc.

NITERÓI

2009

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de
Computação da UFF

C858 Coura, Cláudia Valéria Gávio.

Estudo sobre a substituição do agregado miúdo por mármore triturado na confecção de concreto / Cláudia Valéria Gávio Coura – Niterói,. RJ : [s.n.], 2009.

195 f.

Orientador: Fathi Aref Ibrahim Darwish e Maria Teresa Gomes Barbosa.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, 2009.

1. Mármore. 2. Agregado (Material de construção). 3. Desenvolvimento sustentável. 4 Resíduo industrial 5 Construção Civil 6. Concreto - Tecnologia. I. Título.

CDD691.2

CLÁUDIA VALÉRIA GÁVIO COURA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO
POR MÁRMORE TRITURADO NA CONFECCÃO DE CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção

Aprovada em março de 2009

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish – Ph.D – Orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof^a. Maria Teresa Gomes Barbosa – D.Sc. – Co-orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Luiz Carlos Mendes – D.Sc.
Universidade Federal Fluminense

Prof^a. Maria Aparecida Steinherz Hippert – D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Robson Luiz Gaiofatto – D.Sc
Universidade Católica de Petrópolis

NITERÓI

2009

A minha mãe, Edna, e meu pai, Maurício, meus exemplos de vida, amor e
ensinamento.

Ao meu marido Lino, e minhas filhas, Laís e Laura, pelo incentivo na
conquista dessa etapa da minha vida.

A minha eterna gratidão. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença constante, permitindo o início, o desenvolvimento e conclusão dessa longa caminhada.

Aos meus irmãos que sempre pude e espero contar por todo resto de minha vida. Amo vocês.

Agradeço ao Professor Fathi Aref Ibrahim Darwish pela sua orientação, incentivo, conduta ética, que com dedicação, eficiência e presteza transmitiu seus conhecimentos e experiências.

A co-orientadora Professora Maria Teresa Gomes Barbosa, pela orientação precisa diante das dúvidas, pela confiança no meu trabalho, por ter se mostrado amiga e preocupada com o meu bom desempenho. Sua experiência e competência foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Aos Professores Luiz Carlos Mendes, Maria Aparecida Steinherz Hippert e Robson Luiz Gaiofatto por terem aceitado o convite de fazer parte de minha banca examinadora.

A Marshetti Moagem de Minérios Ltda na pessoa do Sr. Cristiano pelo incentivo, apoio e fornecimento do material de estudo desta dissertação.

A HOLCIN (Brasil) S.A. na pessoa do Sr. Anderson Silva Santos pela atenção e fornecimento do cimento utilizado neste estudo.

A PEDRA SUL Mineração Ltda pelo fornecimento de material para a confecção dos corpos-de-prova.

A todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram com preciosas informações na área de materiais de construção e de resistência dos materiais em especial ao Prof. Marconi de Fonseca Moraes.

Ao grande amigo Professor Sérgio Kitamura pela amizade, companheirismo e discussões sempre positivas.

Aos bolsistas e estagiários do Laboratório de Materiais de Construção do CTU/UFJF, pelos bons momentos de amizade e descontração vividos, e que funcionaram como uma injeção de ânimo para que a jornada prosseguisse.

A todos que conheci, seja por uma sugestão, interesse, um gesto amigo, que incentivaram a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
SUMÁRIO	6
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	12
LISTA DE TABELAS	15
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	21
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	22
1.2 OBJETIVOS	24
1.2.1 Objetivo geral	24
1.2.2 Objetivo específico	24
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	25
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	25
2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM DE RESÍDUOS	27
2.1 CONSUMO DE MATÉRIAS-PRIMAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	27
2.2 IMPACTOS DA RECICLAGEM.....	29
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	30
2.4 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	31
2.5 ROCHAS ORNAMENTAIS.....	33
2.5.1 CARACTERIZAÇÃO E ORIGEM.....	34
2.5.1.1 Granitos.....	35
2.5.1.2 Mármorees	36
2.5.2 PRINCIPAIS DEPÓSITOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO BRASIL ...	38
2.6. RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE.....	39
2.6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	39
2.6.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS	39
2.6.3. TRABALHOS COM RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	43
3 Influência dos agregados nas propriedades do concreto.....	45
3.1 AGREGADOS.....	45
3.1.1 IMPORTÂNCIA	45

3.1.2	POROSIDADE, ABSORÇÃO E UMIDADE SUPERFICIAL	47
3.1.3	Aderência do agregado	49
3.1.4	RESISTÊNCIA DO AGREGADO	50
3.1.5	Forma e textura das partículas	53
3.1.6	SUBSTÂNCIAS DELETÉRIAS	57
3.1.6.1	IMPUREZAS ORGÂNICAS	58
3.1.6.2	ARGILA E OUTROS MATERIAIS FINOS	58
3.1.6.3	PARTÍCULAS NÃO SÃS	59
3.1.7	A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	60
3.1.7.1	O MECANISMO DA REAÇÃO	64
3.1.7.2	TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	66
3.1.7.3	FATORES QUE INFLUENCIAM A REAÇÃO	67
3.1.8	DIMENSÃO MÁXIMA E COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	68
3.2	INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA DOSAGEM DE CONCRETOS	69
4	Programa experimental	71
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	71
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	72
4.2.1	Cimento	72
4.2.2	Agregado miúdo	76
4.2.2.1	Agregado miúdo natural (AMN)	76
4.2.2.2	Agregado miúdo artificial (AMA)	77
4.2.2.3	Rejeito de mármore triturado (RMT)	77
	O carbonato pode ser tanto Calcita (CaCO_3) como Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), não sendo possível distinguir em lâmina delgada, somente por outros métodos como Geoquímica ou Difração de Raio X, porém por meio da paragênese mineral é bem provável que a lâmina apresente dolomita, pois no sistema apresenta minerais ricos em Mg como a Olivina (Mg_2SiO_4) e a Tremolita [$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH}_2)$].	81
4.2.2.3.2	Características físicas	81
4.2.3	Agregado graúdo	83
4.2.4	Água	84
4.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	84
4.3.1	Amostras testadas	86
4.4	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO	87
4.4.1	Trabalhabilidade	87
4.4.2	Exsudação	87
4.5	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO	87
4.5.1	Ensaio de resistência à compressão axial	87
4.5.2	Resistência à tração por compressão diametral	88
4.5.3	Resistência à tração na flexão	89
4.5.4	Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson	91
4.5.5	Absorção de água por imersão	93
4.5.6	Absorção de água por capilaridade	93
4.5.7	Retração hidráulica	94
4.5.8	Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas	94
5	RESULTADOS E ANÁLISES	96
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	96
5.2	ENSAIO DE TRABALHABILIDADE	97
5.3	ENSAIO DE EXSUDAÇÃO	99
5.4	ENSAIO DE DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO ENDURECIDO	100

5.5	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	102
5.6	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 109	
5.7	DETERMINAÇÃO DA TRAÇÃO NA FLEXÃO	117
5.8	MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON.....	120
5.9	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS.....	124
5.13.1	Composição mineralógica	133
5.13.2	Teor de álcalis no concreto	133
5.13.3	Granulometria do agregado.....	134
5.14.1	Trabalhabilidade	134
5.14.2	Exsudação.....	134
5.14.3	Densidade de massa no estado endurecido	134
5.14.4	Resistência mecânica (à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão)	135
5.14.5	Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson	135
5.14.6	Absorção de água por imersão e índice de vazios	136
5.14.7	Absorção de água por sucção capilar	136
5.14.8	Retração hidráulica.....	136
5.14.9	Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.....	137
5.14.10	Reação álcali-agregado.....	137
5.15.1	Resistência à compressão axial x resistência à tração por compressão diametral	138
5.15.2	Resistência à tração por compressão diametral x resistência à tração na flexão	139
5.15.3	Resistência à compressão axial x resistência à tração na flexão	140
5.15.4	Resistência à compressão axial x módulo de elasticidade.....	141
5.15.5	Resistência à compressão axial x coeficiente de Poisson.....	143
5.15.6	Resistência à compressão axial x módulo de elasticidade x coeficiente de Poisson	144
5.15.7	Absorção de água por imersão x Índice de vazios	145
5.15.8	Absorção de água por imersão x absorção de água por sucção capilar x índice de vazios.....	147
5.15.9	Resistência à compressão x absorção de água por imersão x absorção de água por sucção capilar x índice de vazios	148
5.15.10	Resistência à compressão axial x velocidade de propagação de ondas ultra- sônicas	149
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MÁRMORE TRITURADO	152
6.2	COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	152
6.3	COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO.....	153
6.3.1	Propriedades mecânicas.....	153
6.3.1.1	Densidade de massa no estado endurecido	153
6.3.1.2	Resistência à compressão axial	153
6.3.1.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	154
6.3.1.4	Resistência à tração na flexão	155
6.3.1.5	Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson	155
6.3.1.6	Retração hidráulica	156
6.3.1.7	Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.....	156

6.3.2	Parâmetros de durabilidade	157
6.3.2.1	Absorção de água por imersão e índice de vazios	157
6.3.2.2	Absorção de água por sucção capilar	157
6.5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	158
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
	ANEXO A - resultados dos ensaios COM CIMENTO CP II E 32.....	169
	ANEXO B – resultados dos ensaios COM CIMENTO CP III 40 RS	175
	ANEXO C – resultados dos ensaios COM CIMENTO CP V ARI.....	181
	ANEXO D – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	187

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A_i	Absorção de água por imersão
A_c	Absorção de água por sucção capilar
AMA	Agregado miúdo artificial
AMN	Agregado miúdo natural
DNITT	Departamento Nacional de Transporte Terrestre
cm	Centímetros
CP	Corpo-de-prova
CPII E 32	Cimento Portland composto com escória de alto forno e resistência à compressão mínima aos 28 dias de idade de 32 MPa.
CPIII 40 RS	Cimento Portland alto forno com resistência à compressão mínima aos 28 dias de idade de 40 MPa.
CP V ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CV	Coeficiente de variação
dm^3	Decímetros cúbicos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
E	Exsudação
E_{ci}	Módulo de elasticidade
f_c	Resistência à compressão axial
f_{tc}	Resistência à tração por compressão diametral
f_{tf}	Resistência à tração na flexão
F_o	Valor de Fisher calculado
F_α	Valor de Fisher tabelado
f_{c3}	Resistência à compressão aos três dias de idade
f_{c7}	Resistência à compressão aos sete dias de idade
f_{c28}	Resistência à compressão aos 28 dias de idade
f_{c90}	Resistência à compressão aos 90 dias de idade

f_{c120}	Resistência à compressão aos 120 dias de idade
lv	Índice de vazios
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
µm	Mícrons
N	Newtons
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
p.p.m.	Partes por milhão
ONU	Organização das Nações Unidas
RMT	Rejeito de mármore triturado
kg	Kilograma
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
#	Abertura da malha da peneira

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Ciclo de produção fechado.....	26
Figura 2.2 – Exemplar de granito destacando três de seus minerais.....	34
Figura 2.3 – Mármore travertino	35
Figura 2.4 – Mapa de distribuição das principais zonas produtoras de rochas ornamentais.....	36
Figura 2.5 – Percentuais médios de desperdícios nas etapas da cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais.....	38
Figura 2.6 – Cacos de pedra na etapa de extração	39
Figura 2.7 – Blocos com dimensões não padronizadas	40
Figura 2.8 – Retalhos de pedra em marmoraria.....	40
Figura 3.1 – Diagrama ilustrativo das várias inter-relações.....	44
Figura 3.2 – Representação esquemática da umidade do agregado	46
Figura 3.3 – Formas das partículas.....	52
Figura 3.4 – Partícula alongada (indesejável) à esquerda e partícula desejável para concreto à direita.....	53
Figura 3.5 – Barragem de Furnas – Vista lateral do pilar do vertedouro	60
Figura 3.6 – Barragem de Mascarenhas de Moraes – Detalhe de fissuras tipo mapa na crista de um muro divisório da calha	61
Figura 3.7 – Barragem de Porto Colômbia – Detalhe do topo de um dos pilares do vertedouro com fissuração tipo mapa e deslocamento nas bordas.....	61
Figura 3.8 – Barragem de Fontana (USA) – Vista do vertedouro, Fissuração e deslocamento	62
Figura 3.9 – Resumo do processo da reação álcali-agregado	64
Figura 4.1 – Clorita – Mg com formato tabular	77
Figura 4.2 – Cristal de tremolina	77

Figura 4.3 – Olivina inclusa em carbonato	78
Figura 4.4 – Alteração de olivina em serpentina.	78
Figura 4.5 – Grãos do RMT	80
Figura 4.6 – Fissuras observadas no ensaio de tração por compressão diametral...	87
Figura 4.7 – Corpo-de-prova prismático solicitado à tração na flexão.....	88
Figura 4.8 – Ensaio de módulo de elasticidade.....	90
Figura 5.1 – Abatimento da mistura com 100% de RMT e CP II E 32 (S=140 mm)..	96
Figura 5.2 – Valores de exsudação para os traços T1, T6, T8 e T9.....	97
Figura 5.3 – Densidade de massa no estado endurecido realizado aos 120 dias de idade.	99
Figura 5.4 – Resistência média à compressão (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP II E 32.	104
Figura 5.5 – Resistência média à compressão (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP III 40 RS.....	105
Figura 5.6 – Resistência média à compressão (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP V ARI.	105
Figura 5.7 – Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP II E 32.	111
Figura 5.8 - Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP II 40 RS.....	112
Figura 5.9- Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP V ARI.	112
Figura 5.10 – Resistência média à tração na flexão (MPa) x Teor de adição (%) ..	116
Figura 5.11 – Corpo-de-prova com 100% de RMT.....	117
Figura 5.12 – Módulo de elasticidade (GPa)	120
Figura 5.13 – Coeficiente de Poisson.....	120
Figura 5.14 – Absorção de água por imersão	123
Figura 5.15 – Absorção de água por sucção capilar.	125
Figura 5.16 – Retração hidráulica.	128
Figura 5.17 – Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.....	130
Figura 5.18 – Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral.....	137

Figura 5.19 – Correlação entre a resistência à tração por compressão diametral x resistência à tração na flexão.....	138
Figura 5.20 – Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão.....	139
Figura 5.21 – Correlação entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade.	140
Figura 5.22 – Correlação entre a resistência à compressão axial e o coeficiente de Poisson.	142
Figura 5.23 – Correlação entre a resistência à compressão axial, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.....	143
Figura 5.24 – Correlação entre a absorção de água por imersão e o índice de vazios.	144
Figura 5.25 – Correlação entre a absorção de água por imersão, a absorção de água por sucção capilar e o índice de vazios.....	146
Figura 5.26 – Correlação entre a resistência à compressão axial, a absorção de água por imersão, a absorção de água por sucção capilar e o índice de vazios	147
Figura 5.27 – Correlação entre a resistência à compressão axial e a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas	149

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.4 – Caracterização física do AMN.	76
TABELA 4.5 – Caracterização física do AMA.....	77
TABELA 4.11 – Resumo do programa experimental.....	86
TABELA 5.6 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{cm} para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.	109
Variável	109
CPII E 32	109
CPIII 40 RS	109
CPV ARI	109
F_0	109
F_α	109
F_0	109
F_α	109
F_0	109
F_α	109
Tipo de adição.....	109
18,79	109
3,06	109
20,43	109
3,06	109
22,40	109
3,06	109
Teor de adição do RMT	109
129,82	109
2,87	109
127,77	109
2,87	109
138,76	109
2,87	109
TABELA 5.10 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{tm} para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.	115
Variável	115
CPII E 32	115
CPIII 40 RS	115
CPV ARI	115
F_0	115
F_α	115

F_0	115
F_α	115
F_0	115
F_α	115
Tipo de adição.....	115
25,08	115
3,06	115
55,75	115
3,06	115
28,81	115
3,06	115
Teor de adição de RMT	115
152,05	115
2,87	115
372,03	115
2,87	115
152,81	115
2,87	115
TABELA 5.12 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{tm} para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.	118
Variável	118
CPII E 32	118
CPIII 40 RS	118
CPV ARI	118
F_0	118
F_α	118
F_0	118
F_α	118
F_0	118
F_α	118
Tipo de adição.....	118
13,25	118
5,14	118
342,67	118
5,14	118
101,37	118
5,14	118
Teor de adição	118
0,74	118
3,48	118
3,08	118
3,48	118
2,90	118
3,48	118
TABELA 5.15 – Resultados obtidos na análise estatística do módulo de elasticidade para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.	122
Variável	122
CPII E 32	122
CPIII 40 RS	122
CPV ARI	122

F_0	122
F_α	122
F_0	122
F_α	122
F_0	122
F_α	122
Tipo de adição.....	122
77,06	122
5,14	122
72,56	122
5,14	122
78,26	122
5,14	122
Teor de adição	122
601,61	122
3,48	122
39,51	122
3,48	122
40,06	122
3,48	122
TABELA 5.16 – Resultados obtidos na análise estatística do coeficiente de Poisson para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.	
Variável	123
CPII E 32	123
CPIII 40 RS	123
CPV ARI	123
F_0	123
F_α	123
F_0	123
F_α	123
F_0	123
F_α	123
Tipo de adição.....	123
28,85	123
5,14	123
28,77	123
5,14	123
30,16	123
5,14	123
Teor de adição	123
19,75	123
3,48	123
19,27	123
3,48	123
17,07	123
3,48	123
TABELA 5.18 – Resultados obtidos na análise estatística da absorção de água por imersão para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F....	
Variável	125

CPII E 32	125
CPIII 40 RS	125
CPV ARI	125
F₀	125
F_α	125
F₀	125
F_α	125
F₀	125
F_α	125
Tipo de adição.....	125
20,62	125
5,14	125
201,53	125
5,14	125
137,54	125
5,14	125
Teor de adição	125
4,87	125
3,48	125
7,97	125
3,48	125
6,66	125
3,48	125
TABELA 5.20 – Resultados obtidos na análise estatística da absorção de água por sucção capilar em CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.	
.....	127
Variável	127
CPII E 32	127
CPIII 40 RS	127
CPV ARI	127
F₀	127
F_α	127
F₀	127
F_α	127
F₀	127
F_α	127
Tipo de adição.....	127
28,84	127
3,48	127
28,77	127
3,48	127
30,16	127
3,48	127
Teor de adição de RMT.....	127
19,75	127
3,48	127
19,27	127
3,48	127
17,07	127

3,48	127
TABELA 5.24 – Resultados obtidos na análise estatística da velocidade de propagação de ondas para CP com o tipo de adição de variável – valores de F....	
132	132
Variável	132
CPII E 32	132
CPIII 40 RS	132
CPV ARI	132
F₀	132
F_α	132
F₀	132
F_α	132
F₀	132
F_α	132
Tipo de agregado	132
2,99	132
2,77	132
26,99	132
2,77	132
35,53	132
2,77	132

RESUMO

Um grande problema enfrentado pelas indústrias de mineração, principalmente as de rochas ornamentais é o volume de resíduos gerados, que poluem e degradam o meio ambiente. Assim este trabalho tem por objetivo caracterizar e avaliar a possibilidade de utilização de rejeitos de mármore triturado, substituindo o agregado miúdo natural, como alternativa na produção de concretos. Para a realização dos ensaios, além da mistura de referência utilizando areia natural de rio, foram formuladas quatro novas misturas, substituindo-se 20 %, 40%, 60% e 100% da areia natural por rejeitos de mármore triturado, utilizando mesma distribuição granulométrica, que foi possível devido a grande possibilidade de faixas granulométricas no momento da britagem. E ainda, 100% de substituição do Agregado Miúdo Natural por uma mistura de Rejeitos de Mármore Triturado na Granulometria Ótima (NBR 7211/2005) e por Agregado Miúdo Artificial na granulometria encontrada comercialmente. Nas composições elaboradas foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão, módulo de deformação, coeficiente de Poisson, velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, retração hidráulica, absorção por imersão e absorção por sucção capilar. Com base nos resultados verificou-se que os concretos elaborados com o rejeito de mármore triturado apresentaram características mecânicas e de durabilidade superiores às do concreto de referência, mostrando a viabilidade da utilização desses rejeitos para confecção de concreto.

Palavras-chave: mármore; agregado miúdo; desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

A big problem faced by industries of mining, especially those of ornamental rock is the volume of waste generated, which pollute and degrade the environment. This paper aims to characterize and evaluate the possible use of rejects from crushed marble, replacing the natural small aggregate, as an alternative in the production of concrete. For the test, farther addition to the mixture of reference using natural sand of river, were made four new blends, replacing it is 20%, 40%, 60% and 100% of natural sand by rejects from crushed marble, using same size distribution. What was possible because the possibility of large size bands at the time of crushing. And yet, 100% substitution given the natural small aggregate, by rejects from crushed marble in the great particle size (NBR 7211/2005) and by artificial small aggregate found commercially. In prepared compositions were performed tests for strength to axial compression, tension by direct compression, tension in flexion, modulus of deformation, coefficient of Poisson, absorption by immersion and absorption by capillary suction. Based on the results found that the concrete produced with the rejection of marble had mechanical characteristics and durability of concrete above the reference, showing the feasibility of the use of rejects for production of concrete.

Keywords: Marble; small aggregate; sustainable development.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A humanidade sempre dependeu dos recursos minerais para sua sobrevivência. Segundo BUEST NETO (2006), as pedras que inicialmente eram empregadas mantendo as características naturais, na forma de seixos rolados e de lascas encontradas na natureza, posteriormente foram modificadas, passando a ser utilizadas como instrumentos de guerra e produzindo fogo mediante atrito.

Estatísticas comprovam que a dependência humana do uso de recursos minerais é significativa junto dos outros reinos da natureza. HERRMANN (2002), baseado em suas pesquisas, evidencia um consumo humano por indivíduo de insumos minerais na ordem de 2000 a 20000 kg/ano, enquanto o do reino vegetal varia em torno de 400 a 500 kg/ano e, do reino animal entre 300 a 350 kg/ano.

Dentro deste contexto, confirma-se a construção civil como sendo um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. No Brasil, a demanda de agregados vem aumentando a cada ano. De acordo com JOHN (2000), o consumo estimado de agregados naturais, somente na produção de concretos e argamassas, era, no ano 2000, de aproximadamente 220 milhões de toneladas; em 2006, BUEST NETO menciona um consumo na ordem de 395 milhões de toneladas/ano.

Como mencionado por SILVA (2006), atualmente grande parte do agregado miúdo natural (areia) é extraída de leitos de rios, provocando a retirada da cobertura vegetal e a degradação dos cursos d'água, causando grande impacto ao meio ambiente e, órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o IBAMA, vêm coibindo esta prática. Com isso, os mineradores são forçados a extrair esses agregados em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, onerando o preço final do produto.

No entanto, apesar da construção civil ser um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais, ela também se apresenta como uma das mais eficazes alternativas para consumir materiais reciclados.

No que se refere à incorporação de resíduos na produção de materiais, GONÇALVES (2000) evidencia a redução do consumo de energia para a produção do mesmo produto com resíduos, e pode, dependendo de onde esteja localizado o resíduo e seu mercado consumidor, diminuir distâncias de transporte e contribuir para a redução do custo.

Segundo CHIODI FILHO (2003) a produção brasileira de rochas ornamentais, amplamente empregadas em revestimentos na construção civil, é de aproximadamente 6,0 milhões de toneladas/ano, dos quais 57% são de granito e 17% são de mármore. O restante inclui ardósias (8%), quartzitos (5%) e outros (13%). Os estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia detêm mais de 70% do total produzido nacionalmente. O estado do Espírito Santo produz o equivalente a 47% do total; seguido por Minas Gerais, com cerca de 18%. A Bahia é o terceiro maior produtor e responde por quase 10% da produção nacional (SPÍNOLA *et al*, 2004).

A produção de rochas ornamentais é, simplificada, executada em duas etapas. A primeira nas serrarias onde é feita a serragem, em chapas, de grandes blocos de pedra, nos chamados “teares”. E a segunda, nas marmorarias, empresas que, a partir do beneficiamento de chapas, preparam produtos pétreos para o consumidor final.

GOBBO *et al* (2004) relata que no caso das serrarias, perde-se cerca de 30% a 40% do volume dos blocos serrados, resultando em um material fino. Outras perdas, da ordem de 10% a 20%, ocorrem sob a forma de retalhos de pedra, ou seja, sobras, peças quebradas, dentre outros.

De acordo com ANDRADE e MOURA (2002), atualmente no Brasil, em função do beneficiamento destas rochas, produzem-se 240 000 ton/ano de resíduo ainda sem destino adequado.

Todavia, o estudo da reciclagem dos resíduos gerados no beneficiamento de rochas encontra-se num estágio desenvolvido em nível de laboratório, referindo-se aos trabalhos realizados por CALMON *et al* (1998), NEVES *et al* (2000) e MOREIRA

(2003), em argamassas, tijolos de cerâmica vermelha e tijolos de solo-cimento respectivamente. GONÇALVES (2000) MENEZES *et al* (2002) e BIGNO (2002) também comprovaram a viabilidade da utilização de resíduos de rochas ornamentais na forma de pó em concreto de cimento Portland.

Neste contexto, em função da grande quantidade de resíduos de corte de mármore gerada e não plenamente consumida, este trabalho visa avaliar a viabilidade técnica de sua utilização como agregado miúdo para concretos, por meio do estudo de suas características físicas e químicas.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho possui, além do objetivo geral, objetivos específicos, conforme descritos a seguir:

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com a substituição parcial e integral do agregado miúdo natural por agregado miúdo triturado proveniente do resíduo do beneficiamento do mármore em concretos de cimento Portland, fornecendo assim uma nova alternativa em termos de agregados para concreto e contribuindo, também, para a redução do impacto ambiental.

1.2.2 Objetivo específico

Para alcançar com êxito o objetivo geral têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar química e fisicamente o resíduo;
- b) determinar uma faixa granulométrica adequada que atenda de maneira satisfatória aos ensaios propostos e a normalização brasileira;
- c) determinar o teor ótimo de emprego do resíduo em concretos;
- d) determinar as características mecânicas (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, retração hidráulica e a velocidade de propagação de ondas ultra sônicas) e de durabilidade (porosidade,

absorção de água por sucção capilar e absorção por imersão) dos concretos produzidos.

Esse trabalho visa responder à seguinte questão: “É viável o emprego da areia proveniente da trituração do resíduo de mármore para a produção de concreto de cimento Portland?”.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Este estudo está concentrado no estudo experimental de concretos estruturais com substituição parcial ou integral de agregados triturados proveniente de apenas uma empresa. Esta limitação deve-se a questões de transporte, estocagem e disponibilidade destes materiais para a realização dos ensaios.

A escolha dos experimentos foi determinada pela sua relevância, conforme a disponibilidade do laboratório, equipamentos, recursos materiais, humanos e financeiros destinados à pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho é composto por sete capítulos, conforme a seguir:

No Capítulo 1 é feita a introdução da pesquisa, destacando-se as justificativas e relevância, os objetivos, a estrutura do trabalho e suas limitações.

No Capítulo 2, discutem-se os aspectos relacionados com o desenvolvimento sustentável, consumo de matérias-primas na Construção Civil, alternativas de reaproveitamento e da reciclagem dos resíduos sólidos na Construção Civil. Expõe aspectos relativos às características e origem das rochas ornamentais e, finalmente, são abordadas questões relativas ao resíduo do beneficiamento do mármore, volume gerado, bem como alguns estudos realizados e/ou em andamento com resíduo de rochas ornamentais.

No Capítulo 3 é enfocada a influência dos agregados nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

O Capítulo 4 apresenta detalhadamente o programa experimental, materiais e métodos utilizados, suas características e ensaios realizados.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados encontrados e a análise dos mesmos.

O Capítulo 6 é dedicado às considerações finais sobre a influência do resíduo em substituição aos agregados naturais, com base nos resultados do programa experimental realizado.

Finalmente, o Capítulo 7 fornece as referências Bibliográficas utilizadas neste estudo.

2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM DE RESÍDUOS

2.1 CONSUMO DE MATÉRIAS-PRIMAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Tudo que nos cerca, afirmam ROCHA e JOHN (2003), um dia será resíduo: casas, automóveis, móveis, pontes, aviões. A este total, devemos somar todos os resíduos do processo de extração de matérias-primas e de produção de bens. Assim, em qualquer sociedade, a quantidade de resíduos gerados supera a quantidade de bens consumidos.

Até a década de 50, a natureza era considerada somente como um pano de fundo em qualquer discussão que abordasse a atividade humana e suas relações com o meio (SCHENINI, 2004). Os movimentos sociais que tiveram início nos anos 70 representaram um marco na humanidade, com a formação de uma consciência preservacionista. A palavra *ecologia* passou a ser, então, um termo muito utilizado.

A década de 80 foi um período de grande desenvolvimento econômico e técnico. O bem estar material voltou a ser relevante, independentemente dos prejuízos à natureza que o processo produtivo pudesse provocar.

Entretanto, no início dos anos 90, na Conferência sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente das Nações Unidas (Rio 92) foi consolidada, com a AGENDA 21, a visão de que: desenvolvimento sustentável não apenas demanda a preservação dos recursos naturais de maneira a garantir para as gerações futuras iguais condições de desenvolvimento, mas também, permite uma maior justiça no acesso aos benefícios do desenvolvimento (ONU, 1992).

Segundo PENTTALLA (1997) o princípio do desenvolvimento sustentável é uma melhor distribuição dos recursos econômicos da humanidade, tendo uma

preocupação com a preservação da natureza. Os processos de produção devem economizar energia e não gerar subprodutos perigosos, que podem colocar em risco o meio ambiente e os seres vivos.

Além disso, observando-se o fator econômico (NUNES *et al*, 2003), a geração desordenada e a deposição final sem critérios ambientais podem ser identificadas como fontes de desperdício de insumos. Em condições adequadas, eles podem e devem ser reaproveitados, diminuindo assim o consumo dos recursos naturais e a necessidade de tratamento ou eliminação dos rejeitos, e reduzindo os riscos gerados. Assim, os desafios desta nova visão de desenvolvimento sustentável são, simultaneamente, o crescimento econômico, com preservação do meio ambiente e justiça social (JOHN, 2000).

Consequentemente o modelo linear de produção deve ser substituído por um modelo mais eficiente no aproveitamento dos recursos investidos. Este modelo é definido como de ciclo fechado. A Figura 2.1 apresenta uma adaptação do modelo de ciclo fechado ao caso da Construção Civil proposto por JOHN, (2000).

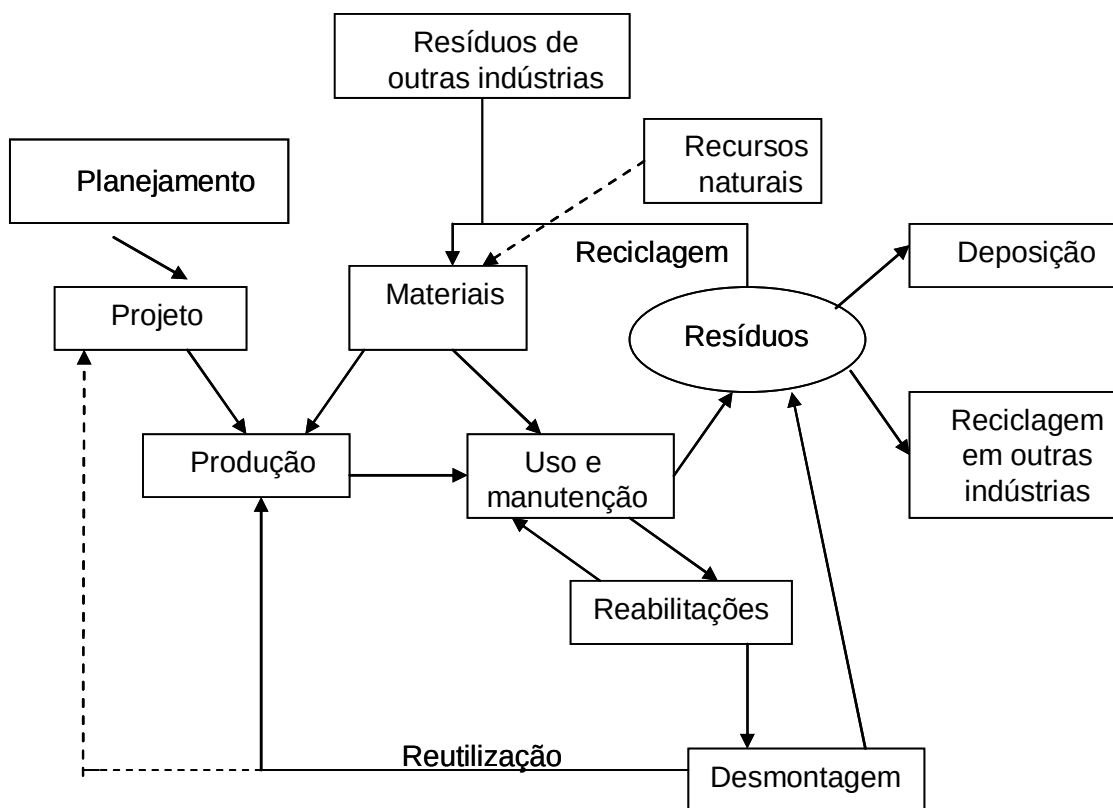


Figura 2.1 – Ciclo de produção fechado; adaptação de JOHN (2000).

Neste novo modelo, os produtos, além de apresentarem desempenho ambiental adequado durante a sua vida útil, não são mais projetados para serem destinados a aterros ao final de suas vidas úteis, ou seja, haverá redução do consumo de materiais e matérias-primas naturais para a produção de um mesmo bem; redução do consumo de energia empregada e redução da poluição gerada.

O movimento de tomada de consciência ambiental, surgido no final do século XX, cunhou um novo paradigma de produção e consumo sustentável de materiais que deve se tornar um imperativo para o século XXI. Nesse novo paradigma a reciclagem se apresenta como uma solução importante para prolongar a vida dos recursos não renováveis.

2.2 IMPACTOS DA RECICLAGEM

A reciclagem de resíduos, assim como qualquer atividade humana, também pode causar impactos ao meio ambiente. JOHN (2006) em seus estudos enfatiza que, fatores como quantidade de materiais, energia necessária ao processo de reciclagem, durabilidade, ou até mesmo que a reciclagem também pode gerar resíduos até mais agressivos ao homem e ao meio ambiente e devem ser observados.

É preciso também considerar os resíduos gerados pelos materiais reciclados no final de sua vida útil e na possibilidade de serem novamente reutilizados, fechando assim o ciclo, como apresentado na Figura 2.1.

JOHN *et al* (2006) salienta um parâmetro que geralmente é desprezado na avaliação desses produtos: o risco à saúde dos usuários do novo material bem como, dos operários da indústria recicladora. Os resíduos muitas vezes são constituídos por elementos perigosos como metais pesados e compostos orgânicos voláteis.

De forma geral, as pesquisas de reciclagem de resíduos se limitam a aspectos do desenvolvimento técnico do material. Entretanto, a ênfase em viabilidade do mercado é um compromisso com a eficácia da pesquisa, pois os benefícios sociais de um processo de pesquisa somente vão se realizar na sua totalidade se o novo produto produzido gerar empregos, diminuir o volume de

aterros, consumirem resíduos em vez de recursos naturais e evitar a contaminação do ambiente com o comprometimento da saúde da população.

Em outras palavras, a opção de reciclagem de um resíduo deve ser criteriosamente avaliada, considerando-se vantagens e desvantagens da mesma.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

A conceituação e a proposição de procedimentos para a gestão de resíduos sólidos têm sido alvo de diversos órgãos governamentais, especialmente a partir da década de 1990.

Devido à quantidade de resíduo gerado por inúmeros processos de produção e a diferença entre estes, a NBR 10004 (2004), Resíduos Sólidos – Classificação avalia os resíduos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, que podem apresentar riscos à saúde pública e/ou ao meio ambiente, conforme descrito a seguir:

- a) resíduos Classe I – perigosos – apresenta riscos à saúde pública (provocando ou acentuando o aumento da mortalidade ou incidência de doenças), ao meio ambiente (quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada), ou características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, que estão definidas na norma em discussão;
- b) resíduos Classe II – não perigosos – são divididos em duas subclasses, a saber:
 - resíduos Classe II A – não inertes – aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – perigosos ou de Classe II B – inertes, podem ter as propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - resíduos Classe II B – inertes – aqueles que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (2004), não solubiliza seus constituintes a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se: o aspecto, a cor, a turbidez, a dureza e o sabor.

A Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, em 2002 também apresenta uma série de definições referentes ao tema:

- resíduos de construção civil – provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, bem como os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, etc., comumente chamados de entulhos de obras;
- agregado reciclado – é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;
- reutilização – é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;
- reciclagem – é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação, devendo-se considerar todas as características do resíduo e, principalmente, seu risco ambiental, para que o desenvolvimento dos novos produtos tenha um bom desempenho e uma maior aceitação por parte dos consumidores;
- beneficiamento – é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições para que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.

2.4 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A Construção Civil como apontam LEVY e HELENE (2002) é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e desde os primórdios da humanidade foi executada de forma artesanal, gerando grande quantidade de resíduo, o que despertou o interesse dos construtores, já na época da edificação das cidades do Império Romano, quando se registrou os primeiros processos de reutilização de resíduos minerais da construção civil para a produção de novas obras.

A preocupação com resíduos, de maneira geral, é relativamente recente no Brasil. Nos Estados Unidos, segundo JOHN e AGOPYAN (2006), já existe desde o final da década de 1960 uma política para resíduos. Contudo, no Brasil, esta

realidade é bem diferente. Aqui ainda se discute uma legislação mais abrangente sobre resíduos.

Atualmente, na construção civil, há uma conscientização quanto ao esgotamento dos recursos não-renováveis utilizados ao longo de toda a sua cadeia produtiva, visando à diminuição dos custos e prejuízos devido ao desperdício de materiais e ainda com o descarte de seus subprodutos.

A cadeia produtiva da Construção Civil é, certamente, a maior consumidora de recursos naturais. Conforme SCHENINI (2004), ela consome algo entre 20% a 50% do total dos recursos naturais utilizados pela sociedade. É também, sem dúvida, a maior fonte geradora de resíduos, energia e, também, colabora significativamente para a poluição ambiental, inclusive para o aumento do efeito estufa (JOHN e ÂNGULO, 2006). Assim, não será possível um desenvolvimento sustentável sem que toda a cadeia produtiva da construção civil sofra transformações significativas.

O setor tem um grande desafio: como conciliar uma atividade produtiva desta magnitude com as condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável consciente, menos agressivo ao meio ambiente? Esta pergunta, ainda que antiga, ainda está sem respostas satisfatórias.

Por outro lado, com o desenvolvimento da consciência do setor em relação aos problemas ambientais que o cercam, tem-se hoje um consenso da necessidade de desenvolvimento de materiais e processos construtivos que não causem danos ao homem e ao meio ambiente (ROCHA e CHERIAF, 2003).

O grande volume de recursos naturais consumidos e a geração de resíduos nos processos industriais fazem da reciclagem uma alternativa para a preservação ambiental e a construção civil, de acordo com OLIVEIRA *et al.* (2003), apresenta-se como um dos setores com maior potencial para absorver esses resíduos.

Para que um problema de tal magnitude seja resolvido satisfatoriamente, é necessária a adoção de conceitos que levem em consideração o uso eficiente de materiais e energias renováveis, não nocivos, e conservando, ao mesmo tempo, a biodiversidade. KILBERT (1995) propôs os seguintes princípios:

a) minimizar o consumo de recursos (CONSERVAR);

- b) maximizar a reutilização de recursos (REUSO);
- c) proteger o meio ambiente (PROTEÇÃO dos FATORES AMBIENTAIS);
- d) usar recursos renováveis ou recicláveis (RENOVAR / RECICLAR);
- e) criar um ambiente saudável e não tóxico (NÃO TÓXICO);
- f) buscar a qualidade na criação do ambiente construído (QUALIDADE)

Sem dúvida, a maior experiência brasileira na área de reciclagem de produtos é a realizada pela indústria cimenteira. São grandes consumidoras de recursos naturais e reciclam aproximadamente mais de cinco milhões de toneladas por ano de escória de alto-forno, cinzas volantes, pneus, etc. YAMAMOTO (1997) estima que, em 1996, a indústria cimenteira brasileira, ao adotar a reciclagem, reduziu a geração de CO₂ em 29% e uma economia de combustível de 28%.

Além desta, o setor siderúrgico é também um grande reciclador com pelo menos seis milhões de toneladas de sucata reutilizada anualmente (JOHN, 2000). Boa parte do aço destinado a reforço de concreto armado, produzido no país, é proveniente do processo de arco elétrico, que utiliza como matéria-prima principal a sucata de aço. A reciclagem desta sucata permitiu economizar em 1997 cerca de seis milhões de toneladas de minério de ferro e evitou a geração de cerca de 2,3 milhões de toneladas de resíduo e de cerca de 11 milhões de toneladas de CO₂.

A cadeia produtiva da construção civil já é a maior recicladora da economia, mas possui enorme potencial para aumentar o volume de materiais que recicla, dada a quantidade de materiais que consome, e as características dos seus materiais. Neste sentido a reciclagem dos resíduos é um desafio importante a ser enfrentado.

2.5 ROCHAS ORNAMENTAIS

A pedra é sem dúvida o material de construção mais antigo que vem sendo utilizado pelo homem na sua luta pela sobrevivência e civilização. O período da idade da pedra, como afirma BIGNO (2002), é considerado o início das atividades tecnológicas, sendo a pedra, uma cooperadora da preservação da história, documentando os povos e suas culturas ao longo dos tempos. Inúmeras construções da antiguidade se preservaram até hoje, mesmo sofrendo as ações do intemperismo, a destruição pelo próprio homem, além das catástrofes naturais.

Desde a época do Império Romano, o ser humano utiliza calcário e mármore como materiais de construção (VARGAS *et al*, 2001). Na época da colonização portuguesa, foram utilizadas no Brasil as rochas graníticas e gnáissicas talhadas, ou seja, não polidas, para colunas de prédios, moldura de janelas, escadas externas, etc. O uso das rochas polidas importadas da Europa, sobretudo mármore, começou no período colonial.

Ainda de acordo com VARGAS *et al* (2001), a produção nacional de mármore iniciou-se no Século XX, em 1908, no Município de Mar de Espanha, estado de Minas Gerais, cidade onde foram coletadas as amostras para o presente estudo e, em 1938, atendeu 73% do consumo nacional. Até a primeira metade do Século XX, os mármore foram mais utilizados para os usos ornamentais altamente decorativos, por isso, as lojas que trabalham com rochas ornamentais são denominados, “marmorarias”.

2.5.1 Caracterização e origem

Segundo a Sociedade Brasileira de Geologia, as rochas ornamentais e de revestimento, também designadas pedras naturais, rochas dimensionais e materiais de cantaria, abrangem os tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortadas em formas variadas e beneficiadas por meio de esquadreamento, polimento e lustro.

Do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais e semi-ornamentais, são basicamente classificadas nas seguintes categorias:

- granito
- mármore
- ardósia
- basalto (estado do Rio Grande do Sul).

O granito e o mármore são as rochas ornamentais economicamente mais importantes. Estas duas categorias respondem por 90% da produção mundial (SPINOLA *et al*. 2004) e por isso o basalto e a ardósia não serão considerados neste estudo.

Os granitos são rochas magmáticas constituídas quase que totalmente por sílica (quartzo) e silicatos (feldspatos, etc.) e possuem estrutura granular compacta. Já os mármore são rochas metamórficas constituídas quase que totalmente de carbonato duplo de magnésio, bem como de componentes das rochas originais. O travertino, entretanto, é uma rocha calcária de sedimentação química, formada pela combinação de dióxido de carbono com carbonato de cálcio em solução saturada, e tem sido também chamado de mármore, para efeito de utilização (<http://www.pedrasnovomundo.com.br/atendimento.asp>).

2.5.1.1 Granitos

Os granitos têm sua formação ligada ao magmatismo e metamorfismo da crosta terrestre, de granulometria grossa sendo composto essencialmente de minerais félsicos, tais como quartzo, feldspato, biotita e/ou moscovita, anfibólios (sobretudo hornblenda) e minerais acessórios como a zirconita, turmalina, fluorita, apatita e rutilo em proporções bem mais reduzidas (<http://www.mundialgranitos.com.br/>).

Os granitos e quartzitos sejam de origem magmática, metamórfica ou sedimentar colocam-se no grupo de materiais de elevado componente silicoso (PENHA *et al.* 1996).

Aspectos de um exemplar de granito podem ser observados na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Exemplar de granito destacando três de seus minerais
(http://www.igc.usp.br/geologia/o_uso_dos_minerais.php).

2.5.1.2 Mármore

Os mármore são rochas metamórficas e recrystalizadas, de granulometria grossa e compostas principalmente de minerais carbonáticos, tais como calcita (CaCO_3) e dolomita ($(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3$), ocorrendo minerais acessórios como mica e clorita, que resultam da transformação de sedimentos químicos antigos depositados no fundo dos mares, que metamorfizados dão origem a cristais macroscópicos de calcita e dolomita (BIGNO, 2002). Do ponto de vista comercial, são incluídas também as rochas carbonáticas sedimentares, tal como o calcário e o dolomito.

O mármore é uma rocha metamórfica originada de calcário exposto a altas temperaturas e pressão. Por esse motivo, as maiores jazidas de mármore são encontradas em regiões de rocha matriz calcária e atividade vulcânica (<http://www.marmoariapedrabranca.com.br/pedrabranca/index.php?pagina=5>).

São três os grupos principais em que se classifica o mármore (<http://www.concatan.hpg.ig.com.br/marmores.htm>):

- calcário recrystalizado por metamorfismo;

- calcário tipo travertino, rocha formada por precipitação química, à custa de material carbonático contido em solução nas águas das fontes das regiões calcárias. O travertino normalmente mostra faixas de diversas cores, o que lhe confere belíssimo efeito ornamental. Vale lembrar que o mármore travertino apresenta fissuras que exigem estuque para o uso como revestimento (Figura 2.3);
- serpentino, tipo de rocha em geral pobre em carbonato de cálcio, mas que adquire ótimo polimento e pode ser usado como mármore verdadeiro.



Figura 2.3 – Mármore travertino (ROCHAS DE QUALIDADE, 2006).

Para PENHA *et al* (1996), a diferença principal entre mármore e granitos está basicamente na origem da rocha e sua composição mineralógica, que são determinadas pelas condições em que são formadas.

O simples exame visual já propicia a distinção entre mármore e granitos. Os granitos aparecem na natureza sob as mais variadas cores já que é formado por diversos minerais (predominantemente feldspatos), o que não ocorre com o mármore que é constituído por um pequeno número de materiais, apresentando uma coloração mais homogênea com muitos veios e não apresentam a coloração preta (pontos pretos) presente em quase cem por cento dos granitos (http://www.pedrasnovomundo.com.br/atendimento_01.asp).

Os mármore, como mencionam PENHA *et al* (1996), são compostos por calcita e por minerais de dureza entre 3,0 e 4,0 na escala de Friedrich Mohs, ao passo que os granitos possuem dureza de 6,0 a 7,0 na mesma escala.

2.5.2 Principais depósitos de rochas ornamentais do Brasil

O Brasil possui grandes reservas de mármore e granitos com os mais variados aspectos estéticos. Dentre os estados produtores, NEVES (2002) destacam o Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro, Bahia, Ceará, Pará. Na indústria da mineração brasileira existem aproximadamente 240 empresas extrativas, 300 serrarias e 3000 marmorarias (<http://www.cetemag.org.br>).

A Figura 2.4 apresenta a localização das principais lavras de rochas ornamentais na região sudeste.



Figura 2.4 – Mapa de distribuição das principais zonas produtoras de rochas ornamentais. (SCHOBENHAUS, QUEIROZ E COELHO – 1991).

2.6. RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE

2.6.1. Considerações gerais

A indústria de mineração e beneficiamento de mármore e granitos é uma das áreas promissoras de negócios do setor mineral, LISBÔA (2004) apresenta um crescimento médio na produção mundial estimado em 6% a.a., nos últimos dez anos, e com uma comercialização de materiais brutos e produtos acabados/ semi-acabados que movimenta em torno de US\$ 6 bilhões/ano, no mercado internacional. As rochas carbonáticas representam aproximadamente 58% desse volume; as silicáticas, 37%; as ardósias 5% (MONTANI, 2003, apud MELLO, 2004). No Brasil, HEIDER *et al* (2008) estimou a produção de rochas ornamentais em 2006, considerando os dados da ABIROCHAS, e apresentou uma variação positiva de 9,1% de 2005 para 2006 atingindo 7.521.759 toneladas.

As indústrias de mineração de mármore e granito têm como principal atividade sua extração, serragem e polimento para produção de rochas ornamentais, que são utilizadas principalmente na indústria da construção civil.

Grande parte das empresas do setor industrial é geradora de resíduos sob diversas formas (gases, líquidos ou sólidos), poluindo, causando grande degradação ambiental e não contribuindo para um desenvolvimento sustentável.

2.6.2. Geração de resíduos

Existem inúmeros resíduos produzidos nas atividades de extração, serragem e polimento dos mármore e, baseado em VILASCHI e SABADINE (2000), foi elaborado um gráfico (Figura 2.5) contendo os percentuais médios destes desperdícios, e uma tabela (Tabela 2.1) com a origem destas perdas.

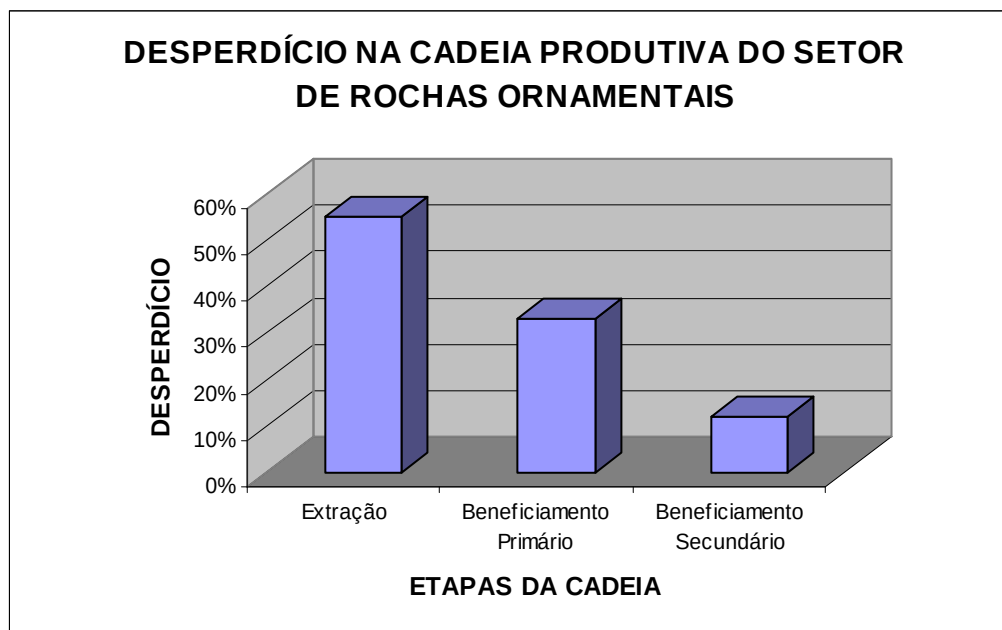


Figura 2.5 – Percentuais médios de desperdícios nas etapas da cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais.

TABELA 2.1 – Origem das perdas na cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais.

ETAPAS DA CADEIA PRODUTIVA	ORIGEM DAS PERDAS
EXTRAÇÃO	• blocos com dimensões não padronizadas; • cacos de pedra e pó.
BENEFICIAMENTO PRIMÁRIO (SERRARIA)	• lama abrasiva; • imperfeições dos casqueiros (laterais dos blocos); • quebras de placa por falhas no empilhamento; • serragem de placas defeituosas.
BENEFICIAMENTO SECUNDÁRIO (MARMORARIA)	• corte dos ladrilhos.

Cumprе esclarecer que este trabalho está focado no estudo dos resíduos oriundos das etapas de extração e beneficiamento sob a forma de aparas ou retalhos de pedra, de formas irregulares e tamanhos variados, resultantes da quebra e recortes que ocorrem durante a industrialização do mármore, devido a ausência de trabalhos específicos com este material.

GOBBO *et al* (2004) relata que, na extração e nas serrarias, perde-se cerca de 10 a 20% dos volumes processados, na forma de retalhos de pedra. Por sua vez, as marmorarias perdem, em média, 20% do volume de chapas trabalhadas, na forma de retalhos de pedra, ou seja, novamente, sobras, peças quebradas, e assim por diante, como mostram as Figuras 2.6 a 2.8.

Essas sobras, passíveis de serem britadas geram agregados com grande potencial de utilização na elaboração de concretos de Cimento Portland, podendo-se tornar uma alternativa viável para o abastecimento de areia para o setor da Construção Civil e para substituição das areias extraídas dos rios.

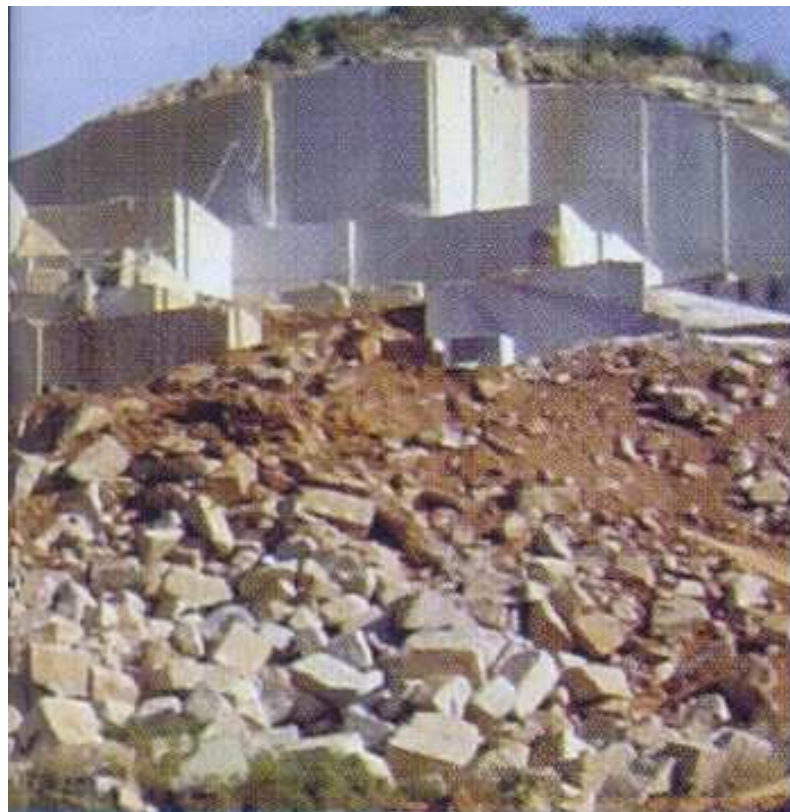


Figura 2.6 – Cacos de pedra na etapa de extração (ROCHAS DE QUALIDADE, 2005).

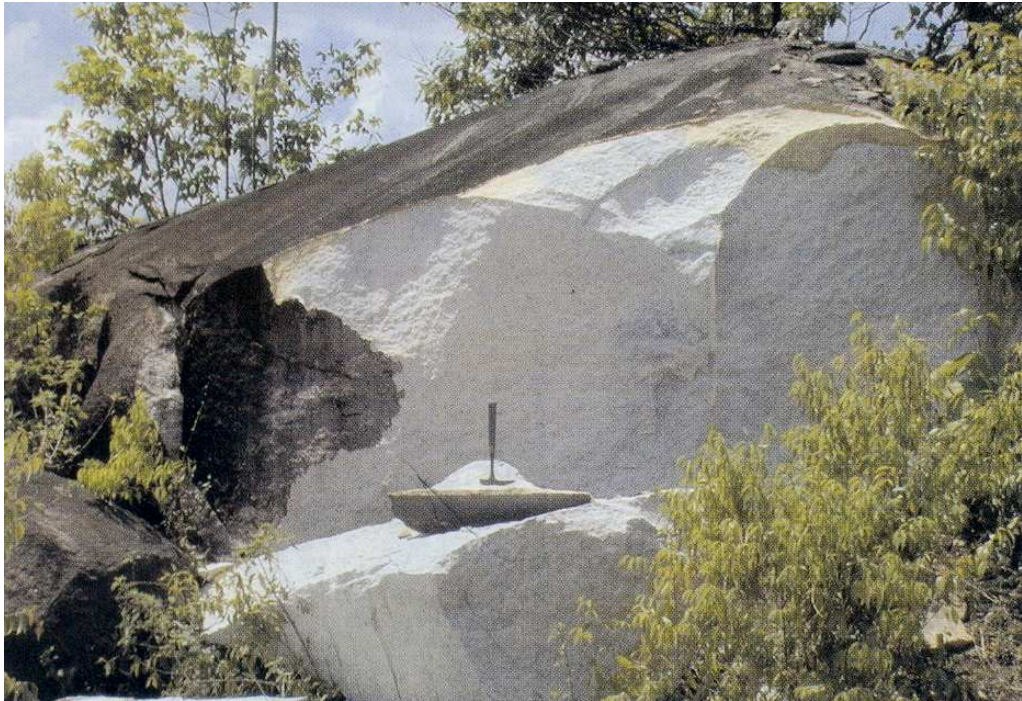


Figura 2.7 – Blocos com dimensões não padronizadas (Rochas de Qualidade, 2002).



Figura 2.8 – Retalhos de pedra em marmoraria

2.6.3. Trabalhos com resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais

Neste item apresentam-se alguns trabalhos utilizando resíduos de rochas ornamentais em produtos cerâmicos, argamassas, concretos convencionais e concretos auto-adensáveis.

CALMON *et al* (1997 e 1998), NEVES *et al* (1999 e 2000) e BARROTE (2000), desenvolveram seus trabalhos utilizando o resíduo da serragem e/ou do polimento de granito em argamassas, tijolos de solo-cimento e em tijolos cerâmicos, onde foi constatada a viabilidade técnica da substituição.

GONÇALVES (2000) utilizou com êxito o resíduo de corte de granito como adição para a produção de concretos.

MOURA *et al* (2002) realizaram alguns estudos sobre a utilização destes resíduos na confecção de lajotas para piso e execução de aterros.

Em 2001, PONTES e STELLIN, PONTES e ALMEIDA estudaram o aproveitamento de rejeitos finos de pedreiras brasileiras para uso em construção civil.

Além destes, MENEZES *et al* (2002), GONÇALVES *et al* (2002) e BIGNO (2002), também comprovaram a viabilidade da utilização de resíduos de rochas ornamentais, inclusive em concreto de cimento Portland.

XAVIER *et al* (2003), VIEIRA *et al* (2003) e NUNES *et al* (2003) visaram aproveitar (reciclar) o resíduo de corte e polimento do granito em misturas cerâmicas. Também MOREIRA *et al* (2003) obteve sucesso utilizando esse resíduo em cerâmica vermelha.

LISBÔA (2004) desenvolveu o trabalho “Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas”, onde verificou uma melhora nas propriedades mecânicas do concreto com a utilização do resíduo.

Estudos de MOREIRA *et al* (2005), MOTHE *et al* (2005), PONTES e VIDAL (2005), PONTES e STELLIN (2005) sobre aplicações industriais na Construção Civil, para uso do resíduo na indústria cerâmica; blocos estruturais; piso para pavimentação; e argamassas, foram realizados e os resultados obtidos foram considerados promissores.

SOUZA *et al* (2006) no estudo da utilização dos resíduos proveniente da serragem de rochas granítica como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente, obtiveram resultados que satisfazem os métodos de misturas asfálticas, preconizadas pelo DNITT.

3 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

3.1 AGREGADOS

3.1.1 Importância

Como pelo menos 60% a 80% do volume do concreto são ocupados pelos agregados, é indiscutível que a sua qualidade seja de considerável importância. SILVA (1995) enfatiza que os agregados podem exercer influência sobre a resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto.

Apesar disso, os agregados são frequentemente considerados como materiais de enchimento inertes negligenciando sua importância nas propriedades do concreto. Há de se considerar inclusive a sua influência no custo e na trabalhabilidade das misturas de concreto, o que justifica serem tratados com atenção (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Considerações importantes também foram apresentadas por NEVILLE (1997), constatando que o agregado influencia a resistência do concreto e compromete a sua durabilidade e o seu desempenho estrutural. “O agregado antes era tido como um material inerte disperso por entre a pasta de cimento, principalmente por razões econômicas. No entanto, é possível adotar um ponto de vista oposto e considerar o agregado como um material de construção ligado em um todo coesivo por meio de uma pasta de cimento, como uma construção de alvenaria”.

A utilização do agregado não se destina, portanto, apenas à redução do custo, mas à obtenção de vantagens técnicas consideráveis, como maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura, conforme NEVILLE (1997). PETRUCCI (1983) e SILVA (1995) também afirmaram ser benéficas a influência do agregado sobre o concreto, com relação à retração e à

resistência ao desgaste. Se o agregado for de boa qualidade, ele não prejudica a resistência mecânica, pois sua resistência é superior à da pasta de aglomerante.

O conhecimento de algumas características dos agregados como a massa específica, composição granulométrica e teor de umidade é uma exigência para a dosagem dos concretos. A porosidade, a massa específica, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos grãos determinam as propriedades dos concretos no estado fresco. Além da porosidade, a composição mineralógica do agregado afeta sua resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade e ensaio de sanidade, que por sua vez influenciam várias propriedades do concreto endurecido contendo o agregado. Analisando a Figura 3.1, torna-se evidente que as características dos agregados são decorrentes da microestrutura do material, das condições prévias de exposição e do processo de fabricação.

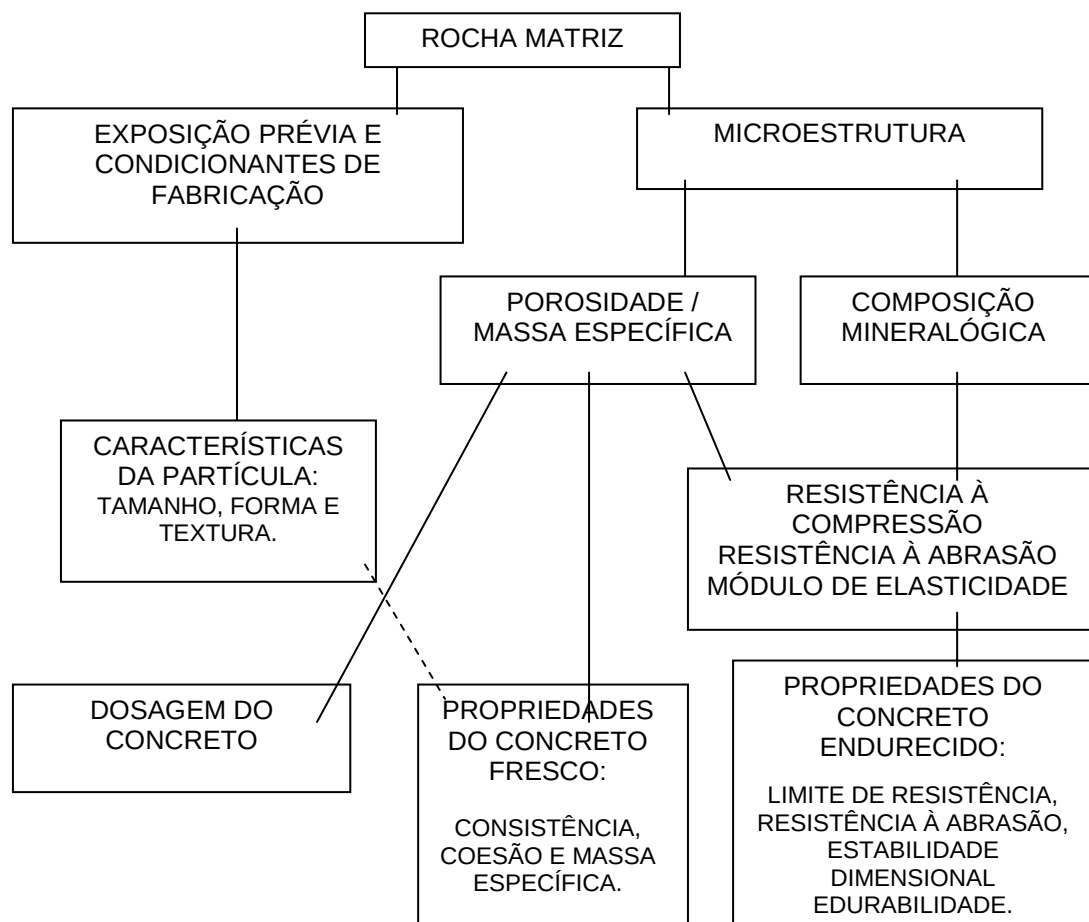


Figura 3.1 – Diagrama ilustrativo das várias inter-relações (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

3.1.2 Porosidade, absorção e umidade superficial.

A presença de poros internos nas partículas está relacionada com a massa específica do agregado e, as características desses poros são muito importantes, pois influenciam propriedades tais como: a aderência entre agregado e pasta de cimento hidratada, a resistência do concreto ao congelamento e ao degelo, bem como a sua estabilidade química e resistência à abrasão. A porosidade influencia também a massa específica aparente e, conseqüentemente, no volume de concreto para uma determinada massa de agregado.

O tamanho dos poros dos agregados é bastante variável, sendo que os maiores podem ser vistos ao microscópio ou a olho nu, e mesmo os menores se apresentam com dimensões maiores do que os poros da pasta de cimento como citado por NEVILLE (1997). Alguns poros estão completamente no interior do sólido; outros se abrem para a superfície da partícula. A pasta de cimento, por causa de sua viscosidade, não consegue penetrar à grande profundidade a não ser nos poros maiores. Porém, a água pode entrar nos poros, em quantidade que depende do tamanho, continuidade e volume total desses poros. Na Tabela 3.1 são apresentados valores de porosidade de algumas rochas comuns e, como o agregado representa cerca de 75% do volume do concreto, torna-se evidente sua contribuição para a porosidade global do concreto.

TABELA 3.1 – Porosidade de algumas rochas comuns NEVILLE (1997).

GRUPO DE ROCHAS	POROSIDADE %
Arenito	0,0 – 48,0
Quartzito	1,9 – 15,1
Calcário	0,0 – 37,6
Granito	0,4 – 3,8

A absorção e a umidade superficial do agregado são de grande importância nas pesquisas de concreto, pois estão diretamente ligadas à quantidade de água de amassamento. Para um mesmo tipo de agregado, maior absorção indica maior

porosidade, maior grau de alteração e menor massa específica (ANDRADE *et al*, 1997).

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não há um filme de água na superfície, o agregado é dito estar na *condição saturada superfície seca (SSS)*; quando o agregado está saturado e também há umidade livre na superfície, o agregado está na *condição úmida ou saturada*. Na *condição seca em estufa*, toda a água evaporável do agregado foi removida pelo aquecimento a 100°C. *Capacidade de absorção* é definida como a quantidade total de água requerida para trazer um agregado da condição seca ao ar para a condição SSS. Esses níveis de secagem são mostrados esquematicamente na Figura 3.2.

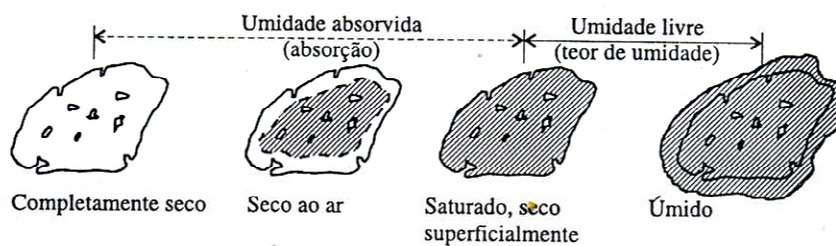


Figura 3.2 – Representação esquemática da umidade do agregado, NEVILLE (1997).

A absorção de água do agregado é obtida determinando-se o acréscimo de massa de uma amostra seca em estufa e depois imersa em água durante 24 horas, removendo-se a água superficial. A relação entre o aumento de massa e a massa da amostra seca, expressa em porcentagem, é denominada absorção.

Embora não haja uma relação definida entre a resistência do concreto e a absorção de água do agregado, os poros da superfície da partícula influenciam na aderência entre o agregado e a pasta de cimento, podendo, portanto exercer influência sobre a resistência do concreto (NEVILLE, 1997).

Geralmente, permite-se que no período da pega do concreto, o agregado esteja na condição saturada superfície seca. Se o agregado for misturado em condição seca, admite-se que seja absorvida água da mistura em quantidade suficiente para saturar o agregado. No entanto, é possível que as partículas sejam rapidamente envolvidas com pasta de cimento, que impede a entrada de água necessária à saturação. Isso se aplica ao agregado graúdo, em que a água tem que

se deslocar da superfície para o interior da partícula. Como resultado a relação água/cimento efetiva é maior do que seria caso houvesse a total absorção de água pelo agregado. Esse efeito é significativo principalmente nas misturas ricas, em que pode ocorrer rapidamente o cobrimento do agregado. Em misturas mais pobres, com muita água, a saturação ocorre normalmente (NEVILLE, 1997).

3.1.3 Aderência do agregado

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é uma propriedade significativa para a resistência do concreto, principalmente para a resistência à flexão. Em parte, a aderência é devida ao intertravamento do agregado e a pasta de cimento hidratada, em virtude da aspereza da superfície das partículas de agregado. NEVILLE (1997) enfatiza que superfícies mais ásperas resultam em melhor aderência com partículas mais moles, porosas e mineralogicamente heterogêneas.

Além disso, a aderência é influenciada também pela composição química e mineralógica do agregado, bem como pela condição eletrostática da superfície. Por exemplo, pode existir algum tipo de aderência química no caso do calcário, da dolomita e, possivelmente, dos agregados silicosos e na superfície de partículas polidas podem se desenvolver forças capilares, (NEVILLE 1997). Contudo, pouco se sabe ainda sobre estes fenômenos. Em qualquer hipótese, é condição necessária para que se tenha uma boa aderência, que a superfície do agregado seja limpa e livre de partículas de argila.

Não há como determinar, por meio de ensaios, a qualidade da aderência do agregado. Normalmente, quando a aderência é satisfatória, um corpo-de-prova rompido deve ter algumas partículas de agregados rompidas, além de outras, mais numerosas, arrancadas de seus alojamentos na pasta. Todavia, um excesso de partículas rompidas pode significar que o agregado é muito fraco. Como a resistência da pasta hidratada endurecida tem influência sobre a aderência, esta aumenta com a idade do concreto (NEVILLE, 1997). Na verdade, é importante o conhecimento da interface entre o agregado e a pasta de cimento que o envolve para a análise da ruptura do concreto, pois o agregado significa uma descontinuidade, dando origem a um efeito de parede. A região da interface também é rica em partículas mais finas de cimento e tem uma relação água / cimento maior do que a pasta toda.

3.1.4 Resistência do agregado

A resistência à compressão do concreto não pode ser expressivamente maior do que a da maior parte do agregado, mesmo não sendo fácil determinar a resistência das partículas isoladas. Por esta razão, a resistência do agregado é usualmente obtida de determinações indiretas, por meio do valor da resistência ao esmagamento do agregado em fragmentos, da força necessária para compactar o agregado no concreto (NEVILLE, 1997). A avaliação do desempenho do agregado significa simplesmente experiência prévia com um dado agregado ou o uso experimental em um concreto que se conhece ter certa resistência com agregados já utilizados.

Se um concreto confeccionado com um agregado a ser estudado, apresentar resistência à compressão insatisfatória e muitas partículas desse agregado rompidas (após a análise da ruptura de um corpo-de-prova elaborado com esse agregado), pode-se concluir que a resistência do agregado é menor do que a resistência à compressão nominal desse concreto.

Para ANDRADE *et al* (1997) a rocha ou alguns materiais sintéticos utilizados como agregados apresentam resistências à compressão e à tração maiores do que o concreto, onde a zona de transição entre a pasta e o agregado é a parte mais fraca do sistema. Com exceção do concreto de alto desempenho, são raros os casos em que o agregado possui resistência menor do que a pasta ou argamassa que o envolve, como alguns tipos de concretos fabricados com agregados leves e alguns tipos de agregados como o micaxisto.

A resistência inadequada do agregado representa um caso limite porque as propriedades físicas do agregado têm alguma influência sobre a resistência do concreto, mesmo quando o agregado é suficientemente resistente para não se romper prematuramente. Comparando concretos preparados com agregados diferentes, observa-se que a influência sobre a resistência do concreto é qualitativamente igual, quaisquer que sejam as proporções da mistura, tanto em ensaios de tração como de compressão. NEVILLE (1997) salienta que a influência do agregado na resistência do concreto seja provavelmente devida não somente à resistência mecânica do agregado, mas também à sua absorção e aderência.

Geralmente, a composição, textura e estrutura do agregado têm uma significativa influência na resistência e na elasticidade do concreto. Assim sendo, uma resistência baixa pode ser devida à pequena resistência dos grãos constituintes ou que os grãos possam ser resistentes, mas não estarem bem ligados ou cimentados entre si.

NEVILLE (1997) considerou que um bom valor médio da resistência à compressão do agregado é cerca de 200 MPa, porém muitos agregados excelentes têm resistência de até 80 MPa. Na Tabela 3.2, são apresentados os valores de resistência de algumas rochas, incluindo-se o quartzito. Deve-se notar que a resistência necessária ao agregado é consideravelmente maior do que os valores normais de resistência do concreto, porque as tensões na interface das partículas podem ser muito maiores do que a tensão nominal aplicada.

TABELA 3.2 – Resistência à compressão de rochas americanas geralmente usadas como agregados de concreto, NEVILLE (1997).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				
TIPO DE ROCHA	NÚMERO DE AMOSTRAS	VALOR MÉDIO	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO
Granito	278	181	257	114
Felsito	12	324	526	120
Basalto	59	283	377	201
Calcário	241	159	241	93
Arenito	79	131	240	44
Mármore	34	117	244	51
Quartzito	26	252	423	124
Gnaiss	36	147	235	94
Xisto	31	170	297	91

Costumava-se especificar um ensaio para determinação da resistência à compressão de rochas com cilindros preparados. No entanto, o resultado desses ensaios é influenciado pela presença de planos de clivagem na rocha que podem não ser significativos, a não ser que a rocha tenha sido fragmentada até os tamanhos que serão usados no concreto. Em essência, o ensaio de compressão mede a qualidade da rocha mãe, mas não propriamente a qualidade dos agregados como usados no concreto. Por essa razão, esse ensaio é empregado com pouca frequência (PINHEIRO, 2003).

Raramente se determina o módulo de elasticidade do agregado. Isso, entretanto, não é importante porque o módulo de elasticidade do concreto é, geralmente, tanto maior quanto maior o módulo dos agregados que o constituem. Segundo NEVILLE (1997), o módulo de elasticidade do agregado influencia na grandeza da retração e da fluência que podem ocorrer no concreto. Em outras palavras, uma diferença muito grande entre os módulos de elasticidade do agregado e da pasta de cimento hidratada, acentua o desenvolvimento de microfissuras na interface agregado-matriz.

Agregados com resistência e módulo de elasticidade moderados ou baixos podem ser bons para a preservação da integridade do concreto. As variações de volume do concreto, de origem hidráulica ou térmica, resultam menores tensões na pasta de cimento hidratada se o agregado for compressível. Ou melhor, a compressibilidade do agregado reduz as tensões internas no concreto, ao passo que agregados rígidos e resistentes podem resultar em fissuração da pasta que os envolvem.

MEHTA & MONTEIRO (1994) relatam que os agregados habitualmente usados para a produção de concreto convencional, são geralmente densos e resistentes; portanto, raramente é um fator limitante da resistência e das propriedades elásticas do concreto endurecido. Valores típicos da resistência à compressão da maioria dos granitos, basaltos, "trapps", "flints", arenito quartizílico e calcários densos variam de 210 a 310 MPa e o módulo de elasticidade dinâmico varia de 70 a 90 GPa.

3.1.5 Forma e textura das partículas

A forma das partículas dos agregados de acordo com COUTINHO (1973) afeta o comportamento do concreto, pois tem influência na trabalhabilidade, no ângulo de atrito interno em estado fresco, na compacidade, etc, isto é, nas propriedades que dependem da quantidade de água de amassamento.

MEHTA & MONTEIRO (1994) salientam que as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento do que partículas lisas e arredondadas para se produzir misturas trabalháveis e, dessa forma, aumentam o custo do concreto. A forma diz respeito às características geométricas dos agregados, tais como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. Partículas formadas por atrito tendem a ser arredondadas pela perda de vértices e arestas. Agregados de rochas intrusivas britadas possuem vértices e arestas bem definidos e são chamados de angulosos. Calcários estratificados, arenitos e folhetos tendem a produzir fragmentos alongados e achatados. Partículas cuja espessura é relativamente pequena em relação às outras duas dimensões são chamadas de lamelares ou achatadas, enquanto aquelas cujo comprimento é bem maior que as outras duas dimensões são chamadas de alongadas.

A forma das partículas do agregado pode ser descrita pelo uso de dois parâmetros designados por esfericidade e curvatura que tem sido usado para a caracterização dos grãos conforme a Figura 3.3.

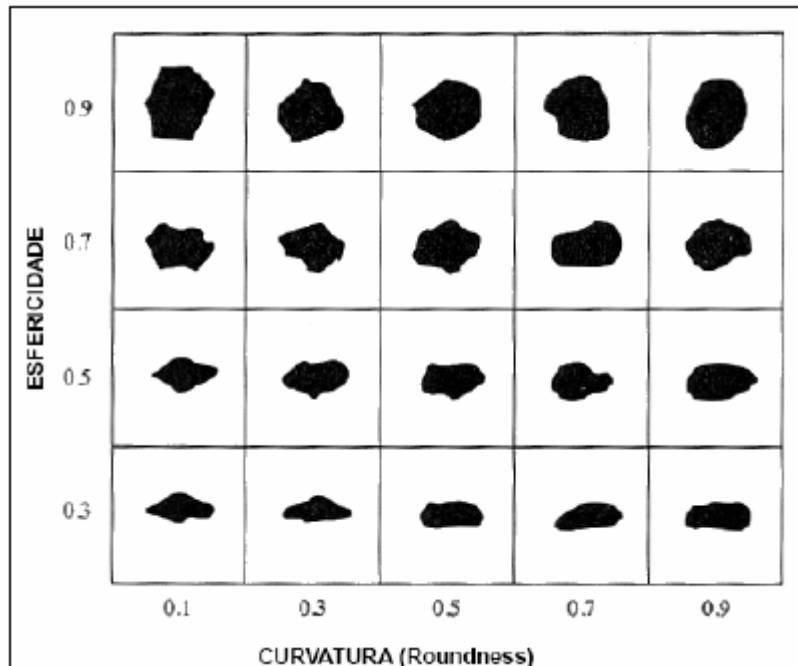


Figura 3.3 – Formas das partículas, POOLE & SIMS (1998).

A esfericidade é dada pela relação entre a área superficial das partículas e o seu volume, enquanto a curvatura é a relação entre o raio médio das extremidades e os limites do raio de circunferência máxima inscrita de cada partícula.

De uma maneira geral, considera-se que as partículas de elevada esfericidade, porém angulosos (com baixo valor do parâmetro de curvatura), são as ideais para a produção de concretos em comparação as partículas lamelares e alongadas (POOLE e SIMS, 1998), conforme a Figura 3.4.

Um outro termo usado para definir a forma dos agregados é a área específica volumétrica, definida como a relação entre a área superficial e o volume.

Partículas alongadas e lamelares devem ser evitadas no concreto em virtude da presença destas partículas aumentarem o valor da área específica e o consumo de pasta de cimento no concreto.

SILVA (1995) considera que os agregados de forma lamelar são difíceis de serem misturados e manuseados, exigindo maior quantidade de argamassa. Por conta disso, utiliza-se quantidade muito maior de areia do que aquela obtida no método baseado na granulometria ideal e, conseqüentemente, uma maior quantidade de água (DÍAZ, 1997).

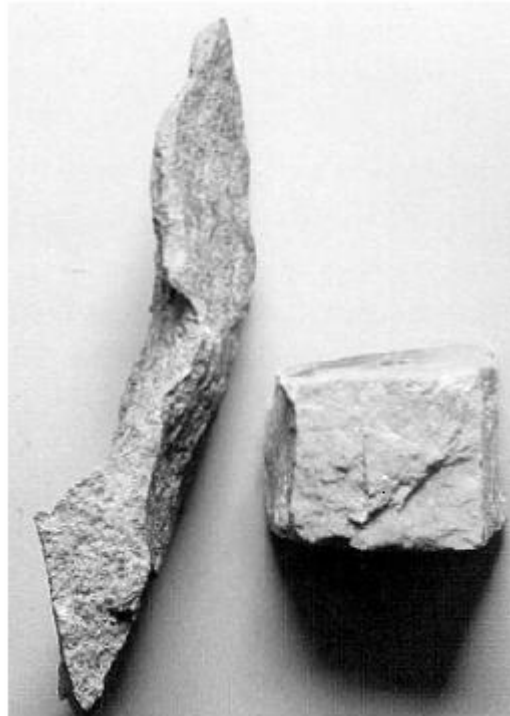


Figura 3.4 – Partícula alongada (indesejável) à esquerda e partícula desejável para concreto à direita.

O adensamento do concreto, contendo agregados lamelares, é mais difícil, podendo formar ninhos de concretagem além de ter uma tendência a diminuir a aderência da pasta de cimento com o agregado, aumentando assim a permeabilidade do concreto.

NEVILLE (1997) enfatiza que ele depende da resistência à abrasão da rocha-mãe e das ações de desgaste a que a partícula foi submetida. Em agregados triturados, a forma das partículas depende da origem do mineral, do tipo de triturador e da relação entre os tamanhos de material que entra e do material que sai do triturador. Uma classificação prática e abrangente de arredondamento é a citada por NEVILLE (1997), mostrada na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Classificação da forma de partículas, com exemplos, NEVILLE (1997).

Classificação	Descrição	Exemplos
Arredondado	Completamente erodido pela água ou pelo atrito	Seixo de rio ou de praia; areia de rio ou deserto
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente desgastado por atrito, com cantos arredondados.	Outros seixos; opalas.
Lamelar	Material em que a espessura é pequena em relação às outras dimensões	Rochas laminadas
Anguloso	Possuem arestas bem definidas formadas pela interseção de faces relativamente planas	Pedras britadas em geral
Alongado	Geralmente anguloso, em que o comprimento é bem maior do que as outras dimensões.	
Discóide	Comprimento muito maior do que a largura e largura muito maior do que a espessura	

Segundo BUEST NETO (2006), uma partícula é considerada lamelar quando a sua espessura é menor que 0,6mm da sua dimensão nominal. O índice de lamelaridade corresponde à relação da massa das partículas lamelares pela massa da amostra. BUEST NETO considera ainda uma partícula alongada, quando o comprimento (maior dimensão) é igual ou superior a 1,8 vezes a sua dimensão nominal. O índice de alongamento corresponde ao quociente da massa das partículas alongadas pela massa da amostra.

A presença de mais de 10% ou 15%, em massa, de partículas alongadas no agregado gráudo, geralmente é considerada indesejável no concreto. NEVILLE

(1997) relata que o limite para o índice de lameralidade do agregado graúdo constituído por seixo rolado natural é de 50% e para agregado graúdo britado ou parcialmente britado é de 40%. Com isso, para superfícies expostas a desgaste, são necessários índices inferiores a esses.

A determinação do índice de forma dos grãos do agregado pode ser feita pela norma NBR7809. A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) – Especificações de Agregados para Concreto estabelece os limites superiores desse índice como segue:

- Em agregado miúdo: sem referência
- Em agregado graúdo: < 3

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), a textura superficial depende da dureza, granulação e porosidade da rocha matriz e sua subsequente exposição ao atrito. Há evidências de que a textura superficial influencia na resistência do concreto à flexão, pelo menos nas primeiras idades. Uma textura mais áspera favorece a formação de maior aderência mecânica entre o agregado e a pasta de cimento. Em idades mais avançadas, a forte aderência química entre agregado e pasta de cimento é mais significativa do que a aderência mecânica.

O aumento de aderência devido à textura áspera está relacionado com o efeito das forças de natureza físico-química e, com efeito, de intertravamento mecânico entre agregado e pasta de cimento. Para o concreto fresco, a textura áspera vai exigir mais água, reduzindo um pouco, mas não totalmente, esta vantagem (SILVA, 1995).

3.1.6 Substâncias deletérias

Substâncias deletérias presentes no agregado são substâncias capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega, a resistência, a estética e as características de durabilidade do concreto, e são constituintes minoritários nos agregados graúdos e miúdos.

Há três categorias de substâncias deletérias presentes nos agregados: impurezas que interferem no processo de hidratação do cimento; películas que impedem a aderência efetiva entre o agregado e a pasta de cimento hidratada; partículas fracas ou não sãs.

Além destas categorias, todo o agregado, ou parte dele, também pode ter efeitos deletérios envolvendo reações químicas no concreto, como por exemplo, a reação álcali-agregado.

3.1.6.1 Impurezas orgânicas

Os agregados podem ter resistência suficiente e mesmo assim não ser satisfatórios para o uso em concreto se contiver impurezas orgânicas que possam interferir com as reações químicas da hidratação do cimento (NEVILLE, 1997). A matéria orgânica presente nos agregados, geralmente se constituem de partículas de húmus e argila orgânica que, segundo ALVES (1987 e 1993) prejudicam a resistência do concreto. Esses materiais são encontrados com maior frequência nos agregados miúdos do que nos grãos, e podem ser removidos por água alcalina.

. A determinação do teor de impureza orgânica pode ser feita pela norma NBR NM 49. A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) – Especificações de Agregados para Concreto estabelece os limites para quantidade de matéria orgânica como segue:

- Em agregado miúdo: < 300 p.p.m.

3.1.6.2 Argila e outros materiais finos

Uma boa aderência do agregado com a pasta de cimento é fundamental para assegurar ao concreto, resistência mecânica e durabilidade. Assim sendo, a argila, que pode estar presente no agregado na forma de películas superficiais, interfere nesta aderência.

NEVILLE (1997) enumera dois tipos de materiais finos: o silte e o pó de pedra. O silte é o material entre $2\mu\text{m}$ e $60\mu\text{m}$, reduzido a este tamanho, por intemperismo, sendo encontrado geralmente nos agregados naturais. O pó de pedra é um material fino formado durante o processo de fragmentação da rocha para a obtenção do agregado triturado, podendo ser removido por meio de lavagem.

Argilas e siltes têm os inconvenientes de recobrir os grãos do agregado prejudicando a aderência e de ter grande área superficial exigindo água em demasia na sua aplicação, aumentando assim a relação água/cimento e prejudicando a resistência do concreto (PETRUCCI, 1983).

Em vista disso é necessário controlar os teores de argila, silte e pó de pedra nos agregados. A norma brasileira NBR 7219 (ABNT, 1987) prescreve o método de determinação de material pulverulento no agregado. A determinação do teor de argila e de materiais friáveis pode ser feita pela norma NM 4418 (ABNT, 1995). A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) – Especificações de Agregados para Concreto estabelece os limites para os teores desses materiais como segue:

- Em agregado graúdo:
 - Teor de argila: 3%
 - Teor de pulverulento: 1%
- Em agregado miúdo:
 - Teor de argila: 3,0%
 - Teor de pulverulento: 5%

3.1.6.3 Partículas não sãs

A maioria das partículas dos agregados é satisfatória. Entretanto, NEVILLE (1997) destaca dois tipos gerais de partículas não sãs: aquelas que não conseguem manter a integridade, ou friáveis, e aquelas que resultam em expansão e desagregação quando expostas ao congelamento ou mesmo à água.

Os xistos e outras partículas com massa específica baixa podem causar falhas ou escamamento do concreto. Em teores altos, maiores do que 2% a 5%, essas partículas podem comprometer a resistência mecânica do concreto e certamente não devem ser usadas em concretos submetidos à abrasão.

O carvão, além da baixa massa específica, pode se expandir, causando degradação do concreto e perturbando o processo de hidratação da pasta de cimento. Pode chegar a até 0,25% da massa do agregado.

A mica deve ser evitada porque influencia de modo adverso a demanda de água e a resistência do concreto. Fookes e Revie, citados por NEVILLE (1997), determinaram que um teor de 5% de mica provocou a redução de aproximadamente 15% na resistência à compressão do concreto aos 28 dias, mesmo mantendo constante a relação água/cimento. A razão provável disso pode ser a aderência insuficiente entre a pasta de cimento e a superfície das partículas de mica.

A maioria dessas impurezas discutidas nesta seção se encontra em jazidas de agregados naturais e são muito menos frequentemente encontradas em agregados britados. No entanto, NEVILLE (1997) menciona alguns agregados beneficiados, como resíduos de mineração, que podem conter substâncias nocivas. Por exemplo, pequenas quantidades de chumbo solúvel em água, podem retardar muito a pega e reduzir a resistência do concreto às primeiras idades; a resistência em longo prazo não é alterada.

A norma ASTM C 123 estabelece os limites para os teores desses materiais como segue:

- Em agregado graúdo: 1,0%
- Em agregado miúdo: 1,0%

3.1.7 A reação Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação que envolve os álcalis provenientes geralmente do cimento e de agregados reativos ocorrendo particularmente nas áreas úmidas do concreto, sendo as estruturas deterioradas, dos mais variados tipos: barragens, pontes, pavimentos, quebra-mar, píer e fundações de concreto em subestações elétricas.

ANDRADE (1997) relata registros sobre casos de reação álcali-agregado no Brasil, sendo que alguns desses casos são apresentados a seguir:

- “Barragem de Jupia – Primeiro estudo sobre a reação álcali-agregado no Brasil, desenvolvido por Gytahy em 1963. Foi identificada a presença de agregados reativos, sendo confirmada a expansão por meio de ensaios laboratoriais. A solução foi o emprego de até 35% de pozolana.”
- “Barragem de Água Vermelha – Construída no Rio Grande, divisa dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, entre 1975 e 1979. Foi constatado, através de ensaios, que um dos agregados (cascalho) apresentou comportamento deletério. A decisão adotada foi o emprego de cimento com teor de álcalis igual ou menor que 0,6% e adição de 30% de pozolana.”

- “Barragem de Moxotó (Usina de Apolônio Sales) – O início da construção data de julho de 1972, com término da concretagem principal em 1977. Foi constatada a presença de reação expansiva entre os componentes mineralógicos (quartzo deformado) e os álcalis do cimento, o que provocou mudança na geometria original da estrutura da Casa de Força, causando sérios problemas estruturais e operativos nos grupos hidrogeradores. Para inibir a reação recomendou-se a injeção de CO_2 sob pressão e redução da temperatura em partes da estrutura (poço da turbina), considerando ser a temperatura um dos aceleradores da reação. Para minimizar os efeitos da expansão algumas medidas foram tomadas, tais como abertura de juntas entre os blocos, possibilitando a recuperação da parte da geometria, e liberação de tensões da estrutura e novas recentragens, com ajustes das peças fixas e embutidas.”
- “Barragem de Peti – Construída em 1946, no rio Santa Bárbara, em Minas Gerais. Por observações diretas foram identificadas fissuras e fendas, sendo detectado que as causas prováveis seriam os problemas de reação álcali-agregado e variação de temperatura. Como solução foi indicada o tratamento de impermeabilização e revestimento.”
- “Barragem de Furnas – Localizada no Rio Grande, município de Alpinópolis, Minas Gerais, sua construção teve início em julho de 1958 e a operação comercial em setembro de 1963. Recentemente foram observadas fissuras em forma de mapa nos vertedouros, cujos ensaios, realizados em testemunhos de concreto, confirmaram a presença de reação do tipo álcali-silicato (quartzito contendo quartzo extremamente deformado). As medidas recomendadas foram: monitoramento das estruturas, mapeamento das fissuras, reparos com injeção de epóxi e extração periódica de testemunhos de concreto, que serão submetidos a um programa de ensaios já estabelecido. Tais recomendações permitirão que providências possam ser tomadas para evitar o comprometimento da operacionalidade e da segurança da barragem.”

Os principais sintomas decorrentes da RAA são: microfissuras no concreto; fissuras nas proximidades da superfície dos agregados graúdos, podendo também ocorrer na interface; presença de gel exsundando ou preenchendo os vazios do concreto; fissuração característica na superfície, com panorama poligonal, havendo predominância na direção de maior dimensão, podendo ser confundida com o panorama de reação por sulfato ou até mesmo retração por secagem, quando as fissuras são de pequena abertura e com fissuração de origem térmica quando as fissuras são de grande abertura (ANDRIOLO *et al*, 1997).

A ocorrência de fissuração pode determinar a perda de estanqueidade, pois permite o transporte de elementos agressivos junto com a água, para o interior do elemento de concreto.

A seguir, nas Figuras 3.5 a 3.8 estão apresentadas fotos de algumas barragens com evidência de reação álcali-agregado.



Figura 3.5 - Barragem de Furnas – Vista lateral do pilar do vertedouro, ANDRADE *et al* (1997).



Figura 3.6 - Barragem de Mascarenhas de Moraes – Detalhe de fissuras tipo mapa na crista de um muro divisório da calha, ANDRADE *et al* (1997).



Figura 3.7 - Barragem de Porto Colômbia – Detalhe do topo de um dos pilares do vertedouro com fissuração tipo mapa e deslocamento nas bordas, ANDRADE *et al* (1997).



Figura 3.8 – Barragem de Fontana (USA) – Vista do vertedouro, Fissuração e deslocamento, ANDRADE *et al* (1997).

3.1.7.1 O Mecanismo da Reação

Trata-se de uma reação química envolvendo íons alcalinos do cimento Portland, íons hidroxila e certos constituintes que podem estar presentes no agregado, podendo resultar em expansão e fissuração, “pipocamentos” e exsudação de um fluído viscoso (álcali-silicoso para reação álcali-sílica) (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

ANDRIOLO (1997) ressalta alguns constituintes mineralógicos dos agregados que reagem com os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros do concreto. Estes hidróxidos alcalinos são derivados geralmente dos álcalis sódio e potássio do cimento Portland, mas os referidos álcalis podem ocasionalmente ser derivados de outras fontes. Um dos produtos formados na reação é o gel higroscópico expansivo, cuja composição química inclui sílica, álcalis e ocasionalmente uma pequena quantidade de cálcio.

A intensidade do fenômeno, sua velocidade e grandeza das deformações dependem de muitos fatores, entre os quais:

- Quantidade e características dos agregados reativos utilizados;

- Níveis de álcalis do cimento;
- Temperatura;
- Disponibilidade de umidade;
- Dosagem de concreto;
- Permeabilidade da pasta de cimento hidratada, pois ela controla o deslocamento da água dos íons envolvidos na reação e também o deslocamento do gel de sílica, que é um produto da reação;
- Presença de adições minerais.

PAULON e ARMELIN (1997) afirma que os álcalis do concreto são provenientes principalmente do cimento Portland, mas podem também ser provenientes da água de amassamento (águas alcalinas, água do mar), de pozolanas e até mesmo de agregados.

A reação começa com o ataque dos minerais silicosos do agregado pelos hidróxidos alcalinos resultantes principalmente dos álcalis do cimento. Os íons hidroxila atacam a superfície da sílica resultando um gel de álcali-silicato nos planos mais fracos ou nos poros do agregado ou na superfície das partículas de agregado. No último caso, forma-se uma zona de alteração superficial característica, que pode destruir a aderência entre o agregado e a pasta que o envolve (NEVILLE, 1997).

O gel absorve água com uma conseqüente tendência a aumento de volume. Como o gel é confinado pela pasta de cimento hidratada, forma-se uma pressão interna que pode eventualmente resultar em expansão, fissuração e desagregação da pasta de cimento. A expansão pode ser devida à pressão hidráulica, mas também pode ser causada por inchamento dos produtos sólidos da RAA (NEVILLE, 1997).

MEHTA & MONTEIRO (1994) ressalta que a água junto ao concreto causa o aumento e a progressão das microfissuras que finalmente atingem a superfície externa do concreto. O padrão das fissuras é irregular, sendo, portanto referidas como fissuras mapeadas.

Um breve resumo do processo de RAA, desde a formação do gel até a fissuração, foi apresentado por FERRARIS em 2000 e adaptado por VALDUGA (2002), conforme Figura 3.9.

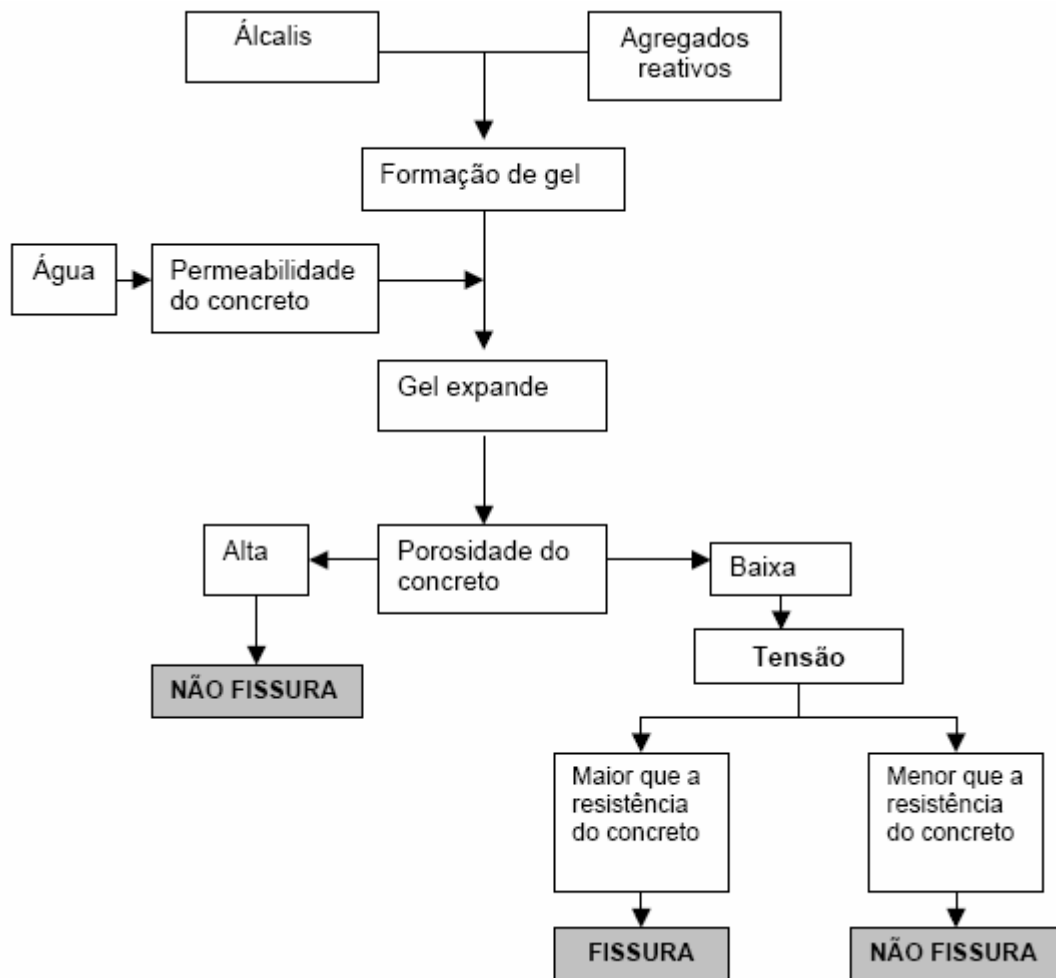


Figura 3.9 – Resumo do processo da reação álcali-agregado, VALDUGA (2002).

3.1.7.2 Tipos de Reação Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado ocorre entre os álcalis liberados na hidratação do cimento e alguns tipos de minerais presentes no agregado. Baseada na composição mineralógica reativa desses agregados, esta reação classifica-se em:

- Reação álcali-sílica;
- Reação álcali-silicato;
- Reação álcali-carbonato.

A reação do tipo álcali-sílica é entendida como a reação química que envolve íons alcalinos e hidroxilas, originários na hidratação do cimento e o agregado, cuja

fase mineralógica contenha sílica na forma amorfa tais como opala, calcedônia, cristobalita e tridimita, certos tipos de vidros naturais (vulcânicas) e artificiais.

Já a reação álcali silicato, segundo KIHARA (1986), ocorre entre os álcalis do cimento e os silicatos existentes nos feldspatos, folhelhos argilosos e certas rochas sedimentares (argilitos, silitos e grauvaca), metamórficas (ardósias, filitos, quartzitos, xistos) e magmáticas (granitos).

A reação álcali-carbonato ocorre entre os álcalis do cimento e o calcário dolomítico, havendo formação de brucita $Mg(OH)_2$ e regeneração de hidróxidos alcalinos, não havendo formação de gel expansivo como na reação álcali-sílica.

3.1.7.3 Fatores que Influenciam a Reação

a) Teor de álcalis no concreto

Sendo o cimento a principal fonte de álcalis no concreto, acredita-se que se o conteúdo alcalino do cimento for menor que 0,6%, não ocorrem danos provenientes de RAA, independentemente dos agregados reativos (MEHTA & MONTEIRO, 1994; SOUZA & RIPPER, 1998). No entanto, experiências mostraram que em concretos contendo um consumo muito alto de cimento, esta limitação por si só não assegura a ausência de reação expansiva. Investigações na Alemanha e Inglaterra mostram que se o conteúdo total de álcalis for abaixo do limite de 3 kg/m³, provavelmente não ocorrerão reações deletérias (HOBBS, 1982).

Enfim, não se pode garantir a não ocorrência de RAA, por meio do controle de álcalis do cimento sem levar em conta as fontes adicionais de álcalis como os agregados, aditivos, água e material pozolânico, que podem contribuir para as reações expansivas.

b) Agregados

HOBBS (1988) estudou a influência da quantidade e do tamanho das partículas de agregado contendo fase reativa. Em suas pesquisas constatou que há uma tendência de expansão em concretos contendo maior quantidade de partículas finas que naquelas com quantidade menor ou similar de partículas maiores. Em outras palavras, há indícios de que partículas menores produzam maiores expansões.

Entretanto se as partículas forem muito pequenas (da ordem de microns) pode haver uma situação diferente. De acordo com PAULON e ARMELIN (1997), partículas de agregado reativo, menores que 0,050mm não provocam expansão, pois, devido a sua grande superfície específica, provocam redução rápida na concentração de álcalis de tal forma que os agregados maiores não tenham oportunidade de sofrer as reações secundárias que provocam a formação do gel expansivo.

c) Condições ambientais

Conforme já relatado, um dos requisitos para a ocorrência da reação é a presença de umidade, principalmente por solubilizar os íons que, por sua vez, promoverão a reação. Diversos autores consideram que a umidade relativa abaixo de 80% não ocorre expansão.

Para que haja reação a umidade mínima no interior do concreto deve ser de cerca de 85% a 20°C. Em temperaturas mais altas, a reação pode ocorrer em umidades mais baixas, pois as reações químicas são sensíveis à temperatura (NEVILLE, 1997).

Molhagem e secagem alternadas intensificam a migração de íons de álcalis, que se deslocam da parte molhada para a parte mais seca, favorecendo a reação. Um gradiente de umidade tem efeito semelhante.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) estabelece os limites máximos para a expansão devida à reação álcali-agregado dos agregados como segue:

- Expansão máxima de 0,05% aos três meses
- Expansão máxima de 0,10% aos seis meses

3.1.8 Dimensão Máxima e Composição Granulométrica

A distribuição das partículas de um agregado segundo as suas dimensões é designada por granulometria e tem influência sobre as propriedades do concreto (SOUZA COUTINHO, 1999).

A razão mais importante para a especificação de limites granulométricos e da dimensão máxima dos agregados segundo PINHEIRO (2003) é a sua influência na

trabalhabilidade e no custo do concreto. Por exemplo, areias muito grossas produzem misturas de concreto ásperas e não trabalháveis, e areias muito finas aumentam o consumo de água além de serem anti-econômicas.

Se a granulometria é a contínua (partículas distribuídas uniformemente por todas as dimensões, da menor a maior) e se as partículas têm uma forma adequada, é possível obter-se um concreto compacto e resistente para um teor mínimo de cimento, reduzindo, paralelamente, o risco de segregação e, em especial, produzindo misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas (HEWLETT, 1998).

A dimensão máxima do agregado é definida pela Norma Brasileira NBR NM 248/2003 como a dimensão da abertura da peneira na qual ficam retidos acumulados 5% ou menos das partículas do agregado. Em geral, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume, que tem que ser coberta pela pasta de cimento, para uma dada relação água/cimento. Como o preço do cimento é mais caro que o preço do agregado, qualquer ação que possa economizar cimento sem reduzir a resistência e a trabalhabilidade do concreto, pode resultar em benefício econômico significativo.

Além do aspecto econômico, há outros fatores que governam a escolha da dimensão máxima do agregado para uma mistura de concreto. Segundo SOUZA COUTINHO (1999) e COURA (2006), quanto maior a dimensão máxima característica do agregado, menor a resistência do concreto utilizando-se as mesmas quantidades dos demais componentes. Esta redução é mais significativa em concretos com relações menores de água/cimento.

Em relação à quantidade de agregado usado num concreto, se este for aumentado com relação água/cimento constante, a resistência será superior. Este efeito é considerado válido apenas se a quantidade de pasta for suficiente para preencher os vazios do conjunto agregado graúdo/miúdo permitindo uma consolidação completa do concreto (ILLSTON & SPON, 1994).

3.2 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA DOSAGEM DE CONCRETOS

A dosagem do concreto representa o proporcionamento ideal dos materiais constituintes: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e eventualmente aditivos e adições, para produção de concreto que atenda a certas especificações

prévias. Entre essas especificações, a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido normalmente representam os requisitos mais importantes. A durabilidade é outra propriedade importante, sendo que, as condições de exposição do concreto em serviço devem ser consideradas.

Um fator a ser considerado na dosagem é o tipo de agregado. É possível dispor-se, no local da obra, de agregados ideais quanto à forma e textura e que também não apresentem reatividade com os compostos hidratados da pasta de cimento (HELENE & TERZIAN, 1993). A Tabela 3.4 mostra a necessidade de um compromisso entre o ótimo e o possível, pois existem parâmetros importantes que evoluem em sentidos opostos quando se pretende obter resistência ou trabalhabilidade.

TABELA 3.4 – Sentido da evolução de diversos parâmetros da dosagem, HELENE & TERZIAN (1993).

Parâmetros de dosagem do concreto	Concreto fresco	Concreto endurecido	Para redução de custo
	Para uma boa trabalhabilidade	Para uma boa resistência	
Granulometria do agregado miúdo	De preferência fina	De preferência grossa	Grossa
Relação gráudo/ miúdo	A diminuir	A aumentar	A maior possível
Consumo de água	A aumentar até certo ponto	A diminuir	A aumentar
Granulometria total	Preferível contínua	Preferível descontínua	A disponível
Dimensão máxima característica do agregado	De preferência média	De preferência pequena	A maior possível
Geometria do grão de agregado gráudo	De preferência esférica	De preferência irregular	Esférica (pedregulho)

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A procura incessante de materiais alternativos para a construção civil induz os pesquisadores a criar novos produtos, que para serem absorvidos pelo mercado, necessitam ser entre outras coisas, resistentes e duráveis, apresentar massa específica adequada ao uso, além de custo moderado, ou seja, preço de mercado igual ou inferior ao daqueles produtos similares disponíveis e normalizados.

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no programa experimental, considerando o embasamento teórico realizado pela revisão da literatura já apresentada. Procura-se avaliar neste estudo as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com a substituição parcial e integral do agregado miúdo natural por agregado miúdo triturado proveniente do resíduo do beneficiamento do mármore em concretos de cimento Portland, fornecendo-se assim uma nova alternativa em termos de agregados para concreto.

A viabilidade de utilização do resíduo foi verificada por meio das características físicas e químicas do material, propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, retração hidráulica, velocidade de propagação de ondas, módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson), e de durabilidade do concreto (porosidade, absorção de água por sucção capilar e absorção por imersão).

Os resultados obtidos na análise dos ensaios citados foram comparados a fim de se verificar as vantagens e ou desvantagens do emprego deste novo material.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.1 Cimento

No programa experimental foram utilizados três tipos de cimento cedidos pela empresa fabricante do cimento – HOLCIM do Brasil S/A.

- Cimento Portland composto (com escória) CPII E 32 (HOLCIM);
- Cimento Portland alto-forno CPIII 40 RS – Ultra Forte (HOLCIM);
- Cimento Portland alta resistência inicial CPV ARI FÁCIL – Ultra Rápido (HOLCIM).

A fim de caracterizar o produto empregado são apresentados a seguir os resultados da análise física e química fornecidos pelo fabricante, (Tabelas 4.1 a 4.3).

TABELA 4.1 – Composição química, resistência e índices físicos do cimento.
CPII E 32.

Compostos	Teor (%)	Ensaaios Físicos		NBR 11578	Resistência à compressão		NBR 11578
SiO ₂	24,05	Início de pega (min.)	190	≥60	Idade (dias)	fc (MPa)	
Al ₂ O ₃	7,15	Fim de pega (min.)	240	≤600	1	8,6	-
Fe ₂ O ₃	2,47	Finura #325 (%)	17,1	≥12,0	3	24,8	≥10,0
CaO	57,50	A/C (%)	26,0	-	7	32,3	≥20,0
MgO	3,36	Superfície específica (cm ² /g)	4181	≥2600	28	40,9	≥32,0
K ₂ O	0,60	Expansão a quente (mm)	0,0	≤5,0			
C ₃ A	5,08	RI (%)	2,06	≤2,5			
CO ₂	3,41	PF (1000°C)	4,71	≤6,5			
SO ₃	1,84						
Sulfeto	0,23						

TABELA 4.2 – Composição química, resistência e índices físicos do cimento.

CPIII 40 RS.

Compostos	Teor (%)	Ensaio Físicos	NBR 11578	Resistência à compressão		NBR 11578
SiO ₂	27,74	Início de pega (min.)	175	≥60	Idade (dias)	fc (MPa)
Al ₂ O ₃	9,22	Fim de pega (min.)	235	≤720	1	11,6
Fe ₂ O ₃	1,73	Finura #325 (%)	1,7	≥8,0	3	28,7
CaO	52,76	A/C (%)	30,1	-	7	37,6
MgO	4,57	Superfície específica (cm ² /g)	4280	-	28	49,3
K ₂ O	0,48	Expansão a quente (mm)	0,0	≤5,0		
C ₃ A	3,16	RI (%)	0,77	≤1,5		
CO ₂	2,09	PF (1000°C)	2,40	≤4,5		
SO ₃	2,00					
Sulfeto	0,42					

TABELA 4.3 – Composição química, resistência e índices físicos do cimento.

CPV ARI FÁCIL Ultra Rápido.

Compostos	Teor (%)	Ensaaios Físicos		NBR 11578	Resistência à compressão		NBR 11578
SiO ₂	19,21	Início de pega (min.)	125	≥60	Idade (dias)	fc (MPa)	
Al ₂ O ₃	4,98	Fim de pega (min.)	165	≤600	1	30,0	-
Fe ₂ O ₃	2,95	Finura #325 (%)	2,8	≥12,0	3	40,8	≥14,0
CaO	64,00	A/C (%)	29,8	-	7	45,5	≥24,0
MgO	0,73	Superfície específica (cm ² /g)	4619	≥2600	28	52,3	≥34,0
K ₂ O	0,81	Expansão a quente (mm)	0,0	≤5,0			
C ₃ A	8,00	RI (%)	0,38	≤2,5			
CO ₂	1,14	PF (1000°C)	2,70	≤6,5			
SO ₃	2,59						
Sulfeto	0,0						

As análises químicas, físicas e propriedades mecânicas dos cimentos utilizados estão conforme a normalização brasileira, NBR 11578 (ABNT, 1991), NBR 5735 (ABNT, 1991) e NBR 5733 (ABNT, 1991).

4.2.2 Agregado miúdo

4.2.2.1 Agregado miúdo natural (AMN)

Foi utilizada areia média quartzosa, proveniente do leito do rio do Peixe, encontrada no comércio de Juiz de Fora, para a produção dos concretos de referência.

Foi caracterizada segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), como ilustrado na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Caracterização física do AMN.

Composição granulométrica (NBR NM 248 (ABNT, 2003))	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Acumulado (%)
4,8	4,37
2,4	9,03
1,2	25,06
0,6	52,03
0,3	87,14
0,15	96,99
<0,15	100,00
Diâmetro máximo	4,80mm
Módulo de finura	2,75
Massa específica real (NBR 9776)	2,62 kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 52)	1,46 kg/dm ³
Teor de argila (NBR 7218)	Isento
Teor de material pulverulento (NBR 7219)	0,60%
Impureza orgânica (NBR NM 49)	<300 p.p.m.
Absorção de água (NM 30)	3,16%
Abrasão “Los Angeles” (NM 51)	38,67%

4.2.2.2 Agregado miúdo artificial (AMA)

Empregou-se um agregado artificial resultante da britagem de rochas de gnaiss, proveniente da cidade de Matias Barbosa – Minas Gerais, cuja caracterização encontra-se na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 – Caracterização física do AMA.

Composição granulométrica (NBR NM 248 (ABNT, 2003))	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Acumulado (%)
4,8	0,35
2,4	31,45
1,2	59,15
0,6	68,19
0,3	77,19
0,15	86,19
<0,15	100,00
Diâmetro máximo	4,80mm
Módulo de finura	3,23
Massa específica real (NBR 9776)	2,70kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 52)	1,71kg/dm ³
Teor de argila (NBR 7218)	Isento
Teor de material pulverulento (NBR 7219)	14,50%
Impureza orgânica (NBR NM 49)	<300 p.p.m.
Absorção de água (NM 30)	2,37%
Abrasão “Los Angeles” (NM 51)	32,80%

4.2.2.3 Rejeito de mármore triturado (RMT)

O RMT foi coletado em uma empresa localizada na cidade de Mar de Espanha, Estado de Minas Gerais, que utiliza apenas mármore em seu processo de beneficiamento. Nesta empresa, os cacos de mármore, após a lavagem e secagem, foram para o processo de moagem, em moinhos de bolas, ressaltando-se que os mesmos passaram previamente pelo britador de mandíbulas. Só então são separados por peneiramento e ensacados por fração granulométrica.

Para a caracterização do RMT foram avaliadas suas propriedades químicas e físicas.

4.2.2.3.1 Características químicas

O conhecimento das características químicas é de fundamental importância para o conhecimento do resíduo e avaliação do seu desempenho. Sendo efetuada na Universidade Federal de Viçosa – Laboratório de Análise de Calcários. A composição química do RMT está apresentada na Tabela 4.6.

TABELA 4.6 – Análise química do RMT

Composição Química do RMT	
Principais Elementos	Teor (%)
Ca	18,1
Mg	12,9
CaO	25,4
MgO	7,8
Classificação: Magnesiano	

Para uma melhor identificação da rocha que compõe o RMT, realizou-se na Universidade Federal de Ouro Preto a descrição petrográfica, com a composição mineralógica, como primeiro passo na investigação das potencialidades reativas do agregado (ANDRADE, 1997), ou seja, buscou-se determinar a presença ou não de constituintes do agregado passíveis de desenvolver reações com o cimento prejudiciais à durabilidade e vida útil do concreto. As Figuras 4.1 a 4.4 e a Tabela 4.7 ilustram a análise petrográfica do RMT.

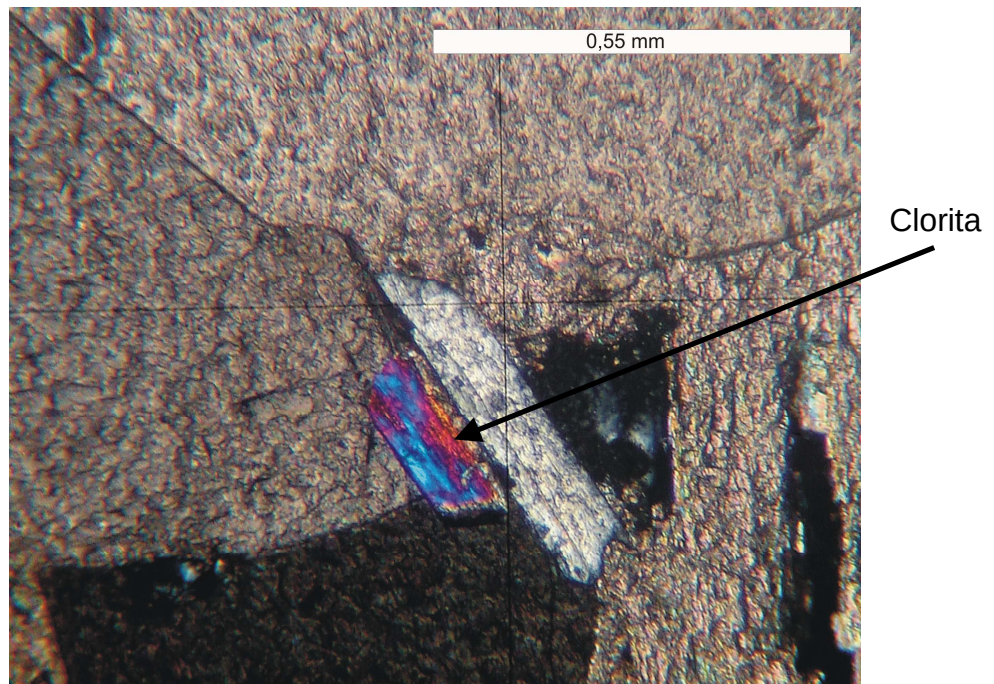


Figura 4.1 – Clorita - Mg com formato tabular

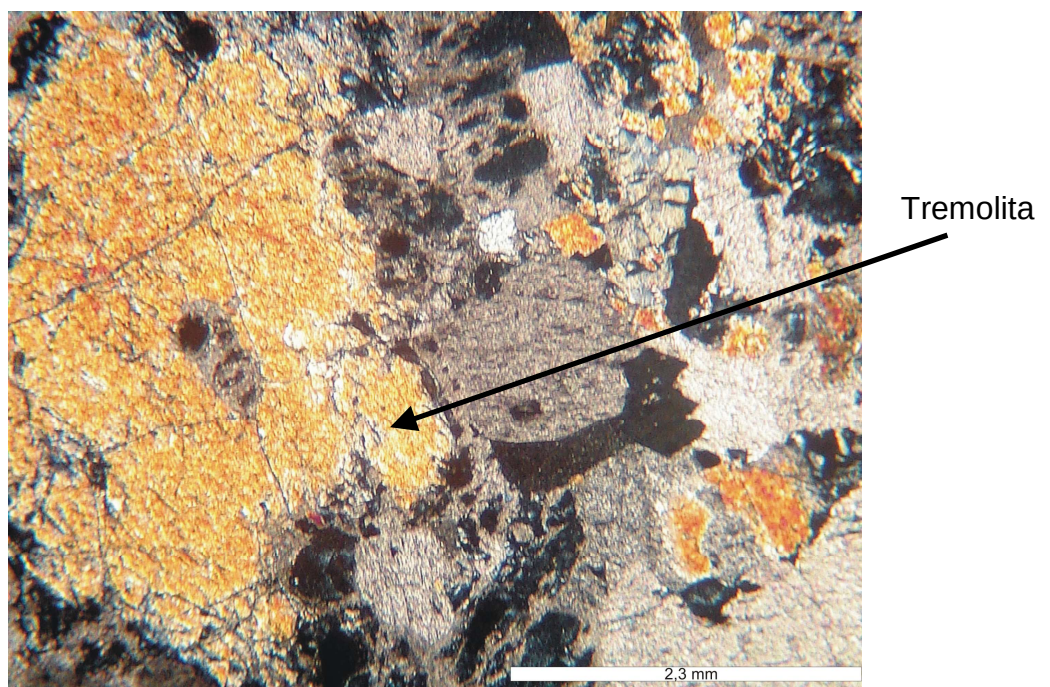


Figura 4.2 – Cristal de Tremolita

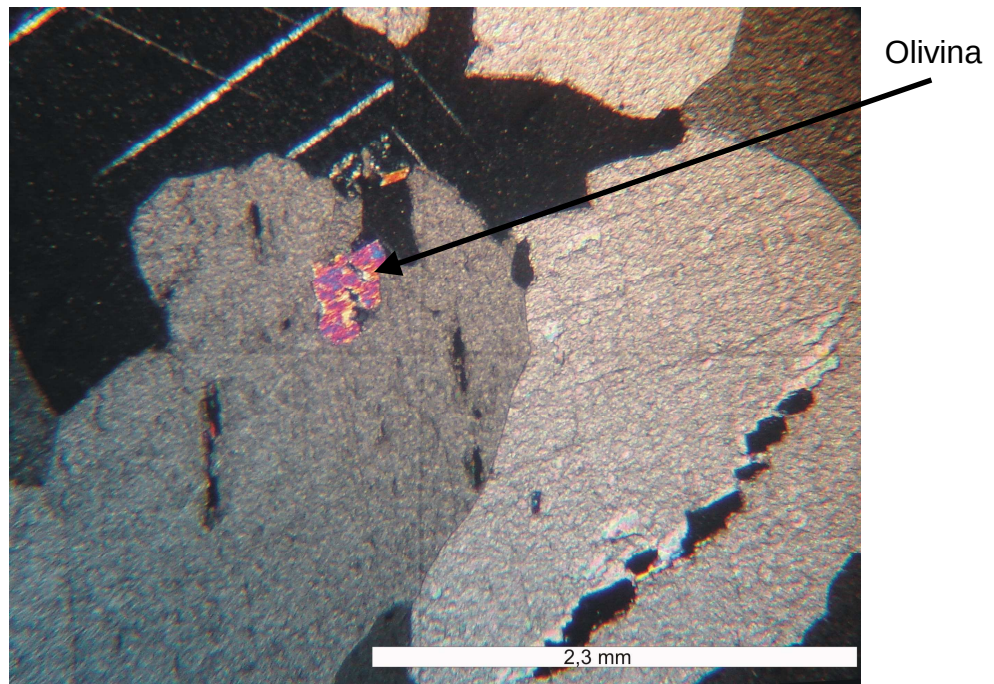


Figura 4.3 – Olivina inclusa em carbonato

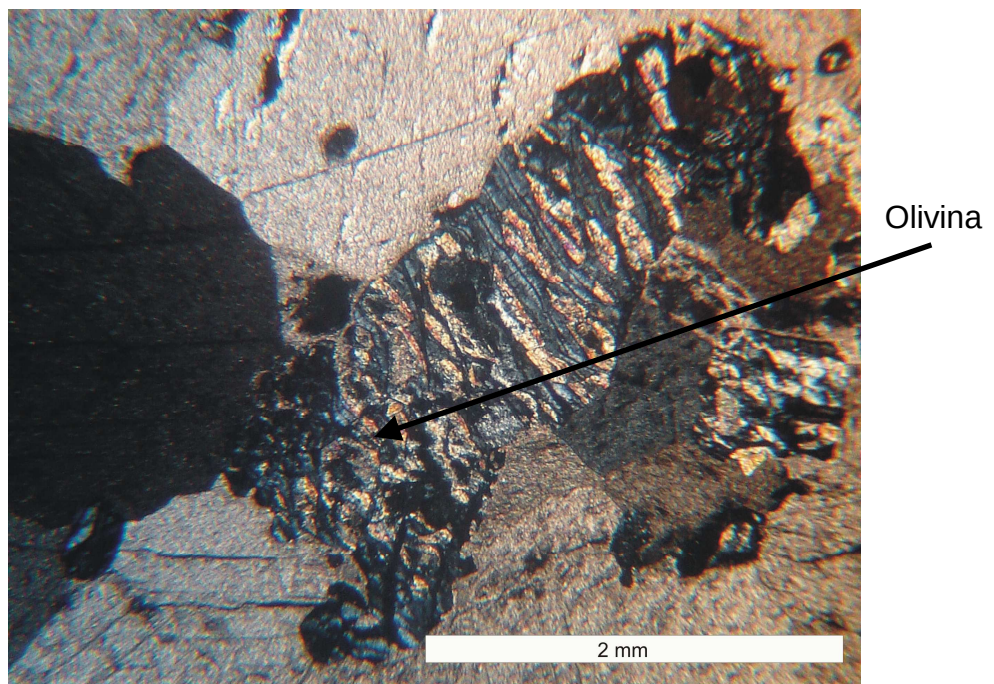


Figura 4.4 – Alteração de Olivina em Serpentina

TABELA 4.7 – Análise petrográfica do RMT

Descrição Petrográfica do RMT		
Mineral	Formulação Química	Porcentagem
Carbonato	(CaCO_3) ou $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$	95%
Olivina – Fosterita	$(\text{Mg}_2\text{SiO}_4)$	3%
Clorita – Mg	$(\text{Mg}_{12}[(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16})$	*
Serpentina	$\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$	*
Anfibólio - Tremolita	$[\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH}_2)]$	*

* A porcentagem dos três minerais juntos chegam a 2% da lâmina.

O carbonato pode ser tanto Calcita (CaCO_3) como Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), não sendo possível distinguir em lâmina delgada, somente por outros métodos como Geoquímica ou Difração de Raio X, porém por meio da paragênese mineral é bem provável que a lâmina apresente dolomita, pois no sistema apresenta minerais ricos em Mg como a Olivina (Mg_2SiO_4) e a Tremolita $[\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH}_2)]$.

4.2.2.3.2 Características físicas

As características físicas estudadas foram a massa específica, granulometria, substâncias deletérias e forma dos grãos. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 4.8 – Características físicas do RMT

Composição granulométrica (NBR NM 248 (ABNT, 2003))	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Acumulado (%)
4,8	4,37
2,4	9,03
1,2	25,06
0,6	52,03
0,3	87,14
0,15	96,99
<0,15	100,00
Diâmetro máximo	4,80mm
Módulo de finura	2,75
Massa específica real (NBR 9776)	2,91 kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 52)	1,74 kg/dm ³
Teor de argila (NBR 7218)	Isento
Teor de material pulverulento (NBR 7219)	5,0%
Impureza orgânica (NBR NM 49)	<300p.p.m.
Absorção de água (NM 30)	1,27%
Abrasão “Los Angeles” (NM 51)	63,10%

A Figura 4.5 mostra os grãos de RMT. Eles não apresentam uma forma definida, sendo angulosos.



Figura 4.5 – Grãos do RMT

4.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado para a fabricação dos corpos-de-prova de concreto de cimento Portland foi a brita gnáissica, oriunda de pedreira localizada na cidade de Matias Barbosa, Minas Gerais. A caracterização da brita utilizada nesta pesquisa foi classificada segundo a normalização brasileira (NBR 7211 (ABNT, 2005)). Os resultados dessa última análise são mostrados na Tabela 4.9.

TABELA 4.9 – Caracterização do agregado graúdo

Composição granulométrica (NBR NM 248 (2003))	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Acumulado (%)
25,0	0,00
19,0	16,53
12,5	60,73
9,5	90,93
6,3	90,93
4,8	90,93
2,4	90,93
1,2	90,93
0,6	90,93
0,3	90,93
0,15	90,93
<0,15	100,00
Diâmetro máximo	25,00mm
Módulo de finura	6,53
Massa específica real (NBR 9776)	2,70 kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 53)	1,36 kg/dm ³
Teor de materiais friáveis (NBR 7218)	Isento
Teor de material pulverulento (NBR 7219)	5,36%

4.2.4 Água

A água utilizada na confecção e imersão dos corpos-de-prova de concreto é potável, e provém da empresa CESAMA, responsável pelo abastecimento de água da cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais.

4.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de avaliar as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com a substituição parcial ou integral do agregado miúdo natural por agregado miúdo triturado proveniente do resíduo do beneficiamento do mármore, e de agregado miúdo artificial oriundo de rocha gnaisse, é apresentado a seguir o programa experimental desenvolvido.

Para a realização dos ensaios, além da mistura de referência utilizando areia natural de rio, foram formuladas quatro novas misturas, substituindo-se (em massa) 20 %, 40%, 60% e 100% da areia natural por RMT, utilizando mesma distribuição granulométrica, o que foi possível devido a grande possibilidade de faixas granulométricas no momento da britagem. E ainda, 100% de substituição do AMN, por RMT na Granulometria Ótima (NBR 7211, 2005) e por AMA na granulometria encontrada comercialmente.

A metodologia empregada na realização deste estudo foi experimental e comparativa. Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, a dosagem e análise do concreto fresco e endurecido com o uso de rejeito de mármore triturado (RMT) e agregado miúdo artificial (AMA) em substituição parcial e integral ao agregado miúdo natural (AMN).

O proporcionamento do concreto foi realizado com base no método de dosagem desenvolvido pelo IPT, descrito por HELENE e TERZIAN (1993). A princípio fixou-se um teor de argamassa seca de 50%, um abatimento do tronco de cone de aproximadamente 70 ± 10 mm (NBR NM 67, 1998) e a mesma relação água/cimento. Posteriormente, efetuaram-se ajustes, tendo como base o ensaio de tronco de cone.

Os traços adotados neste estudo são mostrados na Tabela 4.10.

TABELA 4.10 – Traços dos concretos confeccionados

TEOR DE ADIÇÃO (%)	TRAÇO (kg) CP II E 32	TRAÇO (kg) CP III – 40 - RS	TRAÇO (kg) CP V ARI - PLUS
100% de AMN	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50
20% de RMT	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50
40% de RMT	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50
60% de RMT	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50
100% de RMT (a/c = 0,50)	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50
100% de RMT (Slump = 80 mm)	1 : 1,83 : 2,83 : 0,46	1 : 1,83 : 2,83 : 0,47	1 : 1,83 : 2,83 : 0,46
100% de RMT (granulometria ótima – NBR 7211/2005)	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,51
100% de AMA (a/c = 0,50)	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50	1 : 1,83 : 2,83 : 0,50
100% de AMA (Slump = 80 mm)	1 : 1,83 : 2,83 : 0,53	1 : 1,83 : 2,83 : 0,52	1 : 1,83 : 2,83 : 0,52

4.3.1 Amostras testadas

Cumprir esclarecer que as misturas foram testadas nas idades de 3, 7, 28, 90 e 120 dias. A Tabela 4.11 mostra os tipos de ensaios, dimensão e quantidade de corpos-de-prova e as idades ensaiadas.

TABELA 4.11 – Resumo do programa experimental.

CONCRETO						
Misturas de concreto	Ensaio	Idade	Dimensão do CP	Número de corpos-de-prova		
				Cimento CP II E	Cimento CP III	Cimento CP V
	Resistência à compressão axial (NBR5739)	3	10x20cm	6	6	6
		7		6	6	6
		28		6	6	6
		90		6	6	6
		120		6	6	6
	Resistência à tração por compressão diametral (NBR7222)	3	10x20cm	6	6	6
		7		6	6	6
		28		6	6	6
		90		6	6	6
		120		6	6	6
	Resistência à tração na flexão (NBR12142)	28	15x15x60cm	4	4	4
	Módulo de deformação (NBR8522)	28	15x30cm	3	3	3
	Coeficiente de Poisson (NBR8522)	28	15x30cm	3	3	3
	Absorção por imersão (NBR9778)	28	10x20cm	3	3	3
	Absorção por sucção capilar	28	10x20cm	3	3	3
Exsudação (NM 102)	0	15 dm³	2	2	2	
Densidade de massa no estado endurecido	120	10x20cm	8	8	8	
Retração hidráulica (NM 131)	56	10x10x30cm	3	3	3	
Velocidade de ondas ultra-sônicas	120	10x20cm	6	6	6	

4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

4.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto é composta de pelo menos dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade e a coesão, que representa a resistência à exsudação ou à segregação.

A trabalhabilidade dos concretos desta pesquisa foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998).

4.4.2 Exsudação

Para determinação da exsudação expressa como volume de água exsudada por área de exposição do concreto, de acordo com a NBR NM 102 (ABNT, 1996) aplicou-se a seguinte expressão:

$$E = \frac{V}{A} \quad (4.1)$$

onde

E – exsudação (ml/cm²);

V – volume de água exsudada medida durante o intervalo de tempo selecionado (ml);

A – área do concreto exposto (cm²).

4.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

4.5.1 Ensaio de resistência à compressão axial

A NBR 5739 (ABNT, 2007) prescreve o método de ensaio para determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova de cimento Portland.

Após o tempo necessário ao processo de cura, e estabelecida à idade do rompimento, os corpos-de-prova foram rematados com enxofre, perfeitamente perpendicular ao eixo longitudinal do corpo-de-prova cilíndrico.

Os corpos-de-prova foram ensaiados aos 3, 7, 28, 90 e 120 dias. A força de ensaio foi aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento

de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s, sendo a força de ruptura lida em kgf e transformada em MPa.

O resultado da resistência à compressão é a média das resistências à compressão dos corpos-de-prova ensaiados na mesma idade.

Os resultados individuais, médias e coeficientes de variação estão apresentados no Capítulo 5.

A resistência à compressão axial foi obtida utilizando-se a expressão:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

onde

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

F – força máxima obtida no ensaio (N);

A – área da seção transversal do corpo-de-prova (mm²).

4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado em conformidade com a normalização brasileira, NBR 7222 (ABNT, 1994), conhecido internacionalmente como “Brazilian Test”, por ter sido desenvolvido pelo pesquisador brasileiro Lobo Carneiro, e adotado pelas normas ASTM C 496, BS 1881-117 e ISO 4108.

Os ensaios mostram que as rupturas dos corpos-de-prova ocorrem por meio de dois mecanismos: um principal e o outro secundário.

O mecanismo principal é associado ao crescimento da fissura na região central do corpo-de-prova, e o secundário ocorre após a principal fissura terem ocorrido surgindo fissuras secundárias em ambos os lados dos cutelos que se desenvolvem paralelamente à fissura principal.

Em todos os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral houve o desenvolvimento de uma fissura na sua região central, e, após, observou-se o aparecimento de duas fissuras secundárias, uma em cada lado das tiras de madeira (Figura 4.6).

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela seguinte expressão:

$$f_{t,D} = \frac{2 F}{\pi d L} \quad (4.3)$$

onde

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

F – força máxima obtida no ensaio (N);

d – diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L – altura do corpo-de-prova (mm).

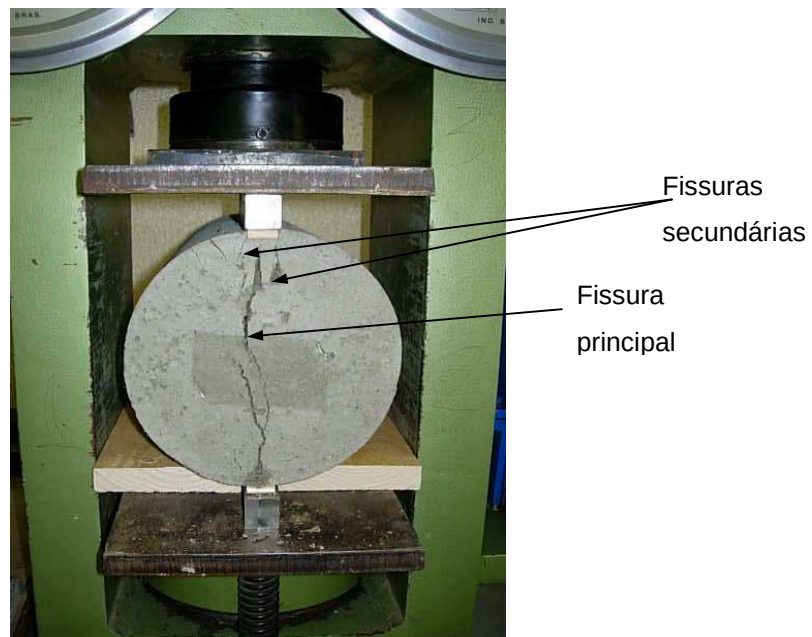


FIGURA 4.6 – Fissuras observadas no ensaio de tração por compressão diametral.

4.5.3 Resistência à tração na flexão

A determinação da resistência à tração na flexão segundo a NBR 12142 (ABNT, 1991), foi realizada em corpos-de-prova prismáticos, sendo que no ensaio, o vão livre possuía 450 mm.

O corpo-de-prova foi carregado continuamente e sem choques, com crescimento constante a uma velocidade de (0,9 a 1,1) MPa/minuto, até a ruptura.

Em todos os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de tração na flexão houve o aparecimento de uma fissura no terço médio da distância entre os elementos de apoio (Figura 4.7).



FIGURA 4.7 – Corpo-de-prova prismático solicitado à tração na flexão.

Os cálculos das resistências à tração na flexão para todos os corpos-de-prova foram efetuados de acordo com o item 5.1 da NBR 12142 (ABNT, 1991), que prescreve que se a ruptura ocorrer no terço médio da distância entre os elementos de apoio aplica-se a seguinte expressão:

$$f_{ctm} = \frac{P l}{b d^2} \quad (4.4)$$

onde

f_{ctm} – resistência à tração na flexão (MPa);

P – força aplicada (N);

l – distância entre cutelos de suporte (mm);

b – largura média do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm);

d – altura média do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm).

Salienta-se que nesta pesquisa a distância entre os cutelos de suporte foi de 150 mm.

4.5.4 Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Resistência dos Materiais do Colégio Técnico Universitário (U. F. J. F.), em conformidade com a NBR 8522/2003. Foi determinado o módulo de elasticidade, sob carregamento estático, à compressão axial simples, aplicando-se um carregamento crescente à velocidade de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, até que fosse alcançada uma tensão (σ_b) de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto (f_c).

Este nível de tensão foi mantido por 60 segundos. Em seguida, reduziu-se a carga, à mesma velocidade do processo de carregamento, até o nível da tensão básica (σ_a) que corresponde a 0,5 MPa. Foram realizados mais dois ciclos de carga e descarga, alternadamente, durante períodos de 60 segundos cada. Depois do último ciclo de pré-carga e após 60 segundos sob a tensão σ_a , registrou-se a deformação específica ε_a . Carregou-se novamente o corpo-de-prova com tensão σ_b , após uma espera de 60 segundos, foi registrada a deformação ε_b .

O módulo de elasticidade foi calculado segundo a expressão:

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (4.5)$$

onde

E_{ci} – módulo de elasticidade (GPa);

σ_b – tensão maior, $0,3f_c$ (MPa);

σ_a – tensão básica, 0,5MPa (MPa);

ε_b – deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a – deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão básica;

O coeficiente de Poisson é dado pela seguinte expressão:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{tf} - \varepsilon_{ti}}{\varepsilon_{lf} - \varepsilon_{li}} \quad (4.6)$$

onde

μ – coeficiente de Poisson;

ε_{tf} – deformação transversal específica final, para 30% da tensão de ruptura;

ε_{ti} – deformação transversal específica inicial, com tensão a 0,5 MPa;

ε_{lf} – deformação longitudinal específica final, para 30% da tensão de ruptura;

ε_{li} – deformação longitudinal específica inicial, com tensão a 0,5 MPa;

A Figura 4.8 mostra o conjunto de equipamentos utilizados para a realização do ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson utilizando extensômetro mecânico.



FIGURA 4.8 – Ensaio de módulo de elasticidade

4.5.5 Absorção de água por imersão

Esse ensaio avalia a porosidade do concreto em corpos-de-prova. De acordo com a NBR 9778/87, a absorção é dada pela expressão:

$$A_i = \frac{m_a - m_b}{m_b} \times 100 \quad (4.7)$$

onde

A_i – absorção de água por imersão (%);

m_b – massa do corpo-de-prova seco em estufa (g);

m_a – massa do corpo-de-prova imerso em água por 72 horas (g);

4.5.6 Absorção de água por capilaridade

Utilizou-se a NBR 9779 (ABNT, 1995) para execução desse ensaio optando-se por determinar as massas dos corpos-de-prova com 72 horas, contadas a partir da colocação destes em contato com a água.

A absorção de água por capilaridade foi expressa em g/cm^2 e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água, de acordo com a seguinte expressão:

$$A_c = \frac{A - B}{S} \times 100 \quad (4.8)$$

onde

A_c – absorção de água por capilaridade (%);

A – massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água (g);

B – massa do corpo-de-prova seco (g);

S – área da seção transversal (cm^2).

4.5.7 Retração hidráulica

A retração hidráulica é a redução de volume observada quando o concreto é submetido a uma perda de umidade e mantido a temperatura constante, sem nenhuma espécie de carregamento.

A determinação da redução volumétrica ocorrida no concreto baseada na NM 131 (ABNT, 1997) foi realizada em corpos-de-prova prismáticos com dimensões (10 x 10 x 30 cm), utilizando-se o comparador mecânico horizontal.

Imediatamente após a moldagem, momento também em que foi posicionado os limitadores para as leituras, os corpos-de-prova foram estocados em câmara úmida, tomando-se o cuidado de proteger a superfície exposta até que o concreto tenha endurecido. Após 24 horas da adição da água de amassamento, procedeu-se a leitura indicada no comparador.

A frequência de medições obedeceu ao seguinte critério: leituras a 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 60, 90 e 120 dias.

A retração hidráulica foi expressa em porcentagem, sendo obtida pela expressão:

$$\Delta L = \frac{\Delta L_x - \Delta L_i}{L_g} \times 100 \quad (4.9)$$

onde

ΔL – variação de comprimento à idade x (%);

ΔL_x – leitura do comprimento com o corpo-de-prova na idade x (mm);

ΔL_i – leitura inicial (mm);

L_g – é a base de medida, em função do tipo de comparador utilizado (mm).

4.5.8 Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas

Entende-se por velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas a relação entre a distância percorrida por uma vibração ou distúrbio durante um intervalo de tempo. Este método de ensaio não destrutivo, usualmente é empregado no estudo

da avaliação da homogeneidade do concreto, da detecção de eventuais falhas internas de concretagem, na avaliação da profundidade de fissuras dentre outros.

No ensaio realizado utilizou-se o equipamento PUNDIT com transdutores de 54 kHz, diâmetro de 50 mm. O procedimento adotado está prescrito na norma NM 58/1996, sendo empregada o tipo de transmissão denominada *direta*, a saber: a posição dos transdutores no corpo de prova, é nas faces opostas, ao longo do comprimento.

Salienta-se que imediatamente após a moldagem, os corpos de prova foram estocados em câmara úmida, tomando-se o cuidado de proteger a superfície exposta até a idade do ensaio, ou seja, 120 dias de idade.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm (diâmetro x altura) com as superfícies planas, lisas e isentas de sujeira; sendo confeccionados um total de quatro exemplares por traço.

A velocidade de propagação de ondas é determinada em km/s, sendo obtida pela expressão:

$$V = \frac{L}{t} \quad (4.10)$$

Onde:

V – velocidade de propagação (km/s);

L – distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (km);

t – tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s);

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme mencionado elaborou-se um extenso programa experimental para se avaliar as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com a substituição parcial e integral do agregado miúdo triturado proveniente do resíduo do beneficiamento do mármore bem como, do agregado miúdo triturado de rocha de gnaiss em concretos de cimento Portland. Dentro desse contexto estudaram-se as propriedades físicas e mecânicas, tais como: trabalhabilidade, exsudação, resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, à tração na flexão, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, dentre outras.

Para uma análise mais consistente da influência dessas substituições nos concretos e da interação entre as variáveis (idade, tipo de adição e teor de adição), efetuou-se uma análise estatística por meio da ferramenta ANOVA em todos os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido. Segundo RIBEIRO (1995), a ANOVA permite verificar a influência das variáveis dentro de seu grupo e entre os grupos, por meio da média geral e dos erros envolvidos. A verificação da significância de uma determinada variável ou grupo de variáveis é comprovado com a comparação entre um valor calculado (F_0) e valores tabelados (F_α) (distribuição de probabilidades de Fischer), neste caso a influência será considerada significativa, quando o valor F_0 for maior que o F_α , sendo adotado um nível de significância igual a 5%. Esta análise foi realizada por meio da planilha eletrônica Excel, utilizando-se a ferramenta ANOVA.

Cumpra esclarecer que, para facilitar a compreensão, adotou-se a seguinte nomenclatura apresentada na Tabela 5.1, para os traços executados.

TABELA 5.1 – Nomenclatura dos traços dos concretos confeccionados.

TEOR DE ADIÇÃO (%)	Cimento CP II E 32	Cimento CP III	Cimento CP V
100% de AMN	T1A	T1B	T1C
20% de RMT	T2A	T2B	T2C
40% de RMT	T3A	T3B	T3C
60% de RMT	T4A	T4B	T4C
100% de RMT (a/c = 0,50)	T5A	T5B	T5C
100% de RMT (Slump = 80 mm)	T6A	T6B	T6C
100% de RMT (granulometria ótima – NBR 7211/2005)	T7A	T7B	T7C
100% de AMA (a/c = 0,50)	T8A	T8B	T8C
100% de AMA (Slump = 80 mm)	T9A	T9B	T9C

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados e as respectivas análises efetuadas por meio dos procedimentos estatísticos.

5.2 ENSAIO DE TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade dos concretos foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone. O abatimento foi estabelecido como uma variável controlada, fixado na faixa de 70 ± 10 mm. A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 5.2 - Abatimento dos concretos confeccionados com CP II E 32

MISTURA	CP II E 32		CP III 40		CP V	
	a/c	SLUMP (mm)	a/c	SLUMP (mm)	a/c	SLUMP (mm)
100% de AMN	0,50	80	0,50	80	0,50	80
20% de RMT	0,50	85	0,50	80	0,50	85
40% de RMT	0,50	90	0,50	90	0,50	90
60% de RMT	0,50	105	0,50	105	0,50	100
100% de RMT (a/c = 0,50)	0,50	140	0,50	135	0,50	140
100% de RMT (Slump = 80 mm)	0,46	80	0,47	80	0,46	80
100% de RMT (granulometria ótima – NBR 7211/2005)	0,50	80	0,50	80	0,50	80
100% de AMA (a/c = 0,50)	0,50	50	0,50	55	0,50	55
100% de AMA (Slump = 80 mm)	0,53	80	0,52	80	0,53	80

Analisando-se os dados da Tabela 5.2 constata-se que o aumento do teor da adição do RMT nos concretos, proporcionou um incremento na trabalhabilidade das misturas, sem que houvesse desagregação ou exsudação excessiva do mesmo (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Abatimento da mistura com 100% de RMT e CP II E 32 (S = 140 mm).

Tal comportamento deve-se, principalmente, à baixa porosidade e absorção de água dos grãos de RMT. Em outras palavras, como podemos observar nas tabelas 4.4 e 4.8, a massa específica aparente do RMT é superior à massa específica do agregado natural, fato que de acordo com NEVILLE (1997), conduz a uma redução da porosidade do RMT. Constata-se, também, que o RMT apresenta menor absorção de água que o AMN. Em virtude disso, o agregado não absorve parte da água de amassamento e, conseqüentemente, a consistência tende a ser mais fluida.

O emprego do AMA resulta, conforme ilustrado na Tabela 5.2, numa diminuição da trabalhabilidade da mistura. Este fato é comprovado por meio da dificuldade de homogeneização da mistura, devido ao efeito das pequenas partículas do AMA difundidas na mesma, visto que (vide Tabela 4.5) este agregado miúdo artificial tem maior teor de material pulverulento do que os demais agregados estudados (cerca de 14,5%). Este comportamento também foi observado por GONÇALVES (2000) em seus experimentos.

5.3 ENSAIO DE EXSUDAÇÃO

Os resultados do ensaio de exsudação do concreto são apresentados no gráfico da Figura 5.2.

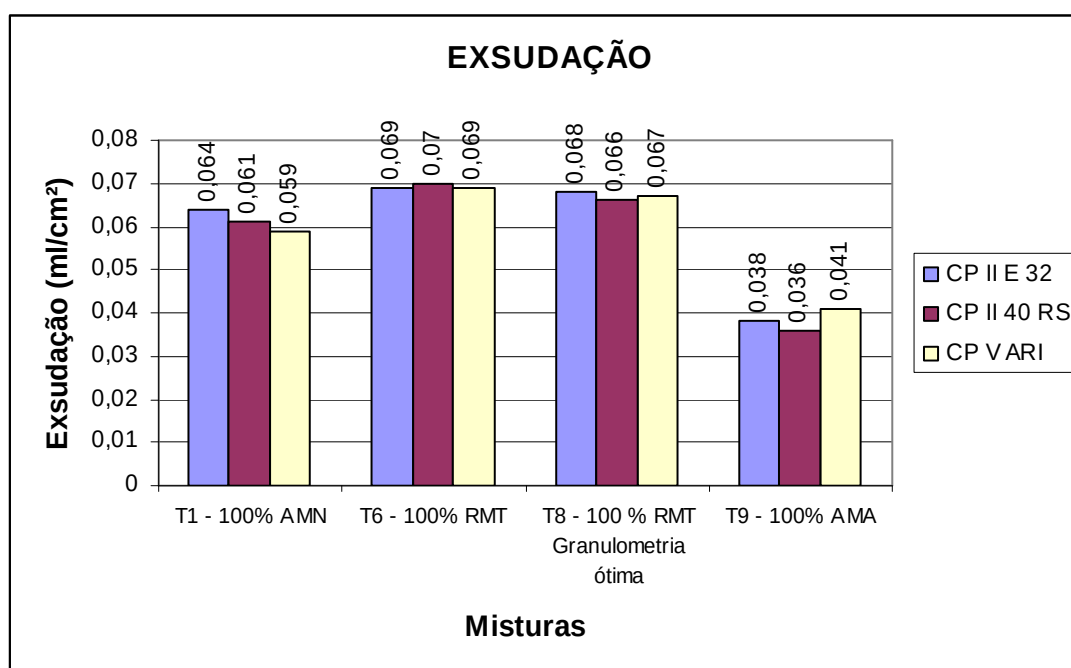


Figura 5.2 – Valores de exsudação para os traços T1, T6, T8 e T9.

A Figura 5.2 apresenta a redução da exsudação nos concretos com AMA, este fato ocorre devido à presença dos grãos finos, ou seja, dos grãos com dimensão inferior a 0,075mm (material pulverulento) que compõem esses agregados. Esses resultados comprovam o observado na Tabela 5.2, ou seja, os menores valores de exsudação ocorrem nos concretos com menores consistências. Isto mostra a influência dos finos totais do concreto, tanto na fluidez (facilidade de mobilidade) quanto na capacidade de retenção de água (por absorção de água às partículas menores).

Nos concretos com RMT e com RMT na granulometria ótima (NBR 7211, (ABNT, 2005)), ocorreu aumento na exsudação, porém em valores insignificantes quando comparados com o AMN. Isto já era esperado, pois o teor de material pulverulento do RMT é muito inferior ao do AMA e ligeiramente maior que o AMN.

Analisando os dados obtidos, constata-se que o teor de material pulverulento influencia de maneira significativa à exsudação do concreto, devido aos finos que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água.

5.4 ENSAIO DE DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO ENDURECIDO

A Figura 5.3 apresenta os resultados médios da densidade de massa no estado endurecido em corpos-de-prova de 100 mm x 200 mm aos 120 dias de idade conforme norma NBR13280 (ABNT, 1995).

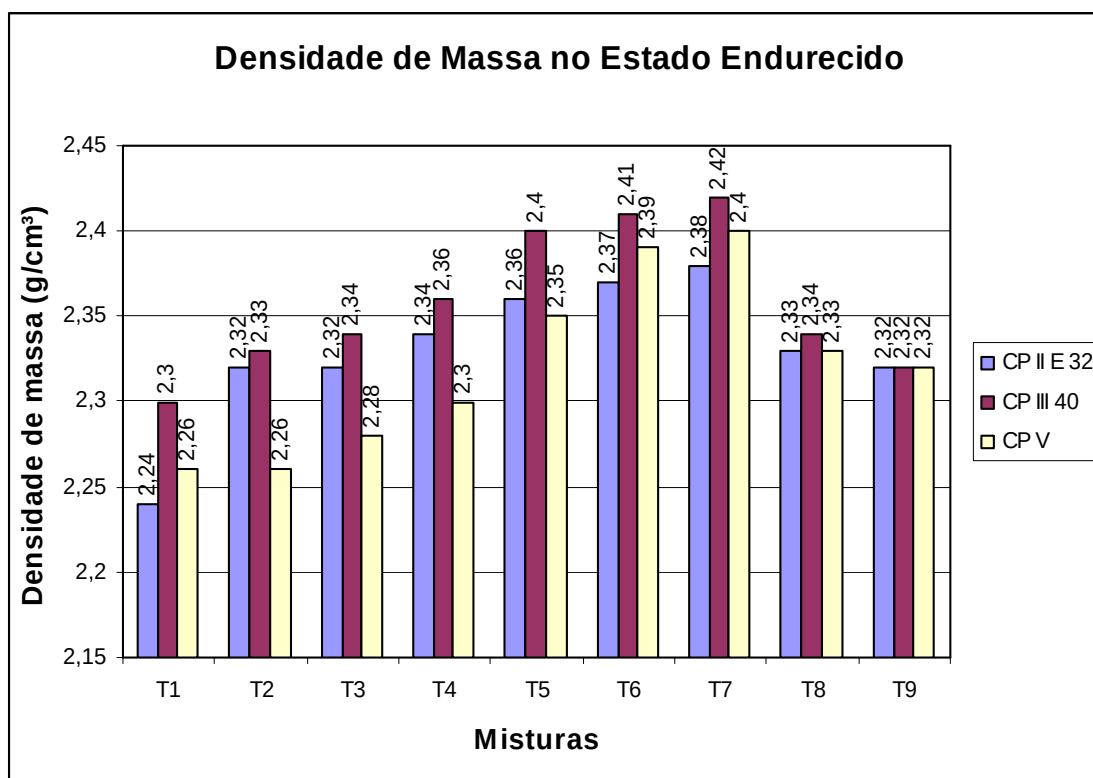


Figura 5.3 – Densidade de massa no estado endurecido realizado aos 120 dias de idade

Constata-se que, à medida que aumenta o teor de adição de RMT, aumenta a densidade de massa. Como os grãos de RMT são materiais inertes com baixa absorção de água (Tabela 4.8), há uma diminuição de perda da água que ficou absorvida às partículas no estado fresco, ocasionando, assim, o aumento da densidade de massa no estado endurecido.

As misturas produzidas com AMA (maior teor de material pulverulento) apresentaram maior densidade de massa em relação ao concreto de referência (100% de AMN). Estes resultados demonstram que, além dos grãos de AMA possuírem maior massa específica do que a areia natural, possivelmente, o aumento dos teores de finos, aumenta o grau de empacotamento do conjunto agregado e aglomerante, conforme foi constatado por SILVA *et al* (2005), visto que o empacotamento está relacionado com a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, e cujos vazios restantes serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente. Isto também explica a maior densidade nas misturas de 100% de RMT com granulometria ótima. O menor teor de

água dos concretos T8A, T8B e T8C em relação aos concretos T9A, T9B e T9C pouco influenciou no resultado da densidade de massa.

5.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Para a verificação do efeito da adição do RMT e do AMA na resistência à compressão axial, foram moldados seis corpos-de-prova para cada teor de adição, para cada tipo de cimento (CP II E 32, CP III 40 e CP V) e para cada idade (03, 07, 28, 90 e 120 dias).

As Tabelas 5.3 a 5.5 apresentam os valores médios obtidos nos ensaios e o coeficiente de variação CV da série de ensaios, expressa em %.

TABELA 5.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão em MPa (Cimento – CP II E 32)

TRAÇO	f_{c3} Média (MPa)	CV (%)	f_{c7} Média (MPa)	CV (%)	f_{c28} Média (MPa)	CV (%)	f_{c90} Média (MPa)	CV (%)	f_{c120} Média (MPa)	CV (%)
T1A	15,90	2,40	21,64	6,16	25,83	5,83	29,66	4,34	29,92	2,04
T2A	15,70	7,29	20,75	5,71	26,62	4,31	30,05	2,86	30,49	1,25
T3A	16,09	2,62	22,26	1,14	31,45	0,90	31,45	1,93	32,34	0,63
T4A	17,18	1,26	22,48	2,07	29,18	1,26	31,64	0,77	32,34	1,70
T5A	17,33	2,17	23,26	2,26	29,52	0,35	33,17	1,33	33,42	1,16
T6A	19,27	6,81	24,55	1,81	34,12	1,36	35,90	0,84	36,16	0,58
T7A	19,93	1,23	28,14	2,39	35,39	1,94	36,86	1,18	36,93	1,00
T8A	15,05	7,18	23,20	2,70	28,07	1,55	30,16	2,58	32,50	0,84
T9A	13,90	1,77	19,13	3,79	26,55	1,99	29,28	1,22	30,62	1,72

f_{c3} – resistência à compressão aos 3 dias de idade.

f_{c7} – resistência à compressão aos 7 dias de idade.

f_{c28} – resistência à compressão aos 28 dias de idade.

f_{c90} – resistência à compressão aos 90 dias de idade.

f_{c120} – resistência à compressão aos 120 dias de idade.

TABELA 5.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão em MPa (Cimento – CP III 40)

TRAÇO	f_{c3} Média (MPa)	CV (%)	f_{c7} Média (MPa)	CV (%)	f_{c28} Média (MPa)	CV (%)	f_{c90} Média (MPa)	CV (%)	f_{c120} Média (MPa)	CV (%)
T1B	14,83	2,15	20,37	1,00	26,10	1,26	30,05	1,21	30,36	2,21
T2B	15,66	2,09	20,69	2,52	27,25	0,76	30,11	1,88	31,26	1,53
T3B	15,85	1,54	21,90	2,12	27,89	1,19	31,38	3,35	32,75	0,74
T4B	17,12	2,54	22,16	1,62	29,66	1,11	32,21	3,32	32,98	1,00
T5B	17,25	1,42	23,05	1,43	29,85	1,46	33,64	0,47	34,12	0,62
T6B	19,22	1,70	24,45	0,85	34,76	0,94	36,19	2,61	36,61	2,91
T7B	19,80	2,20	28,07	0,85	35,40	0,59	36,93	2,45	37,02	3,12
T8B	14,96	1,60	22,47	1,94	27,43	0,89	31,35	1,33	32,66	1,60
T9B	13,63	2,43	20,44	0,64	26,48	0,79	29,86	8,88	31,61	2,42

TABELA 5.5 – Resultados do ensaio de resistência à compressão em MPa (Cimento – CP V)

TRAÇO	f_{c3} Média (MPa)	CV (%)	f_{c7} Média (MPa)	CV (%)	f_{c28} Média (MPa)	CV (%)	f_{c90} Média (MPa)	CV (%)	f_{c120} Média (MPa)	CV (%)
T1C	16,50	2,05	22,51	6,16	26,85	6,38	31,07	1,12	31,72	3,19
T2C	16,21	6,91	21,64	5,84	27,69	4,32	31,02	2,94	32,35	1,17
T3C	16,74	2,24	23,04	0,68	28,07	0,76	32,32	3,37	33,52	1,98
T4C	17,75	1,53	23,33	2,39	30,75	1,67	33,17	2,21	33,88	1,93
T5C	17,94	1,96	24,07	2,83	30,98	0,37	34,48	1,71	35,15	1,81
T6C	19,65	8,83	24,47	1,74	35,49	1,37	36,65	3,63	37,21	2,75
T7C	20,60	1,54	29,12	2,20	36,46	3,50	37,20	2,20	37,66	0,63
T8C	15,38	6,12	23,89	2,46	28,99	2,20	31,90	1,62	33,56	2,72
T9C	14,21	1,75	19,85	4,22	27,57	2,46	30,75	8,77	32,24	2,87

Salienta-se que o coeficiente de variação CV é uma análise estatística preliminar, com o qual se avalia a variação dos resultados de um experimento. Esse procedimento é empregado quando se deseja comparar a variabilidade de várias amostras com médias diferentes, ou quando as variáveis aleatórias têm dimensões diferentes. Em geral, quando o valor do CV é menor ou igual a 25% a amostra é considerada aceitável.

Analisando-se os dados das Tabelas 5.3 a 5.5 verifica-se que todas as amostras têm um coeficiente de variação inferior a 25%, e conclui-se que os resultados obtidos são aceitáveis.

As Figuras 5.4 a 5.6 apresenta de maneira concisa os resultados obtidos experimentalmente.

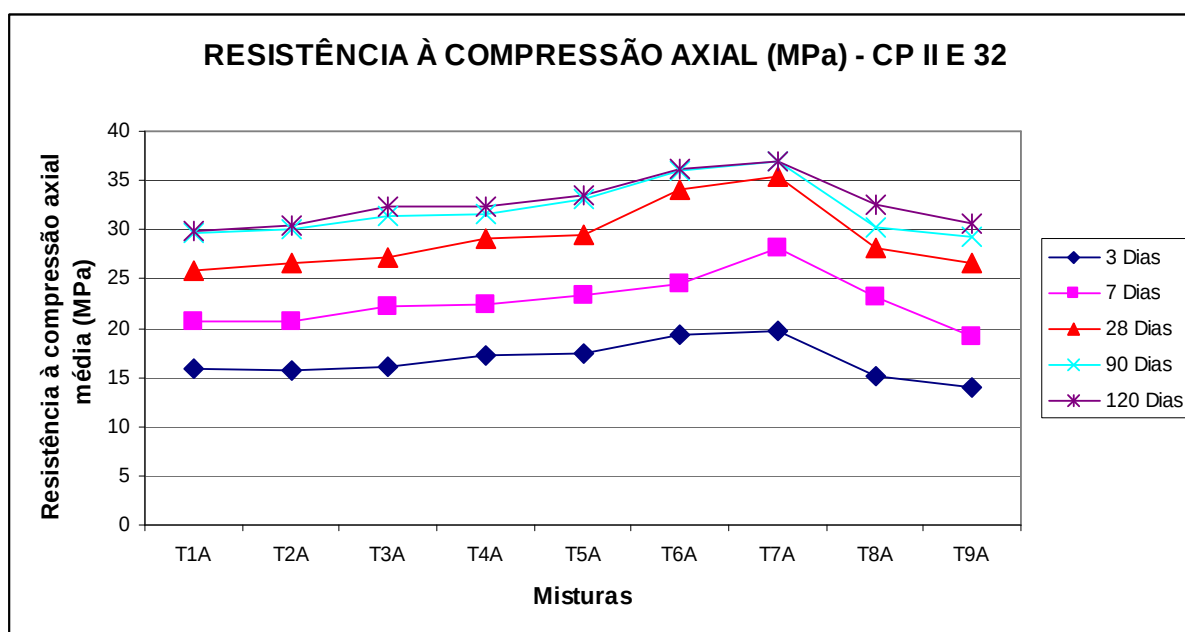


Figura 5.4 – Resistência média à compressão (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP II E 32

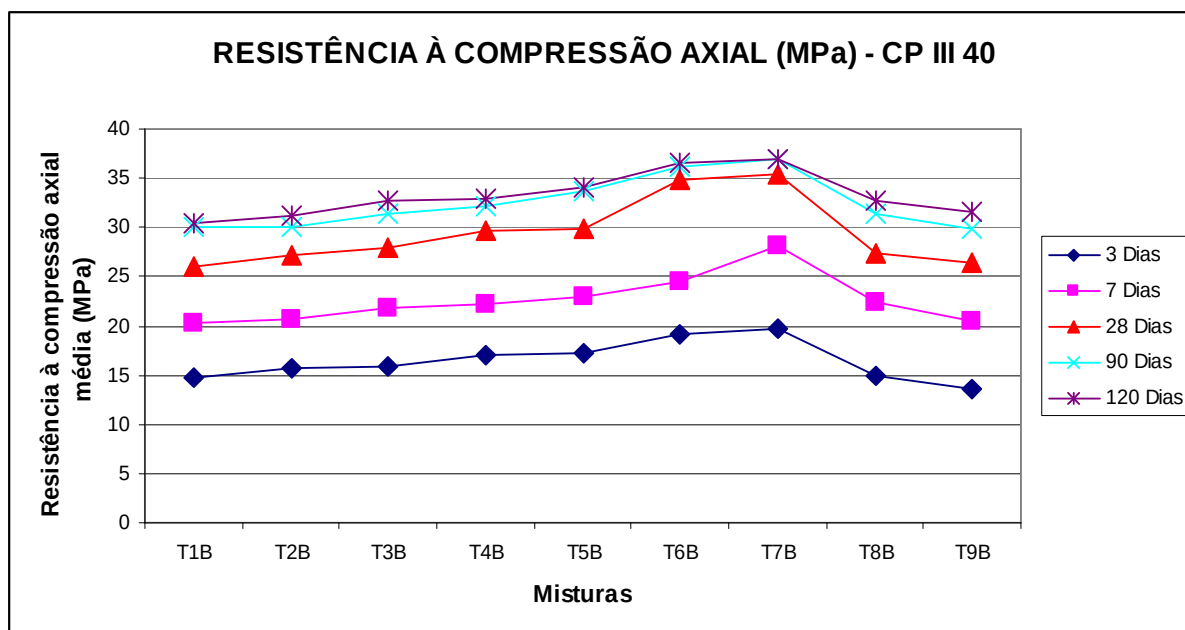


Figura 5.5 – Resistência média à compressão (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP III 40

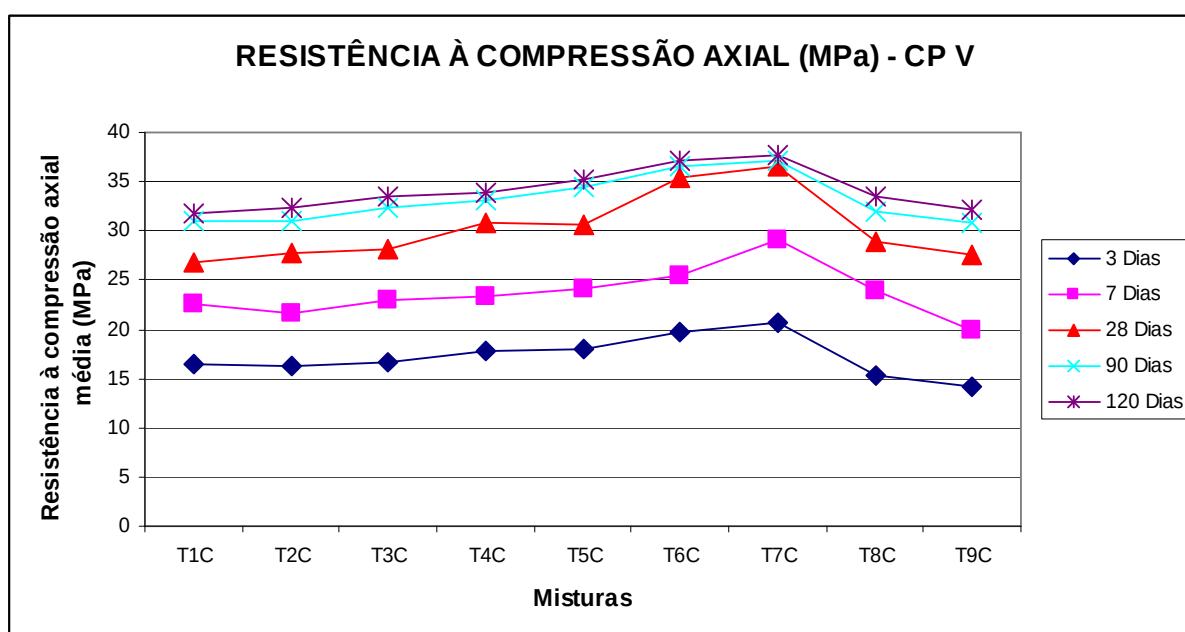


Figura 5.6 – Resistência média à compressão (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP V

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 5.3 a 5.5, identificou-se que os traços contendo agregados miúdos triturados atingiram maiores resistências, destacando-se o concreto com RMT, com maiores resistências em

relação aos demais. A causa para a obtenção destes resultados pode ser entendida devido à baixa porosidade do RMT (baixa absorção de água), pois de acordo com BUEST NETO (2006), a porosidade do agregado pode afetar a resistência à compressão do concreto. NEVILLE (1997) salienta que a influência do agregado na resistência do concreto é proveniente da resistência mecânica do agregado, e, também, da sua absorção e da sua aderência.

Analisando-se isoladamente a influência do teor de adição do RMT na resistência à compressão axial verifica-se que à medida que aumenta o teor de adição, aumenta a resistência à compressão axial. Os concretos apresentaram um aumento médio de resistência (concretos com mesmo fator água cimento) de 12,6% para teores de adição entre 0% e 100% nos concretos confeccionados com cimento CP II E 32, de 12,8% nos concretos confeccionados com CP III 40 e 10,2% nos concretos com cimento CP V. O aumento da resistência à compressão foi proporcional ao aumento do teor de adição (Figuras 5.4 a 5.6).

Cabe mencionar também que, em virtude do RMT melhorar a trabalhabilidade do concreto, é possível reduzir o fator água cimento resultando num aumento da resistência na ordem de 21,72% para o cimento CP II E 32, 24,43% para o cimento CP III 40 e 20,07% para o cimento CP V.

No que se refere a variável tipo de adição, analisada separadamente, constatou-se uma influência, em relação ao concreto de referência (100% de AMN). As misturas confeccionadas com 100% de AMA, $a/c = 0,50$ e Slump = 55 mm, obtiveram melhor desempenho do que o concreto de referência. Entretanto, com relação à mistura de 100% de AMA, $a/c = 0,53$ e Slump = 80 mm ocorreu um decréscimo da resistência. Tal fato é proveniente da necessidade do aumento do fator água / cimento, pois o AMA apresentou como visto no Capítulo 4, um maior teor de material pulverulento.

As misturas confeccionadas com o RMT obtiveram melhor desempenho que os outros concretos, sendo que as misturas de 100% de RMT na granulometria **ótima** apresentaram melhor desempenho, para todos os cimentos, devido ao fato de possuírem maior densidade de massa no estado endurecido e, conseqüentemente, menor teor de ar aprisionado.

Para se obter uma análise mais consistente dos resultados experimentais por meio da planilha eletrônica EXCEL, efetuou-se uma análise estatística do valor médio obtido para a resistência à compressão, para verificar o efeito da influência dos fatores teor de adição de RMT e o tipo de adição. Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Tabela 5.6.

TABELA 5.6 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{cm} para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F_0	F_α	F_0	F_α	F_0	F_α
Tipo de adição	18,79	3,06	20,43	3,06	22,40	3,06
Teor de adição do RMT	129,82	2,87	127,77	2,87	138,76	2,87

Salienta-se que se o valor do fator analisado F_0 , fornecido pela análise estatística for maior que o F_α , o efeito da variável será significativo. Concluindo-se que o teor de adição de RMT e o tipo de adição têm efeito significativo sobre a resistência à compressão axial (Tabela 5.6).

5.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a avaliação da influência da adição do RMT e do AMA na resistência à tração por compressão diametral, foram rompidos seis corpos-de-prova cilíndricos, para cada traço de concreto, nas idades de 03, 07, 28, 90 e 120 dias.

A seguir, nas Tabelas 5.7 a 5.9, são apresentados os valores de tensão média obtidas nos ensaios e o coeficiente de variação CV da série de ensaios, expressa em %.

TABELA 5.7 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral em MPa (Cimento – CP II E 32)

TRAÇO	f_{t3} Média (MPa)	CV (%)	f_{t7} Média (MPa)	CV (%)	f_{t28} Média (MPa)	CV (%)	f_{t90} Média (MPa)	CV (%)	f_{t120} Média (MPa)	CV (%)
T1A	1,9	4,94	2,76	4,00	3,56	6,21	3,91	4,09	3,92	1,70
T2A	2,04	4,53	2,78	5,99	3,57	6,63	3,91	4,84	3,93	2,73
T3A	2,06	2,82	2,90	2,68	3,60	0,83	4,10	2,24	4,05	1,00
T4A	2,20	3,54	2,96	2,84	3,85	1,69	4,04	1,11	4,08	1,30
T5A	2,23	2,44	3,26	2,34	4,02	2,99	4,06	1,61	4,11	0,84
T6A	2,36	7,02	3,41	2,78	4,13	3,31	4,15	1,49	4,25	1,48
T7A	2,73	8,35	4,00	2,73	4,18	0,72	4,24	1,95	4,30	1,89
T8A	2,17	6,42	3,36	5,30	4,08	3,43	4,15	1,53	4,22	1,49
T9A	1,77	3,54	2,48	7,57	3,05	1,92	3,55	5,85	3,58	2,20

f_{t3} – resistência à compressão por compressão diametral aos 3 dias de idade.

f_{t7} – resistência à compressão por compressão diametral aos 7 dias de idade.

f_{t28} – resistência à compressão por compressão diametral aos 28 dias de idade.

f_{t90} – resistência à compressão por compressão diametral aos 90 dias de idade.

f_{t120} – resistência à compressão por compressão diametral aos 120 dias de idade.

TABELA 5.8 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral em MPa (Cimento – CP III 40)

TRAÇO	f_{t3} Média (MPa)	CV (%)	f_{t7} Média (MPa)	CV (%)	f_{t28} Média (MPa)	CV (%)	f_{t90} Média (MPa)	CV (%)	f_{t120} Média (MPa)	CV (%)
T1B	1,86	4,32	2,62	9,43	3,59	3,96	4,09	3,87	4,12	3,85
T2B	1,94	7,84	2,66	3,85	3,78	2,15	4,11	3,54	4,19	5,92
T3B	2,04	2,61	2,75	2,03	3,82	1,47	4,19	3,43	4,21	5,70
T4B	2,09	7,93	2,77	3,93	3,91	2,08	4,23	3,93	4,25	5,41
T5B	2,14	3,51	2,93	5,47	4,06	4,12	4,19	2,64	4,20	2,13
T6B	2,34	4,74	3,30	7,77	4,18	4,63	4,28	3,33	4,29	4,93
T7B	2,42	13,51	3,37	10,83	4,30	8,30	4,43	4,43	4,44	5,08
T8B	2,10	6,54	3,33	4,23	4,11	3,01	4,25	3,25	4,27	4,46
T9B	1,73	6,52	2,42	5,68	3,11	4,44	3,74	4,47	3,77	3,78

TABELA 5.9 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral em MPa (Cimento – CP V)

TRAÇO	f_{t3} Média (MPa)	CV (%)	f_{t7} Média (MPa)	CV (%)	f_{t28} Média (MPa)	CV (%)	f_{t90} Média (MPa)	CV (%)	f_{t120} Média (MPa)	CV (%)
T1C	1,97	4,93	2,84	4,01	3,69	6,42	4,15	2,78	4,19	3,73
T2C	2,05	4,64	2,87	5,51	3,65	8,95	4,24	3,54	4,32	4,23
T3C	2,11	3,17	2,99	3,22	3,71	0,79	4,36	4,54	4,34	6,58
T4C	2,27	5,17	3,06	2,01	3,99	2,09	4,34	3,61	4,41	5,19
T5C	2,32	2,77	3,41	2,37	4,18	2,71	4,32	3,10	4,33	2,29
T6C	2,43	7,78	3,51	2,91	4,25	2,45	4,39	3,48	4,40	5,77
T7C	2,81	8,07	4,11	3,02	4,29	0,88	4,55	5,20	4,50	1,35
T8C	2,22	6,01	3,44	5,25	4,20	2,56	4,39	3,46	4,39	4,41
T9C	1,81	4,35	2,56	7,18	3,15	3,36	3,87	3,98	3,88	4,25

Analisando-se os dados das Tabelas 5.7 a 5.9 verifica-se que todas as amostras têm um coeficiente de variação inferior a 25%, e conclui-se que os resultados obtidos são aceitáveis.

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.9 foram elaborados os gráficos de resistência à tração por compressão diametral, para 3, 7, 28, 90 e 120 dias com os três tipos de cimento, conforme Figuras 5.7 a 5.9.

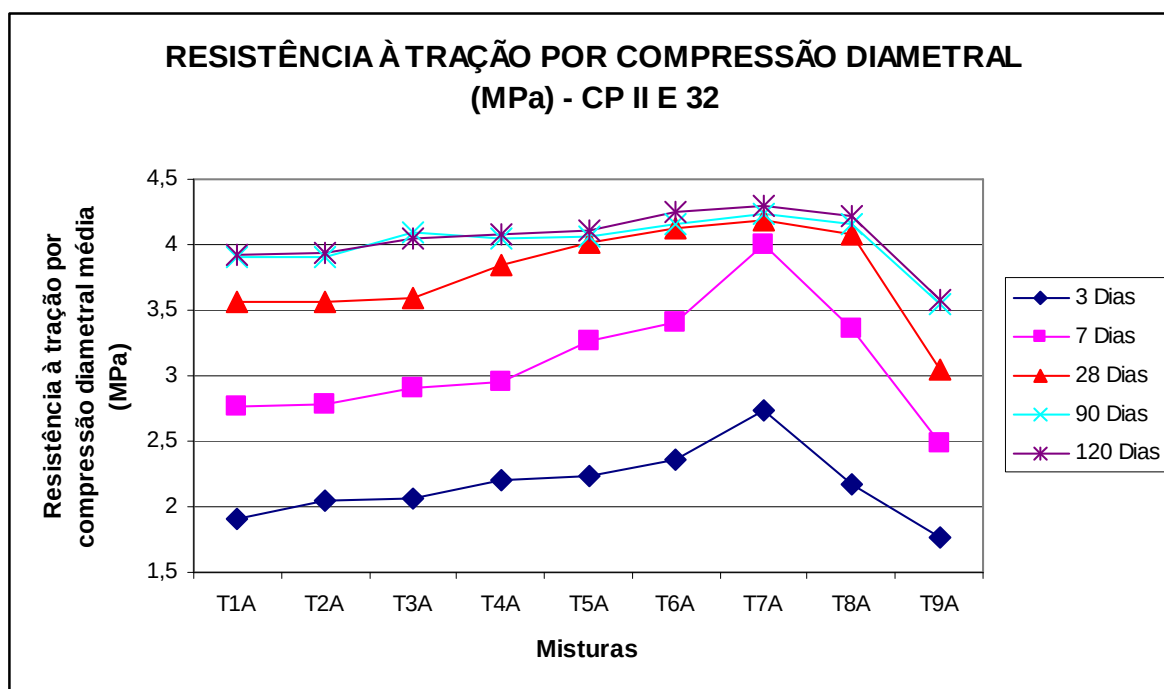


Figura 5.7 – Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP II E 32

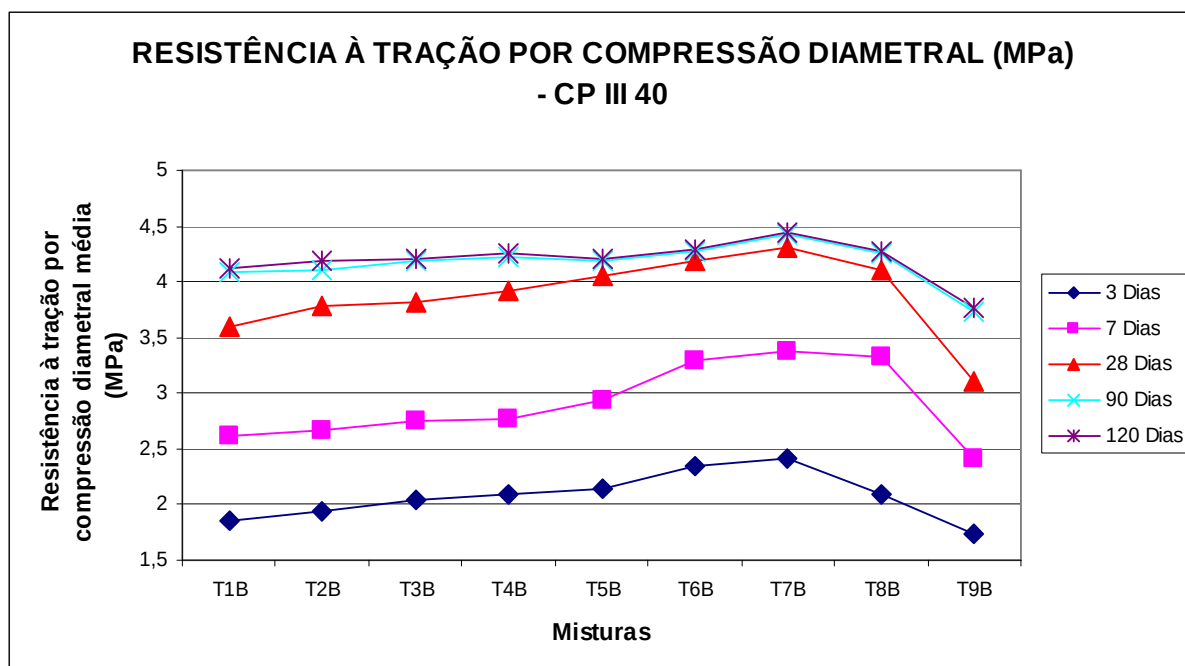


Figura 5.8 – Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP III 40

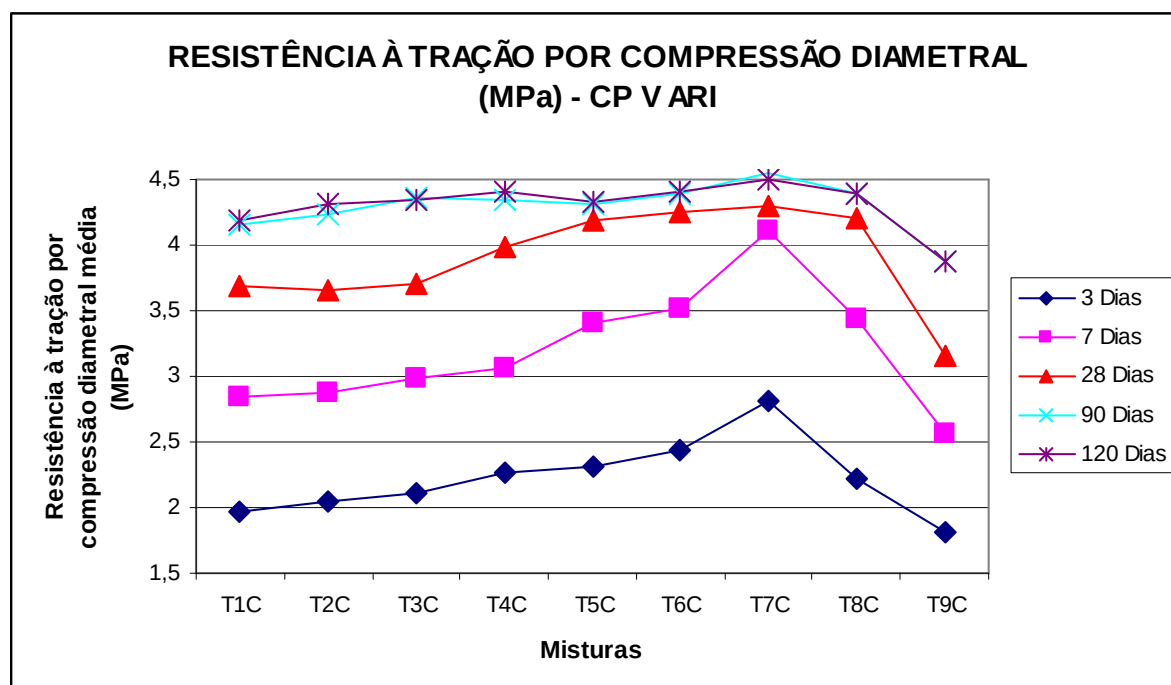


Figura 5.9 – Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Teor de adição (%) para o cimento CP V

Para uma melhor análise dos resultados experimentais, foi utilizada a planilha eletrônica EXCEL, ferramenta ANOVA, para a verificação da existência da influência das variáveis já relacionadas e suas interações. Na Tabela 5.10 consta as análises estatísticas das interações destas variáveis.

TABELA 5.10 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{tm} para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F_0	F_α	F_0	F_α	F_0	F_α
Tipo de adição	25,08	3,06	55,75	3,06	28,81	3,06
Teor de adição de RMT	152,05	2,87	372,03	2,87	152,81	2,87

Os resultados da Tabela 5.10 mostram que como F_0 é maior do que F_α , para todos os casos, conclui-se que houve influência significativa do teor de adição de RMT e o tipo de adição.

NEVILLE (1997) considera que, quando ocorre um aumento na resistência à compressão, também ocorre um aumento na resistência à tração, porém numa taxa menor. A relação entre a tração uniaxial e resistência à compressão gira em torno de 7 a 11% (MEHTA & MONTEIRO, 2005). Para os concretos com RMT avaliados neste trabalho, a relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial variou de 11% a 13%, nos traços com CP II E 32. Nos traços com CP III 40 variou entre 12% a 13% e a variação foi de 12% a 14% nos traços com CP V.

Não se observa aumento de resistência significativo nas misturas com RMT nas idades de 90 para 120 dias, permitindo-se concluir a não existência de atividade pozolânica, já que o RMT apresenta uma estrutura bastante cristalina, não ocorrendo reação química, ou seja, os níveis de resistências dos concretos com RMT, a longas idades, sofrem pouca influência.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), os agregados de textura rugosa ou triturado apresentam maior resistência que um concreto correspondente contendo agregado liso, principalmente à tração. Observa-se que os agregados provenientes

de rejeito de mármore são mais rugosos do que os agregados convencionais. Esse fato pode justificar as melhores resistências obtidas para concretos fabricados com RMT.

Foi possível identificar que os traços contendo agregados miúdos triturados, com mesmo fator água/cimento, atingiram maiores resistências, contudo os concretos produzidos com RMT apresentaram maiores resistências à tração por compressão diametral, sendo que se destaca o concreto confeccionado com o RMT na granulometria ótima, com maiores resistências em relação aos outros concretos.

A causa para a obtenção destes resultados pode ser entendida por meio da menor angulosidade do agregado miúdo natural, o que possibilita uma mobilidade relativa, afetando a micro-fissuração na interface entre a pasta hidratada e o agregado durante o ensaio. A mobilidade maior para os AMN se deve ao fato de serem mais arredondados, além de possuírem textura superficial mais lisa que os triturados.

Analisando-se isoladamente a influência do teor de adição do RMT na resistência à tração por compressão diametral verifica-se que à medida que aumentam o teor de adição, aumenta a resistência à tração por compressão diametral. Os concretos apresentaram um aumento médio na resistência (concretos com mesmo fator água cimento) de 10,16% para teores de adição de 0% para 100% nos concretos com cimento CP II E 32, de 7,48% nos concretos confeccionados com CP III 40 e 10,15% nos concretos com cimento CP V.

O emprego do RMT aumenta a trabalhabilidade do concreto, reduzindo o fator água/cimento, conduzindo a um aumento da resistência chegando a 14,02% para o cimento CP II E 32, 12,96% para o cimento CP II 40 e 12,64% para o cimento CP V.

A variável, tipo de adição, analisada separadamente, também mostrou influência, em relação ao concreto de referência (100% de AMN). As misturas confeccionadas com 100% de AMA, $a/c = 0,50$ e Slump = 55 mm, obtiveram melhor desempenho que o concreto de referência, entretanto, com relação à mistura de 100% de AMA, $a/c = 0,53$ e Slump = 80 mm (mesma trabalhabilidade) ocorreu um decréscimo da resistência. Este fato já era esperado por conta da necessidade de aumento do fator água / cimento, pois o AMA apresentou como visto no Capítulo 4, a

maior presença de material pulverulento. Este fato se manteve para os três tipos de cimento.

5.7 DETERMINAÇÃO DA TRAÇÃO NA FLEXÃO

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado na idade de 28 dias. Para cada traço de concreto foram moldados quatro corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 150 mm x 150 mm x 600 mm. Na Tabela 5.11 e na Figura 5.10 são apresentados os resultados encontrados.

TABELA 5.11 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão em MPa

CIMENTO CP II E 32			CIMENTO CP III 40 RS			CIMENTO CP V ARI		
TRAÇO	f_{tf28} Média (MPa)	CV (%)	TRAÇO	f_{tf28} Média (MPa)	CV (%)	TRAÇO	f_{tf28} Média (MPa)	CV (%)
T1A	4,55	1,54	T1B	4,58	1,89	T1C	4,67	2,83
T2A	4,65	5,70	T2B	4,62	2,06	T2C	4,76	0,68
T3A	4,68	0,65	T3B	4,66	2,18	T3C	4,81	1,38
T4A	4,69	0,54	T4B	4,69	0,37	T4C	4,85	1,26
T5A	4,86	8,45	T5B	4,78	0,63	T5C	4,88	1,17
T6A	4,91	0,82	T6B	4,87	1,78	T6C	5,05	1,62
T7A	4,91	0,54	T7B	4,92	1,53	T7C	5,09	2,53
T8A	3,73	6,53	T8B	3,71	0,27	T8C	3,86	1,81
T9A	3,82	1,20	T9B	3,84	1,58	T9C	4,00	1,84

f_{tf28} – resistência à compressão aos 28 dias de idade.

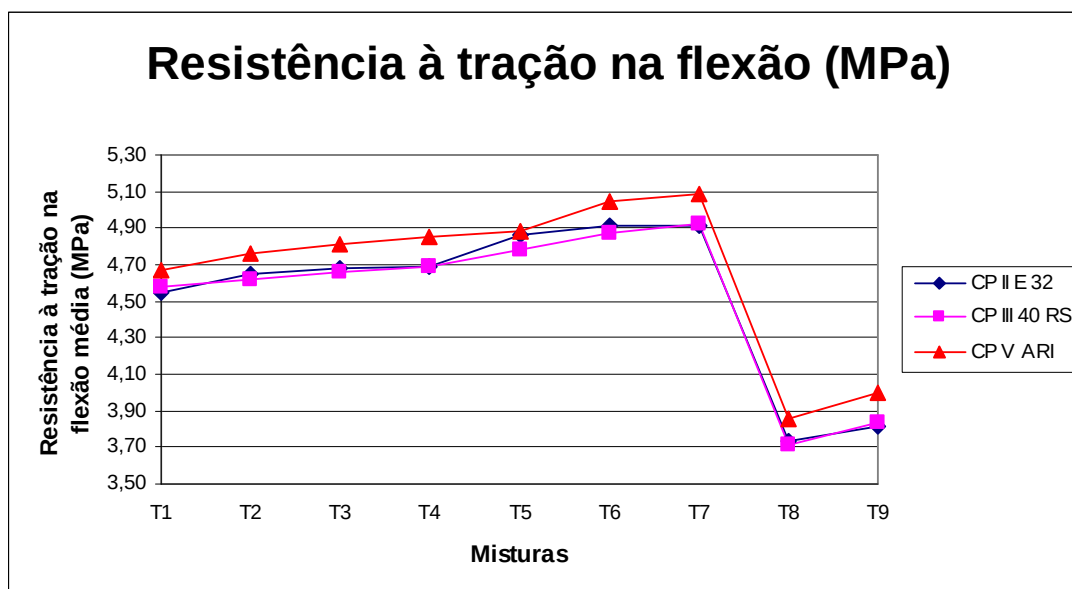


Figura 5.10 – Resistência média à tração na flexão (MPa) x Teor de adição (%)

Com base nos resultados experimentais, realizou-se a ANOVA por meio da planilha eletrônica EXCEL, para a verificação da influência da relação teor de adição e tipo de adição, aos 28 dias de idade. Na Tabela 5.12 constam as análises estatísticas das interações destas variáveis.

TABELA 5.12 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{tfm} para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α
Tipo de adição	13,25	5,14	342,67	5,14	101,37	5,14
Teor de adição	0,74	3,48	3,08	3,48	2,90	3,48

Os resultados da Tabela 5.12 mostram que há influência significativa na resistência à tração na flexão para o tipo de adição, porém não há diferença significativa para o teor de adição do RMT para os concretos avaliados aos 28 dias de idade.

Analisando os resultados, é possível observar que diante de todos os concretos produzidos, obtêm-se melhores resultados à tração na flexão nos concretos com agregado miúdo triturado, sendo que se destacam os concretos contendo RMT, especialmente nos traços com RMT na granulometria ótima.

Considerando o teor de adição do RMT, as misturas apresentaram pequeno aumento na resistência de 4,85% para teores de adição de 0% para 100% nos concretos com cimento CP II E 32, de 1,94% nos concretos confeccionados com CP III 40 e 3,34% nos concretos com cimento CP V.

As resistências aos esforços de tração na flexão nos concretos com adição de RMT se elevaram, porém em proporção inferior ao ganho promovido na resistência à compressão.

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é uma propriedade significativa para a resistência do concreto, principalmente para a resistência à flexão. Em parte, a aderência é devida ao intertravamento do agregado e a pasta de cimento hidratada, em virtude da aspereza da superfície das partículas de agregado.

Normalmente, quando a aderência é satisfatória, um corpo-de-prova rompido deve ter algumas partículas de agregados rompidas, além de outras, mais numerosas, arrancadas de seus alojamentos na pasta (NEVILLE, 1997).

Analisando-se um corpo-de-prova rompido que foi confeccionado com 100% de RMT (Figura 5.11) observa-se esta situação, e pode-se deduzir que o rejeito de mármore triturado apresenta boa aderência com a pasta de cimento.



Figura 5.11 – Corpo-de-prova com 100% de RMT

Além disso, outra possível causa para os resultados de resistência à tração na flexão obtida, está no formato dos grãos, pois os mesmos por serem angulosos

podem provocar um travamento melhor das partículas nos concretos com RMT e AMA, melhorando as suas resistências à tração na flexão.

5.8 MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2003), sendo que antes da realização do ensaio de três corpos-de-prova para a determinação do módulo de elasticidade, dois corpos-de-prova do mesmo concreto foram ensaiados para obter a resistência à compressão.

Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 150 mm x 300 mm, num total de cinco exemplares por traço.

As Tabelas 5.13 a 5.14 e Figuras 5.12 a 5.13 apresentam os resultados dos ensaios de modulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson para cada traço, respectivamente.

TABELA 5.13 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa) AOS 28 DIAS								
CP II E 32			CP III 40 RS			CP V ARI		
Traço	E _{ci} média (GPa)	CV (%)	Traço	E _{ci} média (GPa)	CV (%)	Traço	E _{ci} média (GPa)	CV (%)
T1A	27,89	1,11	T1B	27,98	5,26	T1C	28,82	5,24
T2A	28,93	1,76	T2B	29,45	5,06	T2C	30,44	5,24
T3A	29,86	1,30	T3B	30,12	3,49	T3C	31,23	4,39
T4A	35,36	0,54	T4B	36,19	8,30	T4C	36,79	8,10
T5A	47,81	0,90	T5B	48,98	7,63	T5C	50,11	7,15
T6A	48,20	0,62	T6B	49,17	3,45	T6C	50,47	2,18
T7A	48,87	0,80	T7B	49,70	4,42	T7C	51,19	4,41
T8A	26,47	4,44	T8B	28,04	5,14	T8C	28,88	5,14
T9A	28,89	1,45	T9B	27,07	4,30	T9C	27,87	3,16

TABELA 5.14 – Resultados do ensaio de coeficiente de Poisson aos 28 dias

COEFICIENTE DE POISSON AOS 28 DIAS								
CP II E 32			CP III 40 RS			CP V ARI		
Traço	μ médio	CV (%)	Traço	μ médio	CV (%)	Traço	μ médio	CV (%)
T1A	0,28	11,04	T1B	0,29	9,12	T1C	0,30	6,86
T2A	0,28	2,04	T2B	0,29	5,33	T2C	0,30	5,15
T3A	0,30	5,77	T3B	0,31	8,03	T3C	0,33	9,09
T4A	0,33	7,55	T4B	0,35	7,26	T4C	0,35	8,65
T5A	0,43	8,10	T5B	0,46	8,85	T5C	0,47	9,53
T6A	0,44	4,77	T6B	0,45	8,91	T6C	0,47	8,92
T7A	0,46	7,04	T7B	0,46	6,59	T7C	0,48	6,74
T8A	0,29	5,33	T8B	0,30	6,67	T8C	0,31	5,59
T9A	0,31	8,03	T9B	0,27	5,59	T9C	0,28	3,57

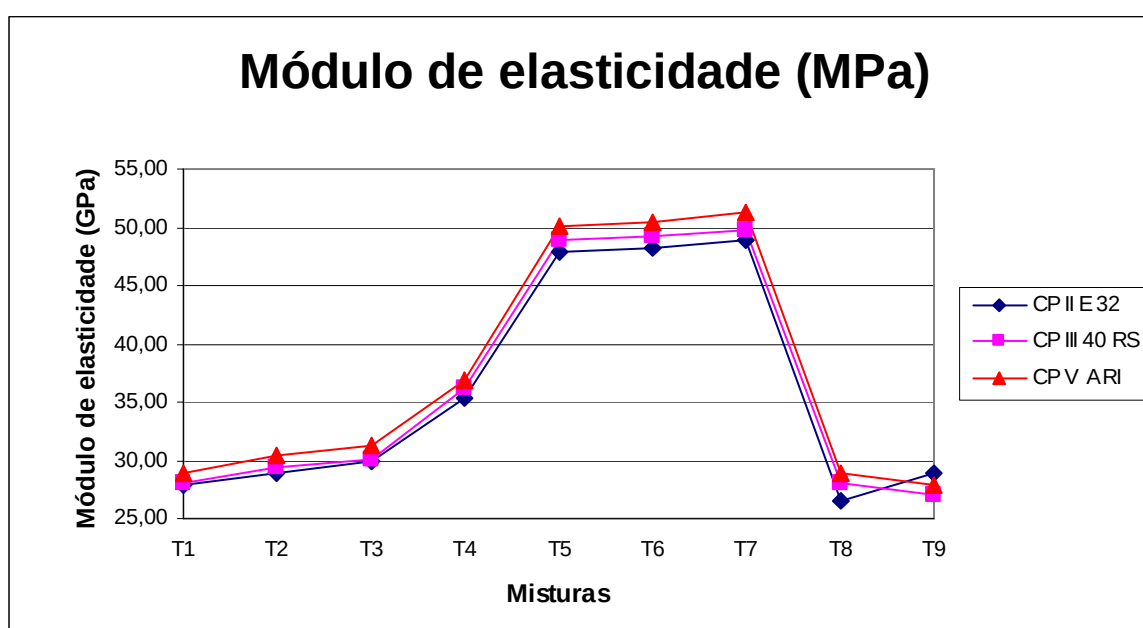


Figura 5.12 – Módulo de elasticidade (GPa)

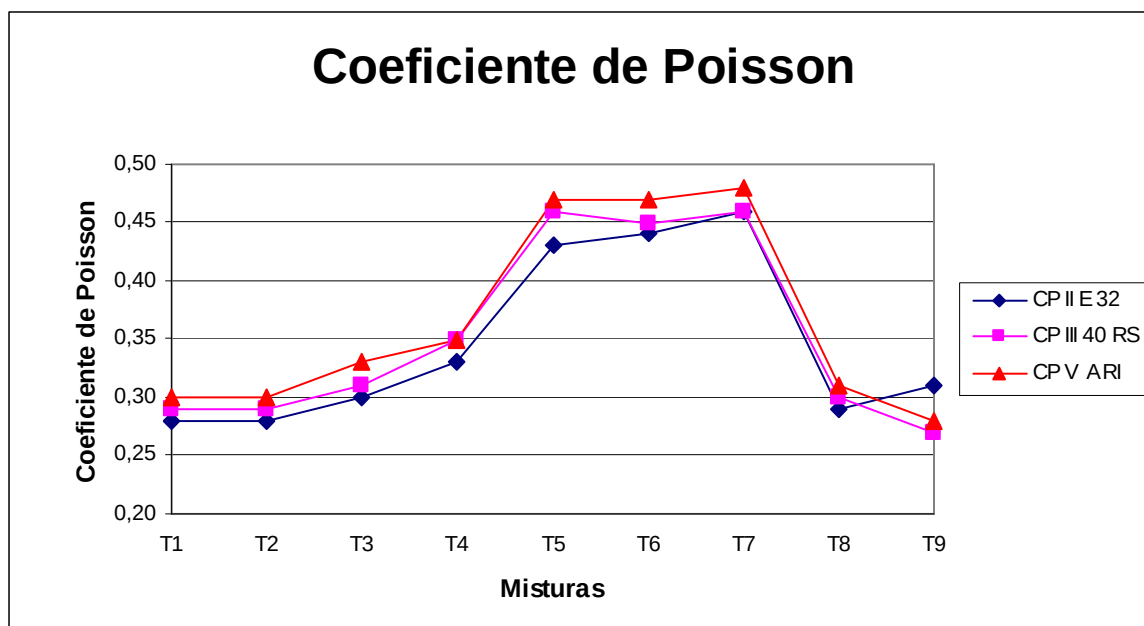


Figura 5.13 – Coeficiente de Poisson

Utilizando-se esses resultados, efetuou-se a ANOVA para verificar a influência do tipo de adição e o teor de adição, no módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

As Tabelas 5.15 e 5.16 mostram as análises estatísticas dessas variáveis.

TABELA 5.15 – Resultados obtidos na análise estatística do módulo de elasticidade para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α
Tipo de adição	77,06	5,14	72,56	5,14	78,26	5,14
Teor de adição	601,61	3,48	39,51	3,48	40,06	3,48

TABELA 5.16 – Resultados obtidos na análise estatística do coeficiente de Poisson para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α
Tipo de adição	28,85	5,14	28,77	5,14	30,16	5,14
Teor de adição	19,75	3,48	19,27	3,48	17,07	3,48

Os resultados das Tabelas 5.15 e 5.16 demonstram que há influência significativa no módulo de elasticidade e no coeficiente de Poisson para o tipo de adição e para o teor de adição do RMT para os concretos avaliados aos 28 dias de idade.

O módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez do concreto no estado endurecido que é proporcionado pela hidratação do cimento presente, pelo travamento entre as partículas dos agregados devido à forma e às rugosidades dos grãos e pelo teor de material pulverulento (SILVA, 2006).

Analisando os resultados observa-se que os concretos com RMT apresentam maior módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson que os concretos com AMN e à medida que aumenta o teor de RMT, aumenta o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Os concretos apresentaram um ganho médio no módulo de elasticidade de 73% e no coeficiente de Poisson de 56% nas misturas de 0% a 100% de adição. Já os concretos confeccionados com AMA não apresentaram aumentos significativos em relação ao concreto de referência (com AMN).

Os AMN apresentam partículas com formas visualmente mais arredondadas e também com textura mais lisa que os RMT. Isso tende a proporcionar maior formação de microfissuras entre agregado e pasta do que os RMT durante o ensaio, reduzindo os valores do módulo de elasticidade.

No concreto com AMA, não ocorreu como no concreto com RMT, em virtude dos agregados miúdos artificiais propiciarem maior volume de pasta devido a maior presença de material pulverulento que o RMT, o que favorece a porosidade da zona de transição, com maior índice de vazios, aumentando a ocorrência de microfissuras na interface pasta-agregado e reduzindo o módulo de elasticidade.

5.9 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

O ensaio de absorção por imersão avalia a absorção de um determinado concreto num tempo e também seu índice de vazios, por meio da relação entre a massa seca e saturada da amostra, sem considerar a velocidade de absorção. Este ensaio é realizado a frio, conforme a NBR 9778/1987, com o tempo de permanência de imersão de 96 horas. Ensaíram-se três corpos-de-prova na idade de 28 dias.

A Tabela 5.17 e a Figura 5.14 apresentam resultados do ensaio realizado com concretos sem adição (referência) e com adição de AMA e RMT.

TABELA 5.17 – Resultados do ensaio de absorção por imersão dos concretos.

Misturas	CPII – E – 32			CPIII – 40 – RS			CPV – ARI		
	Absorção (%)	C.V. (%)	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)	C.V. (%)	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)	C.V. (%)	Índice de Vazios (%)
T1	6,21	8,66	14,21	6,23	3,19	14,17	6,17	3,91	13,94
T2	6,03	4,73	13,94	6,13	3,54	14,15	6,13	2,04	13,88
T3	5,65	0,53	13,31	5,98	1,42	13,77	5,90	1,46	13,42
T4	5,49	2,73	13,01	5,82	0,94	13,36	5,83	1,79	13,20
T5	5,40	2,08	12,81	5,66	1,20	13,02	5,66	1,74	12,85
T6	5,38	0,67	12,70	5,57	0,49	12,97	5,55	1,36	12,72
T7	5,37	0,39	12,13	5,55	1,14	12,40	5,47	2,01	12,24
T8	7,58	6,22	15,17	7,67	1,15	15,40	7,70	0,99	15,32
T9	6,93	7,03	14,57	6,77	1,50	14,78	6,72	2,05	14,65

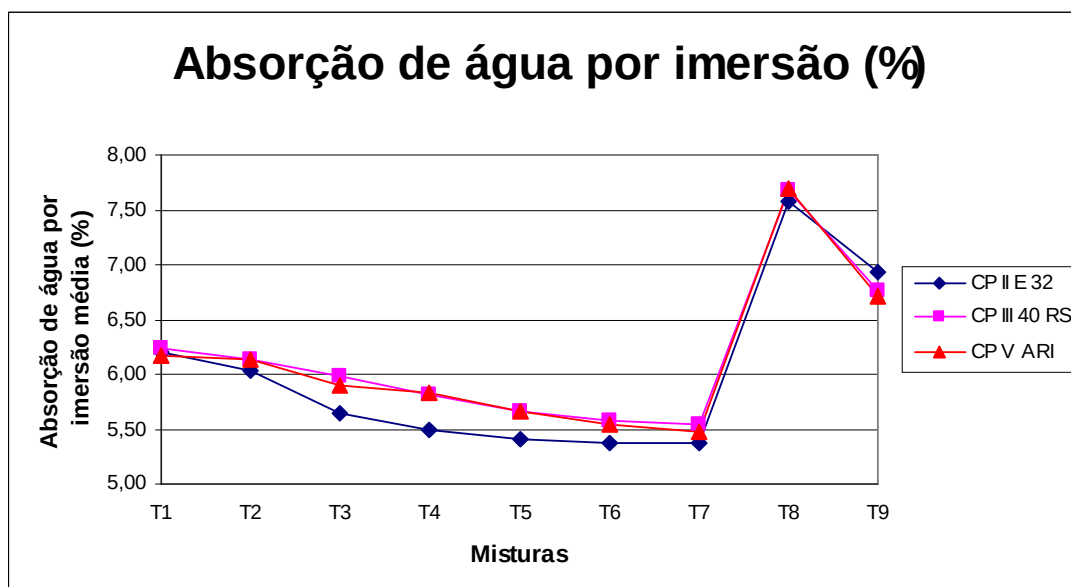


Figura 5.14 – Absorção de água por imersão

A partir dos resultados mostrados na Tabela 5.17 foi utilizada a ANOVA para verificação da influência do tipo e do teor de adição na absorção por imersão e do índice de vazios, cujos valores encontrados constam na Tabela 5.18.

TABELA 5.18 – Resultados obtidos na análise estatística da absorção de água por imersão para CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α
Tipo de adição	20,62	5,14	201,53	5,14	137,54	5,14
Teor de adição	4,87	3,48	7,97	3,48	6,66	3,48

Os valores obtidos pela ANOVA mostram que o teor e o tipo de adição são variáveis significativas em relação à absorção por imersão e ao índice de vazios.

Constata-se que os dados obtidos tanto no ensaio de absorção por imersão quanto o de índice de vazios apresentam uma tendência de decréscimo da massa de água absorvida, como consequência uma redução da absorção por imersão e do índice de vazios com o aumento da quantidade de adição do RMT em substituição ao agregado miúdo natural, em todos os traços analisados, reduzindo-se a absorção em 15,74% e o índice de vazios em 9,37% com a substituição total do agregado miúdo natural.

Todavia ocorreu o oposto nos concretos com adição de AMA que apresentou aumento de até 24,80% na absorção e de até 8,28% no índice de vazios em relação ao concreto de referência.

5.10 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCÇÃO CAPILAR

Este fenômeno pode ser compreendido pela movimentação da água pelos capilares do concreto. Os resultados para os três tipos de cimento estão apresentados na Tabela 5.19 e na Figura 5.15.

TABELA 5.19 – Absorção de água por capilaridade.

Misturas	CPII – E – 32		CPIII – 40 – RS		CPV – ARI	
	Absorção (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
T1	1,23	2,93	1,44	2,03	1,26	2,10
T2	1,15	3,24	1,37	3,92	1,20	2,67
T3	0,96	6,83	1,26	7,37	1,09	7,72
T4	0,92	3,31	1,18	4,68	1,01	3,96
T5	0,84	3,15	1,12	3,77	0,95	4,84
T6	0,77	1,49	1,05	8,24	0,88	9,63
T7	0,76	1,51	1,01	7,81	0,81	7,71
T8	1,37	3,36	1,65	5,19	1,40	4,13
T9	1,22	5,47	1,56	5,20	1,32	4,97

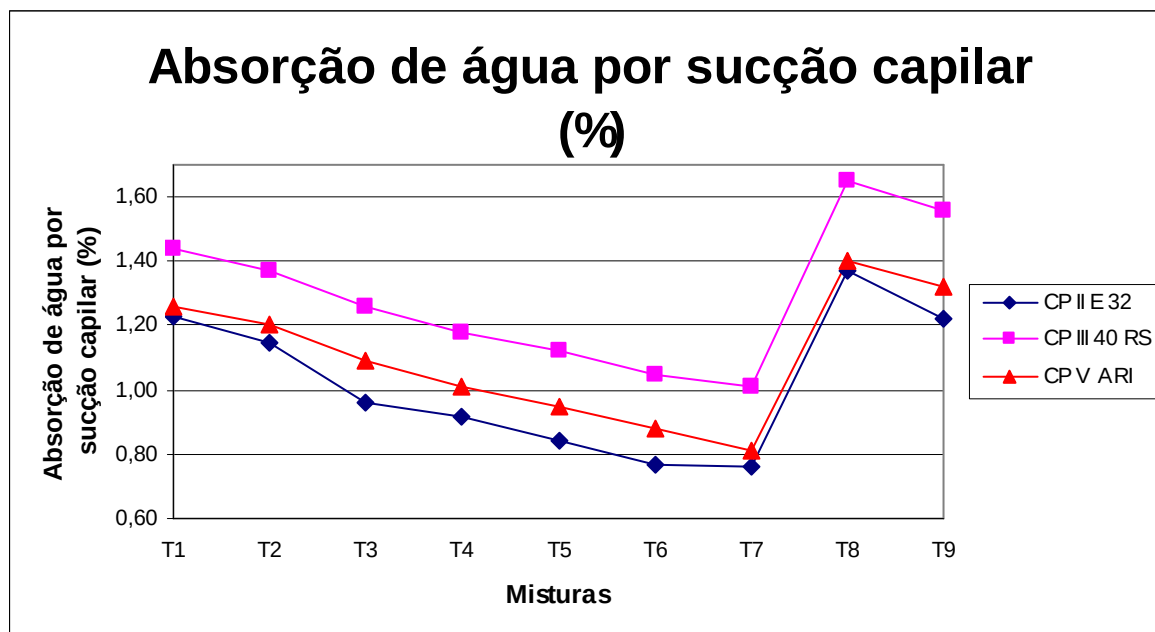


Figura 5.15 – Absorção de água por sucção capilar

A partir dos resultados mostrados na Tabela 5.19 foi utilizado a ANOVA para verificação da influência do tipo e do teor de adição na absorção de água por capilaridade, cujos valores encontrados constam na Tabela 5.20.

TABELA 5.20 – Resultados obtidos na análise estatística da absorção de água por sucção capilar em CP com o tipo e o teor de adição de RMT variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α
Tipo de adição	28,84	3,48	28,77	3,48	30,16	3,48
Teor de adição de RMT	19,75	3,48	19,27	3,48	17,07	3,48

Os valores obtidos pela ANOVA mostram que o teor e o tipo de adição são variáveis significativas em relação à absorção por capilaridade.

Com relação ao teor de adição de RMT, relacionando-se os valores obtidos, há uma redução significativa da absorção, na ordem de 61,84% nos concretos com CPII – E – 32, 55% com CPIII – 40 – RS e 55,55% com CPV – ARI, oriundo provavelmente, do preenchimento e da distribuição dos vazios no concreto com a adição de RMT. Entretanto o emprego do AMA ocasionou um incremento bem maior

de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais, favorecendo a absorção por sucção capilar (GONÇALVES, 2000). Segundo COUTINHO (1973), uma elevada percentagem de finos, sem atividade química, favorece o aumento da absorção capilar.

Analisando a Tabela 5.19 constata-se que as misturas com cimento composto de escória de alto-forno (CPIII – 40 – RS) apresentaram taxa de absorção capilar aproximadamente 24,9% superior a dos concretos confeccionados com cimento sem escória. Estudos realizados por BAUER (1995) também apresentaram taxa 40% superior a dos demais concretos. O autor atribui este aumento a um maior valor no volume total de poros apresentados pelos concretos com escória de alto-forno.

5.11 ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE RETRAÇÃO HIDRÁULICA

A retração hidráulica em estruturas de concreto é um fenômeno inevitável, e como é uma das principais causas da fissuração, assume fundamental importância, pois a sua ocorrência está associada à durabilidade do concreto.

Para tanto, foram avaliados quanto a retração duas misturas de concreto com cimento CP III – 40 RS, a saber: traço de referência com 100% de AMN e 100% de RMT com granulometria igual ao AMN. Sendo realizadas leituras da variação linear de comprimento nas idades 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56, 60, 90 e 120 dias, os resultados estão apresentados na Tabela 5.21 e na Figura 5.16.

TABELA 5.21 – Retração hidráulica.

Idade (dias)	Retração hidráulica (%)	
	100% de AMN	100% de RMT
1	-0,0082	-0,0060
3	-0,0146	-0,0109
5	-0,0169	-0,0137

7	-0,0169	-0,0209
14	-0,0178	-0,0237
21	-0,0187	-0,0250
28	-0,0219	-0,0250
35	-0,0237	-0,0255
42	-0,0260	-0,0264
49	-0,0273	-0,0264
56	-0,0273	-0,0264
60	-0,0273	-0,0264
90	-0,0273	-0,0264
120	-0,0273	-0,0264

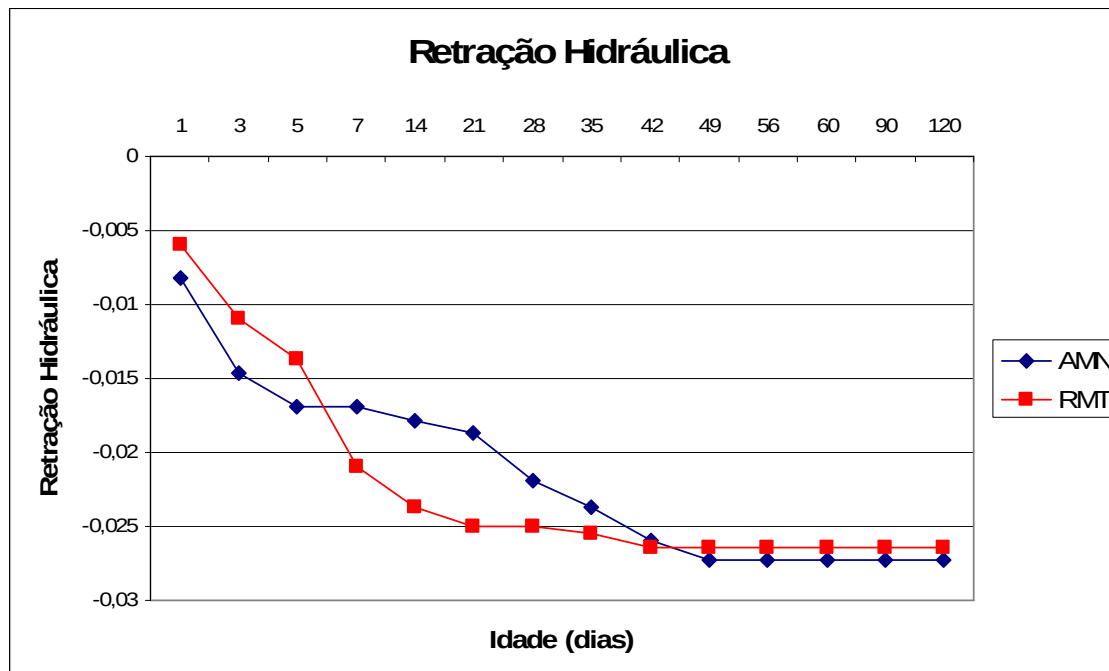


Figura 5.16 – Retração hidráulica

É possível constatar por meio dos resultados obtidos neste ensaio que ao se comparar as misturas com AMN e RMT, a mistura com rejeito de mármore na mesma granulometria do agregado miúdo natural apresentou valores maiores nas

primeiras idades e após os 40 dias a retração se tornou menor e praticamente estabilizada. Isto já era esperado, devido ao RMT apresentar maior teor de material pulverulento que o AMN, o que conduz a um aumento da retração hidráulica nas primeiras idades (ANDRADE,1997). E ainda, o RMT apresenta baixa absorção de água, em virtude disso, o agregado não absorve parte da água de amassamento e uma quantidade maior fica livre na mistura (água evaporável), aumentando assim a retração por secagem nas primeiras idades.

No que se refere à NBR 6118 (ABNT, 2003) que prescreve os valores característicos da deformação específica de retração aos 5, 30 e 60 dias em função da umidade ambiente e da geometria do corpo-de-prova, relacionado ao tempo em que ocorreu a estabilização do concreto (T_{∞}), conforme apresentado na Tabela 5.22, constata-se que os valores encontrados nos ensaios estão abaixo dos limites máximos estabelecidos.

TABELA 5.22 – Comparação da retração hidráulica com a NBR 6118/2003.

Idade (dias)	Retração hidráulica (%)		
	100% de AMN	100% de RMT	Valor máximo estabelecido (NBR 6118)
5	-0,0104	-0,0113	-0,0230
30	-0,0036	-0,0014	-0,0200
60	0,0000	0,0000	-0,0170

5.12 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS

A Tabela 5.23 e a Figura 5.17 apresentam os resultados dos ensaios para cada traço.

TABELA 5.23 – Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aos 120 dias

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (km/s) AOS 120 DIAS						
TRAÇO	CP II E 32		CP III 40 RS		CP V ARI	
	V média (km/s)	CV (%)	V média (km/s)	CV (%)	V média (km/s)	CV (%)
100% de AMN	4,138	5,10	4,223	1,93	4,171	1,56
100% de RMT (a/c = 0,50)	4,211	1,68	4,288	1,38	4,259	1,05
100% de RMT (s = 80 mm)	4,343	1,29	4,367	1,70	4,347	1,07
100% de RMT na granulometria ótima	4,360	6,32	4,439	1,49	4,400	0,81
100% de AMA (a/c = 0,50)	4,092	1,32	4,183	0,99	4,122	1,32
100% de AMA (s = 80 mm)	3,926	7,38	3,928	2,53	4,005	1,11

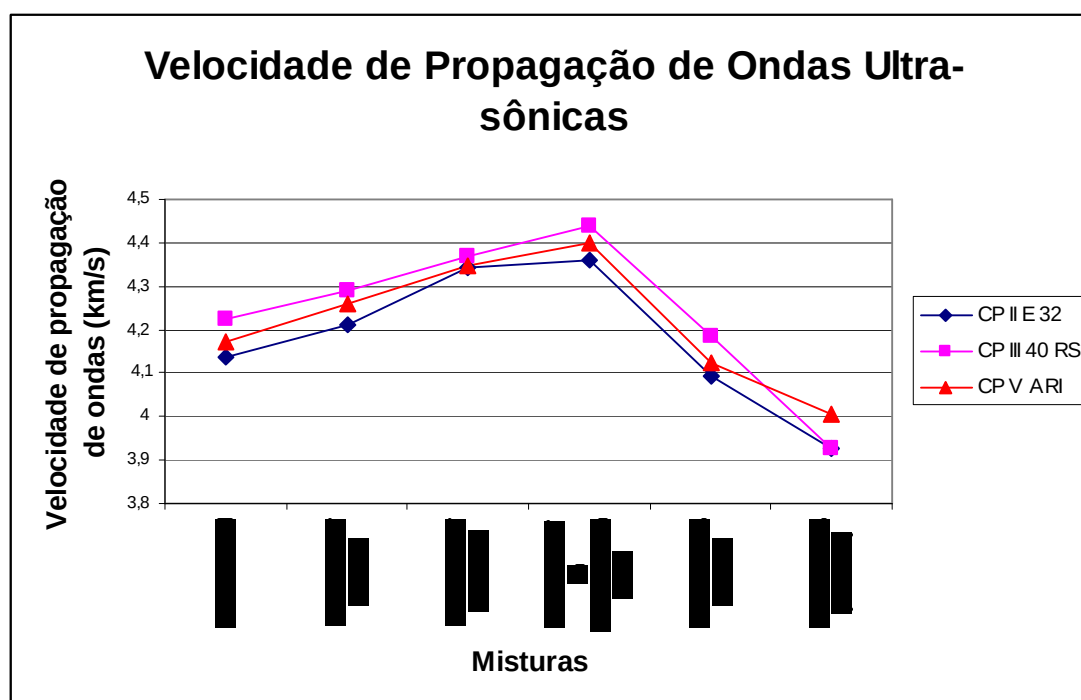


Figura 5.17 – Velocidade de propagação de ondas (km/s)

Efetuu-se uma análise estatística por meio do emprego da ANOVA a fim de se verificar a influência do tipo de agregado, na velocidade de propagação de ondas.

A Tabela 5.24 apresenta as análises efetuadas, onde se verifica uma influência significativa na velocidade de propagação das ondas em função do tipo de agregado empregado na confecção do concreto.

TABELA 5.24 – Resultados obtidos na análise estatística da velocidade de propagação de ondas para CP com o tipo de adição de variável – valores de F.

Variável	CPII E 32		CPIII 40 RS		CPV ARI	
	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α
Tipo de agregado	2,99	2,77	26,99	2,77	35,53	2,77

Analizando os resultados observa-se que os concretos com RMT apresentam maior velocidade de propagação de ondas do que os com AMN. Destacando-se o concreto confeccionado com RMT na granulometria **ótima**, que apresenta uma distribuição granulométrica adequada, segundo os requisitos da normalização brasileira, resultando num aumento na densidade do conjunto agregado/aglomerante. Há de se considerar que a densidade está relacionada com a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos grãos do agregado, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores e, assim sucessivamente. Tal fato fica evidenciado, também, devido à baixa porosidade do agregado oriundo do mármore (vide item 4.2.2.3.2).

No que se refere aos concretos confeccionados com AMA não se observou aumentos em relação ao concreto de referência (com AMN), devido, principalmente, a elevada quantidade de material pulverulento, resultando numa maior superfície específica e maior quantidade de água.

Há de se considerar, inclusive, que neste estudo optou-se por manter o fator água/cimento constante, a fim de se avaliar o comportamento do agregado na mistura. Sendo assim, o AMA produziu um concreto menos trabalhável e mais poroso, que tendem a prejudicar a transmissão das ondas ultra-sônicas, diminuindo sua velocidade.

Além disso, os AMA propiciam maior volume de pasta devido a maior presença de finos, quando comparado ao RMT e ao AMN, favorecendo a porosidade da zona de transição, aumentando a ocorrência de micro-fissuras na interface pasta-agregado e reduzindo tanto o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, quanto à velocidade de propagação de ondas.

Observa-se que os concretos que apresentaram as maiores resistências, os maiores módulos de elasticidade e menores absorções também apresentaram maiores velocidades de propagação de ondas, pois estes concretos foram confeccionados com RMT que é o agregado com maior densidade e, de acordo com NEVILLE (1997), EVANGELISTA (2002) e MEHTA & MONTEIRO (2005) quanto maior a massa específica do agregado, mais denso é o concreto e, portanto, maior a velocidade de propagação de ondas. Este fato se manteve para os três tipos de cimento.

Não se observa diferença significativa entre os valores de velocidade de propagação para os diferentes tipos de cimento: o CP III 40 RS apresentou velocidades um pouco maiores em relação ao CP II E 32 (cerca de 1,4 %) e ao CP V ARI (em torno de 0,5%), conforme se verifica na Tabela A.1.

5.13 ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE REAÇÃO ALCALI-AGREGADO

Como visto no Capítulo 3 são vários os fatores que influenciam a reação álcali-agregado, sendo estes analisados a seguir:

5.13.1 Composição mineralógica

Com base nos resultados apresentados na análise química e petrográfica do RMT (item 4.2.2.3), constata-se a ausência de minerais que poderiam causar a reação álcali-agregado tais como: opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, silicatos existentes nos feldspatos, folhelos argilosos, brucita e calcário dolomítico.

5.13.2 Teor de álcalis no concreto

Sendo o cimento a principal fonte de álcalis no concreto e de acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) se o conteúdo alcalino do cimento for menor que 0,6%, não ocorrem danos provenientes de reação álcali-agregado, e ainda, como os

três tipos de cimento utilizados nesta pesquisa apresentam teor de álcali inferior a 0,6% (vide item 4.2.1), provavelmente não ocorrerão reações deletérias.

5.13.3 Granulometria do agregado

Concretos contendo maior quantidade de partículas finas apresentam maior tendência de expansão (HOBBS,1988). O resíduo de mármore triturado utilizado neste estudo apresenta o módulo de finura de 2,75 o que corresponde a graduação média, portanto acredita-se que o RMT não produza reação álcali-agregado.

5.14 CONCLUSÕES PRELIMINARES

5.14.1 Trabalhabilidade

- O aumento do teor da adição do RMT nos concretos proporcionou um incremento na consistência das misturas, sem que houvesse desagregação ou exsudação excessiva do mesmo, devido a baixa porosidade e absorção dos seus grãos;
- O emprego do AMA resulta, numa diminuição da trabalhabilidade da mistura, sendo este comportamento atribuído ao alto índice de material pulverulento (cerca de 14,5%).

5.14.2 Exsudação

- Ocorreu redução da exsudação nos concretos com AMA, RMT e com RMT na granulometria **ótima** (NBR 7211 (ABNT, 2005)), sendo atribuído à quantidade de teor de material pulverulento que influencia diretamente à exsudação do concreto.

5.14.3 Densidade de massa no estado endurecido

- À medida que se aumenta o teor de adição de RMT, ocorre um aumento na densidade de massa devido à baixa absorção dos grãos;

- As misturas produzidas com AMA apresentaram maior densidade de massa em relação ao concreto de referência (100% de AMN), sendo resultado do alto índice de material pulverulento;
- As misturas confeccionadas com 100% de RMT na granulometria **ótima** apresentaram a maior densidade de massa no estado endurecido, devido ao incremento no grau de empacotamento do conjunto agregado-aglomerante.

5.14.4 Resistência mecânica (à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão)

- Identificou-se que os traços contendo agregados miúdos triturados atingiram maiores resistências, destacando-se o concreto com RMT, com maiores resistências mecânicas em relação aos demais, sendo que as misturas de 100% de RMT na granulometria **ótima** apresentaram melhor desempenho, devido, principalmente, à reduzida porosidade do agregado. Portanto, à medida que se aumenta o teor de adição do RMT, aumenta-se também a resistência à compressão axial;
- Em virtude do RMT, melhorar a trabalhabilidade do concreto é possível reduzir o fator água/cimento resultando num aumento da resistência superior a 20%.
- Não se observa aumento de resistência significativo nas misturas com RMT nas idades de 90 para 120 dias, o que permite concluir a não existência de atividade pozolânica. Entretanto, constatou-se uma boa aderência com a pasta de cimento.

5.14.5 Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

- Os concretos com RMT apresentam maior módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson que os concretos com AMN e à medida que aumenta o teor de RMT, aumenta o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, evidenciando uma melhoria no travamento das partículas dos agregados devido a forma e rugosidade dos grãos e o teor de material pulverulento;

- Os concretos confeccionados com AMA não apresentaram aumentos significativos do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em relação ao concreto de referência (com AMN).

5.14.6 Absorção de água por imersão e índice de vazios

- Tanto no ensaio de absorção por imersão quanto no de índice de vazios uma tendência de decréscimo da massa de água absorvida é observada, como consequência um decréscimo da absorção por imersão e do índice de vazios com o aumento da quantidade de adição do RMT em substituição ao agregado miúdo natural, devido à sua baixa porosidade.
- Os concretos com adição de AMA apresentaram aumento na absorção e no índice de vazios em relação ao concreto de referência.

5.14.7 Absorção de água por sucção capilar

- Ocorre uma redução significativa da absorção por sucção capilar nos concretos com o aumento da quantidade de adição do RMT em substituição ao agregado miúdo natural.
- O emprego do AMA favorece o aumento da absorção capilar.
- As misturas com cimento composto de escória de alto-forno (CPIII – 40 – RS) apresentaram taxa de absorção capilar aproximadamente 24,9% superior a dos concretos confeccionados com cimento sem escória, devido ao incremento no volume total de poros da mistura.

5.14.8 Retração hidráulica

- A mistura com rejeito de mármore na mesma granulometria do agregado miúdo natural apresentou valores maiores nas primeiras idades e após os 40 dias a retração se tornou menor e praticamente estabilizada, devido ao RMT apresentar maior teor de material pulverulento que o AMN, o que conduz a um aumento da retração hidráulica nas primeiras idades, e ainda, que o RMT apresenta baixa absorção de água; portanto, agregado não absorve parte da água de amassamento e uma quantidade maior fica livre na mistura (água

evaporável), aumentando assim a retração por secagem nas primeiras idades.

5.14.9 Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas

- Os concretos com RMT apresentaram maior velocidade de propagação de ondas que os concretos com AMN, sendo que se destaca o concreto confeccionado com RMT na granulometria **ótima**, que apresenta uma distribuição granulométrica adequada, segundo os requisitos da normalização brasileira, resultando num aumento na densidade do conjunto agregado/aglomerante. Tal fato fica evidenciado, também, devido à baixa porosidade do agregado oriundo do mármore (vide item 4.2.2.3.2).
- Os concretos confeccionados com AMA não apresentaram aumentos em relação ao concreto de referência (com AMN). Uma das causas é que o AMA apresenta grande quantidade de material pulverulento, isto resulta numa maior superfície específica e no aumento do teor de água. Como neste estudo optou-se por manter o fator água/cimento constante a fim de avaliar o comportamento do agregado na mistura, o AMA produziu um concreto menos trabalhável e mais poroso, diminuindo a velocidade.

5.14.10 Reação álcali-agregado

- Constata-se na composição mineralógica do RMT a ausência de minerais que possam causar a reação álcali-agregado tais como: opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, silicatos existentes nos feldspatos, folhelos argilosos, brucita e calcário dolomítico.
- O resíduo de mármore triturado utilizado neste estudo apresenta o módulo de finura de 2,75 o que corresponde a graduação média, portanto acredita-se que dificilmente o RMT não produza reação álcali-agregado.

5.15 CORRELAÇÕES

Buscando-se uma análise mais consistente sobre a influência da substituição do rejeito de mármore triturado nas misturas estudadas, efetuaram-se algumas

correlações entre os ensaios realizados aos 28 dias de idade com a mistura de 100% de RMT na granulometria **ótima**:

5.15.1 Resistência à compressão axial x resistência à tração por compressão diametral

A Figura 5.18 relaciona os valores potenciais de resistência à tração por compressão diametral obtidos com os correspondentes resultados de resistência à compressão axial.

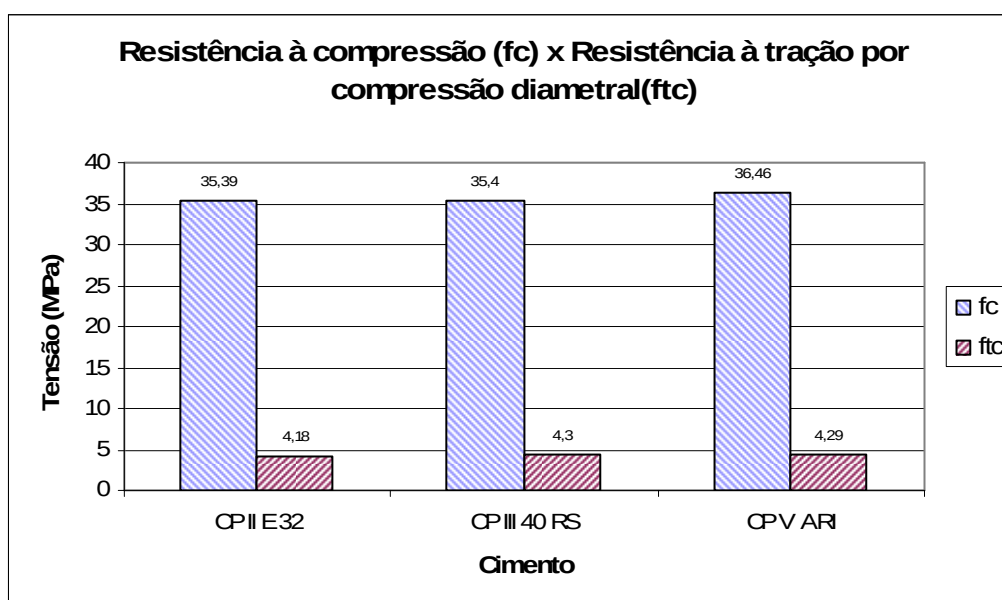


Figura 5.18 – Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral.

A fim de se relacionar a resistência à compressão axial em função da resistência à tração por compressão diametral, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 5.1 a 5.3.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_c = 59,11 - 5,67 \times f_{tc}, \text{ erro padrão} = 0,815 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_c = 3,24 + 7,75 \times f_{tc}, \text{ erro padrão} = 0,231 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$f_c = 9,74 \times (f_{tc})^{1,04}, \text{ erro padrão} = 1,043 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

sendo

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

f_{tc} – resistência à tração por compressão diametral (MPa).

5.15.2 Resistência à tração por compressão diametral x resistência à tração na flexão

A Figura 5.19 apresenta a correlação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral nas amostras confeccionadas com o RMT.

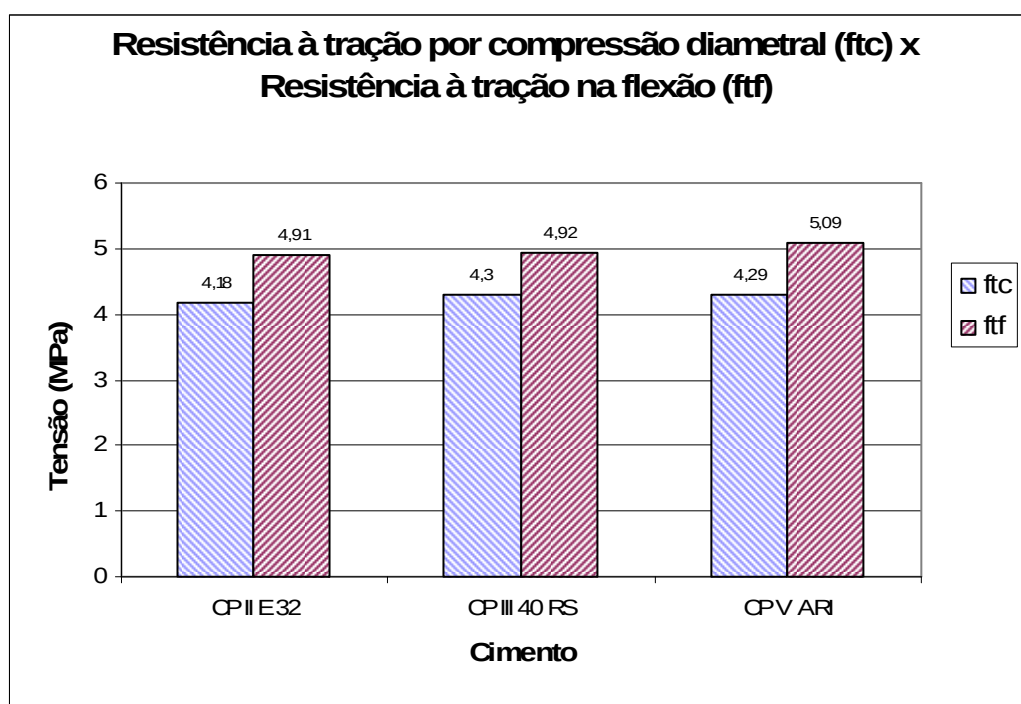


Figura 5.19 – Correlação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão.

A partir dos dados das resistências à tração na flexão e tração por compressão diametral, usados na elaboração da Figura 5.19, foram então definidas as equações que relacionam a resistência à tração na flexão e a resistência à tração

por compressão diametral, que são validas para concretos confeccionados com RMT na granulometria **ótima**. Utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se a expressões 5.4 a 5.6.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_{tc} = -2,13 + 1,28 \times f_{tf}, \text{ erro padrão} = 0,014 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_{tc} = -5,24 + 1,94 \times f_{tf}, \text{ erro padrão} = 0,412 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$f_{tc} = 4,35 - 0,01 \times f_{tf}, \text{ erro padrão} = 0,046 \text{ MPa} \quad (5.6)$$

sendo

f_{tf} – resistência à tração na flexão (MPa);

f_{tc} – resistência à tração por compressão diametral (MPa).

5.15.3 Resistência à compressão axial x resistência à tração na flexão

A Figura 5.20 ilustra a relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão.

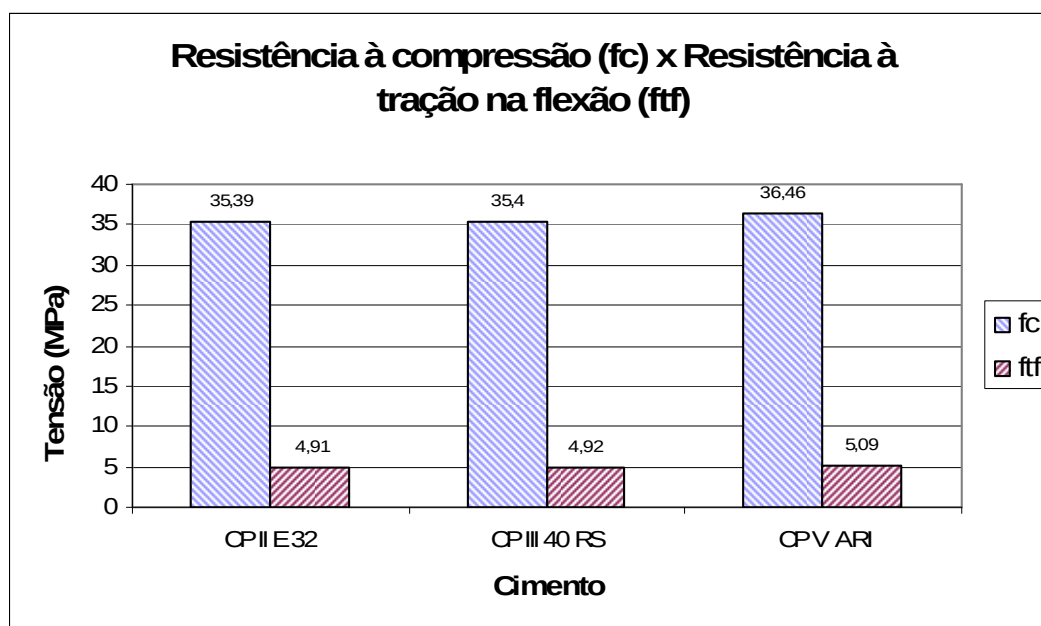


Figura 5.20 – Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão.

Buscando-se obter uma expressão que represente os resultados para resistência à compressão axial em função da resistência à tração na flexão, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 5.7 a 5.9.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_c = 124,47 - 18,14 \times f_{tf}, \text{ erro padrão} = 0,691 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_c = 18,87 + 3,34 \times f_{tf}, \text{ erro padrão} = 0,026 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$f_c = 89,23 - 10,37 \times f_{tf}, \text{ erro padrão} = 0,816 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

sendo

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

f_{tf} – resistência à tração na flexão (MPa);

5.15.4 Resistência à compressão axial x módulo de elasticidade

Na Figura 5.21, é apresentada a relação entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade para observar as influências dos teores de adição de RMT.

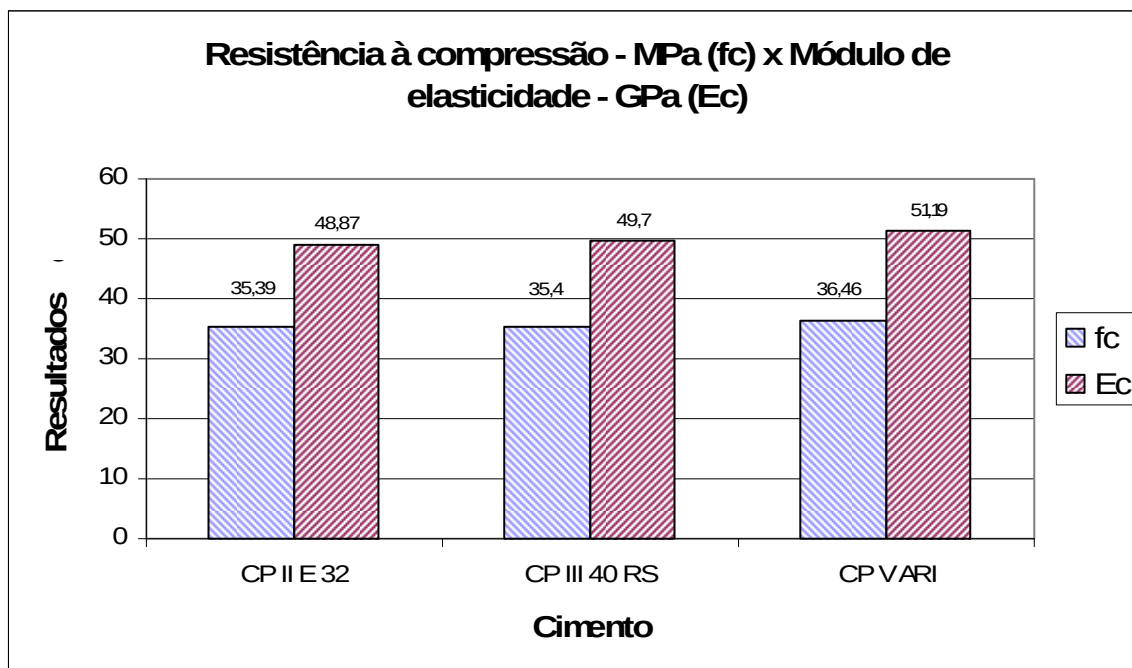


Figura 5.21 – Correlação entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade.

Deve-se ressaltar que a resistência está intimamente relacionada com o módulo de elasticidade. Esse fato pode ser constatado a partir da Figura 5.20, em que está apresentado o comportamento da resistência à compressão axial frente aos valores do módulo de elasticidade.

As equações para estimativa do módulo de elasticidade em função da resistência a compressão axial aos 28 dias, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, são apresentadas a seguir, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 5.10 a 5.12.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_c = -3,12 + 0,79 \times E_c, \text{ erro padrão} = 0,783 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_c = 31,13 + 0,09 \times E_c, \text{ erro padrão} = 0,171 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$f_c = 67,92 - 0,610 \times E_c, \text{ erro padrão} = 0,719 \text{ MPa} \quad (5.12)$$

sendo

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

E_c – módulo de elasticidade (GPa).

5.15.5 Resistência à compressão axial x coeficiente de Poisson

Considerando a relação entre a resistência à compressão axial e o coeficiente de Poisson, obteve-se o gráfico da Figura 5.22.

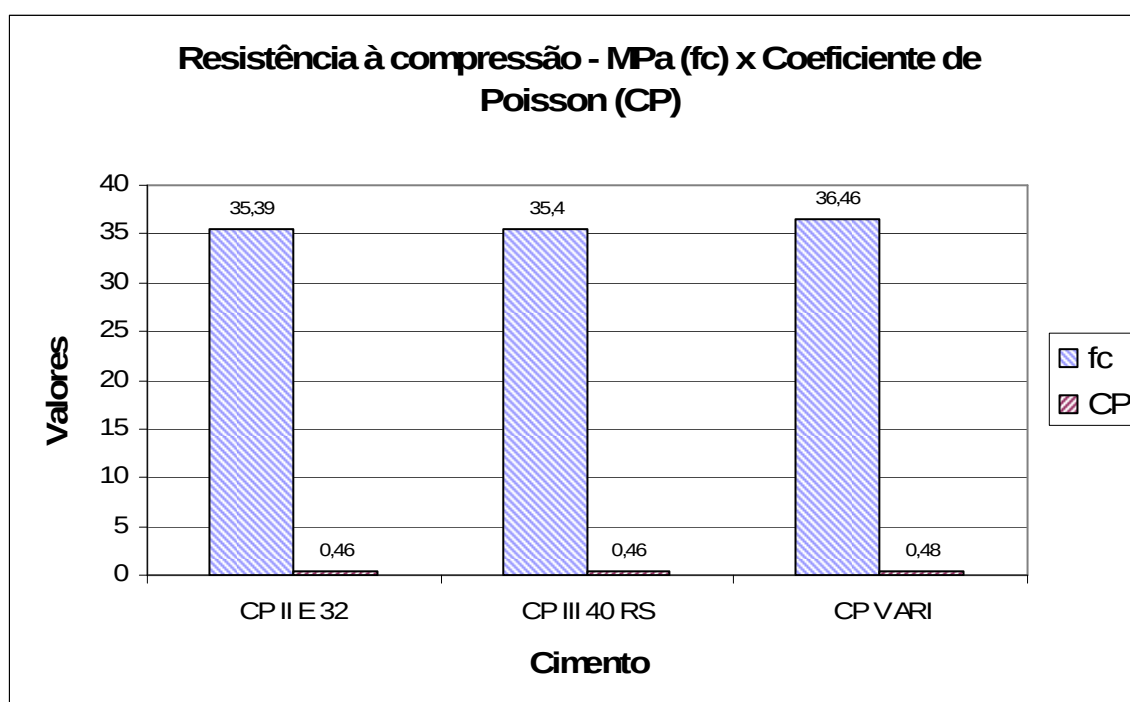


Figura 5.22 – Correlação entre a resistência à compressão axial e o coeficiente de Poisson.

Numa análise das curvas obtidas nos gráficos da Figura 5.22, constata-se que a resistência à compressão axial e o coeficiente de Poisson são diretamente proporcionais, ou seja, com o aumento da resistência à compressão axial ocorre o aumento do coeficiente de Poisson.

A fim de se relacionar a resistência resiste à compressão axial em função do coeficiente de Poisson, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se a expressões 5.13 a 5.15.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_c = 24,76 + 23,25 \times CP, \text{ erro padrão} = 0,382 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_c = 31,62 + 8,17 \times CP, \text{ erro padrão} = 0,049 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$f_c = 27,01 \times (CP)^{-0,40}, \text{ erro padrão} = 1,034 \text{ MPa} \quad (5.15)$$

onde

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

CP – coeficiente de Poisson.

5.15.6 Resistência à compressão axial x módulo de elasticidade x coeficiente de Poisson

Efetuada-se a relação entre a resistência à compressão axial, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, obteve-se o gráfico da Figura 5.23.

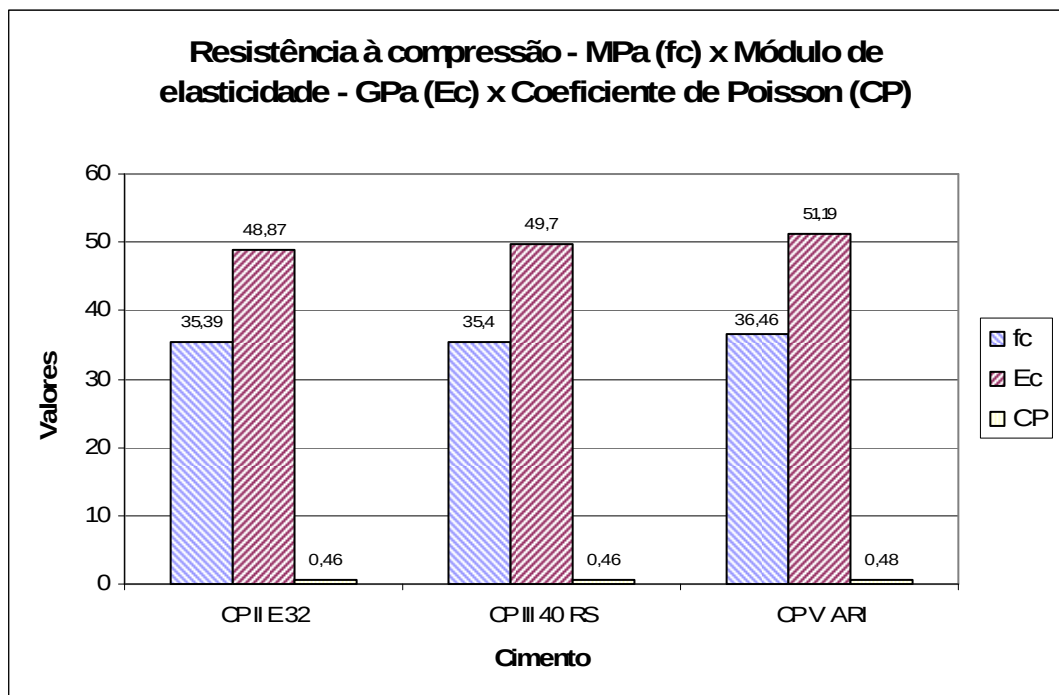


Figura 5.23 – Correlação entre resistência à compressão axial, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

A fim de se relacionar a resistência à compressão axial em função do módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 5.16 a 5.18.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_c = 11,24 + 0,285 \times E_c + 22,30 \times CP, \text{ erro padrão} = 0,520 \text{ MPa} \quad (5.16)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_c = 32,41 + 0,04 \times E_c + 10,41 \times CP, \text{ erro padrão} = 0,033 \text{ MPa} \quad (5.17)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$f_c = 79,66 - 1,39 \times E_c + 59,19 \times CP, \text{ erro padrão} = 0,007 \text{ MPa} \quad (5.18)$$

sendo

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

E_c – módulo de elasticidade (GPa).

CP – coeficiente de Poisson.

5.15.7 Absorção de água por imersão x Índice de vazios

A Figura 5.24 apresenta a correlação entre a absorção de água por imersão e o índice de vazios nas amostras confeccionadas com o RMT.

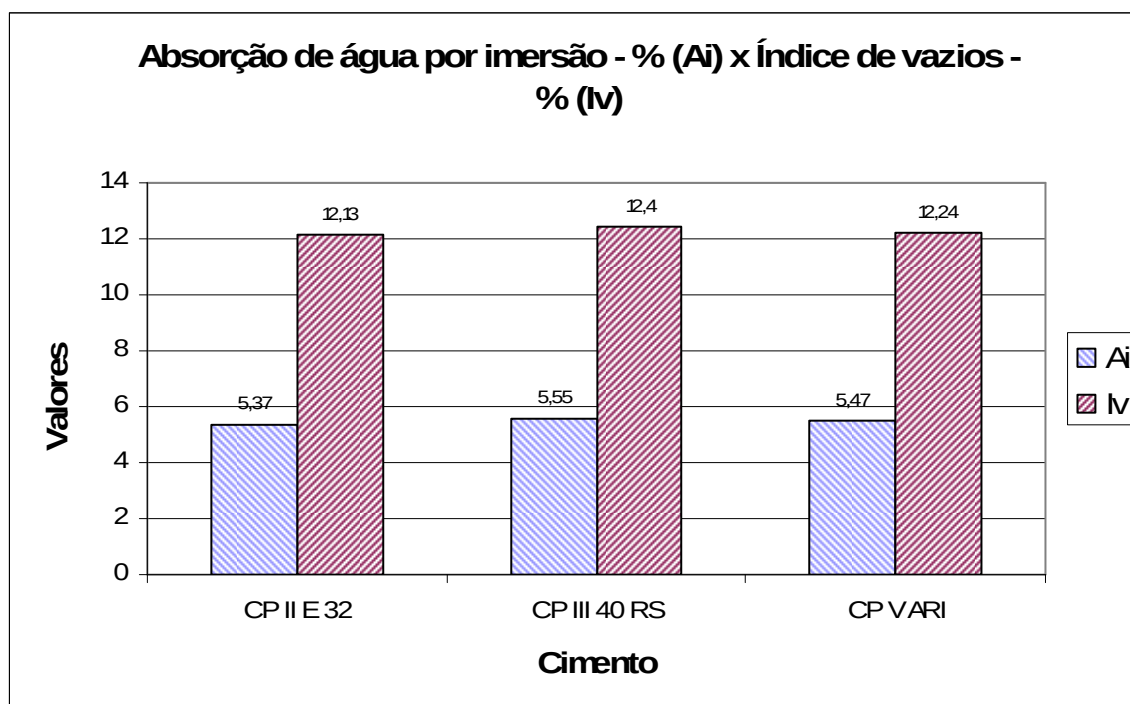


Figura 5.24 – Correlação entre o índice de vazios e a absorção de água de água por imersão.

A fim de se relacionar a absorção de água por imersão e o índice de vazios, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 5.19 a 5.21.

a) Cimento CP II E 32:

$$A_i = 7,99 - 0,2 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,006 \text{ MPa} \quad (5.19)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$A_i = 4,63 + 0,07 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,069 \text{ MPa} \quad (5.20)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$A_i = 7,55 - 0,17 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,106 \text{ MPa} \quad (5.21)$$

sendo

A_i – absorção de água por imersão (%);

I_v – índice de vazios (%).

5.15.8 Absorção de água por imersão x absorção de água por sucção capilar x índice de vazios

Com a relação entre a absorção de água por imersão, absorção de água por sucção capilar e o índice de vazios, obteve-se o gráfico da Figura 5.25.

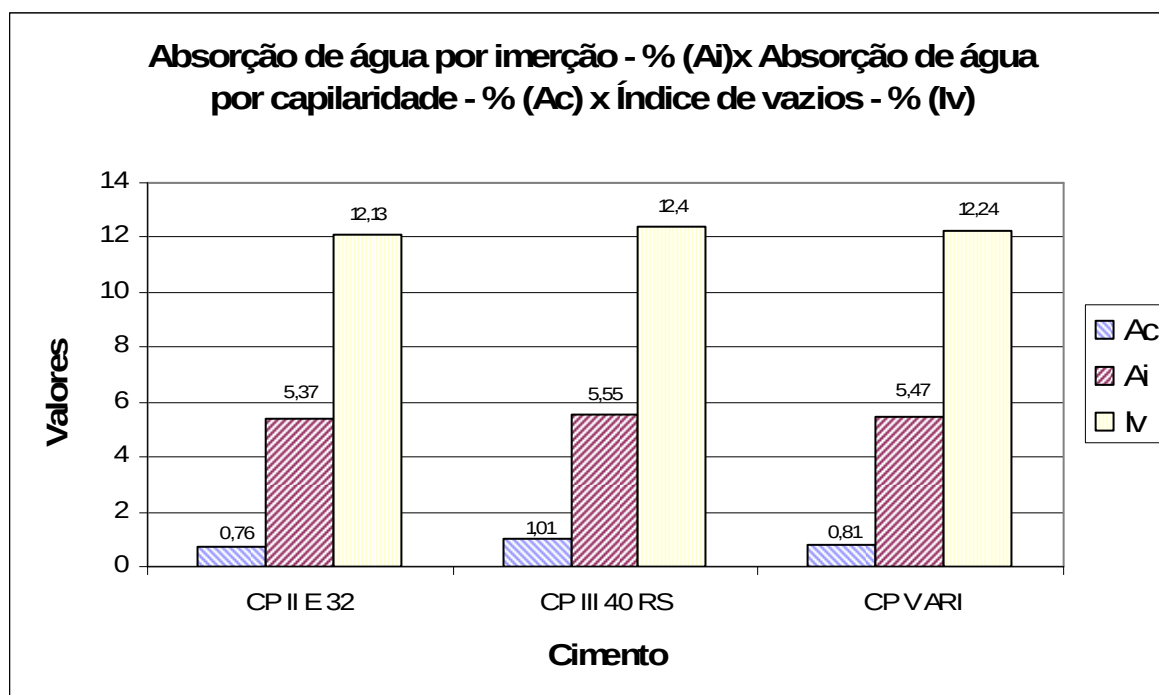


Figura 5.25 – Correlação entre a absorção de água por imersão x absorção de água por sucção capilar x índice de vazios.

Quando se analisa a absorção de água por imersão em função da absorção de água por sucção capilar e em função do índice de vazios, constata-se que os resultados apresentam elevado grau de relacionamento.

A fim de se relacionar a absorção de água por imersão, absorção de água por sucção capilar e o índice de vazios, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 5.22 a 5.24.

a) Cimento CP II E 32:

$$A_i = 9,77 - 1,0 \times A_c - 0,3 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,005 \text{ MPa} \quad (5.22)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$A_i = 4,82 + 0,10 \times A_c + 0,05 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,096 \text{ MPa} \quad (5.23)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$A_i = 8,78 - 1,23 \times A_c - 0,2 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,104 \text{ MPa} \quad (5.24)$$

sendo

A_i – absorção de água por imersão (%);

A_c – absorção de água por sucção capilar (%);

I_v – índice de vazios (%).

5.15.9 Resistência à compressão x absorção de água por imersão x absorção de água por sucção capilar x índice de vazios

Com a relação entre a resistência à compressão axial, a absorção de água por imersão, a absorção de água por sucção capilar e o índice de vazios, obteve-se o gráfico da Figura 5.26.

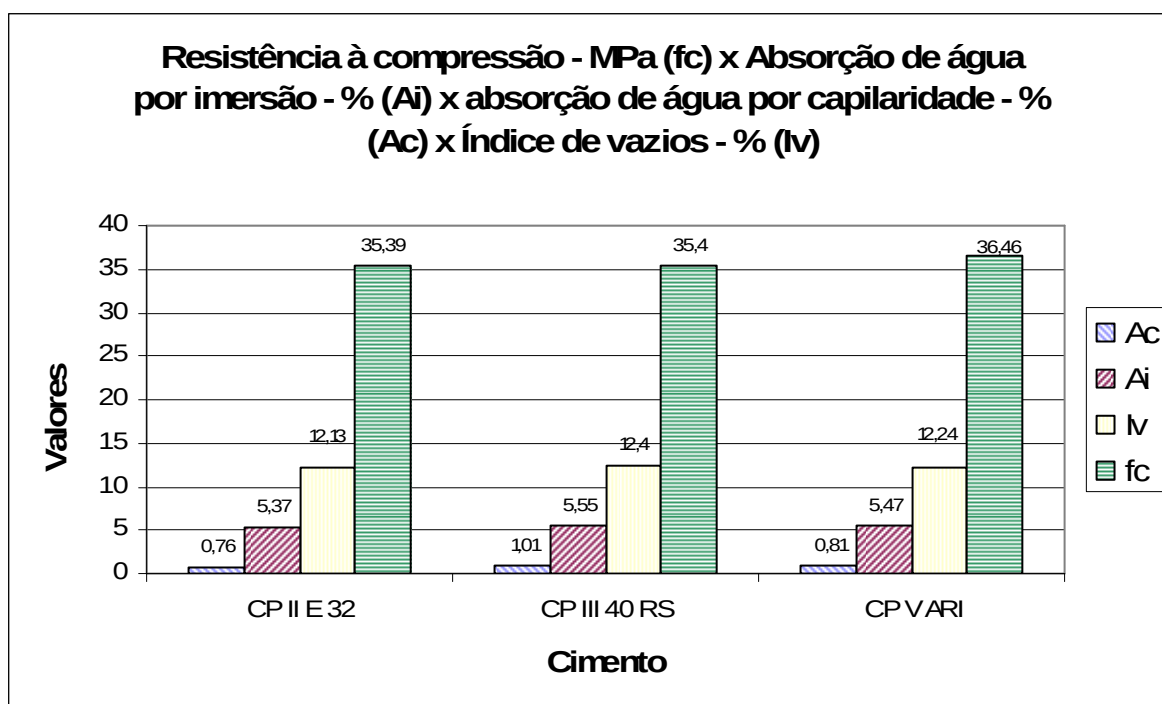


Figura 5.26 – Correlação entre a resistência à compressão x absorção de água por imersão x absorção de água por sucção capilar x índice de vazios.

A análise da Figura 5.26 mostra que a redução da absorção de água por imersão, da absorção de água por sucção capilar e do índice de vazios provoca o aumento da resistência à compressão axial.

A fim de se relacionar a resistência à compressão axial em função da absorção de água por imersão, absorção de água por sucção capilar e o índice de vazios, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 5.25 a 5.27.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_c = -108,79 + 0,01 \times A_i + 34 \times A_c + 9,75 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,722 \text{ MPa} \quad (5.25)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_c = 34,95 - 1,43 \times A_i - 0,42 \times A_c + 0,70 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,002 \text{ MPa} \quad (5.26)$$

c) Cimento CP V ARI:

$$f_c = -70,37 + 16,46 \times A_i + 5,24 \times A_c + 1,02 \times I_v, \text{ erro padrão} = 0,004 \text{ MPa} \quad (5.27)$$

onde

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

A_i – absorção de água por imersão (%);

A_c – absorção de água por sucção capilar (%);

I_v – índice de vazios (%).

5.15.10 Resistência à compressão axial x velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas

A Figura 5.27 relaciona os valores potenciais de velocidade de propagação de ondas obtidos com os correspondentes resultados de resistência à compressão axial.

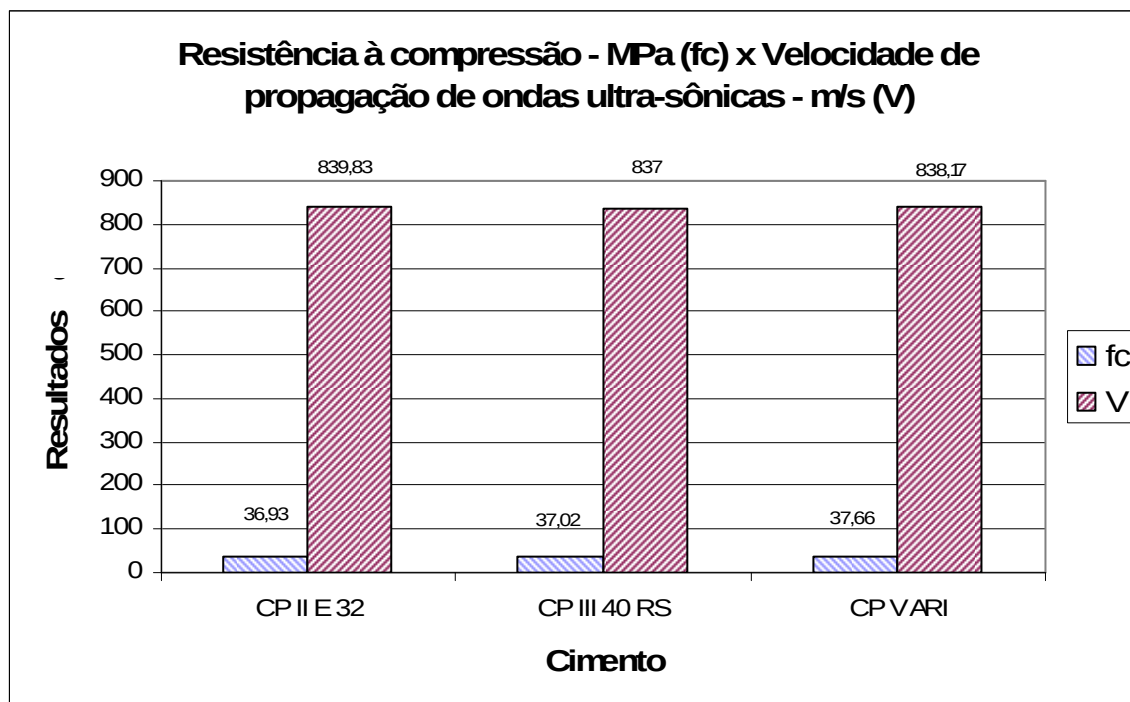


Figura 2.27 – Correlação entre a resistência à compressão axial e a velocidade de propagação de ondas.

A fim de se relacionar a resistência à compressão axial em função da velocidade de propagação de ondas, dos concretos com RMT na granulometria **ótima**, utilizou-se a ferramenta “análise de dados – regressão” existente na planilha eletrônica EXCEL, obtendo-se as expressões 2 a 4.

a) Cimento CP II E 32:

$$f_c = 39,3 - 0,54 \times V, \text{ erro padrão} = 0,411 \text{ MPa} \quad (2)$$

b) Cimento CP III 40 RS:

$$f_c = 38,82 \times (V)^{-0,03}, \text{ erro padrão} = 1,04 \text{ MPa} \quad (3)$$

c) Cimento CP VARI:

$$f_c = 59,14 - 4,88 \times V, \text{ erro padrão} = 0,197 \text{ MPa} \quad (4)$$

sendo

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

V – velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (m/s).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A reciclagem de resíduos deve seguir uma metodologia adequada para que os produtos desenvolvidos apresentem um desempenho compatível com os padrões técnicos e que não ofereçam riscos ambientais.

Após a realização da pesquisa bibliográfica, dos ensaios propostos, análise dos resultados obtidos, e, finalmente, concluída a investigação documental, foi possível responder a pergunta.

O concreto contendo rejeitos de mármore triturado em substituição a areia proveniente dos depósitos aluvionares de rios é tecnicamente viável? A resposta é “sim”.

Recomenda-se a reutilização de rejeito de mármore triturado (RMT), amenizando o acúmulo de montanhas desse entulho. Essa reciclagem não só contribui para a limpeza do planeta, mas também possibilita um melhor aproveitamento desses recursos naturais, além de promover uma nova proposta na produção de concreto de baixo custo e de boa qualidade.

Há de se considerar que este estudo está limitado às características dos materiais, dosagens e técnicas de execução específicas, como por exemplo, o tipo de cimento, bem como a origem, a textura e a rugosidade dos agregados. Sua representatividade deve ser confirmada em novos estudos.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MÁRMORE TRITURADO

O RMT possui forma irregular, angulosa e estrutura cristalina, apresentando-se, nos ensaios de caracterização bons parâmetros, que enquadra nas normas brasileiras vigentes.

Na análise química constatou-se a presença de cálcio, magnésio, óxido de cálcio e óxido de magnésio, sendo possível classificá-lo como calcário magnesiano.

Constata-se na composição mineralógica do RMT a ausência de minerais que podem causar a reação álcali-agregado tais como: opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, silicatos existentes nos feldspatos, folhelos argilosos, brucita e calcário dolomítico.

O resultado do ensaio de abrasão “Los Angeles” resultou em um alto índice de desgaste superficial, limitando o seu emprego, ou seja, não é indicado para concretos solicitados a desgaste superficial.

E ainda, em face de variedade de intervalos granulométricos disponíveis do RMT, o rejeito beneficiado pode substituir com vantagens o agregado miúdo natural, apresentando aumento na resistência mecânica e decréscimo na absorção de água.

6.2 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As misturas de concreto com adição do rejeito de mármore triturado, apresentaram um incremento médio de 6% na trabalhabilidade, sem desagregação ou exsudação excessiva do mesmo. Tal comportamento deve-se, principalmente, à baixa porosidade e à baixa absorção de água dos grãos do RMT. Em virtude disso, o agregado não absorve parte da água de amassamento e, conseqüentemente, a consistência tende a ser mais fluida, e a retração tende a se estabilizar mais rapidamente.

O emprego do agregado miúdo artificial resultante da trituração de rocha gnaisse – AMA, promoveu uma diminuição da trabalhabilidade da mistura. Este fato é comprovado através da dificuldade de homogeneização da mistura, devido ao efeito das suas pequenas partículas, visto que este agregado tem maior teor de material pulverulento do que os demais.

Para a exsudação, constata-se uma redução nos concretos com AMA devido à presença dos grãos finos, já que estes atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água.

6.3 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

Com relação às propriedades do concreto endurecido pode-se concluir:

6.3.1 Propriedades mecânicas

6.3.1.1 Densidade de massa no estado endurecido

No estado endurecido, todas as misturas de concreto apresentaram uma boa uniformidade de massa de seus corpos-de-prova, sendo uma forte característica de uniformidade das misturas. Os concretos também apresentaram, numa análise visual das superfícies internas das amostras, boa distribuição dos agregados, tanto gráudo como miúdo e uma redução de vazios provocados pela presença de bolhas de ar incorporado.

As misturas produzidas com AMA apresentaram maior densidade de massa em relação ao concreto de referência (100% de AMN) utilizando-se o mesmo proporcionamento de materiais. Estes resultados demonstram que, além dos grãos de AMA possuir maior massa específica do que a areia natural, possivelmente, o aumento dos teores de finos, aumenta o grau de empacotamento do conjunto agregado e aglomerante. Isto também explica a maior densidade nas misturas de 100% de RMT com granulometria ótima.

6.3.1.2 Resistência à compressão axial

Os traços contendo agregados miúdos triturados atingiram maiores resistências, destacando-se as misturas confeccionadas com o RMT, sendo que as misturas de 100% de RMT na granulometria **ótima** apresentaram melhor desempenho em relação às demais, para todos os cimentos, devido ao fato de possuírem maior densidade de massa no estado endurecido e, conseqüentemente, menor teor de ar aprisionado. Além disso, o RMT apresenta baixa porosidade (baixa absorção de água), o que comprovadamente afeta a resistência à compressão do concreto.

Analisando-se isoladamente a influência do teor de adição do RMT na resistência à compressão axial, verifica-se que à medida que se aumenta o teor de adição, ela terá um incremento de até 12,8%.

Cabe mencionar, também, que em virtude do RMT, para melhorar a trabalhabilidade do concreto, é possível reduzir o fator água/cimento resultando num aumento da resistência na ordem de 22,07% quando comparado ao concreto com 100% de RMT e fator água/cimento igual a 0,50 e de 32,48% quando comparado às misturas com AMN (concreto de referência); para o RMT na granulometria ótima, o acréscimo é de 36,14%.

6.3.1.3 Resistência à tração por compressão diametral

Constatou-se que os traços contendo agregados miúdos triturados, com mesmo fator água/cimento, atingiram maiores resistências, destacando-se os produzidos com RMT, sendo que para a granulometria ótima atinge valores de até 17,82% em relação ao concreto de referência. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), os agregados de textura rugosa ou triturado, como o RMT apresentam maior resistência que um concreto correspondente contendo agregado liso, principalmente à tração.

A causa para a obtenção desses resultados é devido a menor angulosidade do agregado miúdo natural, o que possibilita uma mobilidade relativa, afetando a micro-fissuração na interface entre a pasta hidratada e o agregado durante o ensaio. A mobilidade maior para os AMN se deve ao fato de serem mais arredondados, além de possuírem textura superficial mais lisa que os triturados.

Analisando-se isoladamente a influência do teor de adição do RMT na resistência à tração por compressão diametral verifica-se que à medida que aumenta o teor de adição, haverá um incremento, visto que o RMT aumenta a trabalhabilidade do concreto, logo reduz o fator água/cimento.

A relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral variou entre 11% e 14%.

Não se observa aumento de resistência significativo nas misturas com RMT na variação das idades de 90 para 120 dias, constatando-se a não existência de

atividade pozolânica, já que o RMT apresenta uma estrutura bastante cristalina, não ocasionando reação química.

6.3.1.4 Resistência à tração na flexão

Analisando os resultados, é possível observar que diante de todos os concretos produzidos, obtêm-se melhores resultados à tração na flexão nos concretos com agregado miúdo triturado, sendo que se destacam os concretos contendo RMT, especialmente para a granulometria ótima.

Considerando o teor de adição do RMT, as misturas apresentaram um aumento na resistência de 7,46% para teores de adição de 0% e 100% e aumento de 8,12% nas misturas com RMT na granulometria ótima quando comparado com o concreto de referência.

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento nas misturas com 100% de RMT mostrou-se satisfatória, apresentando numa análise visual algumas partículas rompidas, e um número maior, arrancadas de seus alojamentos na pasta.

As resistências aos esforços de tração na flexão nos concretos com adição de RMT se elevaram, porém em proporção inferior ao ganho promovido na resistência à compressão.

6.3.1.5 Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

Analisando os resultados observa-se que os concretos com RMT apresentam maior módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson que os concretos com AMN. Já os concretos confeccionados com AMA não apresentaram aumentos significativos em relação ao concreto de referência (com AMN).

Os AMN apresentam partículas com formas visualmente mais arredondadas e também com textura mais lisa que os RMT. Isso tende a proporcionar maior formação de microfissuras entre agregado e pasta do que os RMT durante o ensaio, reduzindo os valores do módulo de elasticidade.

Com relação ao AMA, não ocorreu como no concreto com RMT, em virtude dos agregados miúdos artificiais produzirem maior volume de pasta devido a maior presença de material pulverulento que o RMT, o que favorece a porosidade da zona

de transição, com maior índice de vazios, favorecendo a ocorrência de microfissuras na interface pasta-agregado, reduzindo o módulo de elasticidade.

6.3.1.6 Retração hidráulica

A mistura com rejeito de mármore na mesma granulometria do agregado miúdo natural apresentou valores maiores nas primeiras idades e após os 40 dias a retração se tornou menor e praticamente estabilizada, devido ao RMT apresentar maior teor de material pulverulento que o AMN, o que conduz a um aumento da retração hidráulica nas primeiras idades, e ainda, que o RMT apresenta baixa absorção de água; portanto, agregado não absorve parte da água de amassamento e uma quantidade maior fica livre na mistura (água evaporável), aumentando assim a retração por secagem nas primeiras idades.

6.3.1.7 Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas

Observa-se que os concretos que apresentaram as maiores resistências, os maiores módulos de elasticidade e menores absorções também apresentaram maiores velocidades de propagação de ondas, pois estes concretos foram confeccionados com RMT que é o agregado com maior densidade e, de acordo com NEVILLE (1997), EVANGELISTA (2002) e MEHTA & MONTEIRO (2005) quanto maior a massa específica do agregado, mais denso é o concreto e, portanto, maior a velocidade de propagação de ondas. Este fato se manteve para os três tipos de cimento.

Os concretos com RMT apresentaram maior velocidade de propagação de ondas que os concretos com AMN, sendo que se destaca o concreto confeccionado com RMT na granulometria **ótima**, que apresenta uma distribuição granulométrica adequada, segundo os requisitos da normalização brasileira, resultando num aumento na densidade do conjunto agregado/aglomerante. Há de se considerar que a densidade está relacionada com a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos grãos do agregado, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores e, assim sucessivamente. Tal fato fica evidenciado, também, devido à baixa porosidade do agregado oriundo do mármore (vide item 4.2.2.3.2).

Os concretos confeccionados com AMA não apresentaram aumentos em relação ao concreto de referência (com AMN). Uma das causas é que o AMA apresenta grande quantidade de material pulverulento, isto resulta numa maior superfície específica e no aumento do teor de água. Como neste estudo optou-se por manter o fator água/cimento constante a fim de avaliar o comportamento do agregado na mistura, o AMA produziu um concreto menos trabalhável e mais poroso, diminuindo a velocidade. Além disso, os AMA propiciam maior volume de pasta devido a maior presença de finos, quando comparado ao RMT e ao AMN, favorecendo a porosidade da zona de transição, aumentando a ocorrência de microfissuras na interface pasta-agregado e reduzindo tanto o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, quanto à velocidade de propagação de ondas.

Não se observa grande diferença entre os valores de velocidade de propagação para os diferentes tipos de cimento. De um modo geral o CPIII 40 RS velocidades um pouco maiores em relação ao CP II E 32 (cerca de 1,4 %) e ao CP V ARI (em torno de 0,5%).

6.3.2 Parâmetros de durabilidade

6.3.2.1 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Constata-se que os dados obtidos, tanto no ensaio de absorção por imersão quanto no de índice de vazios, apresentam uma tendência de decréscimo da massa de água absorvida, como consequência uma redução da absorção por imersão e do índice de vazios com o aumento da quantidade de adição do RMT em substituição ao agregado miúdo natural; Reduzindo-se a absorção em 15,74% e o índice de vazios em 9,37% com a substituição total do agregado miúdo natural.

Todavia ocorreu o oposto nos concretos com adição de AMA que apresentou aumento de até 24,80% na absorção e de até 8,28% no índice de vazios em relação ao concreto de referência.

6.3.2.2 Absorção de água por sucção capilar

Com relação ao teor de adição de RMT, relacionando-se os valores obtidos, há uma redução significativa da absorção, na ordem de 61,84% nos concretos com CP II – E – 32, 55% com CPIII – 40 – RS e 55,55% com CPV – ARI, oriundo

provavelmente, do preenchimento e da distribuição dos vazios no concreto com a adição de RMT. Porém, o emprego do AMA ocasionou um incremento bem maior de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais e favorecendo a absorção por sucção capilar.

Constata-se que as misturas com cimento CIII – 40 – RS apresentaram taxa de absorção capilar aproximadamente 24,9% superior aos demais devido a um maior volume total de poros apresentados nestes concretos.

Muito ainda precisa ser feito com relação às pesquisas experimentais, para que sejam exploradas todas as possibilidades de utilização desta nova alternativa para agregados e os resíduos sejam totalmente aproveitados, atingindo uma fatia do mercado compatível com suas potencialidades.

6.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na tentativa da viabilização técnica do uso do rejeito de mármore triturado como substituição do agregado miúdo natural em concretos, poder-se-á realizar novas pesquisas, levando em consideração os seguintes aspectos:

- influência da substituição de RMT na penetração de cloretos e outros parâmetros de durabilidade;
- influência da substituição de RMT na distribuição dos poros na pasta;
- determinação do custo/benefício para utilização do RMT em concretos;
- avaliar a resistência do concreto com RMT ao ataque químico de produtos;
- verificar a abrasão e desgaste de concretos utilizando RMT;
- efetuar o estudo da substituição de RMT empregando-se outros tipos de concretos como os auto-adensáveis e pesados;
- efetuar o estudo da substituição de RMT em argamassas;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. L. M.; CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S. Aproveitamento da areia finos de pedreiras brasileiras para uso em Construção Civil. In: IBERMAC Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre "Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción, 2001, Madri, Espanha.

ALMEIDA, S. L. M.; PONTES, I. F. Aproveitamento de rejeitos de pedreiras e finos de serrarias de rochas ornamentais brasileiras. In: I Seminário Brasileiro de Rochas Ornamentais, 2001, Salvador, P. 89-94.

ALVES, J. D. *Manual de tecnologia do concreto*. 3. ed. Goiânia: Editora da UFG, 1993.

ALVES, J. D. *Materiais de construção*. 6. ed. Goiânia: Editora da UFG, 1987.

AMERICAN GLOBAL GRANITES. *Rochas de Qualidade*. N. 180 – Ano XXXVIII, p.29, janeiro/fevereiro 2005.

ANDRADE, W. P. et al – EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO *Concretos massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo*. Ed. PINI, São Paulo, 1997.

ANDRADE, F. R.; MOURA, W. A. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na Construção civil. 2002 Disponível em: http://www.univap.br/inic2002/inic_resumo_3.htm Acesso em: 27.05.2007.

ANDRIOLO, F. R. Documentação sobre o panorama brasileiro – Relatório final. In: *Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, Gôiania*, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. *NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial*, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5735 – Cimento Portland de alto-forno*, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*, Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. *NBR 6118* – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 7211* – Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 7218* – Teor de argila em torrões e materiais friáveis, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 7219* – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 7222* – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NBR 7389* – Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto, Rio de Janeiro, 1992.

_____. *NBR 8522* – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 8802* – Concreto – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica, Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NBR 9776* – Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 9778* – Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 9779* – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NBR 9935* – Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 10004* – Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

_____. *NBR 10006* – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

_____. *NBR 11578* – Cimento Portland composto, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 12142* – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 13280* – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NBR NM 30* – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água, Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 49 – Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas*, Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente*, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*, Rio de Janeiro, 2002.

_____. *NBR NM 58 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica*, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR NM 66 – Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais*, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*, Rio de Janeiro, 1998.

_____. *NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica*, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NM 30 – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*, Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NM 31 – Agregados – Determinação do teor de partículas leves*, Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NM 44 – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis*, Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NM 51 – Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”*, Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*, Rio de Janeiro, 2002.

_____. *NM 66 – Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais*, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NM 102 – Concreto – Determinação da exsudação*, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NM 131 – Agregados – Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto*, Rio de Janeiro, 1997.

BARROTE, L. G. Utilização de rejeitos (cacos) de mármore em massas cerâmicas – Parte-1. In: *44º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. São Paulo, 31/maio-04/junho, 2000, p.19901-19914.

BIGNO, I. C. *Aproveitamento do resíduo de corte de rochas ornamentais como fíler mineral em compósitos de matriz polimérica e cimentícia*. 2002. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Fluminense, Niterói. 2002

BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. *ACI Materials Journal*, Jan.-Feb., p. 41-48, 2000.

BUEST NETO, G. T. *Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland*. 2006. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006

CABRERA, O.; BONAVENTTI, V.; DONZA, H. IRASSAR, E. F. Hormigones de alta resistência com cimentos de filler calcareo. In: *1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón*. Buenos Aires - Argentina, jun/1998, p. 195-204.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo-cimento. In: *VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Qualidade no Processo Construtivo*. Florianópolis, 27-30 abril, 1998.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas. In: *I Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*. Canela, 18-21 junho, 1997.

CETEMAG – Centro tecnológico do mármore e granito. Disponível em: <http://www.cetemag.org.br> Acesso em : 01.03.2007.

CHIODI FILHO, C. A expressão brasileira no setor de rochas ornamentais. *Pedras do Brasil –Revista da Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais do Brasil*. N. 18 – Ano II, p.38-39, Setembro de 2003.

CONCATAN – Empresa especializada em mármore. O que é o mármore? Disponível em: <http://www.concatan.hpg.ig.com.br/marmores.htm> Acesso em : 01.03.2007.

COURA, C.V.G. *Estudo da influência da dimensão do agregado e do corpo-de-prova na resistência à compressão axial do concreto*. 2006. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006

COUTINHO, A. S. *Fabrico e propriedades do betão*. Vol.1 LNEC. 1973.

DÍAZ, V. O. *Método de dosagem de concreto de elevado desempenho*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1997

GOBBO, L. A.; MELLO, I. S. C.; QUEIRÓZ, F. C.; FRASCÁ, M. H. B. O. Aproveitamento de resíduos industriais. A cadeia produtiva de rochas ornamentais e para revestimento no Estado de São Paulo: diretrizes e ações para inovação e competitividade. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004, p.129-152.

GONÇALVES, J. P. *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. 2000. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000

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

HEIDER, M., MATTA, P. M., ROBERTO, F. A. C. Rochas ornamentais. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2007/rochas_SM2007.doc Acesso em : 27.02.2008.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. Ed. PINI, São Paulo, 1993.

HERRMANN, H. *Política de aproveitamento de areia no estado de São Paulo: dos conflitos existentes às compatibilizações possíveis*. Rio de Janeiro. CETEM/CNPQ, 186p. 2002

HEWLETT, P. *Lea's chemistry of cements and concrete*. Ed. Arnold, London, 1998

HOBBS, D. W. Influence of pulverized-fuel ash and granulated blastfurnace slag upon expansion caused by the alkali-silica reaction. *Magazine of Concrete Research*. N. 119, V. 34, p.488-494, Junho de 1982.

HOBBS, D. W. *Alkali-silica reaction in concrete*. 1. ed. London: Ed. Thomas Telford Ltd, 1988.

ILLSTON, J. M.; SPON, F. N. *Construction materials – their nature and behaviour*. London, 1994

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. Os minerais e suas aplicações. Disponível em: http://www.igc.usp.br/geologia/o_uso_dos_minerais.php Acesso em: 04.10.2007.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. São Paulo: EPUSP, 2000. 113p (Tese de Livre Docência).

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/cetesb> Acesso em : 17.11.2006.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. *Coletânea HABITARE: Utilização de resíduos na construção habitacional*. Porto Alegre: Ed. Rocha e John, 2003, Vol. 4, Cap. 2, p.8-71.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/> Acesso em : 17.11.2006.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/> Acesso em: 17.11.2006.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: *I Simpósio Nacional de Agregados*. São Paulo, junho, 1986, p.127-138.

KILBERT, C. Establishing principles and a model for sustainable construction. *In: CIB TG 16 Sustainable Construction. Proceedings...* Tampa, Flórida, November 6-9, 1995, p.3-12.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Durabilidade de concretos produzidos com resíduos minerais de Construção Civil. *In: III Seminário "Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Práticas Recomendadas"*. São Paulo, 06/junho, 2000, p.3-14.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. *Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção*. São Paulo: EPUSP, 2002. 12p (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP).

LISBÔA, E. M. *Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas*. 2004. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2004

LISBÔA, E. M.; GOMES, P. C. C.; LIMA, F. B.; BARBOZA, A. S. R.; LAMEIRAS, R. M. Obtenção de pastas e argamassas altamente fluídas com resíduo da serragem dos blocos de granito para utilização em concretos auto-adensável. *In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. São Paulo, 18-21/junho, 2004.

MAMORARIA PEDRA BRANCA. Mármore. Disponível em: <http://www.marmorariapedrabranca.com.br/pedrabranca/index.php?pagina=5> Acesso em : 04.10.2007.

MÁRMORES IMPORTADOS. *Rochas de Qualidade*. N. 189 – Ano XXXIX, p.57, julho agosto 2006.

McGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. *Journal of the American Ceramic Society*. V. 44, p. 513-522, 1996.

MELLO, I. S. C. Indicadores do Mercado Nacional e Internacional de Rochas Ornamentais e para Revestimento. A cadeia produtiva de rochas ornamentais e para revestimento no Estado de São Paulo: diretrizes e ações para inovação e competitividade. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004,p.1-26.

MELLO, I. S. C. Rochas ornamentais no Amapá: indicadores de ações estratégicas de governo voltadas à implantação de atividades minero-industriais. *Rochas de Qualidade*. N. 164 – Ano XXXV, p.122-130, maio/junho 2002.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas. *Cerâmica*. N. 48, p.92-101, 2002.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. Third edition. United States of America, 2005.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. N. 49, p.262-267, 2003.

MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do noroeste fluminense em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. N. 51, p.180-186, 2005.

MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; MOTHÉ, C. G. Reciclagem dos resíduos sólidos de rochas ornamentais. *Anuário do Instituto de Geociências, Instituto de Geociências - UFRJ*, 2005, 28-2, p.139-151.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J.P. Utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (mármore e granitos) na Construção Civil. *In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. Foz do Iguaçu, 7-10 maio, 2002, p.1653-1659.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso, *Sitientibus*, jan/jun 2002, n. 26, p.49-61.

MUNDIAL GRANITOS E MÁRMORES IMPORTADOS. O que é mármore e o que é granito. Disponível em: <http://www.mundialgranitos.com.br/> Acesso em: 04.10.2007.

NEVES, G. A. Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matéria-prima cerâmica. 2002. 121f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2002

NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; SILVA, M. C. Potencial de utilização de resíduo da serragem de granito na fabricação de revestimentos cerâmicos – Parte-1. *In: 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. São Paulo, 31/maio-04/junho, 2000, p.19901-19914.

NEVES, G. A.; PATRÍCIO, S. M. R.; FERREIRA, H. C.; SILVA, M. C. Utilização de resíduos da serragem de granitos para confecção de tijolos cerâmicos. *In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. São Paulo, 02-05/junho, 1999, p.00601-00612.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. (Tradução: Salvador Giammusso). 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NUNES, R. L. S.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. C. Placas cerâmicas obtidas pelo processo de laminação utilizando resíduo de granito. *In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Proceedings...* João Pessoa, 15-18/junho, 2003, p.14-23.

NUNES, R. L. S.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de rejeitos de mármore e granitos utilizados em substituição a matérias primas

convencionais para produção de revestimentos cerâmicos. *In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Proceedings...* João Pessoa, 15-18/junho, 2003, p.25-33.

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, V. S.; JUNIOR, F. O. Q.; FARIAS, C. A. S.; MELO, A. B.; CARVALHO, B. Q.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Avaliação da durabilidade de compósitos de concreto de cimento Portland produzidos com resíduos da construção civil. *In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Proceedings...* João Pessoa, 15-18/junho, 2003, p.170-182.

PAULON, V. A.; ARMELIN, J. L. Diagnóstico e recuperação de barragem apresentando reação álcali-agregado. *In: Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, Gôiania*, 1997.

PEDRAS NOVO MUNDO. Manual de orientação ao consumidor - Rochas. Disponível em: <http://www.pedrasnovomundo.com.br/atendimento.asp> Acesso em : 01.03.2007.

PEDRAS NOVO MUNDO. Mármore e granitos. Disponível em: http://www.pedrasnovomundo.com.br/atendimento_01.asp Acesso em : 01.03.2007.

PENHA, C. O.; MAMERI, E. A.; MACHADO, M. A. A lama abrasiva e seu controle. 1996. 86f. Monografia (Especialização em Rochas Ornamentais) – Universidade Federal do Espírito Santo e Centro Tecnológico do Mármore e Granito, Cachoeiro de Itapemirim. 1996

PENTTALA, V. Concrete and sustainable development. *ACI Materials Journal*, Sep.-Oct., p. 409-416, 1997.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento Portland*. 10. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1983.

PILEGGI, R. G. *Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários*. 2001. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2001.

PINHEIRO, W. M. G. *Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto*. 2003. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003

PINTO, T. P. Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP 1. ed. São Paulo: SINDUSCON-SP, 2005, Introdução, p. 6-8.

PONTES, I. F.; STELLIN JÚNIOR, A. Aproveitamento de resíduos de serrarias na indústria de construção civil. *In: VII Jornadas Argentinas de Ingenieria de Minas*, 15-17 Novembro, 2005, Buenos Aires, Argentina, p. 413.

PONTES, I. F.; STELLIN JÚNIOR, A. Utilização de finos de serrarias do Espírito Santo nas indústrias de Construção Civil. *In: IBERMAC Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre "Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción*, 2001, Madri, Espanha.

PONTES, I. F.; VIDAL, F. W. H. Valorização de resíduos de serrarias de mármore e granito e sua aplicação na construção civil. In: V Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 13-15 Novembro, 2005, Recife, p. 117.

POOLE, A. B.; SIMS, I. *Concrete petrography – A handbook of investigative techniques*. Ed. Arnold. London, 1998.

RIBEIRO, J. L. D. Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos. Notas se aula. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS. Jan/1995.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. Introdução. *Coletânea HABITARE: Utilização de resíduos na construção habitacional*. Porto Alegre: Ed. Rocha e John, 2003, Vol. 4, Cap. 1, p.4-7.

ROCHAS DE QUALIDADE. Ardósias, basaltos, granitos, mármore, quartizitos, serpentinitos, travertinos e pedras ornamentais, 2002, Mai/Jun, Edição 164, p.130.

ROCHAS DE QUALIDADE. Ardósias, basaltos, granitos, mármore, quartizitos, serpentinitos, travertinos e pedras ornamentais, 2005, Jan/Fev, Edição 180, p.29.

ROCHAS DE QUALIDADE. Ardósias, basaltos, granitos, mármore, quartizitos, serpentinitos, travertinos e pedras ornamentais, 2006, Jul/Ago, Edição 189, p.57.

ROCHA, J. C.; CHERIAK, M. Aproveitamento de resíduos na construção. *Coletânea HABITARE: Utilização de resíduos na construção habitacional*. Porto Alegre: Ed. Rocha e John, 2003, Vol. 4, Cap. 3, p.72-93.

SCHENINI, P. C.; BAGNATI, A. M. Z.; CARDOSO, A. C. F. Gestão de resíduos da construção civil. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Outubro, 2004, Florianópolis, p.1-13.

SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T.; COELHO, E. Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília: DNPM/CPRM, 1991. 450p.

SILVA, P. F. *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana*. Ed. PINI, São Paulo, 1995

SILVA, N. G. *Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária*. 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006

SILVA, N. G.; BUEST, G. T.; CAMPITELI, V. C. A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. In: *Seminário: O Uso da Fração Fina da Britage II*. São Paulo, 2005, p. 1-12.

SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J. K. G.; SOUZA NETO, P. N. Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente. 2006 Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/> Acesso em : 01.11.2006.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. Ed. PINI, São Paulo, 1998.

SOUZA COUTINHO, J. *Agregados para argamassas e betons*. Ed. LNEC, Lisboa, 1999

SPÍNOLA, V. Rochas Ornamentais em Arranjo Produtivo. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (Série estudos e pesquisas), Salvador, 2003.

SPÍNOLA, V. GUERREIRO, L. F., BAZAN, R. A Indústria de Rochas Ornamentais. Desenharia – Agência de Fomento do Estado da Bahia, Estudo de Mercado 02/04, Salvador, set. 2004.

VALDUGA, L. *Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo*. 2002. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Campinas, Campinas. 2002

VARGAS, T.; MOTOKI, A.; NEVES, J. L. P. Rochas ornamentais do Brasil, seu modo de ocorrência geológica, variedade tipológica, exploração comercial e utilidades como materiais nobres de construção. *Revista de Geociências*, Instituto de Geociências - UFF, 2001, 2-2, p.119-132.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N.; PEITER, C. C.; DUAİLÍBI, J. Efeito da adição de resíduo do corte de granito de Santo Antônio de Pádua-RJ em massa cerâmica vermelha. *In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. Proceedings... João Pessoa, 15-18/junho, 2003, p.1109-1123.

ONU Agenda 21. 1992. Disponível na THE FLETCHER SCHOOL Library Resources – Multilateral Projects. Disponível em: <http://www.tufts.edu/fletcher/multi/chrono.html> Acesso em : 11.10.2007.

VILALASCHI, A. F.; SABADINI, M. S. Arranjos produtivos de rochas ornamentais (mármore e granitos) no estado do Espírito Santo. 2000 Disponível em: http://www.finep.gov.br/estudos/arquivos/arranjos/arranjos15_ee_marmore_es.pdf Acesso em : 01.03.2007.

XAVIER, G. C.; SABOYA JÚNIOR, F.; ALEXANDRE, J. Otimização por planejamento fatorial 3^2 dos ensaios físico-mecânicos das misturas de resíduo de granito na massa cerâmica vermelha moldados por prensagem. *In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. Proceedings... João Pessoa, 15-18/junho, 2003, p.180-187.

YAMAMOTO, J. T. Environmental impact reduction on the production of blended Portland cement in Brazil., *Environmental Geosciences*, 1997, v. 4, n. 4, p.192-206.

ANEXO A - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CIMENTO CP II E 32

Cimento CP II E 32 – Concreto de referência (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial (MPa)	3	15,73	15,71	15,71	16,48	15,82	15,98	15,90	2,40
	7	22,92	22,66	20,37	20,62	21,50	21,78	21,64	6,16
	28	26,99	23,68	26,74	25,92	24,93	26,73	25,83	5,83
	90	29,28	31,57	28,77	29,03	30,02	29,32	29,66	4,34
	120	29,28	30,30	30,56	29,53	28,90	30,94	29,92	2,04
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3	1,99	1,96	1,78	1,88	1,88	1,92	1,90	4,94
	7	2,87	2,74	2,80	2,61	2,82	2,70	2,76	4,00
	28	3,88	3,38	3,50	3,47	3,65	3,47	3,56	6,21
	90	3,88	4,14	3,88	3,76	3,94	3,88	3,91	4,09
	120	3,96	3,82	3,95	3,95	3,86	3,98	3,92	1,70
Resistência à tração na flexão (MPa)	28	4,56	4,48	4,52	4,72	-	-	4,55	1,54
Módulo de deformação (GPa)	28	27,98	28,14	27,54	-	-	-	27,89	1,11
Coeficiente de Poisson (GPa)	28	0,31	0,27	0,25	-	-	-	0,28	11,04
Absorção de água por imersão (%)	28	6,74	5,67	6,78	5,92	-	-	6,25	8,66
Absorção de água por sucção capilar (%)	28	1,22	1,20	1,30	1,24	-	-	1,23	2,93

Cimento CP II E 32 – Concreto com 20% de RMT (S = 85 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial (MPa)	3	15,79	17,06	14,26	15,70	16,32	15,08	15,70	7,29
	7	19,35	21,14	20,37	22,15	21,40	21,10	20,75	5,71
	28	25,21	28,01	26,74	26,53	27,33	25,91	26,62	4,31
	90	30,30	30,56	28,77	30,56	29,48	30,62	30,05	2,86
	120	30,81	30,05	30,30	30,81	31,23	29,75	30,49	1,25
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3	1,85	2,04	1,98	2,04	1,89	2,19	2,04	4,53
	7	2,93	2,87	2,55	2,78	2,64	2,92	2,78	5,99
	28	3,46	3,50	3,93	3,42	3,68	3,46	3,57	6,63
	90	3,69	3,82	4,07	4,07	3,94	3,88	3,91	4,84
	120	3,95	3,88	3,82	4,07	4,02	3,48	3,93	2,73
Resistência à tração na flexão (MPa)	28	4,73	4,35	4,70	5,02	-	-	4,65	5,70
Módulo de deformação (GPa)	28	28,42	29,44	28,92	-	-	-	28,93	1,76
Coeficiente de Poisson (GPa)	28	0,28	0,29	0,28	-	-	-	0,28	2,04
Absorção de água por imersão (%)	28	6,32	6,02	5,97	5,53	-	-	6,03	4,73
Absorção de água por sucção capilar (%)	28	1,27	1,17	1,20	1,03	-	-	1,15	3,24

Cimento CP II E 32 – Concreto com 40% de RMT (S = 90 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coefficiente de variação
Resistência à compressão axial (MPa)	3	16,67	15,95	15,67	16,09	16,42	15,76	16,09	2,62
	7	21,94	22,41	22,19	22,51	21,94	22,58	22,26	1,14
	28	26,99	27,50	26,99	27,26	27,13	27,23	27,18	0,90
	90	32,09	31,07	30,81	31,83	30,97	31,93	31,45	1,93
	120	32,09	32,59	32,34	32,34	31,89	32,79	32,34	0,63
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3	2,12	1,98	2,07	2,07	1,94	2,18	2,06	2,82
	7	2,80	2,93	2,98	2,98	2,85	2,95	2,90	2,68
	28	3,57	3,63	3,57	3,57	3,65	3,55	3,60	0,83
	90	4,07	3,88	4,07	4,07	3,97	4,05	4,01	2,24
	120	4,01	4,08	4,01	4,01	3,98	4,12	4,05	1,00
Resistência à tração na flexão (MPa)	28	4,65	4,71	4,57	4,72	-	-	4,68	0,65
Módulo de deformação (GPa)	28	29,44	30,21	29,92	-	-	-	29,86	1,30
Coefficiente de Poisson (GPa)	28	0,31	0,28	0,31	-	-	-	0,30	5,77
Absorção de água por imersão (%)	28	5,62	5,68	5,65	5,65	-	-	5,65	0,53
Absorção de água por sucção capilar (%)	28	0,95	0,97	1,02	0,90	-	-	0,96	6,83

Cimento CP II E 32 – Concreto com 60% de RMT (S = 105 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coefficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	17,35	16,88	17,33	17,19	16,97	17,39	17,18	1,26
	7	22,15	23,17	22,39	22,24	23,05	21,91	22,48	2,07
	28	29,28	29,28	29,17	29,98	29,06	29,30	29,18	1,26
	90	31,58	31,83	31,83	31,32	30,97	32,31	31,64	0,77
	120	31,57	32,34	32,59	32,84	31,88	32,80	32,34	1,70
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,29	2,1	2,2	2,21	2,54	1,86	2,2	3,54
	7	2,87	3,07	2,97	2,93	3,03	2,89	2,96	2,84
	28	3,94	3,86	3,79	3,82	3,69	4,01	3,85	1,69
	90	4,01	4,1	4,07	4,01	4,2	3,88	4,04	1,11
	120	4,08	4,14	4,08	4,01	4,21	3,95	4,08	1,30
Resistência à tração na flexão	28	4,72	4,67	4,66	4,72	-	-	4,69	0,54
Módulo de deformação	28	35,73	34,22	36,12	-	-	-	35,36	2,84
Coefficiente de Poisson	28	0,33	0,31	0,36	-	-	-	0,33	7,55
Absorção de água por imersão	28	5,64	5,34	5,44	5,54	-	-	5,49	2,73
Absorção de água por sucção capilar	28	0,89	0,95	0,93	0,92	-	-	0,92	3,31

Cimento CP II E 32 – Concreto com 100% de RMT (S = 140 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	17,57	16,78	17,57	17,41	16,64	18,02	17,33	2,17
	7	23,17	23,94	22,66	23,26	22,33	24,19	23,26	2,26
	28	29,54	29,52	29,64	29,39	28,34	30,70	29,52	0,35
	90	33,36	33,62	33,1	32,59	31,84	34,50	33,17	1,33
	120	33,1	33,1	33,62	33,87	32,08	34,76	33,42	1,16
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,16	2,29	2,23	2,25	2,14	2,32	2,23	2,44
	7	3,27	3,23	3,18	3,36	3,12	3,39	3,26	2,34
	28	4,14	4,09	3,98	3,87	3,86	4,18	4,02	2,99
	90	4,1	4,01	4,14	4,01	3,90	4,22	4,06	1,61
	120	4,08	4,14	4,14	4,08	3,94	4,27	4,11	0,84
Resistência à tração na flexão	28	4,87	4,44	5,10	5,42	-	-	4,86	8,45
Módulo de deformação	28	47,98	47,32	48,13	-	-	-	47,81	0,90
Coeficiente de Poisson	28	0,40	0,47	0,43	-	-	-	0,43	8,10
Absorção de água por imersão	28	5,52	5,37	5,15	5,45	-	-	5,40	2,08
Absorção de água por sucção capilar	28	0,81	0,86	0,80	0,90	-	-	0,84	3,15

Cimento CP II E 32 – Concreto com 100% de RMT (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	18,08	18,83	21,14	19,02	18,50	20,04	19,27	6,81
	7	24,15	24,94	24,92	24,17	23,57	25,53	24,55	1,81
	28	34,63	34,38	33,61	33,87	32,76	35,48	34,12	1,36
	90	36,16	35,63	35,65	36,16	34,46	37,34	35,9	0,84
	120	36,41	36,16	35,9	36,16	34,71	37,60	36,16	0,58
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,42	2,17	2,55	2,28	2,27	2,45	2,36	7,02
	7	3,48	3,27	3,45	3,44	3,27	3,54	3,41	2,78
	28	4,33	4,01	4,14	4,08	3,96	4,29	4,13	3,31
	90	4,14	4,07	4,2	4,2	3,98	4,31	4,15	1,49
	120	4,2	4,2	4,33	4,27	4,08	4,42	4,25	1,48
Resistência à tração na flexão	28	4,87	4,95	4,80	5,00	-	-	4,91	0,82
Módulo de deformação	28	48,11	47,95	48,53	-	-	-	48,20	0,62
Coeficiente de Poisson	28	0,43	0,46	0,42	-	-	-	0,44	4,77
Absorção de água por imersão	28	5,30	5,35	5,42	5,44	-	-	5,38	0,67
Absorção de água por sucção capilar	28	0,76	0,78	0,72	0,84	-	-	0,77	1,49

Cimento CP II E 32 – Concreto com 100% de RMT na Granulometria Ótima (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	19,86	20,12	20,12	19,61	19,13	20,73	19,93	1,23
	7	29,03	27,50	27,76	28,26	27,01	29,26	28,14	2,39
	28	35,65	34,38	35,65	35,9	33,97	36,80	35,39	1,94
	90	36,92	37,43	36,41	36,66	35,38	38,33	36,86	1,18
	120	36,41	37,19	36,92	37,19	35,45	38,40	36,93	1,00
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,42	2,93	2,87	2,71	2,62	2,83	2,73	8,35
	7	4,01	4,14	3,88	3,96	3,84	4,16	4,00	2,73
	28	4,14	4,20	4,20	4,20	4,01	4,34	4,18	0,72
	90	4,20	4,14	4,27	4,33	4,07	4,41	4,24	1,95
	120	4,39	4,20	4,33	4,27	4,13	4,47	4,30	1,89
Resistência à tração na flexão	28	4,88	4,93	4,89	4,93	-	-	4,91	0,54
Módulo de deformação	28	48,61	48,68	49,32	-	-	-	48,87	0,80
Coeficiente de Poisson	28	0,48	0,42	0,47	-	-	-	0,46	7,04
Absorção de água por imersão	28	5,36	5,39	5,31	5,39	-	-	5,37	0,39
Absorção de água por sucção capilar	28	0,77	0,71	0,75	0,83	-	-	0,76	1,51

Cimento CP II E 32 – Concreto com 100% de AMA (S = 50 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	15,79	15,79	13,50	15,13	14,44	15,65	15,05	7,18
	7	22,41	23,17	23,94	23,27	22,27	24,13	23,20	2,70
	28	28,26	27,50	28,52	28,01	26,94	29,19	28,07	1,55
	90	31,02	29,28	29,79	30,57	28,95	31,37	30,16	2,58
	120	32,09	32,59	32,59	32,71	31,20	33,80	32,50	0,84
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,23	2,29	2,17	1,97	2,08	2,25	2,17	6,42
	7	3,44	3,18	3,25	3,57	3,22	3,49	3,36	5,30
	28	4,17	4,07	3,89	4,20	3,91	4,24	4,08	3,43
	90	4,13	4,07	4,22	4,17	3,98	4,32	4,15	1,53
	120	4,14	4,20	4,27	4,27	4,05	4,38	4,22	1,49
Resistência à tração na flexão	28	3,60	3,99	3,51	3,76	-	-	3,73	6,53
Módulo de deformação	28	25,28	27,63	26,49	-	-	-	26,47	4,44
Coeficiente de Poisson	28	0,30	0,29	0,27	-	-	-	0,29	5,33
Absorção de água por imersão	28	8,09	7,16	7,40	7,58	-	-	7,58	6,22
Absorção de água por sucção capilar	28	1,32	1,40	1,38	1,42	-	-	1,37	3,36

Cimento CP II E 32 – Concreto com 100% de AMA (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	13,75	14,26	13,75	13,82	13,34	14,46	13,90	1,77
	7	20,12	18,59	18,59	19,23	18,36	19,89	19,13	3,79
	28	27,25	25,97	26,47	26,52	25,49	27,61	26,55	1,99
	90	29,03	29,79	29,03	29,28	28,10	30,45	29,28	1,22
	120	30,05	30,30	31,07	31,07	29,39	31,84	30,692	1,72
Resistência à tração por compressão diametral	3	1,72	1,85	1,72	1,79	1,70	1,84	1,77	3,54
	7	2,23	2,68	2,54	2,48	2,38	2,57	2,48	7,57
	28	3,06	3,12	2,98	3,03	2,93	3,17	3,05	1,92
	90	3,69	3,25	3,57	3,69	3,40	3,69	3,55	5,85
	120	3,57	3,69	3,57	3,50	3,43	3,72	3,58	2,20
Resistência à tração na flexão	28	3,87	3,78	3,79	3,83	-	-	3,82	1,20
Módulo de deformação	28	28,61	28,68	29,37	-	-	-	28,89	1,45
Coeficiente de Poisson	28	0,31	0,29	0,34	-	-	-	0,31	8,03
Absorção de água por imersão	28	6,53	7,47	6,74	6,82	-	-	6,93	7,03
Absorção de água por sucção capilar	28	1,14	1,22	1,26	1,28	-	-	1,22	5,47

ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CIMENTO CP III 40 RS

Cimento CP III 40 RS – Concreto de referência (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	14,51	15,27	14,76	14,76	14,24	15,42	14,83	2,15
	7	20,37	20,62	20,37	20,12	19,56	21,18	20,37	1,00
	28	25,97	25,72	26,23	26,48	25,06	27,14	26,10	1,26
	90	30,04	30,56	29,79	29,79	28,85	31,25	30,05	1,21
	120	30,30	31,32	29,79	30,04	29,15	31,57	31,36	2,21
Resistência à tração por compressão diametral	3	1,97	1,84	1,78	1,84	1,79	1,93	1,86	4,32
	7	2,80	2,86	2,42	2,39	2,51	2,72	2,62	9,43
	28	3,72	3,5	3,43	3,69	3,45	3,73	3,59	3,96
	90	3,88	4,26	4,07	4,13	3,93	4,25	4,09	3,87
	120	4,13	4,33	3,95	4,07	3,96	4,28	4,12	3,85
Resistência à tração na flexão	28	4,63	4,48	4,63	4,58	-	-	4,58	1,89
Módulo de deformação	28	27,29	26,98	29,67	-	-	-	27,98	5,26
Coeficiente de Poisson	28	0,31	0,26	0,3	-	-	-	0,29	9,12
Absorção de água por imersão	28	5,83	5,98	6,19	6,23	-	-	6,01	3,19
Absorção de água por sucção capilar	28	1,26	1,24	1,21	1,24	-	-	1,24	2,03

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 20% de RMT (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	16,04	15,79	15,53	15,28	15,03	16,29	15,66	2,09
	7	20,37	21,13	21,13	20,12	19,86	21,52	20,69	2,52
	28	26,99	27,50	27,25	27,25	26,16	28,34	27,25	0,76
	90	29,53	30,81	29,79	30,30	28,91	31,31	30,11	1,88
	120	31,57	31,57	31,32	30,56	30,01	32,51	31,26	1,53
Resistência à tração por compressão diametral	3	1,84	1,91	2,16	1,84	1,86	2,02	1,94	7,84
	7	2,51	2,71	2,67	2,74	2,55	2,77	2,66	3,85
	28	3,81	3,88	3,75	3,69	3,63	3,93	3,78	2,15
	90	4,13	4,07	3,95	4,30	3,95	4,27	4,11	3,54
	120	4,46	4,30	4,13	3,88	4,02	4,36	4,19	5,92
Resistência à tração na flexão	28	4,51	4,67	4,66	4,70	-	-	4,62	2,06
Módulo de deformação	28	27,98	29,42	30,96	-	-	-	29,45	5,06
Coeficiente de Poisson	28	0,27	0,29	0,30	-	-	-	0,29	5,33
Absorção de água por imersão	28	5,72	5,92	6,14	5,96	-	-	5,93	3,54
Absorção de água por sucção capilar	28	1,13	1,15	1,22	1,17	-	-	1,17	3,92

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 40% de RMT (S = 85 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	15,53	16,04	16,04	15,79	15,22	16,48	15,85	1,54
	7	21,39	22,15	22,41	21,65	21,02	22,78	21,90	2,12
	28	27,76	28,01	28,27	27,50	26,77	29,01	27,89	1,19
	90	30,04	32,09	32,34	31,06	30,12	32,64	31,38	3,35
	120	32,59	32,72	33,10	32,59	31,44	34,06	32,75	0,74
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,10	1,97	2,04	2,04	1,96	2,12	2,04	2,61
	7	2,67	2,74	2,80	2,77	2,64	2,86	2,75	2,03
	28	3,81	3,75	3,88	3,85	3,67	3,97	3,82	1,47
	90	4,13	4,01	4,33	4,27	4,02	4,36	4,19	3,43
	120	4,36	4,45	3,94	4,07	4,04	4,38	4,21	5,70
Resistência à tração na flexão	28	4,55	4,68	4,79	4,71	-	-	4,66	2,18
Módulo de deformação	28	28,97	30,35	31,03	-	-	-	30,12	3,49
Coeficiente de Poisson	28	0,29	0,31	0,34	-	-	-	0,31	8,03
Absorção de água por imersão	28	5,97	5,71	5,79	5,73	-	-	5,78	1,42
Absorção de água por sucção capilar	28	1,10	1,38	1,11	1,27	-	-	1,26	7,37

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 60% de RMT (S = 105 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	17,31	16,55	17,57	17,06	16,44	17,80	17,12	2,54
	7	21,65	22,41	22,15	22,41	21,27	23,05	22,16	1,62
	28	29,28	29,79	29,53	30,01	28,47	30,85	29,66	1,11
	90	33,61	31,83	32,34	31,07	30,92	33,50	32,21	3,32
	120	32,85	33,10	32,59	33,36	31,66	34,30	32,98	1,00
Resistência à tração por compressão diametral	3	1,85	2,23	2,10	2,16	2,01	2,17	2,09	7,93
	7	2,86	2,61	2,80	2,80	2,66	2,88	2,77	3,93
	28	3,82	4,01	3,88	3,94	3,75	4,07	3,91	2,08
	90	4,36	4,20	4,36	4,01	4,06	4,40	4,23	3,93
	120	4,20	4,13	4,58	4,07	4,08	4,42	4,25	5,41
Resistência à tração na flexão	28	4,67	4,70	4,70	4,69	-	-	4,69	0,37
Módulo de deformação	28	32,74	37,62	38,62	-	-	-	36,19	8,30
Coeficiente de Poisson	28	0,32	0,37	0,35	-	-	-	0,35	7,26
Absorção de água por imersão	28	5,68	5,58	5,60	-	-	-	5,62	0,94
Absorção de água por sucção capilar	28	1,14	0,97	1,03	1,20	-	-	1,18	4,68

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 100% de RMT (S = 135 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coefficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	17,57	17,06	17,32	17,06	16,56	17,94	17,25	1,42
	7	22,66	22,92	23,43	23,17	22,13	23,97	23,05	1,43
	28	30,30	29,28	29,79	30,04	28,66	31,04	29,85	1,46
	90	33,48	33,61	33,86	33,61	32,29	34,99	33,64	0,47
	120	34,12	33,86	34,12	34,38	32,76	35,48	34,12	0,62
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,22	2,04	2,16	2,13	2,05	2,23	2,14	3,51
	7	2,74	2,99	3,11	2,86	2,81	3,05	2,93	5,47
	28	4,20	3,82	4,07	4,14	3,90	4,22	4,06	4,12
	90	4,14	4,07	4,33	4,20	4,02	4,36	4,19	2,64
	120	4,33	4,14	4,14	4,20	4,03	4,37	4,20	2,13
Resistência à tração na flexão	28	4,75	4,81	4,78	4,77	-	-	4,78	0,63
Módulo de deformação	28	42,27	48,94	52,74	-	-	-	48,98	7,63
Coefficiente de Poisson	28	0,42	0,45	0,50	-	-	-	0,46	8,85
Absorção de água por imersão	28	5,47	5,39	5,52	-	-	-	5,46	1,20
Absorção de água por sucção capilar	28	1,18	1,14	0,94	1,20	-	-	1,12	3,77

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 100% de RMT (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coefficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	19,60	18,84	19,35	19,10	18,45	19,99	19,22	1,70
	7	24,19	24,45	24,45	24,70	23,47	25,43	24,45	0,85
	28	34,38	34,63	35,14	34,89	33,34	36,15	34,76	0,84
	90	35,14	35,65	37,05	36,92	34,74	37,66	36,19	2,61
	120	37,18	37,05	35,01	37,18	35,15	38,07	36,61	2,91
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,22	2,29	2,36	2,48	2,24	2,43	2,34	4,74
	7	2,93	3,44	3,50	3,31	3,17	3,43	3,30	7,77
	28	4,13	3,94	4,39	4,27	4,01	4,35	4,18	4,63
	90	4,33	4,46	4,20	4,14	4,11	4,45	4,28	3,33
	120	4,34	4,27	4,01	4,52	4,12	4,46	4,29	4,93
Resistência à tração na flexão	28	4,92	4,77	4,92	4,86	-	-	4,87	1,78
Módulo de deformação	28	47,31	50,63	49,58	-	-	-	49,17	3,45
Coefficiente de Poisson	28	0,49	0,41	0,46	-	-	-	0,45	8,91
Absorção de água por imersão	28	5,35	5,36	5,40	-	-	-	5,37	0,49
Absorção de água por sucção capilar	28	0,92	1,08	0,85	1,23	-	-	1,05	8,24

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 100% de RMT na Granulometria Ótima (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	19,35	20,37	19,61	19,86	19,01	20,59	19,80	2,20
	7	28,01	28,26	28,26	28,26	26,95	29,19	28,01	0,85
	28	35,14	35,40	35,65	35,40	33,98	36,82	35,40	0,59
	90	35,65	36,96	37,43	37,68	35,45	38,41	36,93	2,45
	120	36,79	37,17	35,65	38,45	35,54	38,50	37,02	3,12
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,54	2,04	2,80	2,29	2,32	2,51	2,42	13,51
	7	3,50	3,82	2,99	3,18	3,24	3,50	3,37	10,83
	28	4,27	3,82	4,65	4,47	4,13	4,47	4,30	8,30
	90	4,33	4,17	4,27	4,39	4,25	4,61	4,43	4,43
	120	4,27	4,39	4,33	4,77	4,26	4,62	4,44	5,08
Resistência à tração na flexão	28	4,84	4,93	4,99	4,94	-	-	4,92	1,93
Módulo de deformação	28	47,23	51,43	50,45	-	-	-	49,70	4,42
Coeficiente de Poisson	28	0,43	0,47	0,49	-	-	-	0,46	6,59
Absorção de água por imersão	28	5,52	5,41	5,52	-	-	-	5,55	1,14
Absorção de água por sucção capilar	28	0,93	0,82	0,95	1,13	-	-	1,01	7,81

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 100% de AMA (S = 55 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	15,27	14,77	14,77	15,02	14,36	15,56	14,96	1,60
	7	22,92	22,40	22,66	21,90	21,57	23,37	22,47	1,94
	28	27,50	27,75	27,24	27,24	26,33	28,53	27,43	0,89
	90	31,07	30,94	31,83	31,57	30,09	32,60	31,35	1,33
	120	32,09	33,10	32,34	33,10	31,35	33,97	32,66	1,60
Resistência à tração por compressão diametral	3	2,10	1,91	2,23	2,16	4,20	2,18	2,10	6,54
	7	3,37	3,18	3,50	3,25	6,66	3,46	3,33	4,23
	28	4,01	4,27	4,01	4,13	8,22	4,27	4,11	3,01
	90	4,45	4,20	4,14	4,20	8,50	4,42	4,25	3,25
	120	4,01	4,26	4,46	4,34	8,54	4,44	4,27	4,46
Resistência à tração na flexão	28	3,72	3,70	3,71	3,70	-	-	3,71	0,27
Módulo de deformação	28	26,45	28,40	29,26	-	-	-	28,04	5,14
Coeficiente de Poisson	28	0,28	0,32	0,30	-	-	-	0,30	6,67
Absorção de água por imersão	28	7,48	7,55	7,38	-	-	-	7,47	1,14
Absorção de água por sucção capilar	28	1,77	1,58	1,60	1,70	-	-	1,65	5,19

Cimento CP III 40 RS – Concreto com 100% de AMA (S = 80 mm)									
Ensaio	Idade	Resultados individuais						Resultado Médio	Coeficiente de variação
Resistência à compressão axial	3	14,01	13,75	13,50	13,24	13,08	14,18	13,63	2,43
	7	20,37	20,63	20,37	20,37	19,62	21,26	20,44	0,64
	28	26,74	26,48	26,48	26,23	25,42	27,54	26,48	0,79
	90	32,85	31,32	27,75	27,50	28,67	31,05	29,86	8,88
	120	31,07	32,83	32,59	30,94	30,35	32,87	31,61	2,42
Resistência à tração por compressão diametral	3	1,69	1,59	1,78	1,85	1,66	1,80	1,73	6,52
	7	2,55	2,42	2,48	2,23	2,32	2,52	2,42	5,68
	28	2,93	3,25	3,09	3,18	2,98	3,23	3,11	4,44
	90	3,50	3,75	3,82	3,88	3,59	3,89	3,74	4,47
	120	3,69	3,63	3,95	3,82	3,62	3,92	3,77	3,78
Resistência à tração na flexão	28	3,77	3,87	3,88	3,85	-	-	3,84	1,58
Módulo de deformação	28	26,87	28,32	26,02	-	-	-	27,07	4,30
Coeficiente de Poisson	28	0,26	0,29	0,27	-	-	-	0,27	5,59
Absorção de água por imersão	28	6,49	6,68	6,54	-	-	-	6,57	1,50
Absorção de água por sucção capilar	28	1,47	1,59	1,62	1,60	-	-	1,56	5,20

ANEXO C – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CIMENTO CP V ARI

[illegible]

ANEXO D – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

 UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COLÉGIO TÉCNICO UNIVERSITÁRIO COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÕES CIVIS	REF.: MC-D-190607-01
	FL.: 01/01

ANÁLISE DE AGREGADO

DADOS DO CONTRATANTE

NOME: Tese de doutorado

ENDEREÇO:

DADOS DO MATERIAL

AMOSTRA: Areia de rio

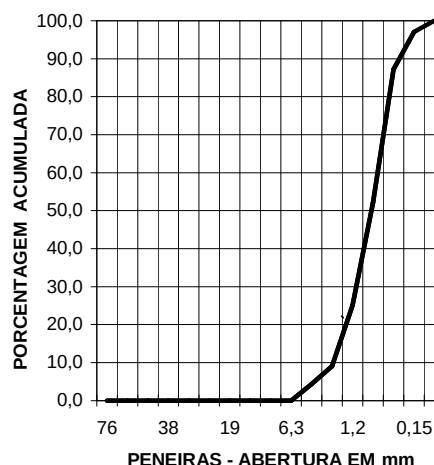
PROCEDÊNCIA: Rio do Peixe

FORNECEDOR: Luiz Gonzaga

GRANULOMETRIA - NBR 7217

Peneiras		Peso retido (g)		% Retida			%
pol.	mm	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	média	Acum.
3	76			0,00	0,00	0,00	0,00
2 1/2	64			0,00	0,00	0,00	0,00
2	50			0,00	0,00	0,00	0,00
1 1/2	38			0,00	0,00	0,00	0,00
2	32			0,00	0,00	0,00	0,00
1	25			0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19			0,00	0,00	0,00	0,00
1/2	12,5			0,00	0,00	0,00	0,00
3/8	9,5			0,00	0,00	0,00	0,00
1/4	6,3			0,00	0,00	0,00	0,00
nº 4	4,8	43,70	43,70	4,37	4,37	4,37	4,37
nº 8	2,4	46,60	46,60	4,66	4,66	4,66	9,03
nº 16	1,2	160,30	160,30	16,03	16,03	16,03	25,06
nº 30	0,6	269,70	269,70	26,97	26,97	26,97	52,03
nº 50	0,3	351,10	351,10	35,11	35,11	35,11	87,14
nº 100	0,15	98,50	98,50	9,85	9,85	9,85	96,99
Fundo	0,00	30,10	30,10	3,01	3,01	3,01	100,00
Totais		1000,00	1000,00	100,00	100,00	100,00	100,00

COMPARAÇÃO COM A NBR 7211



Classificação Granulométrica NBR 7211:	zona utilizável	OBSERVAÇÃO:
Massa Específica Real NBR 9776 (kg/dm³):	2,62	
Massa Específica Aparente Seca NBR 7810 (kg/dm³):	1,46	
Massa Específica Úmida (6%) NBR 7251 (kg/dm³):	***	
Módulo de Finura NBR 7211:	2,75	
Torrões de Argila NBR 7218 (%):	ISENTO	
Material Pulverulento NBR 7219 (%):	0,60	
Impureza Orgânica NBR 7220 (p.p.m.):	<300	
Dimensão Máxima Característica NBR 7211 (mm):	2,40	
Coefficiente de vazios (%):	***	

RESPONSÁVEL:

DATA: 20/06/2007

 UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COLÉGIO TÉCNICO UNIVERSITÁRIO COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÕES CIVIS	REF.: MC-D-190607-03
	FL.: 01/01

ANÁLISE DE AGREGADO

DADOS DO CONTRATANTE

NOME: Tese de doutorado

ENDEREÇO:

DADOS DO MATERIAL

AMOSTRA: Areia Artificial

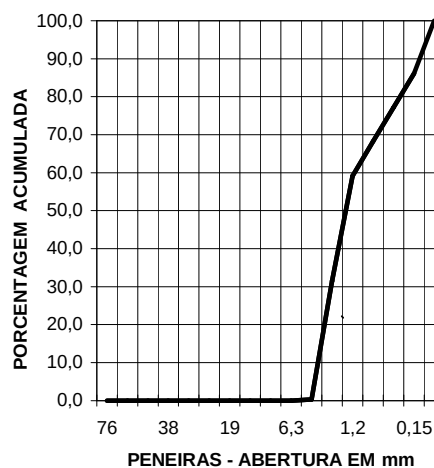
PROCEDÊNCIA: Pedra Sul

FORNECEDOR: Pedra Sul

GRANULOMETRIA - NBR 7217

Peneiras		Peso retido (g)		% Retida			%
pol.	mm	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	média	Acum.
3	76			0,00	0,00	0,00	0,00
2 1/2	64			0,00	0,00	0,00	0,00
2	50			0,00	0,00	0,00	0,00
1 1/2	38			0,00	0,00	0,00	0,00
2	32			0,00	0,00	0,00	0,00
1	25			0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19			0,00	0,00	0,00	0,00
1/2	12,5			0,00	0,00	0,00	0,00
3/8	9,5			0,00	0,00	0,00	0,00
1/4	6,3			0,00	0,00	0,00	0,00
nº 4	4,8	3,50	3,50	0,35	0,35	0,35	0,35
nº 8	2,4	311,00	311,00	31,10	31,10	31,10	31,45
nº 16	1,2	277,00	277,00	27,70	27,70	27,70	59,15
nº 30	0,6	90,40	90,40	9,04	9,04	9,04	68,19
nº 50	0,3	90,00	90,00	9,00	9,00	9,00	77,19
nº 100	0,15	90,00	90,00	9,00	9,00	9,00	86,19
Fundo	0,00	138,10	138,10	13,81	13,81	13,81	100,00
Totais		1000,00	1000,00	100,00	100,00	100,00	100,00

COMPARAÇÃO COM A NBR 7211



Classificação Granulométrica NBR 7211:	Zona utilizável	OBSERVAÇÃO:
Massa Específica Real NBR 9776 (kg/dm³):	2,70	
Massa Específica Aparente Seca NBR 7810 (kg/dm³):	1,71	
Massa Específica Úmida (6%) NBR 7251 (kg/dm³):	***	
Módulo de Finura NBR 7211:	3,23	
Torrões de Argila NBR 7218 (%):	ISENTO	
Material Pulverulento NBR 7219 (%):	14,50	
Impureza Orgânica NBR 7220 (p.p.m.):	<300	
Dimensão Máxima Característica NBR 7211 (mm):	4,80	
Coefficiente de vazios (%):	***	

RESPONSÁVEL:

DATA: 20/06/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COLÉGIO TÉCNICO UNIVERSITÁRIO COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÕES CIVIS	REF.: MC-D-190607-01
	FL.: 01/01

ANÁLISE DE AGREGADO

DADOS DO CONTRATANTE

NOME: Tese de doutorado

ENDEREÇO:

DADOS DO MATERIAL

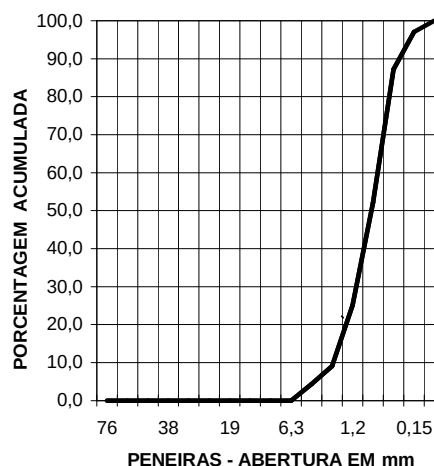
AMOSTRA: Areia artificial

PROCEDÊNCIA: Mármore triturado

FORNECEDOR:

GRANULOMETRIA - NBR 7217							
Peneiras		Peso retido (g)		% Retida			%
pol.	mm	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	média	Acum.
3	76			0,00	0,00	0,00	0,00
2 1/2	64			0,00	0,00	0,00	0,00
2	50			0,00	0,00	0,00	0,00
1 1/2	38			0,00	0,00	0,00	0,00
2	32			0,00	0,00	0,00	0,00
1	25			0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19			0,00	0,00	0,00	0,00
1/2	12,5			0,00	0,00	0,00	0,00
3/8	9,5			0,00	0,00	0,00	0,00
1/4	6,3			0,00	0,00	0,00	0,00
nº 4	4,8	43,70	43,70	4,37	4,37	4,37	4,37
nº 8	2,4	46,60	46,60	4,66	4,66	4,66	9,03
nº 16	1,2	160,30	160,30	16,03	16,03	16,03	25,06
nº 30	0,6	269,70	269,70	26,97	26,97	26,97	52,03
nº 50	0,3	351,10	351,10	35,11	35,11	35,11	87,14
nº 100	0,15	98,50	98,50	9,85	9,85	9,85	96,99
Fundo	0,00	30,10	30,10	3,01	3,01	3,01	100,00
Totais		1000,00	1000,00	100,00	100,00	100,00	100,00

COMPARAÇÃO COM A NBR 7211



Classificação Granulométrica NBR 7211:	Zona utilizável	OBSERVAÇÃO:
Massa Específica Real NBR 9776 (kg/dm³):	2,91	
Massa Específica Aparente Seca NBR 7810 (kg/dm³):	1,74	
Massa Específica Úmida (6%) NBR 7251 (kg/dm³):	***	
Módulo de Finura NBR 7211:	2,75	
Torrões de Argila NBR 7218 (%):	ISENTO	
Material Pulverulento NBR 7219 (%):		
Impureza Orgânica NBR 7220 (p.p.m.):	<300	
Dimensão Máxima Característica NBR 7211 (mm):	2,40	
Coefficiente de vazios (%):	***	

RESPONSÁVEL:

DATA: 20/06/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COLÉGIO TÉCNICO UNIVERSITÁRIO COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÕES CIVIS	REF.: MC-D-190607-03
	FL.: 01/01

ANÁLISE DE AGREGADO

DADOS DO CONTRATANTE

NOME: Tese de doutorado

ENDEREÇO:

DADOS DO MATERIAL

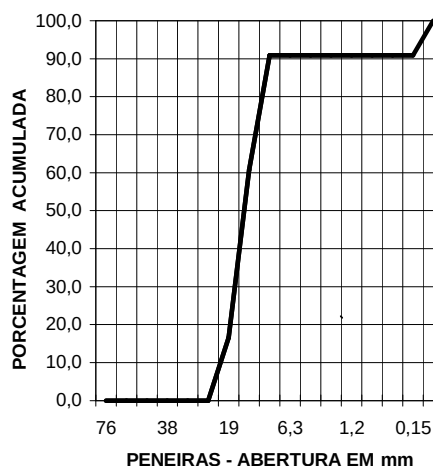
AMOSTRA: Brita 1

PROCEDÊNCIA: Pedra Sul

FORNECEDOR: Pedra Sul

GRANULOMETRIA - NBR 7217							
Peneiras		Peso retido (g)		% Retida			%
pol.	mm	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	média	Acum.
3	76			0,00	0,00	0,00	0,00
2 1/2	64			0,00	0,00	0,00	0,00
2	50			0,00	0,00	0,00	0,00
1 1/2	38			0,00	0,00	0,00	0,00
2	32			0,00	0,00	0,00	0,00
1	25			0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	826,60	826,60	16,53	16,53	16,53	16,53
1/2	12,5	2210,00	2210,00	44,20	44,20	44,20	60,73
3/8	9,5	1510,00	1510,00	30,20	30,20	30,20	90,93
1/4	6,3			0,00	0,00	0,00	90,93
nº 4	4,8			0,00	0,00	0,00	90,93
nº 8	2,4			0,00	0,00	0,00	90,93
nº 16	1,2			0,00	0,00	0,00	90,93
nº 30	0,6			0,00	0,00	0,00	90,93
nº 50	0,3			0,00	0,00	0,00	90,93
nº 100	0,15			0,00	0,00	0,00	90,93
Fundo	0,00	453,40	453,40	9,07	9,07	9,07	100,00
Totais		5000,00	5000,00	100,00	100,00	100,00	100,00

COMPARAÇÃO COM A NBR 7211



Classificação Granulométrica NBR 7211:	Graduação 1	OBSERVAÇÃO:
Massa Específica Real NBR 9776 (kg/dm³):	2,70	
Massa Específica Aparente Seca NBR 7810 (kg/dm³):	1,36	
Massa Específica Úmida (6%) NBR 7251 (kg/dm³):	***	
Módulo de Finura NBR 7211:	6,53	
Torrões de Argila NBR 7218 (%):	ISENTO	
Material Pulverulento NBR 7219 (%):		
Impureza Orgânica NBR 7220 (p.p.m.):	<300	
Dimensão Máxima Característica NBR 7211 (mm):	25,00	
Coefficiente de vazios (%):	***	

RESPONSÁVEL:

DATA: 20/06/2007



RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO / CLASSE : CP - II E 32

PERÍODO : 15.02.2007 a
EMIÇÃO : 1/10/2008

FÁBRICA BARROSO - ENSACADEIRA FÁBRICA

Ref	Dia/Mês	FÍSICOS												QUÍMICOS						QUÍMICOS							
		# 200	# 325	Blaine	A/C	Tempo Pega(min)		Exp. Quente	Resistência à Compressão (MPa)				CO2	PF 500 ° C	PF 1000 ° C	R.Insol.	SO3	SULFETO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Cor L	C3A	
		NBR 11579	NBR 9202	NBR 7224		NBR 11581		NBR 11582	NBR 7215				NBR 11583	IT 22	NBR 5743	NBR 5744	NBR 5745									teórico	
		%	%	cm2/g	%	Início	Fim	mm	1 DIA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
1	15.02.2007		17,1	4181	26,0	190	240	8,6	24,8	32,3	40,9			4,71		1,84	0,23	24,05	7,15	2,47	57,50	3,36	0,60		5,08		
2	19.02.2007		20,0	3868	26,4	190	250	10,0	24,4	30,5	39,6	3,41		4,40	2,06	1,95	0,24	24,02	7,09	2,65	57,55	3,43	0,59		5,17		
3	22.02.2007		19,6	3975	25,2	190	250	10,6	23,3	32,2	42,9			3,97		1,71	0,26	24,14	7,22	2,69	57,60	3,56	0,57		5,24		
4	24.02.2007		20,7	4076	25,4	200	270	9,8	25,6	35,7	44,1			4,37	1,33	1,87	0,24	24,23	7,24	2,59	57,85	3,64	0,57		5,12		
5	27.02.2007		19,6	3767	24,8	190	255	9,5	24,0	30,4	40,5			4,23		1,92	0,24	24,06	7,17	2,48	57,68	3,59	0,57		5,15		
6	01.03.2007		17,6	3801	25,0	195	260	10,4	23,4	29,9	40,3			4,63		1,80	0,24	24,34	7,26	2,25	56,84	3,74	0,57		4,86		
7	03.03.2007		6,6	4280	29,0	205	255	10,7	29,5	35,9	46,6	4,15		4,77	1,90	2,00	0,26	24,51	7,40	2,16	56,48	3,88	0,58		4,68		
8	06.03.2007		25,7	3814	25,0	190	260	9,5	21,4	28,2	36,5			4,49		1,97	0,23	23,82	7,09	2,55	57,13	3,45	0,59		5,12		
9	08.03.2007		16,9	4073	25,8	195	260	10,7	25,1	32,9	41,0			5,01		2,15	0,27	24,21	7,28	2,08	56,95	3,72	0,56		4,75		
10	10.03.2007		16,1	3696	26,0	195	255	10,3	22,3	30,0	37,2	4,38		5,15	1,94	2,21	0,23	23,63	7,05	1,99	57,46	3,35	0,57		4,99		
11	13.03.2007		25,5	3685	26,0	205	270	9,2	21,1	27,3	36,4			5,37		2,07	0,26	23,90	7,32	2,02	56,91	3,52	0,58		4,75		
12	15.03.2007		26,4	3599	26,2	180	245	8,9	20,0	25,1	33,8			5,62		2,30	0,22	23,83	7,25	2,10	56,82	3,36	0,62		4,72		
13	16.03.2007	6,3		4040	27,4	180	240		20,4	26,0	33,6			6,00	2,74	2,49	0,23	22,52									
14	17.03.2007		20,0	4044	26,0	180	250	10,3	24,0	29,7	38,0	4,96		5,91	1,69	2,41	0,26	23,69	7,11	2,27	57,32	3,32	0,60		4,79		
15	20.03.2007		21,3	3984	26,0	185	250	9,9	22,4	29,5	36,5			5,38		2,00	0,25	23,62	7,12	2,36	57,60	3,28	0,61		4,83		
16	22.03.2007		18,0	4016	25,9	185	245	9,1	22,2	30,0	38,3			5,49		1,90	0,27	23,77	7,23	2,35	57,34	3,39	0,60		4,71		
17	24.03.2007		19,8	4070	25,9	180	240	10,7	23,2	31,2	37,9	4,27		5,22	1,94	2,59	0,24	24,05	7,29	2,33	56,78	3,32	0,63		4,60		
18	27.03.2007		19,6	3730	25,4	185	240	9,9	22,2	28,0	35,7			4,23		2,07	0,25	23,94	7,30	2,30	57,01	3,27	0,61		4,92		
19	29.03.2007		22,0	3553	25,8	175	225	9,8	23,2	28,9	36,7			4,57		2,07	0,26	24,11	7,32	2,32	57,10	3,28	0,60		4,82		
20	31.03.2007		24,4	3597	25,6	185	250	8,7	20,3	26,8	34,9	3,63		4,36	1,79	2,13	0,26	24,05	7,30	2,17	57,16	3,33	0,60		4,86		
21	03.04.2007		19,6	3333	25,6	215	290	9,3	22,3	27,7				4,21		1,95	0,26	24,25	7,38	2,11	57,58	3,48	0,59		4,87		
22	07.04.2007		11,5	3699	28,0	200	265	10,0	25,4	32,2		3,35		4,22	1,33	1,83	0,28	24,11	7,52	1,80	56,67	3,74	0,57		4,69		
23	10.04.2007		21,5	3271	26,2	220	300	9,5	22,1	27,3				3,43		1,70	0,24	24,18	7,47	2,22	57,22	3,49	0,60				
24	12.04.2007		18,3		26,0	205	270	9,9	22,4	28,6						1,79		24,02	7,36	2,18	57,06	3,48	0,60				
25	14.04.2007		16,1	3744	26,2	200	275	9,5	21,9	28,7				4,31	1,63	1,89	0,25	24,19	7,49	2,04	56,31	3,66	0,58				
26	17.04.2007		20,5	3889	25,8	180	235	12,7	26,2	31,0		4,04		4,46		1,89	0,22	23,94	7,34	2,09	57,32	3,36	0,60				
27	19.04.2007		16,6	3941	26,2	155	195	13,6	25,4	30,9				4,59		1,95	0,24	23,78	7,37	2,02	56,51	3,51	0,57				
28	21.04.2007		16,6	3905	27,0	175	235	13,6	26,8	34,8				3,66	1,39	2,42	0,26	24,06	7,47	2,03	56,43	3,61	0,57				
29	24.04.2007		15,2	3749	26,8	180	235	11,1	25,7			3,32		3,81		1,87	0,24	24,38	7,52	2,08	56,87	3,66	0,59				
30	26.04.2007		13,0	4238	26,8	165	215	15,8	30,3					4,13		1,83	0,25	23,81	7,28	2,31	57,76	3,42	0,60				
31	28.04.2007		19,6		26,8	170	240																				
32																											
MÉDIA		6,3	18,8	3849	26,1	189	250	10,4	23,7	30,1	38,6	3,95		4,64	1,79	2,02	0,25	23,97	7,29	2,24	57,13	3,49	0,59		4,89		
MÁXIMO			26,4	4280	29,0	220	300	15,8	30,3	35,9	46,6	4,96		6,00	2,74	2,59	0,28	24,51	7,52	2,69	57,85	3,88	0,63		5,24		
MÍNIMO			6,6	3271	24,8	155	195	8,6	20,0	25,1	33,6	3,32		3,43	1,33	1,70	0,22	22,52	7,05	1,80	56,31	3,27	0,56		4,60		
DESVIO			4,16	244,96	0,87	14,04	20,51	1,62	2,47	2,72	3,41	0,56		0,65	0,41	0,23	0,02	0,35	0,13	0,22	0,43	0,16	0,02		0,19		
% VARIAÇÃO			22,0	6,4	3,3	7,4	8,2	15,6	10,4	9,1	8,9	14,2		14,0	22,6	11,4	6,2	1,5	1,8	9,7	0,7	4,7	3,0		3,9		



RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO / CLASSE : CP III 40 RS - Ultra Forte

PERÍODO : 02.05.2007 a
EMISSÃO : 1/10/2008

FÁBRICA BARROSO - ENSACADEIRA FÁBRICA

Ref	Dia/Mês	FÍSICOS												QUÍMICOS						QUÍMICOS											
		# 325	# 400	Blaine	A/C	Tempo Pega(min)		Exp. Quente	Resistência à Compressão (MPa)				CO2	PF 500 ° C	PF 1000 °C	R.Insol.	SO3	SULFETO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Cor	C3A					
		NBR 11579	%	NBR 7224	NBR 11580	NBR 11581			NBR 7215																		NBR 11583	NBR 5743	NBR 5744	NBR 5745	NBR 5746
		%	%	cm2/g	%	Início	Fim		mm	1 DIA	3 DIAS	7 DIAS															28 DIAS	%	%	%	%
1	02.05.2007	1,7	4,6	4280	30,1	175	235		11,6	28,7	37,6	49,3			2,40		2,00	0,42	27,74	9,22	1,73	52,76	4,57	0,48		3,16					
2	04.05.2007	1,6	4,0	4308	30,0	200	275		11,5	31,4	38,9	47,5			2,37		1,98	0,41	27,57	9,20	1,71	52,42	4,57	0,48		3,48					
3	07.05.2007	1,9	4,3	4167	30,2	170	280		12,1	31,4	40,3	49,1	2,09		2,41	0,77	2,03	0,40	27,30	9,15	1,69	52,67	4,46	0,47		3,55					
4	09.05.2007	2,0	5,2	4333	30,1	185	260		12,5	31,1	39,1	51,0			2,55		2,17	0,40	26,97	8,95	1,67	52,80	4,35	0,48		3,65					
5	11.05.2007	1,8	5,0	4267	30,2	190	280		11,4	28,4	38,3	49,1			2,61		2,04	0,40	27,44	9,12	1,69	52,78	4,48	0,49							
6	14.05.2007	3,6	4,8	4314	30,2	185	260		11,1	28,7	37,5	47,2	2,12		2,68	0,69	1,94	0,42	27,51	9,12	1,71	52,90	4,46	0,49							
7	16.05.2007	1,6	4,0	4314	30,2	200	265		12,2	27,9	38,2	49,3			2,68	0,69	1,94	0,42	27,41	9,04	1,73	53,08	4,40	0,47							
8	18.05.2007	1,8	4,1	4329	30,0	205	280		12,6	28,9	39,4	50,4			2,44		2,04	0,39	27,22	8,96	1,71	52,86	4,30	0,48							
9	21.05.2007	1,9	5,2	4450	30,2	195	265		12,1	30,8	38,9	48,5	2,08		2,55	0,66	2,05	0,39	27,70	9,18	1,68	52,64	4,45	0,49							
10	23.05.2007	1,6	4,5	4341	30,2	195	260		13,4	28,8	38,9	49,6			2,61		2,04	0,40	27,51	9,03	1,67	52,62	4,38	0,49		3,42					
11	25.05.2007	1,5	4,2	4320	29,8	200	270		11,5	28,8	38,6	50,0			2,37		2,01	0,39	27,39	8,96	1,79	52,66	4,31	0,49		3,64					
12	28.05.2007	2,1	4,8	4278	29,6	205	295		11,6	28,7	38,0	48,3			2,54	0,85	1,95	0,39	27,47	9,00	1,72	53,03	4,31	0,50							
13	30.05.2007	1,4	4,1	4082	29,6	205	275		12,5	31,3	42,0	50,8			2,14		2,08	0,38	27,42	8,96	1,73	53,17	4,30	0,52							
14	01.06.2007	1,6	4,6	4303	27,7	195	260		12,8	29,2	40,9				1,15		2,02	0,39	27,47	8,97	1,71	52,97	4,34	0,51							
15	04.06.2007	1,6	3,3	4048	29,9	185	245		12,1	29,6	37,5				2,45	0,88	1,97	0,40	27,56	8,97	1,68	53,01	4,35	0,51							
16	06.06.2007	1,7	4,2	4418	30,0	190	250		12,7	29,7	37,2				2,46		2,10	0,40	27,71	9,11	1,71	52,57	4,44	0,51							
17	08.06.2007	1,4	3,2	4478	30,0	190	265		14,6	31,3	40,0				2,24		1,87	0,41	27,24	8,81	2,02	52,88	4,27	0,53							
18	11.06.2007	1,2	3,2	3979	30,0	200	270		13,0	29,0	38,0		2,05		2,21	0,79	1,93	0,37	27,38	8,90	2,01	52,82	4,34	0,52							
19	13.06.2007	1,2	3,2	3906	30,1	210	285		12,3	28,1	37,7				2,20	0,88	1,96	0,37	27,86	9,10	1,90	52,55	4,53	0,52							
20	15.06.2007	1,6	4,2	4227	29,6	195	270		12,9	29,2	40,8				2,35	1,02	2,06	0,38	27,50	8,89	1,86	52,77	4,39	0,53		3,50					
21	18.06.2007	1,5	4,1	4265	30,0	205	285		12,3	29,7	37,0				2,66	1,02	2,04	0,37	27,55	8,93	1,86	52,92	4,43	0,54		3,55					
22	20.06.2007	1,5	3,8	4252	30,0	185	255		13,9	31,2	38,9				2,43		2,25	0,39	27,50	9,09	1,91	52,64	4,48	0,51		3,23					
23	22.06.2007	1,3	2,9	4397	30,2	215	285		12,9	29,4			2,10		2,26	0,91	1,95	0,38	27,53	9,04	1,94	52,79	4,50	0,50		3,57					
24	25.06.2007	1,6	4,8	4278	30,0	185	260		11,9						2,44	1,07	2,01	0,38	27,17	9,11	1,97	52,72	4,35	0,51		3,52					
25	26.06.2007	1,4	3,9	4322	30,0	185	260								2,50		2,08	0,39	27,43	9,09	1,87	52,74	4,44	0,52		3,47					
26	27.06.2007																2,94		25,51	8,72	1,72	52,97	4,02	0,56							
27																															
28																															
29																															
30																															
31																															
32																															
MÉDIA		1,7	4,2	4266	29,9	194	268		12,4	29,6	38,8	49,2	2,09		2,39	0,85	2,06	0,39	27,39	9,02	1,78	52,80	4,39	0,50		3,48					
MÁXIMO			5,2	4478	30,2	215	295		14,6	31,4	42,0	51,0	2,12		2,68	1,07	2,94	0,42	27,86	9,22	2,02	53,17	4,57	0,56		3,65					
MÍNIMO			2,9	3906	27,7	170	235		11,1	27,9	37,0	47,2	2,05		1,15	0,66	1,87	0,37	25,51	8,72	1,67	52,42	4,02	0,47		3,16					
DESVIO		0,46	0,64	137,28	0,50	10,80	13,93		0,82	1,17	1,32	1,16	0,03		0,30	0,14	0,20	0,01	0,43	0,12	0,11	0,18	0,11	0,02		0,15					
% VARIAÇÃO		27,3	15,5	3,2	1,7	5,6	5,2		6,6	3,9	3,4	2,4	1,2		12,5	16,2	9,6	3,8	1,6	1,3	6,4	0,3	2,6	4,5		4,3					

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO/CLASSE: CP V ARI FÁCIL Ultra Rápido										PERÍODO : 01.05.2007 a EMISSÃO : 1/10/2008														
		FÁBRICA CIMINAS - ENSACADEIRA FÁBRICA																								
Ref	Dia/Mês	FÍSICOS										QUÍMICOS							QUÍMICOS							
		# 400	# 325	Blaine	A/C	Tempo Pega(min)		Exp. Quente	Resistência à Compressão (MPa)				CO2	PF 500 ° C	PF 1000 ° C	R.Insol.	SO3	SULFETO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Cor L	C3A
		%	NBR 9202 %	NBR 7224 cm2/g	%	NBR 11581		NBR 11582 mm	NBR 7215				NBR 11583 %	IT 22 %	NBR 5743 %	NBR 5744 %	NBR 5745 %	%	%	%	%	%	%	%	%	teórico
						Início	Fim		1 DIA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS														
1	01.05.2007	2,8		4619	29,8	125	165		30,0	40,8	45,5	52,3													2,8	8,0
2	06.05.2007	3,2		4619	29,6	140	185		29,0	41,5	45,6	53,4	1,14	0,85	2,70	0,38	2,59		19,21	4,98	2,95	64	0,73	0,81	3,2	8,0
3	08.05.2007	2,8		4643	29,5	150	195		27,9	39,6	43,2	49,6												2,8	7,9	
4	13.05.2007	3,0		4570	30,0	145	195		27,8	40,4	45,5	52,8	1,14	0,99	2,74	0,44	2,71							3	7,9	
5	15.05.2007	2,9		4667	30,2	150	195		32,3	40,9	45,7	53,6												2,9	8,1	
6	20.05.2007	2,3		4691	28,9	130	175		31,0	40,7	47,3	53,5	0,84	0,86	2,50	0,42	2,67		19,63	5,25	2,92	63,99	0,78	0,86	2,3	8,2
7	22.05.2007	3,0		4715	29,0	135	185		32,8	42,5	46,6	54,3												3	8,2	
8	27.05.2007	2,9		4691	29,4	165	210		32,4	44,5	48,4	53,3	0,84	0,75	2,45	0,43	2,72							2,9	8,2	
9	29.05.2007	4,4		4545	28,6	160	195		31,7	40,8	46,6	53,7												4,4	7,5	
10	02.06.2007	2,2		4667	30,0	145	180		30,5	42,3	47,1		1,04	0,90	2,57	0,39	2,65		20	5,4	2,89	63,44	1,07	0,85	2,2	7,5
11	05.06.2007	2,3		4619	28,9	160	210		30,7	42,9	46,5													2,3	7,5	
12	09.06.2007	2,2		4786	29,2	160	205		30,5	42,8	46,2		0,79	1,03	2,36	0,39	2,67							2,2	7,5	
13	12.06.2007	2,0		4763	29,8	180	230		30,9	41,0	47,4		0,92	1,02	2,47	0,32	2,66		19,68	5,09	2,96	63,52	0,99	0,84	2	7,8
14	15.06.2007	2,6		4810	28,9	140	180		31,1	42,0	47,2		0,83	1,02	2,46	0,30	2,56		20,03	5,08	2,96	63,9	0,65	0,83	2,6	7,8
15	19.06.2007	2,9		4643	28,8	135	175		33,3	42,2	46,8													2,9	7,9	
16	23.06.2007	2,4		4691	30,1	160	215		30,2	42,9			0,79	1,06	2,36	0,36	2,66							2,4	7,9	
17	26.06.2007	2,2		4595	29,2	140	185		29,6																2,2	
18																										
19																										
20																										
21																										
22																										
23																										
24																										
25																										
26																										
27																										
28																										
29																										
30																										
31																										
32																										
MÉDIA		2,71		4667	29,4	148	193		30,7	41,7	46,4	52,9	0,93	0,94	2,51	0,38	2,65		19,71	5,16	2,94	63,77	0,84	0,84	2,71	7,9
MÁXIMO		4,40		4810	30,2	180	230		33,3	44,5	48,4	54,3	1,14	1,06	2,74	0,44	2,72		20,03	5,40	2,96	64,00	1,07	0,86	4,40	8,2
MÍNIMO		2,00		4545	28,6	125	165		27,8	39,6	43,2	49,6	0,79	0,75	2,36	0,30	2,56		19,21	4,98	2,89	63,44	0,65	0,81	2,00	7,5
DESVIO		0,57		73	0,5	14	17		1,56	1,24	1,20	1,37	0,14	0,11	0,13	0,05	0,05		0,33	0,17	0,03	0,27	0,18	0,02	0,57	0,2
% VARIAÇÃO		21		2	2	10	9		5	3	3	3	15,5	11,3	5,4	12,5	1,9		1,7	3,2	1,0	0,4	21,1	2,3	20,9	3,0

