

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC**

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS E SINTÉTICAS EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO DE ALVENARIA: ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Título
Mestre em Engenharia Civil

JOSÉ EDUARDO LOBATO DE SIQUEIRA

Florianópolis, agosto de 2006

UTILIZAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS E SINTÉTICAS EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO DE ALVENARIA: ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

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

Prof. Humberto Ramos Roman, PhD. (Orientador)

Prof. Dra. Denise Antunes da Silva (Co-orientadora)

Prof. Dr. Glicério Trichês (Coordenador do PPGEC)

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr.-Ing. Philippe Jean Paul Gleize (UFSC)

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD. (UFSC)

Prof. Dr. Holmer Savastano Júnior (USP)

Ao velho Capitão

**“Um homem nunca sabe aquilo
de que é capaz até que o tenta
fazer.”**

Charles Dickens

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à minha mãe Zuila, ao meu melhor amigo Alexandre e aos meus irmãos pelo carinho, compreensão e, principalmente, pelo grande incentivo em mais essa empreitada.

Aos professores Humberto e Denise, por acreditarem no meu potencial e pela orientação prestada no desenvolvimento deste trabalho. Aos professores Holmer e Philippe pelas sugestões e contribuições dadas à pesquisa.

A todos os grandes amigos e parceiros de HN que me deram o companheirismo e suporte emocional tão necessário quando se está tão longe de casa, em especial aos amigos Ay, Preto e Jognildes.

Aos companheiros de trabalho do GDA que sempre estiveram à disposição, em especial à Déa, Nadi, Tina, Jujuba, Miche, Tati e Odilar.

Aos bolsistas Geovane e Monique pela ajuda na realização dos ensaios e, principalmente, no corte das fibras vegetais.

Aos laboratoristas do LMCC, Luiz Henrique e Renato e ao grande “figura” Roque, pela ajuda nos trabalhos laboratoriais necessários.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida durante os dois anos de mestrado.

Ao amigo Cristóvam Sena pelo grande auxílio na pesquisa sobre o curauá. À PEMATEC TRIANGEL pela doação da fibra.

À Cimentos Itambé, na pessoa do Eng. Jorge Aoki, à FITESA, na pessoa do Eng. Júlio Montardo, à FLINCO, na pessoa do Sr. Antonio Guerreiro, e à ARTEPLÁS pela doação dos materiais empregados nessa pesquisa.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIACÕES.....	19
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	21
1 – INTRODUÇÃO	22
1.1 – Considerações iniciais e objetivos	22
1.2 – Justificativa e relevância do tema	23
1.3 – Estrutura da dissertação.....	24
2 – FIBRAS UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	26
2.1 – Fibra de polipropileno	29
2.2 – Fibras PET	32
2.3 – Fibras vegetais: a fibra de curauá.....	35
3 – INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	40
3.1 – Propriedades no estado fresco	43
3.2 – Propriedades no estado endurecido.....	45
3.2.1 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À FLEXÃO	46
3.2.2 – TENACIDADE	47
3.2.3 – ADERÊNCIA	48
3.2.4 – PERMEABILIDADE A ÁGUA	49
3.2.5 – RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	50
3.2.6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	51
3.2.7 – RESISTÊNCIA A ALTAS TEMPERATURAS	52
3.2.8 – FADIGA.....	54
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1 – Planejamento experimental	56
4.2 – Caracterização dos materiais	57

4.2.1 – CIMENTO.....	57
4.2.2 – CAL	58
4.2.3 – AREIA	59
4.2.4 – ADITIVO PLASTIFICANTE	60
4.2.5 – FIBRA DE POLIPROPILENO.....	61
4.2.6 – FIBRA DE PET.....	63
4.2.7 – FIBRA DE CURAUÁ.....	64
4.2.8 – BLOCOS CERÂMICOS.....	65
4.3 – Dosagem e preparo das argamassas.....	66
4.4 – Ensaio no estado fresco	68
4.5 – Ensaio em revestimentos aplicados sobre alvenaria de blocos cerâmicos	70
4.5.1 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	72
4.5.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	73
4.5.3 – PERMEABILIDADE À ÁGUA PELO MÉTODO DO CACHIMBO	74
4.6 – Ensaio em corpos de prova no estado endurecido	75
4.6.1 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	76
4.6.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	78
4.6.3 – TENACIDADE	78
4.6.4 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	79
5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	80
5.1 – Ensaio no estado fresco	81
5.1.1 – MASSA ESPECÍFICA DA ARGAMASSA.....	81
5.1.2 – TEOR DE AR INCORPORADO	82
5.1.3 – RETENÇÃO DE ÁGUA	83
5.2 – Ensaio em revestimento aplicado sobre alvenaria de blocos cerâmicos	85
5.2.1 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	85
5.2.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	94
5.2.3 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE	99

5.2.4 – ANÁLISE VISUAL DE FISSURAS.....	111
5.3 – Ensaio em corpos de prova no estado endurecido	114
5.3.1 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	114
5.3.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	122
5.3.3 – ÍNDICE DE TENACIDADE – I5	128
5.3.4 – ÍNDICE DE TENACIDADE – I10	135
5.3.5 – ÍNDICE DE TENACIDADE – I20	138
5.3.6 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	140
5.4 – Discussões	146
6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	150
6.1 – Conclusões gerais do estudo	150
6.2 – Sugestões para trabalhos futuros.....	152
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
APÊNDICE A – CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC) DAS FIBRAS.....	162
APÊNDICE B - RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NAS PAREDES DE BLOCOS CERÂMICOS E EM CORPOS DE PROVA	164
APÊNDICE C - GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 28 DIAS DE IDADE.....	194
APÊNDICE D - GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 90 DIAS DE IDADE.....	200
APÊNDICE E - GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 180 DIAS DE IDADE.....	206
APÊNDICE F - GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 270 DIAS DE IDADE.....	212

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 2.1 – Diagrama de tensão-deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO <i>et al.</i> , 2002).....	28
Ilustração 2.2 – Fluxograma simplificado da cadeia de produção das principais fibras sintéticas (Fonte: BNDES).....	31
Ilustração 2.3 – Estrutura molecular do PET (JELIDI, 1991).....	32
Ilustração 2.4 – Distribuição dos mercados para o PET reciclado (Fonte: ABIPET).....	33
Ilustração 2.5 – Princípio esquemático das reações de despolimerização do poliéster (JELIDI, 1991).....	34
Ilustração 2.6 – As duas espécies de curauá: o roxo e o branco.....	35
Ilustração 2.7 – Máquina utilizada para o desfibramento do curauá, popularmente chamada de “periquita”.....	36
Ilustração 2.8 – Peças automobilísticas produzidas com reforço de fibra de curauá.....	36
Ilustração 2.9 - (a) Seção transversal de fibras de sisal (NUTMAN apud BENTUR e MINDESS, 1990); (b) Estrutura de células de fibra de celulose (ILLSTON <i>et al.</i> apud BENTUR e MINDESS, 1990).....	38
Ilustração 3.1 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões (NUNES e AGOPYAN, 1998).....	42
Ilustração 3.2 - Passos que levam ao lascamento do concreto quando exposto ao fogo (NINCE <i>et al.</i> , 2003).....	53
Ilustração 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	60
Ilustração 4.2 – MEV das fibras de polipropileno.....	62
Ilustração 4.3 – MEV das fibras de PET.....	63
Ilustração 4.4 – MEV das fibras de curauá.....	65
Ilustração 4.5 – Medição do índice de consistência para argamassa de cal referência.....	69
Ilustração 4.6 – Funil de Büchner modificado.....	69
Ilustração 4.7 – Variações médias de temperatura e umidade relativa no período de 06 a 10 de junho de 2005.....	71
Ilustração 4.8 – Aplicação e acabamento das argamassas de revestimento.....	71
Ilustração 4.9 – Desenho esquemático da divisão realizada em cada parede para realização dos ensaios.....	72
Ilustração 4.10 – Parede instrumentada para a realização de ensaios de aderência e cachimbo.....	73
Ilustração 4.11 – Corpos de prova aspergidos com solução de fenolftaleína.....	74
Ilustração 4.12 – Cachimbo fixado ao substrato (DIAS e CARASEK, 2003).....	74

Ilustração 4.13 – Exposição dos corpos de prova prismáticos.....	76
Ilustração 4.14 – Vista geral do aparato de ensaio de tração na flexão.....	77
Ilustração 4.15 – Desenho esquemático do ensaio de tração na flexão.....	77
Ilustração 4.16 – Gráfico de medidas dos índices de tenacidade segundo ASTM C 1018.....	79
Ilustração 5.1 - Resultados dos ensaios de massa específica.....	81
Ilustração 5.2 - Resultados dos ensaios de teor de ar incorporado.....	83
Ilustração 5.4 - Resultados dos ensaios de retenção de água.....	84
Ilustração 5.5 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com fibra de curauá.....	86
Ilustração 5.6 – Variação média de temperatura e umidade relativa para o período de junho/05 a fevereiro/06.....	87
Ilustração 5.7 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com fibra de PET.....	89
Ilustração 5.8 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com fibra de PP.....	90
Ilustração 5.9 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com 28 dias.....	92
Ilustração 5.10 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com 270 dias.....	93
Ilustração 5.11 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de curauá.....	94
Ilustração 5.12 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de PET.....	96
Ilustração 5.13 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de polipropileno.....	97
Ilustração 5.14 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 28 dias.....	98
Ilustração 5.15 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 180 dias.....	99
Ilustração 5.16 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com fibra de curauá.....	101
Ilustração 5.17 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com fibra de curauá.....	102
Ilustração 5.18 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com fibra de PET.....	103
Ilustração 5.19 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com fibra de PET.....	104
Ilustração 5.20 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com fibra de PP.....	105

Ilustração 5.21 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com fibra de PP.....	106
Ilustração 5.22 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal para 28 dias.....	107
Ilustração 5.23 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo para 28 dias.....	108
Ilustração 5.24 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas com 270 dias de idade.....	110
Ilustração 5.25 – Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,25C e C0,25PP com cerca de 150 dias de idade.....	111
Ilustração 5.26 – Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,25PET e C0,50C com cerca de 150 dias de idade.....	111
Ilustração 5.27 - Localização e quantidade de fissuras na argamassa CR com cerca de 150 dias de idade.....	112
Ilustração 5.28 - Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,25C e C0,25PET com cerca de 210 dias de idade.....	113
Ilustração 5.29 - Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,50PET e CR com cerca de 210 dias de idade.....	113
Ilustração 5.30 – (a) Fissura na argamassa 0,25C; (b) Fissura na argamassa CR.	114
Ilustração 5.31 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de curauá.....	116
Ilustração 5.32 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PET.....	117
Ilustração 5.33 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PP.....	118
Ilustração 5.34 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 28 dias de idade.....	120
Ilustração 5.35 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 270 dias de idade.....	121
Ilustração 5.36 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de curauá.....	123
Ilustração 5.37 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de PET.....	124
Ilustração 5.38 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de polipropileno.....	125
Ilustração 5.39 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com 28 dias de idade.....	126
Ilustração 5.40 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com 180 dias de idade.....	127

Ilustração 5.41 – Gráficos tensãoxdeformação para as argamassas A0,50PP e AR para 28 dias.....	128
Ilustração 5.42 – Gráficos tensãoxdeformação para as argamassas C0,25C e CR para 90 dias.....	129
Ilustração 5.43 – Valores do I5 para argamassas com fibra de curauá.....	130
Ilustração 5.44 – Valores do I5 para argamassas com fibra de PET.....	131
Ilustração 5.45 – Valores do I5 para argamassas com fibra de polipropileno.....	132
Ilustração 5.46 – Valores do I5 para argamassas com 28 dias de idade.....	133
Ilustração 5.47 – Valores do I5 para argamassas com 270 dias de idade.....	134
Ilustração 5.48 – Valores do I10 para argamassas com fibra de curauá.....	135
Ilustração 5.49 – Valores do I10 para argamassas com fibra de PET.....	136
Ilustração 5.50 – Valores do I10 para argamassas com fibra de polipropileno.....	136
Ilustração 5.51 – Valores do I10 para argamassas com 28 dias de idade.....	137
Ilustração 5.52 – Valores do I10 para argamassas com 270 dias de idade.....	138
Ilustração 5.53 – Valores do I20 para argamassas com 270 dias de idade.....	139
Ilustração 5.54 – MEV de fibra de curauá aos 28 dias: (a) Argamassa de aditivo; (b) Argamassa de cal.....	140
Ilustração 5.55 – MEV de argamassa com cal e fibra de curauá aos 90 dias: fibra envolta por produtos hidratados.....	141
Ilustração 5.56 – MEV de argamassa com aditivo e fibra de curauá aos 270 dias: (a) Fibra envolta por produtos hidratados; (b) Possível degradação da fibra.....	141
Ilustração 5.57 – MEV de fibra de PET aos 28 dias: (a) Argamassa com aditivo; (b) Argamassa com cal.....	142
Ilustração 5.58 – “Leitos” das fibras de PET.....	142
Ilustração 5.59 – MEV de fibra de PET aos 90 dias: (a) Argamassa com aditivo; (b) Argamassa com cal.....	143
Ilustração 5.60 – MEV de fibra de PET: (a) Argamassa com aditivo aos 270 dias; (b) Argamassa com cal aos 180 dias.....	144
Ilustração 5.61 – MEV de fibra de polipropileno: (a) Argamassa com aditivo aos 270 dias; (b) Argamassa com cal aos 90 dias.....	144
Ilustração 5.62 – MEV de fibra de polipropileno: (a) Argamassa com aditivo aos 180 dias; (b) Argamassa com cal aos 90 dias.....	145
Ilustração 5.63 – Aspecto superficial das argamassas com aditivo.....	146
Ilustração 5.64 – Aspecto superficial das argamassas com cal.....	146
Ilustração A.1 – DSC da fibra de curauá.....	163
Ilustração A.2 – DSC da fibra de polipropileno.....	163
Ilustração A.3 – DSC da fibra de PET.....	163
Ilustração C.1 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25C.....	195

Ilustração C.2 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50C.....	195
Ilustração C.3 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PET.....	195
Ilustração C.4 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PET.....	196
Ilustração C.5 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PP.....	196
Ilustração C.6 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PP.....	196
Ilustração C.7 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa AR.....	197
Ilustração C.8 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa CR.....	197
Ilustração C.9 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25C.....	197
Ilustração C.10 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50C.....	198
Ilustração C.11 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PET.....	198
Ilustração C.12 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PET.....	198
Ilustração C.13 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PP.....	199
Ilustração C.14 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PP.....	199
Ilustração D.1 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25C.....	201
Ilustração D.2 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50C.....	201
Ilustração D.3 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PET.....	201
Ilustração D.4 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PET.....	202
Ilustração D.5 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PP.....	202
Ilustração D.6 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PP.....	202
Ilustração D.7 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa AR.....	203
Ilustração D.8 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa CR.....	203
Ilustração D.9 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25C.....	203
Ilustração D.10 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50C.....	204
Ilustração D.11 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PET.....	204
Ilustração D.12 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PET.....	204
Ilustração D.13 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PP.....	205
Ilustração D.14 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PP.....	205
Ilustração E.1 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25C.....	207
Ilustração E.2 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50C.....	207
Ilustração E.3 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PET.....	207
Ilustração E.4 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PET.....	208
Ilustração E.5 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PP.....	208
Ilustração E.6 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PP.....	208
Ilustração E.7 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa AR.....	209
Ilustração E.8 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa CR.....	209

Ilustração E.9 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25C.....	209
Ilustração E.10 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50C.....	210
Ilustração E.11 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PET.....	210
Ilustração E.12 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PET.....	210
Ilustração E.13 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PP.....	211
Ilustração E.14 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PP.....	211
Ilustração F.1 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25C.....	213
Ilustração F.2 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50C.....	213
Ilustração F.3 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PET.....	213
Ilustração F.4 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PET.....	214
Ilustração F.5 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,25PP.....	214
Ilustração F.6 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa A0,50PP.....	214
Ilustração F.7 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa AR.....	215
Ilustração F.8 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa CR.....	215
Ilustração F.9 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25C.....	215
Ilustração F.10 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50C.....	216
Ilustração F.11 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PET.....	216
Ilustração F.12 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PET.....	216
Ilustração F.13 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,25PP.....	217
Ilustração F.14 – Gráfico tensãoxdeformação para a argamassa C0,50PP.....	217

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras (BENTUR e MINDESS, 1990).....	27
Tabela 4.1 – Caracterização química do cimento.....	58
Tabela 4.2 – Caracterização física do cimento.....	58
Tabela 4.3 – Caracterização da cal.....	59
Tabela 4.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo.....	60
Tabela 4.5 – Dados técnicos do aditivo plastificante obtidos junto ao fabricante...	61
Tabela 4.6 – Características físicas e mecânicas das fibras de polipropileno.....	62
Tabela 4.7 – Características físicas e mecânicas das fibras PET.....	64
Tabela 4.8 – Características físicas e mecânicas das fibras de curauá.....	65
Tabela 4.9 – Propriedades dos blocos cerâmicos.....	66
Tabela 4.10 – Designação das argamassas estudadas.....	67
Tabela 5.1 – Relação água/aglomerante e água/matérias secas das argamassas.....	80
Tabela 5.2 - Valores de ANOVA para os ensaios de massa específica.....	82
Tabela 5.3 - Valores de ANOVA para os ensaios de teor de ar incorporado.....	83
Tabela 5.4 - Valores de ANOVA para os ensaios de retenção de água.....	85
Tabela 5.5 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com fibras de curauá.....	88
Tabela 5.6 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com fibras de PET.....	90
Tabela 5.7 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com fibras de polipropileno.....	91
Tabela 5.8 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com 28 dias.....	93
Tabela 5.9 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com 270 dias.....	94
Tabela 5.10 - Valores de ANOVA para os ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de curauá.....	95
Tabela 5.11 - Valores de ANOVA para os ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 28 dias.....	98
Tabela 5.12 - Valores de ANOVA para os ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 180 dias.....	99
Tabela 5.13 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com curauá.....	101
Tabela 5.14 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com curauá.....	102

Tabela 5.15 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com PET.....	104
Tabela 5.16 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com PET.....	105
Tabela 5.17 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com PP.....	106
Tabela 5.18 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal para 28 dias de idade.....	108
Tabela 5.19 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo para 28 dias de idade.....	109
Tabela 5.20 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas com 270 dias de idade.....	110
Tabela 5.21 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de curauá.....	116
Tabela 5.22 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PET.....	118
Tabela 5.23 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PP.....	119
Tabela 5.24 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 28 dias de idade.....	120
Tabela 5.25 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 270 dias de idade.....	122
Tabela 5.26 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de curauá.....	123
Tabela 5.27 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de PET.....	124
Tabela 5.28 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de polipropileno..	125
Tabela 5.29 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para 28 dias de idade.....	126
Tabela 5.30 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para 180 dias de idade.....	128
Tabela 5.31 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com fibra de curauá..	130
Tabela 5.32 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com fibra de PET.....	131
Tabela 5.33 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com fibra de polipropileno.....	132
Tabela 5.34 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com 28 dias de idade..	133
Tabela 5.35 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com 270 dias de idade.....	135

Tabela 5.36 – ANOVA dos valores de I20 para argamassas com 270 dias de idade.....	139
Tabela B.1 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 28 dias de idade.....	165
Tabela B.2 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 90 dias de idade.....	166
Tabela B.3 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 180 dias de idade.....	167
Tabela B.4 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 270 dias de idade.....	168
Tabela B.5 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 28 dias de idade.....	169
Tabela B.6 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 90 dias de idade.....	170
Tabela B.7 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 180 dias de idade.....	171
Tabela B.8 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 270 dias de idade.....	172
Tabela B.9 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 28 dias de idade..	173
Tabela B.10 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 90 dias de idade..	174
Tabela B.11 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 180 dias de idade.....	175
Tabela B.12 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 270 dias de idade.....	176
Tabela B.13 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 28 dias de idade.....	177
Tabela B.14 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 90 dias de idade.....	178
Tabela B.15 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 180 dias de idade.....	179
Tabela B.16 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 270 dias de idade.....	180
Tabela B.17 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 28 dias de idade.....	181
Tabela B.18 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 90 dias de idade.....	182
Tabela B.19 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 180 dias de idade.....	183
Tabela B.20 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 270 dias de idade.....	184

Tabela B.21 – Valores do índice de tenacidade I5 para 28 dias de idade.....	185
Tabela B.22 – Valores do índice de tenacidade I5 para 90 dias de idade.....	186
Tabela B.23 – Valores do índice de tenacidade I5 para 180 dias de idade.....	187
Tabela B.24 – Valores do índice de tenacidade I5 para 270 dias de idade.....	188
Tabela B.25 – Valores do índice de tenacidade I10 para 28 dias de idade.....	189
Tabela B.26 – Valores do índice de tenacidade I10 para 90 dias de idade.....	190
Tabela B.27 – Valores do índice de tenacidade I10 para 180 dias de idade.....	191
Tabela B.28 – Valores do índice de tenacidade I10 para 270 dias de idade.....	192
Tabela B.29 – Valores do índice de tenacidade I20 para 270 dias de idade.....	193

LISTA DE ABREVIações

PET	Polietileno teraftalato
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria de PET
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Nacional
PVA	Álcool polivinílico
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
PP	Polipropileno
ANOVA	Análise de Variância
CP	Cimento Portland
CH	Cal Hidratada
NBR	Norma Brasileira
MBT	<i>Master Builders, INC</i>
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
POLIMAT	Laboratório de Materiais Poliméricos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _f	Temperatura de fusão
T _c	Temperatura de cristalização
RILEM	<i>Reunion Internationale des Laboratoires D'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions</i>
IRS	<i>Initial Rate of Suction – Taxa Inicial de Sucção</i>
r.p.m.	Rotações por minuto
CSTC	<i>Centre Scientifique et Technique de la Construction</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>

RESUMO

Atualmente, uma das grandes preocupações do profissional de engenharia civil diz respeito à vida útil das estruturas. No caso das argamassas de revestimento, essa durabilidade pode ser afetada pelo aparecimento de fissuras, principalmente, causadas pelo fenômeno da retração. Uma das alternativas para se controlar a fissuração é a incorporação de fibras à matriz cimentícia. O objetivo principal desta pesquisa é realizar um estudo comparativo sobre a influência da incorporação de três tipos de fibras (curauá, polipropileno e PET - polietileno tereftalato) em argamassas de revestimento com cal e argamassas com aditivo, utilizadas na região de Florianópolis. No que diz respeito ao estado fresco das argamassas, pôde-se constatar a necessidade de aumento da relação água/aglomerante para que os compósitos com fibra tivessem uma consistência adequada para posterior aplicação em paredes de blocos cerâmicos. Além disso, as fibras aumentaram a retenção de água e incorporação de ar das argamassas. No entanto, os ensaios indicaram que parece haver um teor ótimo de fibra, acima do qual há a redução da capacidade de retenção de água. Para as argamassas aplicadas sobre alvenarias observou-se que as argamassas com cal fissuraram após cinco meses de exposição às intempéries, enquanto que as com aditivo plastificante permaneceram incólumes. Acredita-se que isso se deva, provavelmente, à sua baixa aderência e elevado teor de ar incorporado. A incorporação de fibras causou, também, aumento de carbonatação e de permeabilidade para as argamassas com cal, e um efeito contrário na argamassa com aditivo. As fibras não influenciaram significativamente a resistência de aderência das argamassas. Nessa propriedade pode-se afirmar que o fator preponderante foi o tipo de argamassa utilizada. Para os ensaios de tração na flexão observou-se um decréscimo no valor de tensão de ruptura com a incorporação de fibras e, como esperado, um aumento expressivo na tenacidade dos compósitos. Pelas imagens obtidas em MEV, pôde-se observar o processo de degradação e/ou petrificação das fibras de PET e da vegetal já nas primeiras idades. De acordo com os resultados obtidos pode-se afirmar o potencial da utilização dessas fibras em argamassas de revestimento, havendo, no entanto, a necessidade de estudos mais aprofundados.

Palavras-chave: argamassa de revestimento, fibras, desempenho.

ABSTRACT

Nowadays, one of the major concerns of the professional of civil engineering is the durability of structures. In the case of rendering mortars, the durability can be affected by cracks caused, mainly, by shrinkage. One of the alternatives to control this problem is the addition of fibers in the cementitious matrix. The main objective of this research is to study the influence of three different fibers (curauá, polypropylene, PET - polyethylene terephthalate) in rendering mortars with admixture and lime, used in the region of Florianópolis. In the fresh state, it was necessary to increase the mortars water/binder ratio, to have an adequate consistency for application in ceramic blocks masonry. Moreover, the fibers increased the water retention and air entraining of mortars. However, the tests indicated that it seems to have an optimum fiber content, above of which the reduction of water retention occur. For mortars applied on masonry it was observed that the ones with lime have cracked after five months of exposition to the weather, whereas the ones with water-reducer admixture had remained stable. This may be a result of the low bonding resistance and high volume of entrained air found. The incorporation of fiber caused, also, an increase of carbonation depth and permeability for mortars with lime, and an opposite effect in the mortar with admixture. The fiber type did not show an important role on the bonding resistance behavior. The preponderant factor in this property was the type of mortar used. For the tests of flexural strength, the incorporation of fibers decreased the ultimate strength value and, as expected, increased the toughness of the composites. The scanning electron microscopy indicated that the degradation and/or petrification processes of PET and vegetable fibers had already begun in early ages. These results showed the potential use of these fibers in rendering mortars, however more studies are necessary.

Key-words: rendering mortars, fibers, performance

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais e objetivos

Atualmente, uma das grandes preocupações do profissional de engenharia civil diz respeito à vida útil das estruturas, ou seja, à sua durabilidade, que é, muitas vezes, condicionada pela facilidade ou dificuldade de acesso de agentes agressivos aos materiais que compõem o sistema construtivo. A presença de fissuras nas argamassas de revestimento dos edifícios, especialmente daquelas que revestem as fachadas, resulta em acesso mais rápido dos agentes agressivos e de água da chuva. Dentre os problemas que podem ser acarretados pela fissuração do revestimento estão o aumento de permeabilidade, a perda de aderência à base, que traz como consequência o descolamento de eventual revestimento cerâmico, além, obviamente, do comprometimento do aspecto estético.

Os revestimentos das edificações estão entre os elementos mais suscetíveis à ação do meio ambiente, e acabam por ter que atender às diversas solicitações impostas. Segundo Bastos (2001), a retração e a fissuração de argamassas são fenômenos normalmente associados. As argamassas sofrem retração, cuja intensidade depende fundamentalmente das proporções de mistura, das condições de preparo e aplicação, e das condições de exposição. Entretanto, a fissuração, decorrente do desenvolvimento de tensões de tração pela retração restringida pode ser evitada pela incorporação de materiais que modifiquem o comportamento das argamassas sob tração.

Uma das alternativas para impedir ou diminuir a fissuração proveniente da retração das argamassas de revestimento é a incorporação de fibras durante seu preparo. Todavia, há uma grande variedade de fibras para utilização em compósitos cimentícios. Fibras de ocorrência natural ou sintética têm sido incorporadas a argamassas e concretos com objetivo de aumentar a tenacidade do material e, principalmente, reduzir o aparecimento de fissuras.

Os objetivos gerais deste trabalho são avaliar, comparativamente, a influência de três tipos de fibras (polipropileno¹, polietileno teraftalato - PET²- e curauá³), no desempenho de argamassas usadas para revestimento de alvenarias de fachada na região da Grande Florianópolis, e, ainda, avaliar se uma eventual degradação das fibras tem conseqüências no comportamento dos revestimentos no estado endurecido a curto e médio prazos.

Foram também estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o efeito da incorporação das fibras nas propriedades do estado fresco das argamassas de revestimento;
- Avaliar a capacidade das fibras em impedir ou reduzir o aparecimento de fissuras nas argamassas de revestimento aplicadas sobre paredes de blocos cerâmicos;
- Avaliar a influência das fibras no desempenho mecânico das argamassas de revestimento;
- Analisar a microestrutura das argamassas com fibras, e a região de interface fibra/matriz de cimento, buscando detectar sinais de degradação.

1.2 – Justificativa e relevância do tema

Adicionam-se fibras em matrizes cimentícias com o intuito de minimizar os efeitos da retração, principalmente, no que diz respeito à fissuração. De acordo com Bentur e Mindess (1990), a diminuição da fissuração devido à incorporação de fibras pode ter um efeito sobre a durabilidade de estruturas de concreto armado, reduzindo o ingresso de agentes agressivos (umidade, oxigênio e cloretos) e diminuindo a probabilidade de ocorrência de corrosão de armaduras. Além disso, a ausência de fissuras torna o revestimento de argamassa menos permeável à penetração de chuva em fachadas, reduzindo, desta forma, os problemas causados pela presença de umidade nas edificações.

¹ Fibra proveniente da polimerização de um derivado do petróleo

² Fibra proveniente da reciclagem de embalagens PET

³ Fibra vegetal proveniente do norte do Brasil

A fibra de polipropileno já foi bastante estudada e é utilizada com freqüência em obras da construção civil, adicionada às argamassas e concretos. Pelo fato de sofrerem pouca ou nenhuma degradação em meio alcalino (RODRIGUES e MONTARDO, 2002), as argamassas com fibras de polipropileno foram selecionadas para esta pesquisa, podendo servir de parâmetro para o desempenho das argamassas reforçadas com as demais fibras (PET e curauá), que são degradáveis em meios cimentícios.

A fibra de PET utilizada foi fornecida por uma fábrica localizada na cidade de Itajaí (SC), que recicla garrafas plásticas para obtenção de matéria-prima para a produção de cordas. Feixes de fibras com comprimentos não suficientes para a produção de cordas são cortados para a obtenção de fibras curtas, que podem ser usados em argamassas e concretos. Do ponto de vista ambiental, esta alternativa de uso pode ser importante, tendo em vista o elevado tempo necessário para a decomposição do PET quando disposto em aterros sanitários (cerca de 500 anos, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria de PET - ABIPET).

Por fim, a fibra vegetal aparece como uma alternativa de reforço de baixo custo, tendo em vista sua ocorrência natural e larga escala, principalmente em países em desenvolvimento e com alto déficit de habitações populares. Em especial, as fibras de curauá têm sido pesquisadas e utilizadas na confecção de peças para a indústria automobilística em compósitos com resinas poliméricas. A ocorrência da planta de curauá na região norte do Brasil, sua facilidade de reprodução, e as ainda incipientes pesquisas de sua influência no desempenho de materiais à base de cimento, justificam a proposta de utilização da fibra nas pesquisas.

1.3 – Estrutura da dissertação

A presente pesquisa está dividida em seis capítulos com o intuito de proporcionar um melhor entendimento ao leitor.

No primeiro capítulo expõe-se o tema proposto, ressaltando-se o motivo da utilização de fibras em compósitos cimentícios. Dessa forma, propuseram-se os objetivos gerais e específicos do trabalho.

Os capítulos 2 e 3 tratam do estado da arte do tema abordado. No segundo capítulo, discorre-se de maneira geral sobre as principais fibras utilizadas na construção civil, dando-se destaque para o comportamento das fibras utilizadas neste trabalho (polipropileno, PET e curauá). O capítulo 3 trata do desempenho e das propriedades conferidos aos compósitos cimentícios quando da incorporação de fibras.

O capítulo 4 trata da metodologia utilizada com o objetivo de avaliar o desempenho e o comportamento das argamassas com fibras em relação às argamassas comuns, utilizadas normalmente para revestimento na região da Grande Florianópolis.

Os resultados obtidos nos ensaios as análises estatísticas e as discussões são apresentados no capítulo 5.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões da pesquisa e, ainda, sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.

2 – FIBRAS UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O mais antigo registro da utilização de fibras em materiais de construção encontra-se na Bíblia (Êxodo 5, 6-7) que descreve a utilização de palha para o reforço de tijolos de barro (BENTUR e MINDESS, 1990). Há evidências, ainda, do uso de fibras de asbesto para reforço de postes de argila há cerca de 5000 anos atrás (MEHTA e MONTEIRO, 1994) e de pêlos de animais em argamassas de assentamento de tijolos (JOHNSTON, 2001).

A primeira forma moderna de compósito em escala comercial com a incorporação de fibras, de qualidade aceitável e, por conseqüência, amplamente utilizada na construção civil foi o cimento-amianto, com o advento do processo Hatschek por volta de 1900 (BENTUR e MINDESS, 1990). No entanto, houve uma diminuição no seu uso na década de 70, devido à descoberta de que o amianto é prejudicial à saúde dos operários. Dessa forma, criou-se uma demanda pela descoberta de um material que substituísse o amianto e, ainda, que apresentasse propriedades e comportamentos semelhantes, custo compatível, e que não oferecesse risco à saúde humana (JOHNSTON, 2001).

De acordo com Bentur e Mindess (1990), os primeiros estudos científicos em compósitos cimentícios foram realizados entre os anos de 1950 e 1960 com a produção de fibras de aço. Esse tipo de fibra é o que vem sendo mais utilizado em compósitos, sejam eles estruturais ou não-estruturais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

No que diz respeito às fibras poliméricas, a primeira tentativa de utilização deu-se em 1965 com Goldfein. As mais utilizadas são as de polipropileno, embora outros tipos possam ser citados tais como: *nylon*, poliéster, polietileno, celulose e *kevlar* (TANESI e FIGUEIREDO, 1999). De acordo com Rodrigues e Montardo (2002) ocorreram alguns equívocos graves no Brasil a respeito da utilização das fibras plásticas, pois se acreditava que era possível dispensar outros tipos de reforços sem que houvesse problemas no combate e controle da retração hidráulica. Segundo os autores, passadas as experiências negativas iniciais, esse tipo de fibra voltou a ocupar lugar de destaque na produção de compósitos cimentícios.

O registro mais antigo no Brasil sobre a utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios data de 1982 e foi desenvolvido pelo CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento – localizado na Bahia. Nesta pesquisa testou-se a incorporação de cabos de piaçava e taliscas de bambu no concreto, bem como o uso de fibras vegetais em fibro-cimento (MAIA, 1996).

Dessa forma, vários são os tipos de fibras utilizadas na construção civil atualmente. Accetti e Pinheiro (2000) citam as seguintes: fibras de silicato cristalino (amianto), fibras de vidro, fibras de metal (aço-carbono e aço inox), fibras de carbono, fibras vegetais naturais (sisal, cânhamo, juta, coco, etc.), e fibras poliméricas (polipropileno, polietileno, PET, *nylon*, etc.).

Na tabela 2.1 apresentam-se as características físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras utilizadas normalmente como reforço de matrizes cimentícias.

Tabela 2.1 - Características físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras (BENTUR e MINDESS, 1990)

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5 a 500	7,84	200	0,5 a 2,0	0,5 a 3,5
Vidro	9 a 15	2,60	70 a 80	2 a 4	2 a 3,5
Amianto	0,02 a 0,4	2,60	164	3,1	2 a 3
Polipropileno	20 a 200	0,9	5 a 77	0,5 a 0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65 a 133	3,6	2,1 a 4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Náilon	-	1,1	4,0	0,9	13,0 a 15,0
Celulose	-	1,2	10	0,3 a 0,5	-
Acrílico	18	1,18	14 a 19,5	0,4 a 1,0	3,0
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7x10 ⁻³	10,0
Fibra de madeira	-	1,50	71,0	0,9	-
Sisal	10 a 50	1,50	-	0,8	3,0
Matriz cimentícia (para comparação)	-	2,50	10 a 45	3,7x10 ⁻³	0,02

Os autores ressaltam, entretanto, que a escolha das fibras utilizadas depende das características desejadas ao compósito. As fibras de elevado módulo de elasticidade (aço, vidro e carbono, por exemplo) resultam em compósitos com elevada resistência à tração, rigidez e absorção de cargas dinâmicas. Já as fibras de baixo módulo de elasticidade e alongamento maior (polipropileno e polietileno, por

exemplo) conseguem absorver grandes energias, tendo seus compósitos elevada resistência ao impacto e tenacidade, embora não haja grande contribuição à sua resistência.

Hannant, citado por Accetti e Pinheiro (2000), afirma, ainda, que as fibras de baixo módulo apresentam coeficiente de Poisson elevado, fazendo com que, ao se alongarem longitudinalmente e contraírem lateralmente, haja uma alta tensão de tração lateral na interface fibra-matriz, causando seu arrancamento. Para sanar esse problema criaram-se artifícios como o entrelaçamento de fibras ou o uso de fibras fibriladas. Para que a possibilidade de arrancamento seja reduzida, as fibras de alto módulo possuem mecanismos de ancoragem como seções transversais variáveis ou extremidade fletidas.

Figueiredo *et al.* (2002) apresenta na Ilustração 2.1 o comportamento de uma matriz hipotética reforçada com fibras de módulo de elasticidade alto e baixo, sendo ambas de comportamento elástico perfeitos. A linha AO representa a curva tensão-deformação da matriz, enquanto que as linhas OB e OC, respectivamente, as curvas tensão-deformação das fibras de alto e baixo módulo. Assim que a matriz atinge a ruptura (ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C), esta fibra apresenta uma tensão muito baixa para esse nível de deformação, devendo ser intensamente deformada (ponto D) para alcançar o mesmo nível de tensão da matriz.

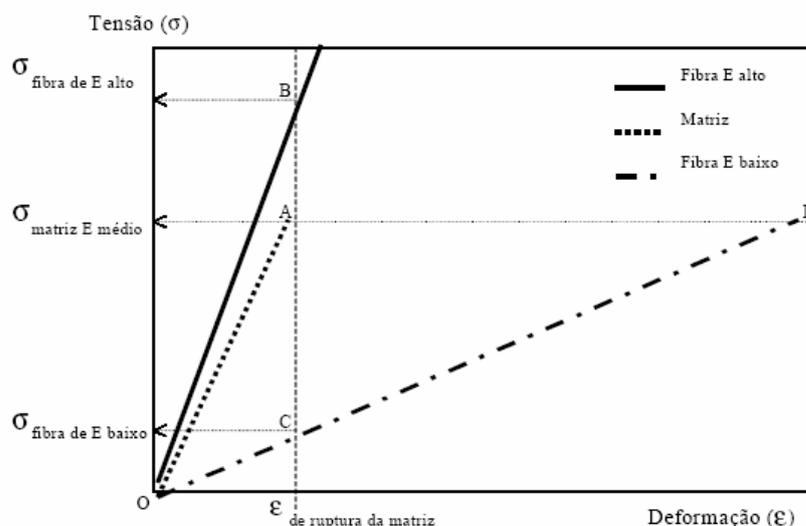


Ilustração 2.1 – Diagrama de tensão-deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO *et al.*, 2002)

Deste modo, a fibra de baixo módulo não conseguirá oferecer uma capacidade de reforço pós-fissuração da matriz ou permitirá uma grande deformação e fissuração da estrutura (ponto D). Isto apenas ocorreria se a resistência mecânica dessa fibra fosse suficiente para suportar a tensão pós-fissuração e se o volume de fibra incorporado na matriz fosse bastante elevado. No outro caso, a fibra de alto módulo apresentará um elevado nível de tensão no momento do colapso do compósito, permitindo-lhe atuar como reforço a partir do ponto B.

2.1 – Fibra de polipropileno

Illston, citado por Rodrigues e Montardo (2002), afirma que o desenvolvimento de polímeros no último século foi possível graças ao crescimento da indústria do petróleo. Desde 1930 o petróleo tem sido a maior fonte de matéria-prima para a fabricação de produtos químicos orgânicos (plásticos, fibras, borracha e adesivos, por exemplo). Zonsveld *apud* Tanesi e Figueiredo (1999) relata que em 1966 a *Shell* desenvolveu e patenteou o processo de fabricação de fibras de polipropileno em forma de filmes fibrilados picotados para utilização em concreto. Esse material ficou conhecido como “*Caricrete*” e era caracterizado por possuir uma adição máxima de fibra de 1% em volume.

O processo de produção das fibras sintéticas inicia-se com a transformação da nafta petroquímica, um derivado do petróleo, em benzeno, eteno, p-xileno e propeno. O polipropileno, por sua vez, é obtido pela polimerização do propeno (C_3H_6). Para a obtenção da fibra segue-se ao processo de extrusão que consiste em pressionar a resina, em forma pastosa, através de pequenos furos finíssimos em uma peça denominada fieira. As fibras tomam sua forma final através do processo de estiramento, que consiste em estirá-las durante o processo de solidificação e logo após estarem solidificadas. A Ilustração 2.2 apresenta um fluxograma simplificado das etapas necessárias para a obtenção de várias fibras sintéticas a partir do processo de refino do petróleo.

Segundo Figueiredo *et al.* (2002), existem dois tipos básicos de fibras de polipropileno: monofilamentos e fibriladas. As fibriladas apresentam-se como uma malha de finos filamentos de seção retangular. A estrutura em malha das fibras de polipropileno fibrilado promove um aumento de adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento. As fibras chamadas de monofilamento consistem em fios cortados em comprimento padrão.

Bentur e Mindess (1990) citam como principais vantagens no uso das fibras de polipropileno o fato de serem resistentes ao meio alcalino, possuírem uma temperatura de fusão relativamente alta ($165^{\circ}C$) e o baixo preço de sua matéria-prima. Citam, porém, como desvantagens sua fraca resistência ao fogo, sensibilidade à luz do sol e ao oxigênio, baixo módulo de elasticidade e fraca aderência com a matriz cimentícia. Vale ressaltar, entretanto, que a matriz envolve as fibras e, conseqüentemente, minimiza sua sensibilidade ao fogo e a outros efeitos do meio ambiente.

A baixa aderência fibra-matriz pode ser explicada pela estrutura molecular do polipropileno que lhe dá propriedades hidrofóbicas. Esta característica acaba por afetar negativamente, também, sua dispersão na matriz. Para sanar esse problema, fibras de polipropileno são especialmente produzidas com tratamento superficial no intuito de melhorar sua molhabilidade quando incorporadas em matrizes cimentícias (BENTUR e MINDESS, 1990).

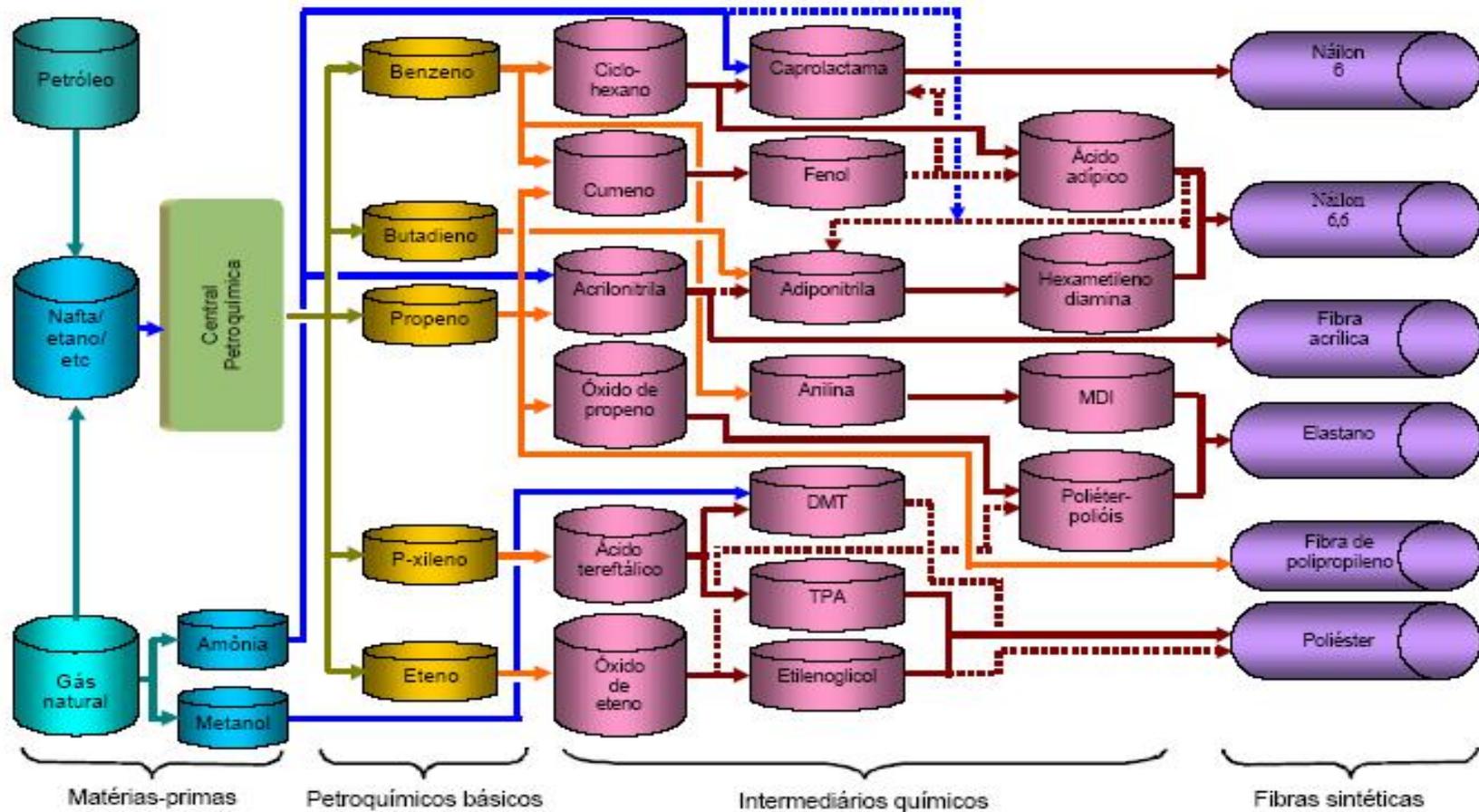


Ilustração 2.2 – Fluxograma simplificado da cadeia de produção das principais fibras sintéticas (Fonte: BNDES)

Segre *et al.* (1998) reiteram que o polipropileno é moderadamente resistente a agentes químicos como ácidos, álcalis e sais. No entanto, todos os polímeros sintéticos e naturais estão sujeitos à deterioração quando expostos ao meio ambiente, como resultado de mudanças irreversíveis em sua composição e estrutura molecular. Os autores concluem que o uso das fibras de polipropileno seria interessante somente quando efeitos a curto prazo são desejados, pois observaram oxidação das fibras após 100 dias de exposição em uma solução água-cimento e redução de aproximadamente 10% na resistência à compressão de compósitos cimentícios após exposição das fibras à radiação ultravioleta. Balaguru e Slattum (1995) também constataram em sua pesquisa a fragilidade da fibra de polipropileno perante exposição à luz ultravioleta, destacando que a degradação da fibra em forma de monofilamentos foi mais rápida do que a das fibras fibriladas.

2.2 – Fibras PET

O polietileno tereftalato (PET) é um tipo de polímero termoplástico da família do poliéster. De acordo com Silva (2005) a primeira amostra desse material foi desenvolvida pelos químicos ingleses Whinfield e Dickson em 1941. No entanto, as pesquisas que levaram a produção em larga escala só começaram após a Segunda Guerra Mundial em laboratórios da Europa e EUA, e era basicamente para utilização em produtos têxteis. Apenas na década de 70 que se iniciou a produção de embalagens com esse tipo de resina.

Segundo a ABIPET o PET pode ser produzido industrialmente por duas vias químicas: esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com etileno glicol (EG) ou transesterificação do dimetil tereftalato (DMT) com etileno glicol (EG). A Ilustração 2.3 apresenta a estrutura molecular do material.

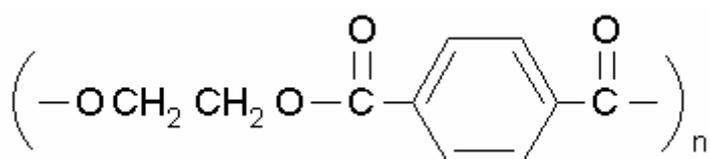


Ilustração 2.3 – Estrutura molecular do PET (JELIDI, 1991)

A reciclagem das embalagens PET está em franca ascensão no mundo todo. Uma das grandes justificativas para isso diz respeito à preservação do meio ambiente, visto que o tempo necessário para a decomposição desse tipo de material é de cerca de 500 anos. Para se ter uma idéia desse potencial constata-se que a demanda mundial é de cerca de 2,2 milhões de toneladas por ano, com previsão de dobrar nos próximos anos (SILVA, 2005). No Brasil o índice de reciclagem pós-consumo no ano de 2004 foi de cerca de 48% do total produzido de PET. A Ilustração 2.4 demonstra a distribuição dos mercados para o PET reciclado no ano de 2003 no Brasil.

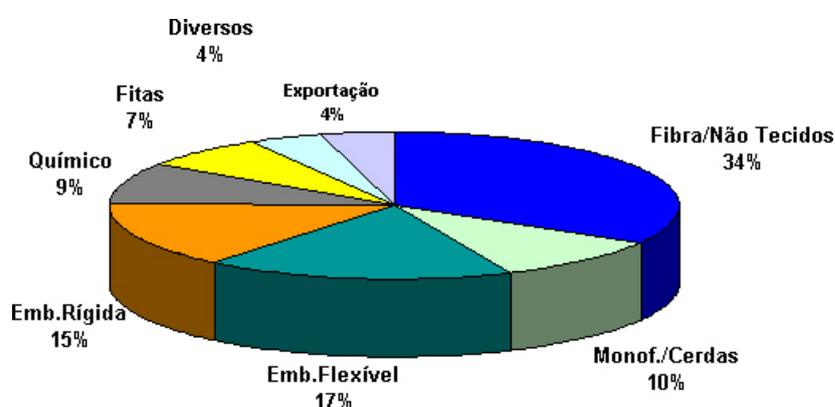


Ilustração 2.4 – Distribuição dos mercados para o PET reciclado (Fonte: ABIPET)

Especificamente na indústria de cordas, a garrafa PET passa pelo processo de reciclagem primária (seleção, separação, limpeza e trituração) e retorna à produção de resina na própria unidade. Segue-se, então, a extrusão do material triturado (*flake*) e posterior produção da fibra (BETIOLI, 2003).

Tem sido demonstrado que as fibras de PET sofrem degradação em ambientes cimentícios, o que acarreta uma diminuição do reforço dos compósitos (JELIDI, 1991; HOUGET, 1992; BETIOLI, 2003).

Segundo Jelidi (1991), o mecanismo químico de degradação da fibra de poliéster consiste em uma despolimerização que ocorre parcialmente ou totalmente em dois grupos: o grupo do anel aromático e o grupo do éster alifático. Sobre esses grupos irão se fixar os íons alcalinos e os íons hidroxilas, respectivamente. A Ilustração 2.5

apresenta o processo de ataque desses íons sobre o PET, bem como a sua transformação em tereftalato de sódio e/ou potássio e/ou cálcio e etileno glicol.

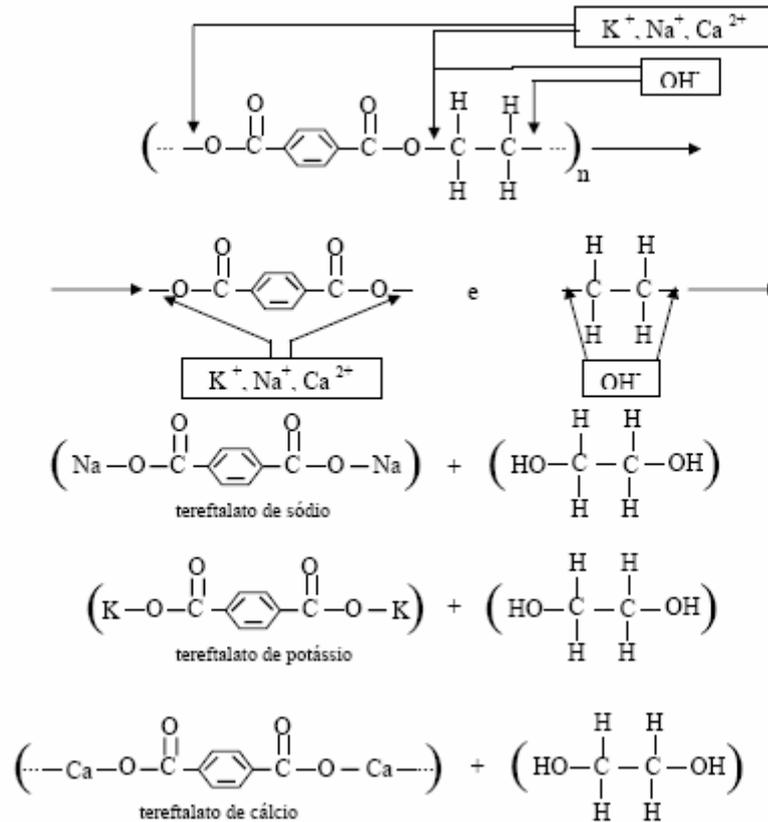


Ilustração 2.5 – Princípio esquemático das reações de despolimerização do poliéster (JELIDI, 1991)

Fechine *et al.* (2001) afirmam em sua pesquisa que o PET é sensível, também, aos raios ultravioletas, e que estes afetam largamente suas propriedades mecânicas. Isso seria conseqüência da extensa degradação química resultante das reações de separação das cadeias e da formação de grupos carboxilas.

Podem-se citar, ainda, outras pesquisas realizadas com a resina obtida da reciclagem do PET. Rebeiz (1995) e Rebeiz *et al.* (1996) utilizaram esse material para produção de concreto-polímero e argamassa-polímero, respectivamente. Os autores relatam melhorias de propriedades mecânicas dos compósitos, ressaltando-se o ganho de resistência de cerca de 80% da resistência final do concreto-polímero em um dia. No entanto, ainda há a necessidade de posteriores pesquisas principalmente no que concerne ao seu comportamento em temperaturas elevadas e a sua durabilidade.

2.3 – Fibras vegetais: a fibra de curauá

De acordo com Sena e Colares (1996), dá-se o nome de curauá a uma planta cujas folhas são formadas por uma fibra têxtil de natureza ligno-celulósica. Trata-se de uma bromeliácea, do tipo *ananas*, especificamente *Ananas erectipholius*. Existem duas espécies de curauá, uma de folha roxo-avermelhada, que se desenvolve mais, e outra de folha verde-clara, denominada de curauá branco (Ilustração 2.6). As folhas medem cerca de cinco centímetros de largura por cinco milímetros de espessura e o comprimento é de aproximadamente 1,5 metros. O fruto é semelhante em aspecto e sabor ao do abacaxi, mas apresenta menor tamanho. Cada planta produz de 20 a 24 folhas, sendo delas extraídas cerca de dois quilos de fibra. A máquina utilizada para beneficiamento da planta (Ilustração 2.7) tem o mesmo mecanismo de funcionamento da utilizada para o sisal, planta cultivada no nordeste brasileiro principalmente.

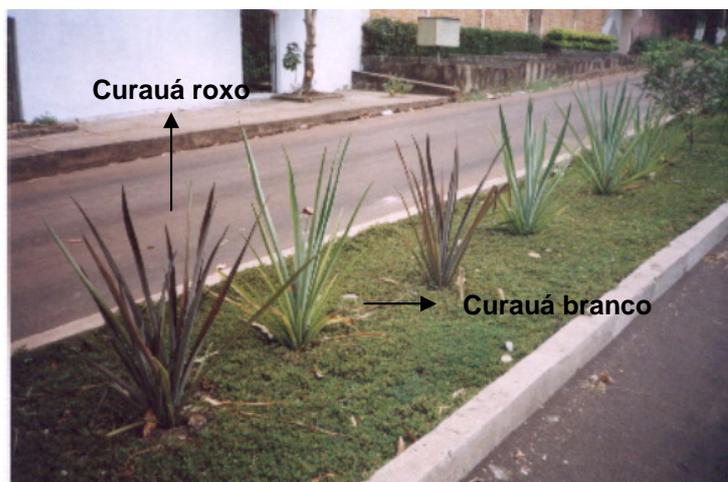


Ilustração 2.6 – As duas espécies de curauá: o roxo e o branco



Ilustração 2.7 – Máquina utilizada para o desfibramento do curauá, popularmente chamada de “periquita”

O curauá é uma planta nativa da Amazônia e era explorada pelos índios desde os tempos pré-colombianos para a produção de uma fibra que seria utilizada na confecção de cordas para arreios em cavalos. Os primeiros plantios racionais foram iniciados no início do século XX em larga faixa do Médio Amazonas, na região oeste do Pará, principalmente no município de Santarém. Após realização de simpósios e testes de pesquisa, a fibra de curauá demonstrou possuir excelentes propriedades físicas, atraindo a atenção da indústria automotiva (SENA, 1999). Iniciou-se, então, a produção de alguns protótipos utilizando a fibra natural do curauá em substituição à fibra de vidro, como demonstrado na Ilustração 2.8. Além da indústria automobilística, outros setores visados são os fabricantes de piscinas, pranchas de surf, caixas d’água, tanques e caiaques. Vale ressaltar, ainda, que da planta podem ser produzidos tecidos, papel e até um tipo de anestésico.



Ilustração 2.8 – Peças automobilísticas produzidas com reforço de fibra de curauá

Como pesquisas sobre a fibra de curauá e seu comportamento em ambientes cimentícios são praticamente inexistentes, optou-se por apresentar o comportamento de outras fibras vegetais, partindo-se do pressuposto de que seu desempenho seja semelhante.

Segundo Bentur e Mindess (1990) a microestrutura das fibras vegetais é muito complexa. Cada fibra é, na realidade, formada por várias microfibras, como mostrada na Ilustração 2.9(a). A estrutura de uma célula individual é apresentada, por sua vez, na Ilustração 2.9(b). Essas células são compostas principalmente por longas moléculas de celulose (grau de polimerização de cerca de 25000), hemicelulose e lignina. Estes últimos dois componentes estão localizados principalmente na lamela média que é responsável pela ligação das microfibras.

Um dos grandes inconvenientes do uso de fibras vegetais em compósitos cimentícios diz respeito à sua deficiente durabilidade. Isso se deve, principalmente, pela fragilidade de seus constituintes ao ataque alcalino proveniente da água de poro dos produtos de hidratação da pasta de cimento. Gram, citado por Bentur e Mindess (1990), sugere que, em fibras de sisal, o principal mecanismo do ataque alcalino é resultante da dissolução e decomposição da hemicelulose e lignina da lamela média, levando à quebra da ligação entre as microfibras individuais. Johnston (2001) afirma, também, que a celulose é mais resistente aos álcalis, e, por conseqüência, procede-se a tratamentos que reduzam a quantidade de hemicelulose e lignina a fim de reduzir essa deterioração. Esses tratamentos variam desde a simples lavagem das fibras com água até tratamentos químicos de polpação das mesmas.

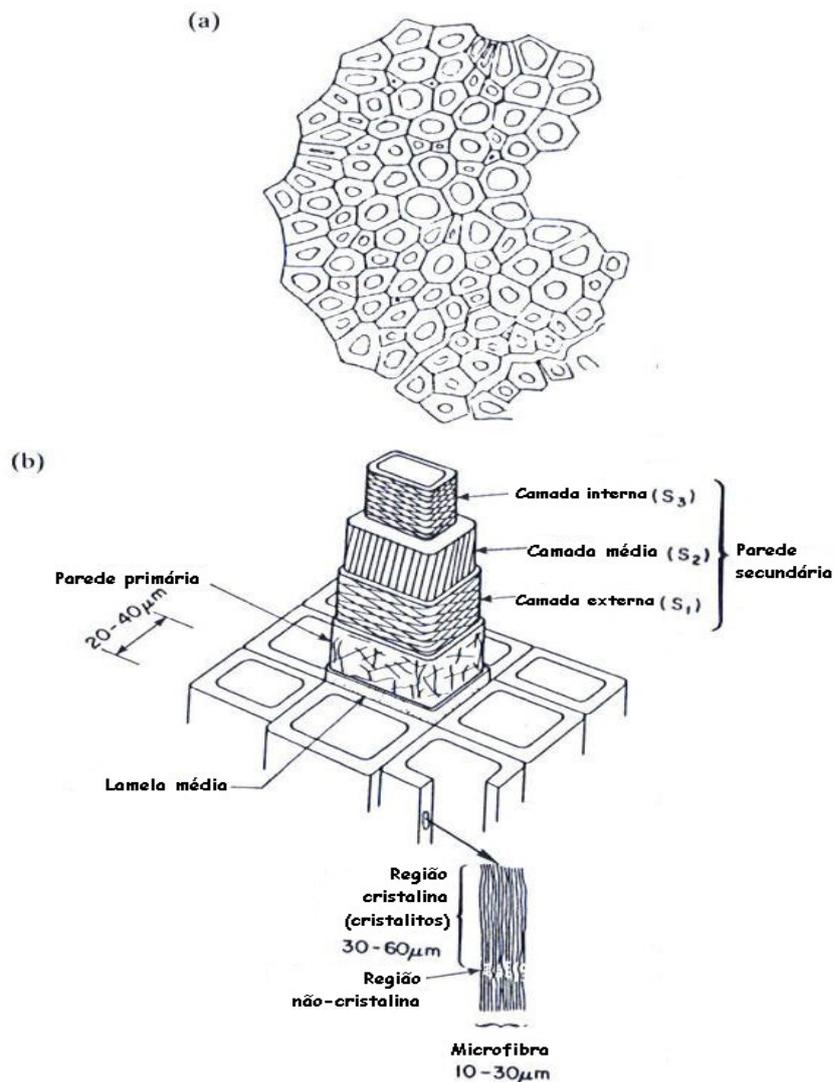


Ilustração 2.9 - (a) Seção transversal de fibras de sisal (NUTMAN *apud* BENTUR e MINDESS, 1990);
 (b) Estrutura de células de fibra de celulose (ILLSTON *et al.* *apud* BENTUR e MINDESS, 1990)

Outro problema no que concerne ao uso de fibras vegetais em compósitos cimentícios é o processo de petrificação (mineralização). Isso ocorre quando os vazios das fibras são preenchidos por produtos provenientes da hidratação do cimento. Esse fenômeno acaba por enrijecer a fibra, tornando-a frágil e impedindo-a de se deformar, o que resulta em um decréscimo, principalmente, na tenacidade do compósito.

Savastano Júnior (1998) afirma que as fibras vegetais possuem, como consequência da sua estrutura, elevada capacidade de absorção de água e inchamento. Isso ocasiona o surgimento de uma zona de transição próxima à fibra com relação água/cimento superior ao do resto da matriz, além de uma elevada concentração

local de macrocristais de portlandita e microfissuras. Conseqüentemente, há uma diminuição da resistência da fibra e da sua aderência com a matriz.

Segundo Aggarwal e Singh (1990), a adição de fibras vegetais influencia nos tempos de pega inicial e final de pastas de cimento. Os autores relatam em sua pesquisa que os componentes solúveis em água das fibras de coco e sisal retardam e, ocasionalmente, inibem o processo normal de pega. Ainda que se utilizem aditivos aceleradores de pega com o intuito de correção dessa adversidade, constatou-se que a resistência final atingida é inferior àquela dos compósitos sem fibra. Essa inibição é causada, principalmente, pela hemicelulose, amido, açúcares, taninos, alguns tipos de fenóis e lignina que são lixiviados tanto pela água como pela solução de hidróxido de cálcio (JOHNSTON, 2001).

Savastano Júnior (2000) afirma que o ataque biológico das fibras não representa maiores problemas, já que as matrizes, por possuírem pH alcalino, inibem a ação de fungos.

De acordo com vários pesquisadores, algumas alternativas poderiam ser utilizadas a fim de impedir ou diminuir sensivelmente a degradação ou a influência negativa das fibras vegetais nos compósitos cimentícios, tais como a proteção da fibra com polímeros e hidro-repelentes (DELVASTO *et al.*, 2004; RAMAKRISHNA *et al.*, 2004), utilização de matrizes de baixa alcalinidade (LEAL *et al.*, 2004; SAVASTANO JÚNIOR *et al.*, 2001; MARIKUNTE e SOROUSHAN, 1994), a impermeabilização superficial do componente construtivo por meio de pintura PVA, e a possibilidade de redução da alcalinidade do sistema por carbonatação acelerada da matriz (SILVA e JOHN, 2003).

Como o processo de degradação é relativamente lento, compósitos cimentícios com fibras vegetais podem ser empregados nas estruturas em que a resistência ao impacto e ductilidade são necessárias por pequeno período de tempo, como, por exemplo, durante seu transporte ou montagem (SAVASTANO JÚNIOR, 2000).

3 – INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

O propósito da utilização de fibras em compósitos é a melhoria das propriedades de uma matriz cimentícia inerentemente fraca, frágil e propensa à fissuração. Dependendo do tipo e teor de fibra utilizado, essas melhorias podem ser notadas em vários aspectos: resistência à tração ou flexão, ductilidade, tenacidade ou capacidade de absorção de energia, resistência ao impacto, resistência à fadiga, resistência à fissuração, permeabilidade e durabilidade (JOHNSTON, 2001).

Taylor, citado por Rodrigues e Montardo (2002), aborda os principais parâmetros relacionados com o desempenho dos materiais compósitos cimentícios:

- Teor de fibra: um alto teor de fibra confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pelas fissuras;
- Módulo de elasticidade da fibra: quanto maior o módulo de elasticidade da fibra maior a probabilidade de haver o seu arrancamento;
- Aderência entre fibra e matriz: uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;
- Resistência da fibra: aumentando-se a resistência da fibra, aumenta-se, também, a ductilidade do compósito. Esse parâmetro dependerá das características pós-fissuração desejadas, assim como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;
- Deformabilidade da fibra: a ductilidade do compósito poderá ser aumentada se fibras com alta deformação na ruptura forem utilizadas. Isto é causado pelo fato de estruturas com fibras de elevado grau de deformabilidade consumirem energia sob a forma de alongamento da fibra;
- A compatibilidade entre a fibra e a matriz: a compatibilidade química e física entre as fibras e a matriz é extremamente importante. Em curto prazo, fibras que absorvem água podem causar excessiva perda de trabalhabilidade nos compósitos, além de sofrerem variação de volume e prejudicarem a aderência

fibra/matriz. Em longo prazo pode ocorrer degradação de alguns tipos de fibra pelos álcalis provenientes da hidratação do cimento;

- Comprimento da fibra: quanto menor for o comprimento das fibras, maior será a probabilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será mais eficiente se o seu comprimento for capaz de permitir que a tensão cisalhante proporcione o desenvolvimento de uma tensão de tração igual a sua resistência à tração.

Bentur e Mindess (1990) afirmam, ainda, que a eficiência das fibras em melhorar as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias frágeis é controlada:

- Pelos processos em que o carregamento é transferido da matriz para as fibras;
- Pelo efeito “ponte” das fibras através das fissuras da matriz, o que ocorre em estágios mais avançados de carregamento.

Há que se considerar dois casos para os efeitos de transferência de tensões: o pré-fissura e o pós-fissura da matriz cimentícia.

No caso pré-fissura, a transferência de tensão elástica é dominante e os deslocamentos longitudinais da fibra e da matriz na interface são geometricamente semelhantes. A tensão desenvolvida na interface é uma tensão de cisalhamento que obriga a distribuição do carregamento externo entre as fibras e a matriz (módulos de deformação diferentes), de forma que as deformações desses dois componentes na interface permanecem iguais (BENTUR e MINDESS, 1990).

De acordo com os autores, em estágios mais avançados de carregamento, geralmente ocorre a perda de aderência na interface. Acaba ocorrendo o deslocamento relativo entre a fibra e a matriz e as tensões são transferidas através do atrito fibra-matriz. O mecanismo de transferência por atrito é o predominante na etapa pós-fissuração, onde o gasto energético para o arrancamento da fibra é muito elevado, o que caracteriza a alta tenacidade dos compósitos com fibras. Propriedades como as máximas resistência e deformação são controladas por esse tipo de transferência de tensão.

Na Ilustração 3.1 apresenta-se o mecanismo de reforço das fibras atuando como “ponte” de transferência de tensões através da fissura.

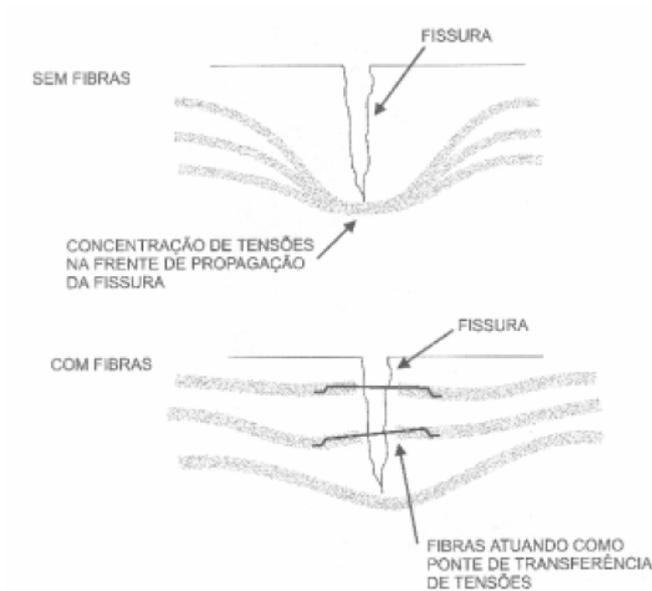


Ilustração 3.1 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões
(NUNES e AGOPYAN, 1998)

Tanesi e Figueiredo (1999) relatam, ainda, que o efeito de ponte de transferência de tensões promove tanto o aumento da deformação para o aparecimento da primeira fissura, como da deformação até a ruptura do compósito, uma vez que o mesmo continua suportando carregamento e se deformando durante os processos de descolamento e arrancamento das fibras.

O diâmetro da fibra também é de fundamental importância para o desenvolvimento das resistências ao cisalhamento e à tração. A relação l/d (fator de forma) é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência de aderência fibra/matriz na ruptura. Ou seja, se a resistência à tração da fibra for alta (fibra de aço, por exemplo), então ou a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou fibras de alta relação l/d deverão ser empregadas. Por este motivo, fibras de aço são, geralmente, produzidas com seções transversais variáveis ou extremidades fletidas para promover ancoragem (ACCETTI e PINHEIRO, 2000).

A seguir, apresenta-se a influência da adição de fibras em algumas propriedades de compósitos cimentícios.

3.1 – Propriedades no estado fresco

Segundo Mehta e Monteiro (1994), é bastante conhecido que a incorporação de qualquer tipo de fibra no concreto reduz a trabalhabilidade. Essa perda é proporcional à concentração volumétrica de fibras no compósito. Desta forma, os autores afirmam que o ensaio de abatimento não é um bom índice de trabalhabilidade para esse tipo de material.

Johnston (2001) afirma que a adição de fibras que absorvam água pode causar redução na fluidez da mistura. Até mesmo a adição de fibras não absorventes em pastas, argamassas e concretos reduz a fluidez da mistura devido ao seu formato e sua alta superfície específica. O autor afirma que a relação entre o teor de fibras máximo com a trabalhabilidade ou consistência adequada depende da fluidez e do volume da pasta de cimento, do tamanho máximo do agregado graúdo, quando presente, e da relação de aspecto (l/d) da fibra.

Vale ressaltar, entretanto, que compósitos com a adição de fibras de polipropileno em baixos teores quando submetidos à vibração apresentam trabalhabilidade adequada para os processos convencionais de manipulação do concreto (FIGUEIREDO *et al.*, 2002). Essa coesão dada pela adição de fibras, tanto em concretos como em argamassas (OLIVEIRA *et al.*, 2003), pode ser favorável em algumas aplicações como o concreto (argamassa) projetado e pré-moldado, já que minimiza a reflexão e aumenta a estabilidade dimensional do compósito fresco recém-desformado.

Ramakrishna *et al.* (2004) pesquisaram argamassas poliméricas com a incorporação de fibra de sisal. Em sua pesquisa observaram que a perda de trabalhabilidade resultante da incorporação de materiais fibrosos pode ser evitada ou substancialmente diminuída pela adição de polímeros.

Em estruturas de concreto ou de argamassa, caso a quantidade de água perdida por unidade de área exposta ao meio ambiente for maior que a quantidade que sobe à superfície pelo efeito da exsudação, pode ocorrer o aparecimento de fissuras por retração plástica (NEVILLE, 1997). No caso do concreto, as fissuras se desenvolvem acima das obstruções como barras de aço ou agregado graúdo, por exemplo, para uniformizar o assentamento. Se o concreto próximo à superfície estiver muito rígido para fluir e não possuir resistência suficiente para suportar as tensões de tração causadas pela retração, haverá o aparecimento de fissuras (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Bastos (2001) ressalta, ainda, que, para as argamassas de revestimento, além de estarem presentes os fenômenos de retração próprios dos materiais cimentícios, há, ainda, a influência da perda de água por sucção pela base que pode acarretar, também, o aparecimento de fissuras. Por este motivo, o estudo da retração torna-se mais complexo, exigindo uma abordagem que considere fatores intrínsecos (composição da mistura e espessura da camada de argamassa) e extrínsecos (agentes atmosféricos e natureza do substrato) ligados ao desempenho do revestimento e da construção como um todo.

Segundo Bentur e Mindess (1990), fibras de baixo módulo de deformação em baixos teores (menos que 0,3% em volume) ajudam a reduzir a quantidade de fissuras proveniente da retração plástica, que é um problema comum em argamassas de revestimento. Estudos realizados por Tolêdo Filho e Sanjuán (1999) demonstraram que fibras de sisal são extremamente eficazes na redução da retração plástica de argamassas, na redução do tempo de aparecimento da primeira fissura e no controle da fissuração, quando comparadas com argamassas com fibras de polipropileno. De acordo com os autores isso se deve ao fato de que nas primeiras idades o módulo de elasticidade dessas fibras ainda é maior que o da matriz cimentícia.

Tanesi e Figueiredo (1999) verificaram que a adição de fibras de polipropileno reduz a exsudação, provavelmente devido a uma redução do assentamento. Essa redução pode ser conseqüência do fato das fibras formarem uma malha que estabiliza a matriz, prevenindo o assentamento e a segregação dos materiais mais pesados da mistura, além de poderem contribuir com o aumento da área de molhagem. Essa

diminuição pode ter sido um dos fatores da menor fissuração por retração observada na pesquisa.

Sanjuán *et al.* (1997) e Soroushian e Ravanbakhsh (1999) também constataram a diminuição do aparecimento de fissuras provenientes da retração plástica em argamassas com fibras de polipropileno e em concretos para reparos com fibras de celulose, respectivamente. Vale ressaltar que a incorporação de fibras de celulose, inclusive, aumentou a resistência inicial do concreto, possibilitando uma redução de 10 a 20% no teor de cimento e aditivo acelerador.

Atenta-se, entretanto, que a simples utilização de fibras não impede o surgimento de fissuras. São necessários, sobretudo, boas técnicas de aplicação, cura e acabamento (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

3.2 – Propriedades no estado endurecido

Johnston (2001) afirma que as fibras na pasta de cimento, argamassa ou concreto podem ter pelo menos três efeitos importantes no estado endurecido desses compósitos.

O primeiro efeito é a tendência de aumentar a tensão sob a qual a matriz fissura. Este comportamento é mais evidente sob carregamentos que gerem esforços de tração direta, flexão e cisalhamento.

O segundo efeito é a melhora da capacidade de deformação ou ductilidade de materiais frágeis, devido ao aumento da capacidade de absorção de energia ou tenacidade. Esse aumento pode ocorrer mesmo quando o acréscimo de resistência for mínimo.

O terceiro e último efeito é a capacidade de inibir ou modificar o desenvolvimento de fissuras ao reduzir a abertura e o espaçamento entre elas. Esse efeito depende do tipo e quantidade de fibras incorporadas, assim como da natureza do mecanismo de fissuração.

3.2.1 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À FLEXÃO

A princípio acreditava-se que a incorporação de fibras em matrizes cimentícias aumentaria, substancialmente, sua resistência à tração e à flexão. Isso porque as fibras seriam responsáveis pela obstrução da propagação de microfissuras, retardando, assim, o aparecimento de fissuras de tração e aumentando a resistência à tração do material. No entanto, pesquisas demonstraram que os compósitos cimentícios com fibras não apresentaram melhoras substanciais na resistência quando comparados às misturas sem fibra (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Entretanto, enquanto as resistências últimas à tração não aumentaram apreciavelmente, as deformações de tração na ruptura aumentaram.

Apesar disso, Coutts e Warden (1992) demonstraram em sua pesquisa que a incorporação de polpa de sisal em argamassas, em um volume aproximado de 8% em massa, pode dobrar a resistência à flexão do compósito quando comparado à matriz sem fibras.

Esse comportamento também foi observado por Garcés *et al.* (2005) para argamassas com fibras de carbono. Em sua pesquisa com corpos de prova (4x4x16 cm), os autores observaram um aumento na resistência à flexão de 14% quando incorporado um teor de 0,5% de fibra. Para teores acima do mencionado, o aumento de resistência não é significativo, podendo até ocorrer sua diminuição. Isso, provavelmente, se deve ao aumento de porosidade do material provocado pelo maior teor de fibra de carbono.

Okafor *et al.* (1996) avaliaram o comportamento mecânico de argamassas com fibras provenientes de uma palmeira. De acordo com a pesquisa, a resistência à tração do compósito diminuiu proporcionalmente ao aumento do teor de fibra incorporada na mistura. Já a resistência à flexão aumentou em cerca de 33% para um volume ótimo de fibra de 2%.

Em pesquisas com a adição de poliéster, nylon, fibra acrílica e *aramid* (WANG *et al.*, 1987) e com a adição de fibra de PET (PELISSER, 2002) foi constatado um aumento significativo na resistência à flexão de concretos. Bentur e Mindess (1990) relatam,

ainda, que a incorporação de fibras de aço tem, geralmente, um maior efeito na resistência à flexão de concretos, com acréscimos de mais de 100% se comparado a concretos sem fibras. Esse aumento na resistência à flexão é influenciado não apenas pelo volume de fibras, mas, também, pelo fator de forma. Quanto maior for o fator de forma, maior será o acréscimo na resistência.

3.2.2 – TENACIDADE

Geralmente, tenacidade é definida como a área sob a curva carga-deflexão, proveniente do ensaio de flexão, que representa a energia dissipada no material até certa deformação (BENTUR e MINDESS, 1990; FIGUEIREDO, 2000). Paciornik (2006), por sua vez, define que tenacidade é a capacidade que o material possui de absorver energia mecânica até a fratura.

Segundo Nunes e Agopyan (1998), a tenacidade do compósito é diretamente proporcional à aderência fibra-matriz ou à quantidade de fibras por unidade volumétrica de matriz que possam interceptar uma fissura e atuar como ponte desta. No primeiro caso, uma das formas de aumentar a resistência ao arrancamento da fibra é aumentando seu comprimento, melhorando assim a transferência de tensões por atrito. Para o segundo caso, há duas possibilidades: aumento do teor de fibras incorporado à matriz ou diminuição do diâmetro equivalente da fibra, mantendo seu comprimento constante.

Os autores asseguram que um aumento no fator de forma da fibra (l/d) é capaz de representar tanto um aumento no comprimento da fibra quanto uma diminuição no diâmetro equivalente. Conseqüentemente, o aumento da relação l/d pode representar um aumento na resistência ao arrancamento da fibra ou um aumento no número de fibras que podem interceptar uma possível fissura, ou, ainda, os dois casos concomitantemente. De qualquer forma, quanto maior for o fator de forma de fibra, maior será a tenacidade do compósito.

Tanesi e Figueiredo (1999) afirmam, ainda, que o aumento na tenacidade do compósito pode levar a diminuição da fissuração.

Griffiths e Ball (2000) observaram em sua pesquisa um aumento de 55% na tenacidade de concreto-polímero quando foram incorporados 1,5% (em peso) de fibra de vidro no material. Bauer e Cortez (2001) também observaram substancial aumento no valor da tenacidade em argamassas de revestimento com a adição de fibras de nylon ou polipropileno.

Vale ressaltar, entretanto, que dependendo do tipo de fibra utilizado pode haver diminuição da tenacidade no decorrer do tempo. Dias *et al.* (2004) submeteu amostras de fibrocimento (com fibras de celulose e PVA) a ciclos de molhagem e secagem e observou redução na sua tenacidade. De acordo com o autor, a forma como essa propriedade foi alterada sugere que ocorreu degradação das fibras de origem vegetal.

3.2.3 – ADERÊNCIA

Rosello *apud* Carasek (1996) afirma que a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno essencialmente mecânico, causado pela penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre a rugosidade da base de aplicação. O que ocorre é que parte da água de amassamento, que possui em dissolução ou estado coloidal os componentes do aglomerante, adentra pelos poros e cavidades do substrato. Com o passar do tempo, esses precipitados intracapilares (géis de silicato ou hidróxido de cálcio da cal) exercem ação de ancoragem da argamassa à base.

A autora afirma, ainda, que os revestimentos devem apresentar capacidade de deformação apropriada para que, se ocorrer pequenos movimentos da alvenaria ou da estrutura, a camada de argamassa possa se deformar suficientemente sem que haja seu rompimento ou para que, no máximo, ocorram microfissuras, não havendo dessa forma o comprometimento da aderência, estanqueidade e durabilidade.

Há uma grande deficiência de trabalhos que enfoquem a influência da incorporação de fibras na aderência de argamassas de revestimento. No entanto, Zhu e Chung (1997) analisaram o efeito de fibras de carbono na aderência de tijolos com a argamassa de assentamento. De acordo com o estudo, a incorporação da fibra

aumentou a aderência entre o conjunto em 50% sob tração e 44% sob tensão cisalhante sob condições normais de aplicação. De acordo com os autores, esse aumento deve-se, provavelmente, à redução da retração por secagem causada pela adição da fibra. Volumes incorporados maiores que o ótimo levaram a uma diminuição dessa propriedade acarretada pela maior porosidade da argamassa.

Esse mesmo comportamento foi observado por Chen *et al.* (1995) em sua pesquisa sobre a aderência entre argamassas. Segundo os autores, a incorporação de 0,35% de fibras de carbono (em volume) aumentou a resistência de aderência entre argamassas com fibra e argamassas sem fibra em até 89%. O aumento é proporcionado, mais uma vez, pela diminuição da retração por secagem imputada à adição das fibras.

Toutanji (1999) estudou o desempenho de concretos com cimentos expansivos com a adição de fumo de sílica e fibras de polipropileno. Segundo o autor, o concreto com cimento expansivo, utilizado como reparo de estruturas, apresentou um aumento substancial de aderência ao substrato diretamente proporcional ao teor de fibras.

3.2.4 – PERMEABILIDADE A ÁGUA

Em compósitos cimentícios o papel da água deve ser visto sob uma perspectiva adequada, já que, como parte integrante necessária para as reações de hidratação do cimento e como agente de plasticidade da mistura, está presente desde o começo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com Neville (1997), a permeabilidade não é função simples da porosidade, mas depende, também, das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam, ainda, que argamassas ou concretos apresentam coeficientes de permeabilidade maiores do que pastas de cimento com a mesma relação água/cimento e grau de maturidade. Segundo os autores isso se deve à existência de microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de

cimento. Conforme o tamanho e a granulometria do agregado as características de exsudação de uma mistura é afetada e, por sua vez, influencia a zona de transição. As fissuras existentes na zona de transição têm largura maior que a maioria das cavidades capilares presentes na matriz da pasta de cimento e, conseqüentemente, são capazes de estabelecer as interconexões que aumentam a permeabilidade do sistema.

Há carência em estudos que enfoquem a influência da incorporação de fibras na permeabilidade de compósitos cimentícios. No entanto, Huang (1997) estudou a permeabilidade a água em grautes com fibra de polipropileno (1% em massa), bentonita e fumo de sílica. Para relações água/aglomerante de até 0,7, os grautes com fibra apresentaram permeabilidade semelhante ao material sem fibra. Contudo, para relações acima de 0,9, o coeficiente de permeabilidade encontrado foi de 2 a 3 ordens maiores. O autor relata que, para esse último caso, seria necessário que se fizesse uma redução no teor de fibras utilizado.

3.2.5 – RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A adição de fibras em compósitos cimentícios é altamente benéfica no melhoramento do seu desempenho sob carregamentos dinâmicos. Isso é devido, principalmente, à sua alta capacidade de tolerância às deformações e suporte de cargas na zona pós-fissuração (BENTUR e MINDESS, 1990). Segundo Figueiredo (2000), o reforço com fibras aumenta entre 3 e 10 vezes a resistência a esforços dinâmicos como cargas explosivas, queda de massas e cargas dinâmicas de compressão, flexão e tração.

Ramakrishna e Sundararajan (2005) estudaram a influência da incorporação de quatro diferentes tipos de fibras vegetais na resistência ao impacto de placas de argamassa. Em sua pesquisa constataram que a adição das fibras aumentou de 3 a 18 vezes a resistência ao impacto quando comparados com a argamassa referência.

Pelisser (2003) também constatou um aumento considerável na resistência ao impacto para concretos com a incorporação de fibras de PET. O autor observou um aumento nessa propriedade de 10%, 233% e 533% para os volumes de 0,05%,

0,18% e 0,30% de fibras de PET, respectivamente, quando comparado à matriz sem fibra com idade de 35 dias. Vale ressaltar, no entanto, que para a idade de 150 dias a matriz com fibra comportou-se como a matriz referência. Isso se deve, provavelmente, a degradação da fibra de PET no meio cimentício.

3.2.6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Apesar da resistência à compressão não ser uma propriedade de extrema importância para argamassas de revestimento, Ceotto *et al.* (2005) citam-na como parâmetro fundamental para o projetista de revestimento. Cincotto *et al.* (1995) afirmam, ainda, que movimentações térmicas podem gerar esforços de compressão ou tração nas argamassas de revestimento, dependendo se esse movimento for de expansão ou retração.

Forças de compressão normalmente não causam fissuração da matriz, pelo menos não diretamente em um plano perpendicular à tensão como acontece em esforços de tração. No entanto, o ensaio à compressão uniaxial usualmente produz uma combinação de ruptura por cisalhamento próximo das extremidades do corpo de prova com inchamento lateral da seção lateral não-confinada acompanhada por fissuras paralelas ao eixo de carregamento. Fibras podem afetar essas facetas do comportamento uniaxial à compressão que envolve forças de cisalhamento e deformações por tração. Isso fica evidente na parte pós-fissuração do gráfico tensão-deformação do compósito (JOHNSTON, 2001). O autor relata que essa melhoria dada pelas fibras é interessante dependendo do tipo de aplicação que será dada à estrutura na prática. Por exemplo, sob condições extremas, como terremotos, a incorporação de fibras pode auxiliar reduzindo o grau de desintegração e perda de integridade estrutural associados com grandes deformações na compressão.

Bauer e Cortez (2001) constataram em sua pesquisa que a adição de fibras de nylon e de polipropileno pouco influenciou na resistência à compressão de argamassas de revestimento. Este mesmo comportamento foi encontrado por Pelisser (2002) em seu estudo sobre a incorporação de fibras de PET em concretos.

No entanto, Fujjyama *et al.* (1999) e Modler *et al.* (2002) observaram, em seus estudos, que a adição de fibras de sisal em argamassas e a adição de fibras de aço em concretos, respectivamente, apresentaram uma tendência a diminuir o valor de resistência à compressão dos compósitos. Huang (1997) constatou em sua pesquisa que a incorporação de fibras de polipropileno em grautes também diminuiu sensivelmente a sua resistência à compressão.

3.2.7 – RESISTÊNCIA A ALTAS TEMPERATURAS

De acordo com Cincotto *et al.* (1995), a argamassa de revestimento contribui para a resistência ao fogo da parede. Entretanto não se pode atribuir essa propriedade apenas ao revestimento. Segundo os autores, observa-se um nítido aumento na resistência ao fogo em paredes revestidas, em relação às não revestidas, sob as mesmas condições.

Como há uma grande carência de estudos sobre a performance de argamassas com fibras sob a ação de altas temperaturas, apresenta-se a seguir o desempenho de concretos com fibras, acreditando-se que possa haver uma correlação entre o comportamento dos dois materiais.

Nince *et al.* (2003) afirmam que as mudanças que vêm sendo feitas na composição e dosagem do concreto com o objetivo de melhorar algumas de suas propriedades (resistência, reologia, ductilidade, compacidade e durabilidade, por exemplo) podem ter sido responsáveis pela maior susceptibilidade ao lascamento explosivo, também conhecido como *spalling*, principalmente dos concretos de alta resistência expostos a altas temperaturas. Este fenômeno ocorre, geralmente, sob ação conjunta de dois mecanismos: pressão nos poros internos e tensões térmicas geradas por gradientes térmicos.

Zeiml *et al.* (2006) consideram que a permeabilidade do concreto é a principal causa do lascamento. A Ilustração 3.2 demonstra o que acontece quando a permeabilidade não é suficiente para evitar o processo de *spalling*. Na figura pode-se constatar que quando o concreto é submetido à alta temperatura o vapor de água e o ar são parcialmente evacuados para a atmosfera, mas também migram para o centro da

matriz, onde, quando atingido condições termodinâmicas adequadas, se condensa. Essa migração acaba por formar uma camada saturada que age como uma parede impermeável para o fluxo dos gases. Se a permeabilidade da zona seca do concreto não for suficiente para evitar um contínuo aumento da pressão proveniente da vaporização da água, o lascamento ocorre.

Outro fator que pode influenciar a ocorrência ou não do *spalling* é a natureza do agregado (NINCE *et al.*, 2003). Isso ocorre pois durante o aquecimento do concreto as deformações entre a pasta e o agregado são distintas. No decorrer da exposição (em torno de 300°C) o agregado dilata, enquanto a pasta retrai (TAYLOR *apud* NINCE *et al.*, 2003).

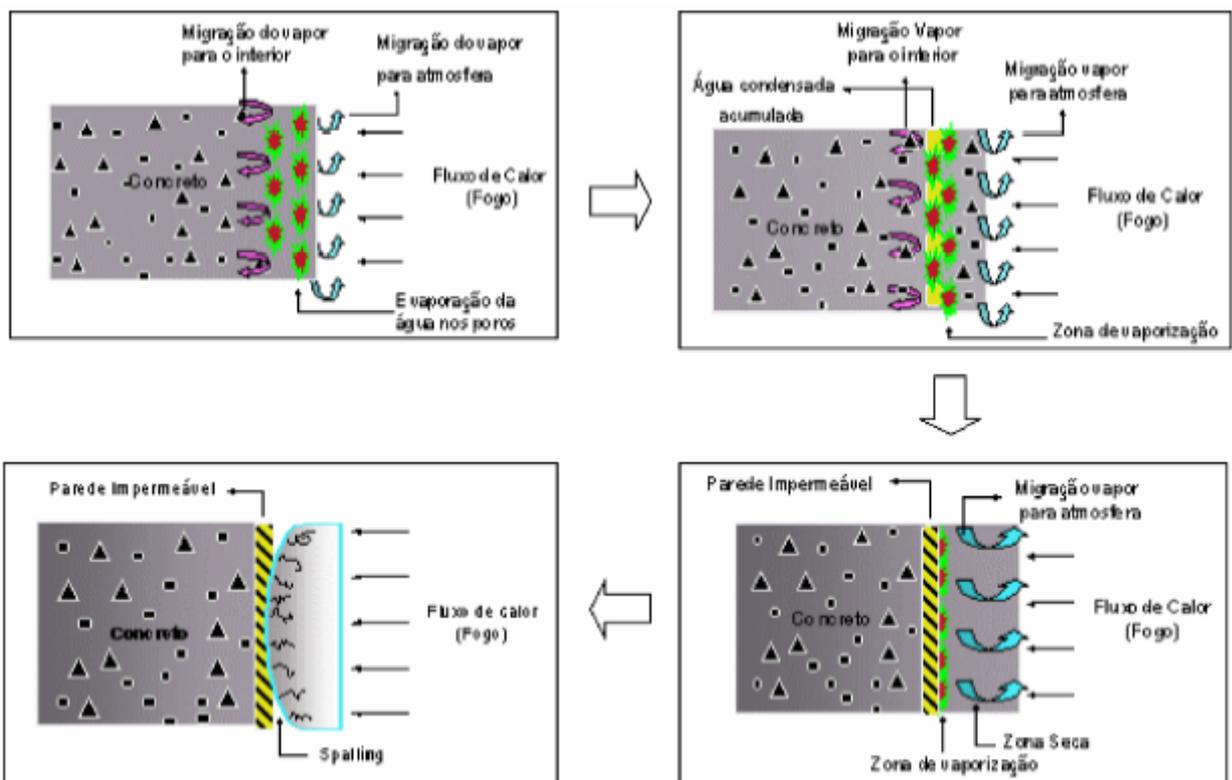


Ilustração 3.2 - Passos que levam ao lascamento do concreto quando exposto ao fogo (NINCE *et al.*, 2003)

A resistência ao fogo do concreto pode ser aprimorada com a incorporação de fibras de polipropileno. Isso ocorre pois as fibras possuem baixa temperatura de fusão (cerca de 165°C) e ao se volatilizarem criam pequenos vazios e canais que permitem a liberação dos gases formados pela evaporação da água interna da

camada de concreto. Desta forma, as tensões de tração interna diminuem e a deterioração do concreto é evitada ou reduzida sensivelmente (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Figueiredo *et al.* (2002) afirmam que uma das promissoras aplicações dos concretos com fibra de polipropileno é a sua utilização no revestimento secundário de túneis. Os autores relatam que a incorporação das fibras impede a ocorrência do destacamento, fazendo com que as camadas superficiais do concreto, ainda que calcinadas, protejam as mais internas e retardem ou evitem o colapso do túnel. No Brasil isso se justifica pelo fato de que os túneis são geralmente executados em maciços argilosos, propiciando um maior risco caso haja colapso da estrutura.

Os estudos de Nince *et al.* (2003) e de Zeiml *et al.* (2006) reiteram essa propriedade conferida ao concreto pela incorporação de fibras de polipropileno, demonstrando que a porosidade do concreto aumenta após exposição a altas temperaturas.

Purkiss *apud* Bentur e Mindess (1990) constatou que, abaixo de 600°C, concretos com fibra de aço apresentaram melhor desempenho na retenção de resistência dos que concretos comuns.

Em relação à incorporação de fibras de vidro no concreto, Majumdar e Nurse citados por Bentur e Mindess (1990), ressaltam que o risco da fabricação de uma matriz muito densa é que, desta forma, não há uma fácil saída da água constituinte da estrutura, o que pode levar ao lascamento explosivo. No entanto, as fibras podem ser benéficas ao compósito por mantê-lo coeso, mesmo se completamente desidratado.

3.2.8 – FADIGA

Segundo Figueiredo (2000) a fadiga ocorre quando um material rompe por esforço cíclico, que acontece em níveis de tensões inferiores ao determinado durante testes de esforços estáticos, devido à propagação de microfissuras existentes no material. A cada ciclo de carregamento as fissuras tendem a se difundir e, conseqüentemente, diminuir a área útil para transferência de tensão. Quanto mais próximo o

carregamento cíclico estiver da resistência do material, menor será o número de ciclos necessários para que o mesmo sofra ruptura. Como as fibras atuam como pontes de transferência de tensões através das fissuras, o concreto com a incorporação de fibras pode sofrer um maior número de ciclos de cargas ou ser submetido a um maior nível de tensão para a mesma vida útil.

Morris e Garret *apud* Bentur e Mindess (1990) constataram que a incorporação de fibras de aço melhorou a resistência à fadiga do concreto sob tensão direta em 65 a 70% da resistência estática de ruptura, sendo que para o concreto sem fibras esse valor chegou apenas a 50%. Geralmente, a resistência à fadiga é diretamente proporcional ao aumento de volume de fibras incorporadas na matriz cimentícia (BENTUR e MINDESS 1990).

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são descritas as variáveis de controle e de resposta adotadas, bem como os métodos de caracterização dos materiais utilizados e os ensaios propostos.

4.1 – Planejamento experimental

Com base na estrutura laboratorial disponível foi traçado um plano experimental compatível, a fim de cumprir os objetivos propostos nessa pesquisa. Dessa forma, foram produzidos em laboratório diferentes tipos de argamassa de revestimento, normalmente utilizadas na região de Florianópolis. Foram adicionadas fibras de polipropileno, PET e curauá às argamassas, que foram então aplicadas como revestimento de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos construídas especificamente para esta pesquisa.

No intuito de caracterizar as argamassas foram realizados ensaios para determinar suas propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido. .

Em resumo, as variáveis estudadas na avaliação do comportamento das argamassas de revestimento com a incorporação de fibras foram:

a) Variáveis independentes ou de controle:

- Tipo de argamassa:
 - Argamassa de cimento, cal hidratada e areia média;
 - Argamassa de cimento, areia média e aditivo plastificante.
- Tipo de fibra:
 - Polipropileno (PP);
 - Poli (etileno tereftalato) (PET);
 - Curauá.
- Teor de fibra (em relação ao volume de materiais secos):
 - 0%;
 - 0,25%;
 - 0,5%.

- Idade/tempo de exposição:
 - 28 dias;
 - 90 dias;
 - 180 dias;
 - 270 dias.

b) Variáveis dependentes ou de resposta

- Relação água/aglomerante;
- Retenção de água;
- Retenção de consistência;
- Resistência de aderência à tração do revestimento;
- Permeabilidade do revestimento;
- Profundidade de carbonatação;
- Resistência à tração na flexão;
- Tenacidade.

A consistência das argamassas medida em mesa de consistência foi mantida constante (relação água/cimento variável). Os resultados foram tratados estatisticamente por análise de variância (ANOVA). Buscou-se, também, o estabelecimento de correlações entre os resultados dos diversos ensaios.

4.2 – Caracterização dos materiais

4.2.1 – CIMENTO

Na produção de todas as argamassas foi utilizado o cimento Portland composto com calcário moído - CII-F 32, produzido pela Itambé. Esse cimento foi utilizado por não possuir adições pozolânicas, o que introduziria uma variável adicional nas análises. As caracterizações física e química foram obtidas junto ao fabricante e encontram-se nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Caracterização química do cimento

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P. Fogo	CaO Livre	R. Insol.	Eq. Alc.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,30	18,74	2,57	60,27	4,95	3,16	5,30	1,30	1,28	0,58
Sd	0,03	0,06	0,01	0,04	0,06	0,03	0,18	0,18	0,11	0,01
Min	4,26	18,67	2,56	60,21	4,89	3,11	4,89	1,07	1,14	0,57
Max	4,34	18,84	2,57	60,33	5,10	3,20	5,51	1,60	1,47	0,59

Tabela 4.2 – Caracterização física e mecânica do cimento

Exp.	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Quente	h : min	h : min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
mm	h : min	h : min	%	cm²/g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
0,68	2:38	3:31	26,4	3.473	2,88	14,34	15,6	26,8	33,3	40,9
0,25	0:04	0:04	0,6	54,05	0,44	0,86	0,5	0,5	0,4	0,9
0,50	2:30	3:30	25,8	3.380	2,30	12,80	14,5	25,6	32,7	39,6
1,00	2:45	3:45	27,9	3.580	3,60	15,90	16,4	27,5	34,1	42,7

4.2.2 – CAL

Utilizou-se a cal do tipo CH-III, fornecida pela empresa Minersol. Este material passou por um processo de maturação de 24 horas antes da mistura com os demais materiais, com o objetivo de melhorar a plasticidade e a retenção de água da argamassa, seguindo-se, assim, as recomendações da NBR 7175/03. O processo de maturação consiste em deixar a cal em contato com a areia e/ou água durante um determinado período de tempo, com o objetivo de melhorar suas propriedades no estado fresco, tais como trabalhabilidade e retenção de água (RAGO e CINCOTTO, 1999). Sua caracterização, obtida junto ao fabricante, encontra-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Caracterização da cal

REQUISITO	Garantia mínima (NBR-7175)	Valores estimados pelo fabricante
Características químicas		
Soma de óxidos	≥ 88,0%	90,0%
Óxidos não hidratados	≤ 15,0%	13,0%
Características físicas		
Finura		
- Peneira ABNT # 30 (0,60mm)	≤ 0,5%	0,3%
- Peneira ABNT # 200 (0,075mm)	≤ 15,0%	8,0%
Características mecânicas		
Retenção de água	≥ 70,0%	92,0%
Estabilidade	ausência de cavidades ou protuberâncias	OK
Plasticidade	> 110	150
Incorporação de areia	≥ 2,2	3,0

4.2.3 – AREIA

A areia utilizada na produção das argamassas é de origem natural, proveniente do Rio Tijucas (SC). Possui granulometria contínua, classificando-se como média de acordo com a NBR 7211/05. Sua caracterização e curva granulométrica são apresentadas na Tabela 4.4 e na Ilustração 4.1, respectivamente. A fim de simular as condições encontradas na prática, optou-se por não lavar a areia, secando-a apenas por 24 horas em estufa à 100°C antes da mistura.

Tabela 4.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Peneiras # mm	% retida	% retida acumulada	Módulo de finura	2,55
9,5	-	-	Diâmetro máximo	2,4 mm
6,3	-	-	Massa específica	2,59 kg/m ³
4,8	0	0	Argila em torrões	0,58%
2,4	6	6	Material pulverulento	2,40%
1,2	28	34	Matéria orgânica	< 300 ppm
0,6	20	54	Massa unitária	1,35 kg/m ³
0,3	18	72	LIMITES	
0,15	17	89	Matéria orgânica	<300ppm
Fundo	11	100	% argila em torrões	< 1,5 %
Total	100		% material pulverulento	< 5,0%

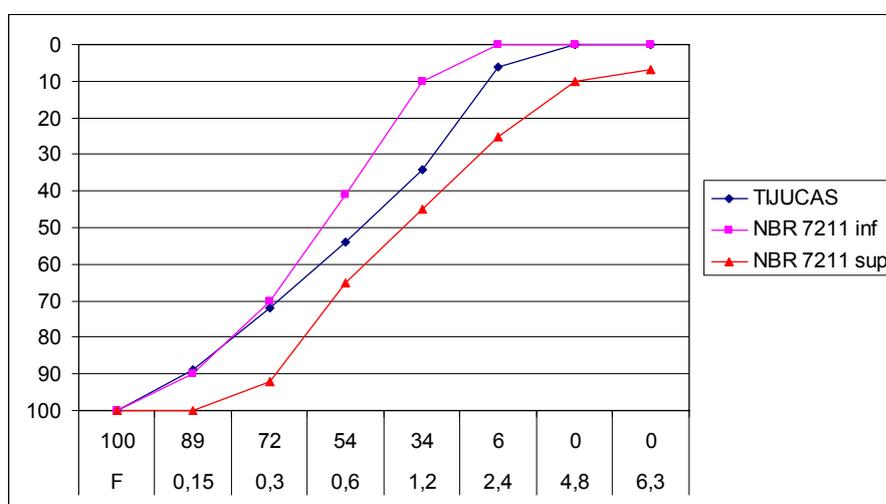


Ilustração 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo

4.2.4 – ADITIVO PLASTIFICANTE

Utilizou-se no presente trabalho o aditivo Reomix 550 da MBT, recomendado para argamassas, na dosagem de 130 ml para cada saco de 50 kg de cimento. Esta é a quantidade usualmente empregada por empresas construtoras da cidade de Florianópolis para argamassas de revestimento.

Os seguintes dados técnicos apresentados na Tabela 4.5 foram obtidos junto ao fabricante.

Tabela 4.5 – Dados técnicos do aditivo plastificante obtidos junto ao fabricante

Função principal	Plastificante para argamassa
Base química	Lignosulfonato de sódio
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho
Densidade	1,000 a 1,040 g/cm ³
pH	11 a 14
Viscosidade	Até 150 CPs

4.2.5 – FIBRA DE POLIPROPILENO

As fibras de polipropileno foram adquiridas junto à empresa FITESA, de Gravataí (RS). A tabela 4.6 apresenta algumas características obtidas junto ao fabricante, assim como outras determinadas por ensaios.

Os valores de temperatura de transição vítrea e de fusão foram determinados pelo ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) em um equipamento da marca Shimadzu localizado no Laboratório de Materiais Poliméricos (POLIMAT) do departamento de Química da UFSC. Nesse mesmo local, utilizando-se um máquina de ensaio universal da marca Emic DL2000, foram realizados os testes mecânicos para cada tipo de fibra estudada. Para a fibra de polipropileno foram feitos 12 ensaios mecânicos, a uma velocidade de carregamento de 25mm/min, baseando-se em ensaios anteriores realizados por Betioli (2003). Vale ressaltar que, na sala onde foram realizados os ensaios, havia controle de temperatura ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$) e umidade ($50\pm 5\%$).

A densidade das fibras foi determinada na Central de Análises do Departamento de Química da UFSC. Para isso utilizou-se um picnômetro DIST (volume de 50ml) e balança analítica para determinar a verdadeira medida de volume do material. Foram feitas três medidas de volume e adotou-se o valor de densidade pela média

aritmética dos valores. Assim como no POLIMAT, a temperatura e a umidade foram controladas.

Pode-se observar, ainda, na Ilustração 4.2 o aspecto superficial da fibra observado em MEV.

Tabela 4.6 – Características físicas e mecânicas das fibras de polipropileno

Diâmetro médio	20 μm
Comprimento	6 mm
Área superficial específica	225 m^2/kg
Cor	Translúcido a branco
Aparência	Monofilamentos cortados
Temperatura de transição vítrea (Tg)*	30,5°C
Temperatura de fusão (Tf)	165,6°C
Densidade	0,76 g/cm^3
Alongamento na ruptura	111,50%
Resistência à tração direta	231 MPa
Módulo de elasticidade	2,4GPa

*Temperatura característica na qual há a passagem da fase amorfa de um material da fase rígida para a fase flexível

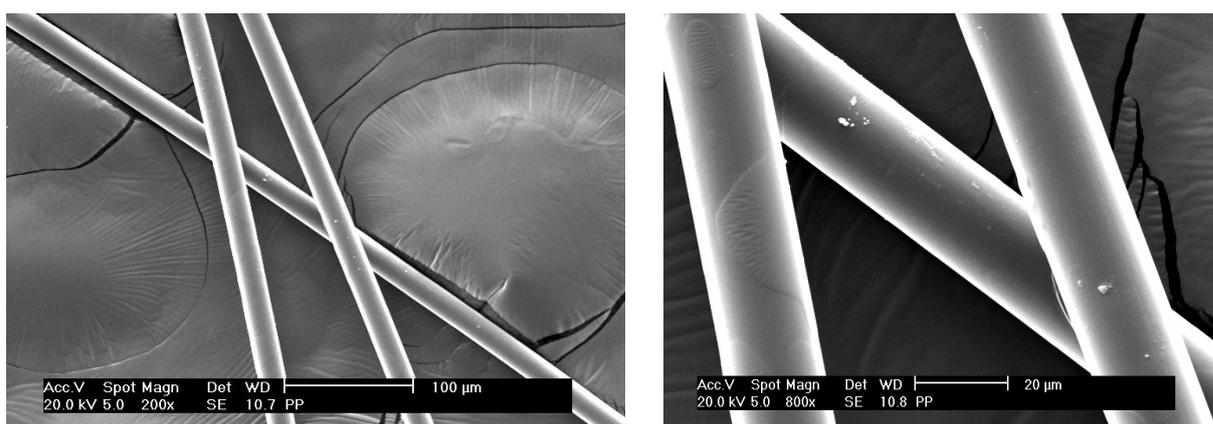


Ilustração 4.2 – MEV das fibras de polipropileno

4.2.6 – FIBRA DE PET

As fibras de PET foram disponibilizadas pela empresa Arteplás Ltda (Itajaí – SC), que fabrica cordas a partir da reciclagem de garrafas plásticas. A fibra foi obtida em bobinas e cortada mecanicamente no comprimento de 6 mm.

De acordo com a bibliografia, as fibras de PET, em sua maioria, apresentam seção transversal circular e lisa. Analisando-se as micrografias mostradas na Ilustração 4.3 observa-se que seu diâmetro varia entre 25 e 30 μ m. Essas imagens são muito similares às encontradas por Betioli (2003), apesar de serem de lotes diferentes.

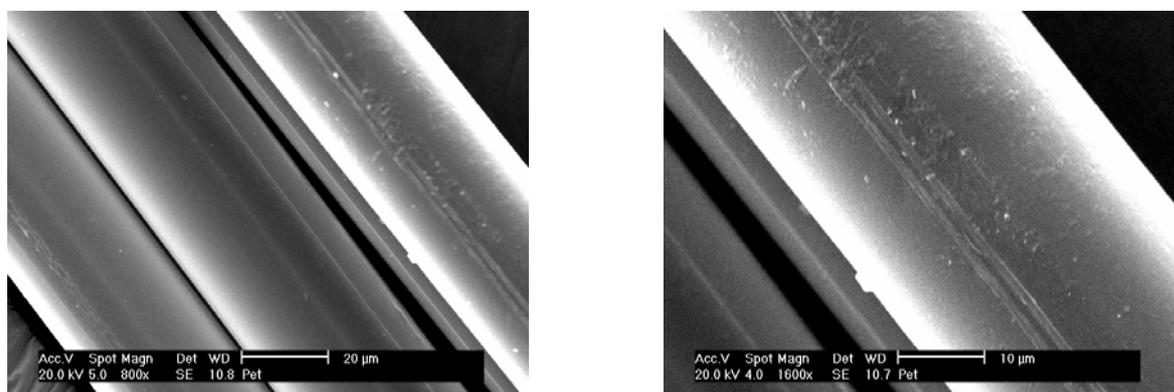


Ilustração 4.3 – MEV das fibras de PET

Além disso, utilizando-se dos mesmos equipamentos e amostragem da fibra de polipropileno, foram determinadas as características da fibra de PET. Esses resultados estão apresentados na Tabela 4.7 abaixo.

Para determinação do ensaio de absorção de água foi utilizado um aparato semelhante ao descrito por Betioli (2003). Desta forma, mantiveram-se as fibras em um ambiente com umidade próxima de 100%, pesando-se as amostras em uma balança (precisão 0,0001g) até que houvesse constância de massa.

Tabela 4.7 – Características físicas e mecânicas das fibras PET

Absorção de água	cerca de 5%
Densidade	1,29 g/cm ³
Temp. de transição vítrea (Tg)	78,3°C
Pico de cristalização (Tc)	135,7°C
Temp. de fusão (Tf)	248,7°C
Alongamento na ruptura	26,3%
Resistência à tração direta	398,8 MPa
Módulo de elasticidade	7,5GPa

4.2.7 – FIBRA DE CURAUÁ

A fibra de curauá foi doada pela empresa Pematec Triangel, situada em Santarém – PA. Obteve-se essa fibra em fardos, e, devido à dificuldade de bobiná-la para posterior corte mecânico, optou-se por cortá-la manualmente com o auxílio de guilhotina e tesouras no comprimento desejado (6 mm).

Novamente, alguns ensaios foram realizados a fim de caracterizar a fibra de curauá e seus resultados se encontram na Tabela 4.8. A única mudança feita nos ensaios referentes à fibra vegetal diz respeito à velocidade de carregamento, que foi de 2mm/min. Adotou-se esse valor pelo fato desse tipo de fibra ser um frágil e praticamente não apresentar nenhum alongamento na ruptura, diferentemente das fibras poliméricas. Realizaram-se, ainda, 16 repetições de ensaios devido à alta variabilidade no diâmetro da fibra vegetal.

Na micrografia mostrada na Ilustração 4.4 pode-se notar que a sua superfície apresenta-se áspera e irregular, além de que a estrutura de uma única fibra é formada por inúmeras outras de menor tamanho, como já observado por Bentur e Mindess (1990).

Tabela 4.8 – Características físicas e mecânicas das fibras de curauá

Diâmetro médio	130 μm
Densidade	0,88 g/cm^3
Absorção de água	cerca de 65%
Alongamento na ruptura	1,769%
Resistência à tração direta	178 MPa
Módulo de elasticidade	9,5GPa

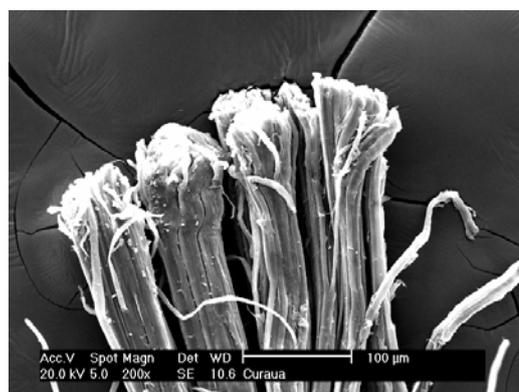
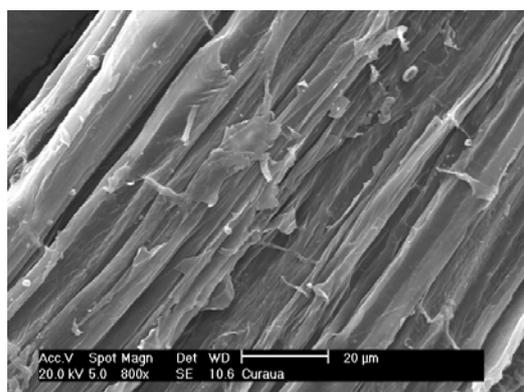


Ilustração 4.4 – MEV das fibras de curauá

4.2.8 – BLOCOS CERÂMICOS

Para a confecção das alvenarias que foram revestidas com as argamassas contendo fibras, foram utilizados blocos cerâmicos vazados contendo 6 furos, obtidos em loja de materiais de construção na cidade de Florianópolis. Com o intuito de caracterizar os blocos cerâmicos foram tomadas seis unidades aleatórias da pilha de estocagem. Na Tabela 4.9 apresentam-se suas propriedades no que diz respeito às suas dimensões, absorção de água (RILEM LUMA 4/91) e Taxa Inicial de Sucção (IRS – *Initial Rate of Suction*) de acordo com recomendações da RILEM LUMA 5/91. Ressalta-se, ainda, que se determinou a absorção de água e o IRS para duas condições distintas: bloco cerâmico com umidade natural do ambiente e bloco cerâmico seco em estufa pelo período de 24 horas. Procedeu-se dessa forma a fim de simular as condições de campo em que os blocos cerâmicos são utilizados com sua umidade natural do ambiente.

Tabela 4.9 – Propriedades dos blocos cerâmicos

Comprimento	189 ± 2,30 mm
Altura	152 ± 0,85 mm
Espessura	102 ± 0,50 mm
Absorção de água (umidade do ambiente)	22,2%
Absorção de água (seco em estufa)	22,4%
IRS (umidade do ambiente)	1,27 kg/m ² /min
IRS (seco em estufa)	1,44 kg/m ² /min

4.3 – Dosagem e preparo das argamassas

A fim de verificar a influência da incorporação de fibras em argamassas de revestimento foram preparados dois tipos diferentes de argamassa usualmente empregados pelas construtoras da cidade de Florianópolis: uma argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia média, nas proporções de mistura de 1:1:6 (em volume de materiais secos), e uma argamassa de cimento, areia e aditivo plastificante, na proporção 1:5 (cimento:areia média). A quantidade de água adicionada às misturas, como já exposto, foi variável, a fim de se obter uma consistência adequada para sua aplicação. Essa consistência foi, primeiramente, definida pela análise do profissional que executaria o revestimento das paredes. De posse dessa análise subjetiva, determinou-se o índice de consistência equivalente na mesa de consistência, utilizando-se o mesmo para as argamassas a serem estudadas.

Depois de estabelecidos os tipos de argamassa do estudo foram adicionadas as fibras PET, polipropileno e curauá às argamassas. As fibras foram incorporadas em dois teores distintos - 0,25% e 0,5%, em volume de materiais secos. Argamassas sem fibras foram adotadas como referência. Todas as fibras possuem o comprimento de cerca de 6 mm com o objetivo de promover uma maior dispersão e facilidade de mistura na matriz cimentícia.

Dessa forma, foram estudados 14 tipos diferentes de argamassa de revestimento. Na Tabela 4.10 apresenta-se a designação utilizada para cada argamassa do estudo.

Tabela 4.10 – Designação das argamassas estudadas

Designação da argamassa	Tipo de argamassa	Tipo de fibra	Teor de fibra (%)
CR	CAL	-	0,00
C0,25C		Curauá	0,25
C0,25PET		PET	
C0,25PP		Polipropileno	
C0,50C		Curauá	0,50
C0,50PET		PET	
C0,50PP		Polipropileno	
AR		ADITIVO	-
A0,25C	Curauá		0,25
A0,25PET	PET		
A0,25PP	Polipropileno		
A0,50C	Curauá		0,50
A0,50PET	PET		
A0,50PP	Polipropileno		

A mistura das argamassas foi realizada em um misturador vertical com capacidade de 30 litros e velocidade única e constante de 90 r.p.m. O procedimento de mistura adotado foi diferente para os dois tipos de argamassas produzidas – com cal e com aditivo, devido à possibilidade de incorporação excessiva de ar nas argamassas com aditivo plastificante. As argamassas com cal hidratada foram preparadas de acordo com a seqüência a seguir descrita:

1. Mistura da argamassa maturada de cal – areia (100%), cal (100%) e água de maturação (18% em relação à massa de areia e cal) – durante um período de 30 segundos;
2. Adição do cimento e mistura durante um período de 90 segundos;
3. Adição da água restante e continuação da mistura por 60 segundos;
4. Adição manual e heterogênea da fibra correspondente ao traço a ser produzido;

5. Adição da água restante necessária para se atingir a consistência desejada (determinada em estudo prévio) e prosseguimento da mistura por 60 segundos.

Para as argamassas com aditivo plastificante, adotou-se a seguinte seqüência:

1. Mistura dos materiais secos – areia e cimento – durante cerca de 60 segundos;
2. Adição das fibras correspondentes ao traço a ser produzido e continuação da mistura por 60 segundos;
3. Adição da água de amassamento e aditivo plastificante necessários para se atingir a consistência desejada, e mistura dos materiais por 180 segundos.

Com o fim do processo de mistura, as argamassas foram aplicadas ou moldadas de acordo com os ensaios que seriam posteriormente realizados e que serão descritos nos itens 4.4, 4.5 e 4.6.

4.4 – Ensaio no estado fresco

A consistência das argamassas foi medida com o auxílio da mesa de espalhamento (*flow table*), apresentada na Ilustração 4.5, de acordo com a NBR 13276/02. O índice de consistência foi fixado para as argamassas com fibra e para as de referência, com o objetivo de se atingir uma consistência compatível para a sua aplicação, conforme exposto no subitem 4.3. Conseqüentemente, obtiveram-se relações água/aglomerante variáveis de acordo com o tipo de argamassa produzida. Desta forma, definiu-se um índice de consistência para as argamassas referência de 230 ± 10 mm e, para as argamassas com fibra, de 205 ± 10 mm. O menor índice de consistência se deve ao aumento da coesão proporcionada pela adição das fibras, ressaltando-se que esse fato não proporcionou grandes dificuldades na posterior aplicação.



Ilustração 4.5 – Medição do índice de consistência para argamassa de cal referência

Para a determinação da retenção de água das argamassas, adotou-se o método do funil de Büchner modificado (NBR 9290/96). Essa norma determina o cálculo dessa propriedade pela Equação 1, que está apresentada abaixo.

$$RA = \left(\frac{A - 125}{B - 125} \right) \times 100 , \quad (1)$$

onde: RA – índice de retenção de água (%);

A – consistência após a sucção no funil de Büchner modificado, em mm;

B – consistência antes da sucção no funil de Büchner modificado, em mm.

A Ilustração 4.6 apresenta o equipamento utilizado para a determinação da retenção de água.



Ilustração 4.6 – Funil de Büchner modificado

Além dessas propriedades, foram determinados, também, a densidade de massa e o teor de ar incorporado das argamassas de acordo com a NBR 13278/95. Foram realizadas três repetições para cada argamassa, a fim de adotar a média dos valores determinados.

4.5 – Ensaios em revestimentos aplicados sobre alvenaria de blocos cerâmicos

Com o intuito de simular as condições de uso e exposição da argamassa de revestimento foram construídas 14 paredes de blocos cerâmicos, medindo cerca de 1 m² cada, e suas faces foram revestidas com as argamassas estudadas. Os blocos foram assentados por profissional habilitado, e, logo após o período de 28 dias, as paredes foram chapiscadas e revestidas. Esse período foi adotado para minimizar os efeitos da retração da argamassa de assentamento sobre o comportamento do revestimento. Adotou-se, também, um período de três dias entre a aplicação do chapisco e a aplicação da argamassa. Os traços utilizados para a argamassa de assentamento e chapisco foram de 1:1:6 (cimento:cal:areia média) e 1:3 (cimento:areia grossa) em volume de materiais secos, respectivamente.

Para que as duas faces das paredes ficassem sob exposição solar semelhante durante o período de ensaios, optou-se por orientá-las em relação ao leste-oeste magnéticos. As faces voltadas para Leste foram submetidas aos ensaios destrutivos descritos nos subitens 4.5.1 a .5.3, enquanto que as faces Oeste, por estarem sujeitas a maiores variações de temperatura diárias, foram mantidas intactas para que se pudesse avaliar visualmente o aparecimento de fissuras no revestimento.

As paredes foram revestidas no mês de junho de 2005, durante o período das 8:00 até 12:00. Enquanto se fazia a aplicação do revestimento, registrava-se a temperatura e a umidade relativa do local por meio de um sensor de umidade e temperatura portátil. A média dessas medições encontra-se no gráfico da Ilustração 4.7.

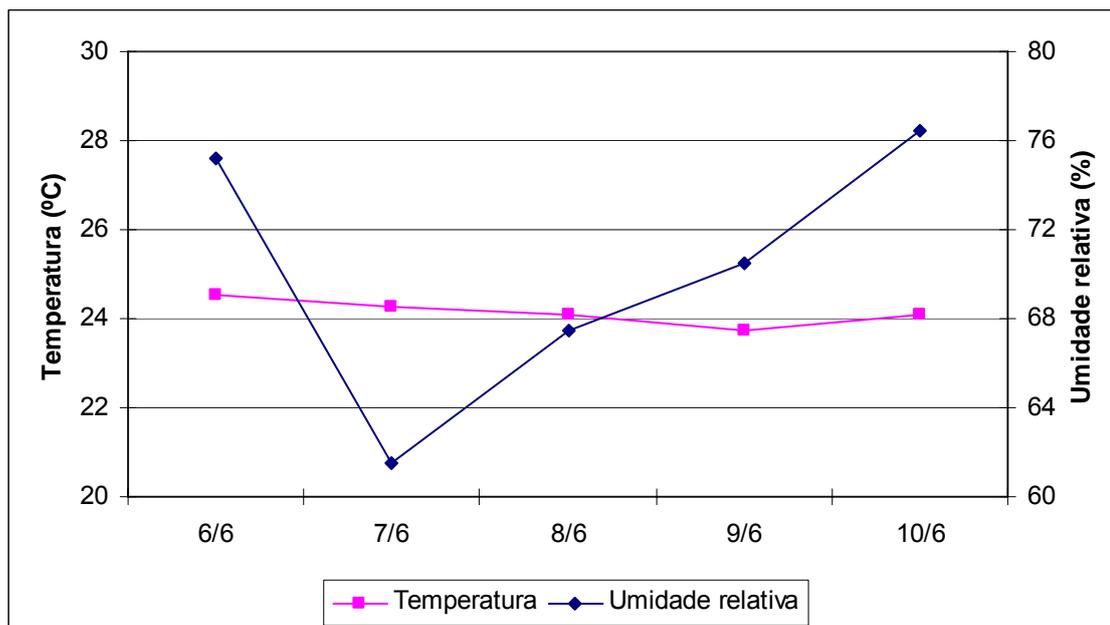


Ilustração 4.7 – Variação de temperatura e umidade relativa no período de 06 a 10 de junho de 2005

A espessura dos revestimentos de argamassa foi de 2 cm, obtida com o auxílio de taliscas e guias de madeira. Anteriormente à aplicação das argamassas, as paredes foram molhadas com o auxílio de uma esponja buscando-se, desta forma, seguir o que ocorre normalmente em situações práticas. Cerca de 30 minutos após a aplicação da argamassa foi feita a regularização da sua superfície com auxílio de régua metálica. O acabamento final foi feito com desempenadeira de madeira 30 minutos após a regularização. A Ilustração 4.8 mostra imagens da aplicação da argamassa e do seu acabamento.



Ilustração 4.8 – Aplicação e acabamento das argamassas de revestimento

Nas idades de 28, 90, 180 e 270 dias, os revestimentos foram submetidos a ensaios para determinação da resistência de aderência à tração (NBR 13528/95),

permeabilidade à água pelo método do cachimbo (CSTC - *Centre Scientifique et Technique de la Construction* (N.I.T. 140)), e profundidade de carbonatação (RILEM CPC18) com auxílio de fenolftaleína como indicador de pH.

Para a realização dos ensaios citados, as paredes foram divididas em seis áreas iguais (Ilustração 4.9) e, em cada uma delas, foi realizado um ensaio individual, totalizando 336 durante todo o estudo para cada propriedade. A análise visual da fissuração do revestimento foi feita durante todo o período em que os mesmos estiveram expostos.

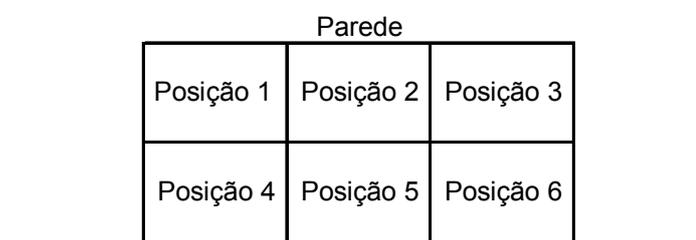


Ilustração 4.9 – Desenho esquemático da divisão realizada em cada parede para realização dos ensaios

4.5.1 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Para a realização do ensaio de resistência de aderência seguiu-se a seqüência abaixo:

- Perfuração dos locais de ensaio com auxílio de serra copo diamantada com diâmetro aproximado de 50mm;
- Colagem de peças de alumínio com adesivo à base de epóxi no local onde foram feitos os furos;
- Utilização de aparelho de arrancamento manual equipado com dinamômetro portátil IMADA com célula de carga de 20kN, 24 horas após colagem das peças metálicas.

Na Ilustração 4.10 apresenta-se uma parede instrumentada para a realização dos ensaios de resistência de aderência à tração e de permeabilidade pelo método do cachimbo, que será descrito posteriormente.



Ilustração 4.10 – Parede instrumentada para a realização de ensaios de aderência e cachimbo

4.5.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Depois de realizados os ensaios de resistência de aderência, as peças de argamassa arrancadas eram partidas ao meio e aspergidas com solução de fenolftaleína. Com o auxílio de um paquímetro mediu-se a frente de carbonatação conforme determina a norma adotada.

A fenolftaleína caracteriza-se por apresentar diferença de coloração quando aspergida em ambientes básicos ou ácidos: adquire coloração roxa quando em contato com ambiente com pH superior a 9,6 (característico dos compósitos cimentícios), e permanece incolor quando aspergido em ambiente com pH inferior a 8, ou seja, onde já existe frente de carbonatação (Ilustração 4.11).



Ilustração 4.11 – Corpos de prova aspergidos com solução de fenolftaleína

4.5.3 – PERMEABILIDADE À ÁGUA PELO MÉTODO DO CACHIMBO

O método do cachimbo consiste em se fixar, com massa de calafetar, um tubo de vidro em forma de “L” no substrato que se deseja ensaiar, conforme mostrado na Ilustração 4.12.



Ilustração 4.12 – Cachimbo fixado ao substrato (DIAS e CARASEK, 2003)

Realiza-se o ensaio colocando-se água no tubo até a marca de referência. Segundo a norma, essa pressão inicial de 92 mm de coluna d'água, equivale à ação estática

de um vento com velocidade de cerca de 140 km/h. A diminuição do nível da água, ao longo do tempo, é usada como parâmetro da vulnerabilidade do material à entrada da água.

Foram realizadas medidas depois de transcorridos 5, 10 e 15 minutos da colocação da água. A diferença de absorção entre as medidas efetuadas depois de 15 e 5 minutos (Δ_{15-5}) permite obter um grau de absorção quase independente do estado inicial de umidade do substrato.

4.6 – Ensaios em corpos de prova no estado endurecido

Além dos ensaios realizados nas paredes, foram moldados corpos de prova prismáticos (2x4x16 cm) para realização de ensaios de flexão com monitoração da deflexão. A moldagem foi realizada em fôrmas de madeira, em camada única e adensada com o auxílio de mesa vibratória durante o período de 60 segundos. Logo depois, os moldes eram rasados, cobertos com uma placa de vidro e estocados em ambiente de laboratório com temperatura e umidade controlada, até a sua desmoldagem. Esse período de tempo foi adotado a fim de que os cp's não sofressem nenhum dano na operação de desfôrma. A Ilustração 4.13 apresenta a forma como ficaram dispostos os cp's. Optou-se por colocá-los em local próximo ao da construção das paredes para que os mesmos ficassem expostos a condições ambientais semelhantes.

Cerca de 48 horas antes da execução dos ensaios, os corpos de prova eram estocados em local protegido, a fim de que qualquer condição de saturação imposta por chuva ou ambiente muito úmido fosse normalizada.



Ilustração 4.13 – Exposição dos corpos de prova prismáticos

4.6.1 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão com base na metodologia adotada por Bastos (2001). O autor adaptou o método ISO/DIS 679 – *Methods of testing cements – Determination of strength (International Organization for Standardization, 1987)* para corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm. Ajustando-se o método, para uma carga pontual localizada no meio do corpo de prova bi-apoiado, a tensão de tração na flexão é dada pela Equação 2.

$$\sigma = \frac{1,5 PL}{bh^2}, \quad (2)$$

onde: σ - tensão de tração na flexão (MPa);

P – carga aplicada no meio do prisma (N);

L – distância entre os apoios (mm);

b – maior lado da seção transversal do corpo de prova (mm);

h – espessura do corpo de prova (mm).

Com base na pesquisa feita por Kawamata *et al.* (2002) e em ensaios anteriores realizados por Betioli (2003), adotou-se uma velocidade de aplicação de carga de 0,1 mm/minuto. Desenvolveu-se, então, o aparato para o ensaio que conta com prensa automática, célula de carga, dispositivo para aquisição de dados e transdutor de deslocamento (precisão de 0,001 mm), sendo todos esses equipamentos

controlados por ferramentas computacionais. Na Ilustração 4.14 pode-se observar uma vista geral do aparato montado para a realização do ensaio. A Ilustração 4.15, por sua vez, apresenta um desenho esquemático do mesmo.



Ilustração 4.14 – Vista geral do aparato de ensaio de tração na flexão

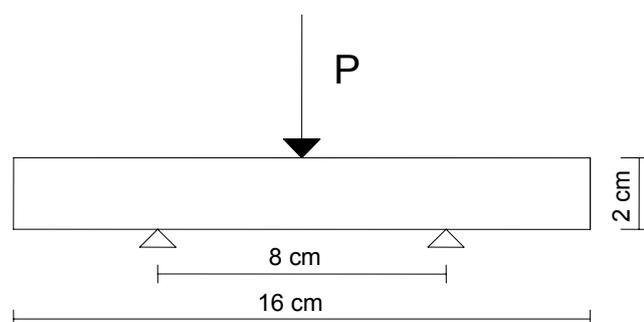


Ilustração 4.15 – Desenho esquemático do ensaio de tração na flexão

Foram moldados seis corpos de prova para cada combinação de variáveis, totalizando 336 ensaios realizados.

4.6.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Após a ruptura dos testemunhos procedeu-se ao ensaio com aspersão de solução de fenolftaleína, a fim de se medir a frente de carbonatação, conforme descrito no subitem 4.5.2. Foram feitas três medidas com o auxílio de um paquímetro em relação à extremidade superior de cada corpo de prova ensaiado, que foi a face exposta as intempéries. Foi adotada a média aritmética das três medidas como resultado final.

4.6.3 – TENACIDADE

Para o cálculo da tenacidade adotou-se o procedimento da ASTM C 1018/94, sendo a propriedade a área sob a curva tensão x deformação. Utilizou-se dos índices de tenacidade I5, I10 e I20 adotados por Betioli (2003), e descritos a seguir:

- I5 é calculado pela relação entre a área sobre a curva obtida até 3 vezes a deformação da primeira fissura pela área sob a curva até a primeira fissura;
- I10 é calculado pela relação entre a área sobre a curva obtida até 5,5 vezes a deformação da primeira fissura pela área sob a curva até a primeira fissura;
- I20 é calculado pela relação entre a área sobre a curva obtida até 10,5 vezes a deformação da primeira fissura pela área sob a curva até a primeira fissura.

A Equação 3 simplifica essa descrição, bem como a Ilustração 4.16.

$$I_n = \frac{\text{Energia absorvida até um múltiplo da primeira fissura}}{\text{Energia absorvida até a primeira fissura}} \quad (3)$$

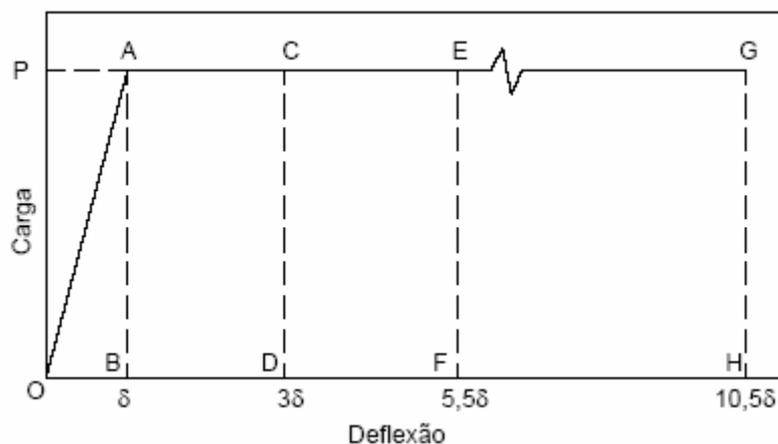


Ilustração 4.16 – Gráfico de medidas dos índices de tenacidade segundo ASTM C 1018

4.6.4 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A degradação das fibras, bem como o aspecto superficial das argamassas, foi analisada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de fragmentos de argamassa retirados dos corpos de prova prismáticos submetidos ao ensaio de flexão. Em função do elevado custo do ensaio, optou-se por analisar apenas as argamassas com 0,50% de fibras (PP, PET, curauá) depois de expostas por 28, 90, 180 e 270 dias às condições atmosféricas.

5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Apresenta-se, na Tabela 5.1, a variação das relações água/aglomerante e água/materiais secos das argamassas estudadas.

Tabela 5.1 – Relação água/aglomerante e água/matérias secos das argamassas

Argamassa	Índice de consistência (mm)	Relação água/aglomerante	Relação água/materiais secos
C0,25C	205 ± 10	1,54	0,26
C0,25PP		1,42	0,24
C0,25PET		1,58	0,27
C0,5C		1,61	0,27
C0,5PP		1,42	0,24
C0,5PET		1,77	0,30
CR	230 ± 10	1,42	0,24
AR		1,52	0,20
A0,25C	205 ± 10	1,52	0,20
A0,25PP		1,52	0,20
A0,25PET		1,52	0,20
A0,5C		1,62	0,21
A0,5PP		1,52	0,20
A0,5PET		1,72	0,23

Pode-se observar pela tabela que a fibra de PET apresentou os maiores valores tanto para as argamassas de cal quanto para as argamassas com aditivo. Pelisser (2002) observou que devido à deficiente dispersão das fibras PET no compósito, há o agrupamento de fibras em chumaços, aprisionando parte da água da mistura e, conseqüentemente, diminuindo a consistência.

Essa diferença, em relação às argamassas com outras fibras, é menor quando são comparados apenas os compósitos com aditivo. A razão dessa mudança de comportamento se deve, possivelmente, pelo efeito lubrificante das bolhas de ar incorporadas à matriz, o que acaba por melhorar a trabalhabilidade do material.

5.1 – Ensaio no estado fresco

5.1.1 – MASSA ESPECÍFICA DA ARGAMASSA

Apesar dos valores próximos, nota-se uma tendência mais expressiva à diminuição da massa específica nas argamassas de cal quando são adicionadas fibras, como mostra a Ilustração 5.1. Já para as argamassas de aditivo, o efeito da incorporação de fibras não é perceptível devido, provavelmente, à grande quantidade de ar incorporado conforme demonstrado no subitem 5.1.2.

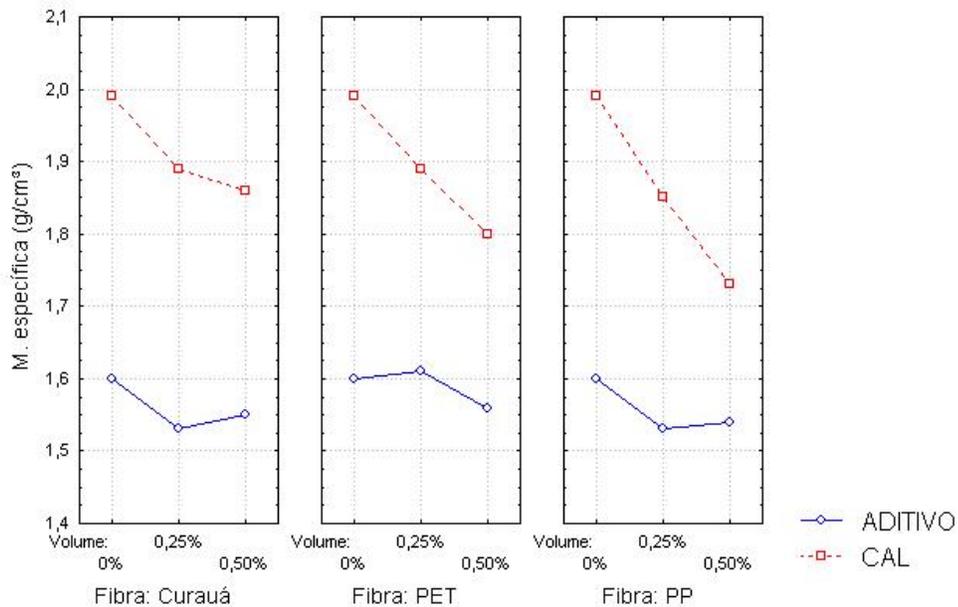


Ilustração 5.1 - Resultados dos ensaios de massa específica

Pela análise estatística apresentada na Tabela 5.2, observa-se que todas as variáveis (tipo de argamassa, tipo de fibra e volume de fibra) mostraram-se significativas no que diz respeito à massa específica dos compósitos.

Tabela 5.2 - Valores de ANOVA para os ensaios de massa específica

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	1,37282	1	1,37282	13728,16699	0,00000
B - Tipo de fibra	0,01290	2	0,00645	64,50000	0,00000
C - Volume de fibra	0,13690	2	0,06845	684,50000	0,00000
AxB	0,00803	2	0,00402	40,16667	0,00000
AxC	0,04623	2	0,02312	231,16667	0,00000
BxC	0,01340	4	0,00335	33,50000	0,00000
AxBxC	0,00767	4	0,00192	19,16667	0,00000
Resíduo	0,00360	36	0,00010		
Total	1,60155	53			

5.1.2 – TEOR DE AR INCORPORADO

Como era esperado, as argamassas com aditivo apresentaram um teor de ar incorporado superior às argamassas de cal, como pode ser observado na Ilustração 5.2.

Nota-se, também, que a adição de fibras nas argamassas de cal propicia uma tendência ao aumento do teor de ar incorporado na mistura, principalmente para a incorporação de fibras de polipropileno, chegando a valores da ordem de 16% para o traço C0,50PP. Supõe-se que esse aumento do ar incorporado se deva ao aprisionamento de certa quantidade de bolhas de ar entre as cerdas das fibras.

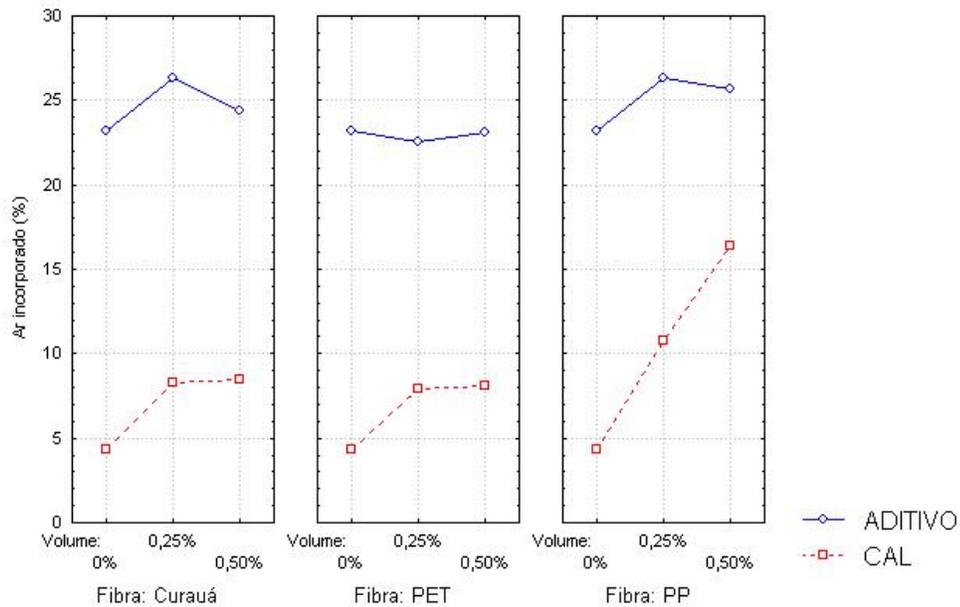


Ilustração 5.2 - Resultados dos ensaios de teor de ar incorporado

No entanto, analisando-se estatisticamente os resultados desses ensaios, percebeu-se que todas as variáveis são significativas, conforme demonstra a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores de ANOVA para os ensaios de teor de ar incorporado

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	3505,35864	1	3505,35864	15124,12500	0,00000
B - Tipo de fibra	78,90845	2	39,45423	170,22813	0,00000
C - Volume de fibra	161,80261	2	80,90131	349,05457	0,00000
AxB	20,68144	2	10,34072	44,61580	0,00000
AxC	66,57056	2	33,28528	143,61177	0,00000
BxC	56,57372	4	14,14343	61,02286	0,00000
AxBxC	27,03487	4	6,75872	29,16098	0,00000
Resíduo	8,34382	36	0,23177		
Total	3925,27413	53			

5.1.3 – RETENÇÃO DE ÁGUA

No que diz respeito à retenção de água das argamassas, observa-se na Ilustração 5.4 uma tendência ao aumento dessa propriedade quando são incorporados 0,25% de fibra, com exceção do traço A0,25PET em que a retenção manteve-se praticamente constante.

Há, no entanto, comportamento totalmente diferente quando se incorpora 0,50% de fibra nos compósitos, excetuando-se, novamente, o traço de aditivo com fibra PET que apresenta um aumento expressivo nessa propriedade.

Atenta-se, contudo, para o fato de que a quantidade de água adicionada às misturas não é constante. Não se pode descartar a possibilidade, então, de que a relação água/aglomerante variável afetou o comportamento dos compósitos no que tange a essa propriedade.

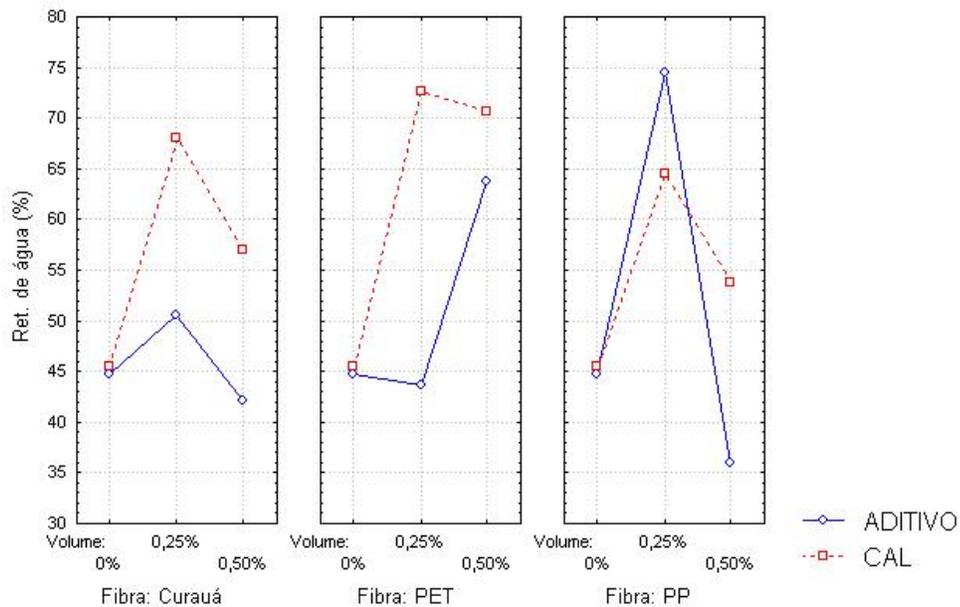


Ilustração 5.4 - Resultados dos ensaios de retenção de água

Novamente a análise estatística demonstra que todas as variáveis têm efeito significativo para esta propriedade, como pode ser observado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores de ANOVA para os ensaios de retenção de água

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	1026,78003	1	1026,78003	586731,43750	0,00000
B – Tipo de fibra	281,71063	2	140,85532	80488,75000	0,00000
C - Volume de fibra	2674,41211	2	1337,20605	764117,75000	0,00000
AxB	236,58063	2	118,29031	67594,46875	0,00000
AxC	424,82492	2	212,41246	121378,55469	0,00000
BxC	1854,62158	4	463,65540	264945,93750	0,00000
AxBxC	1059,01831	4	264,75458	151288,34375	0,00000
Resíduo	0,06300	36	0,00175		
Total	7558,01121	53			

5.2 – Ensaio em revestimento aplicado sobre alvenaria de blocos cerâmicos

Optou-se, para melhor entendimento da influência das fibras nos compósitos, por avaliar os resultados dos ensaios de forma individual para cada tipo de fibra ao longo do tempo de exposição. Mais adiante, é apresentado um estudo comparativo entre as fibras para as idades de 28 e 270 dias de idade, ou entre idades em que ocorram mudanças significativas nos compósitos. Escolheram-se essas idades a fim de avaliar alguma mudança no desempenho dos compósitos devido a eventual degradação das fibras.

5.2.1 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

a) Argamassas com fibra de curauá

A Ilustração 5.5 apresenta a evolução dos resultados de resistência de aderência para as argamassas com fibra de curauá durante o período de estudo.

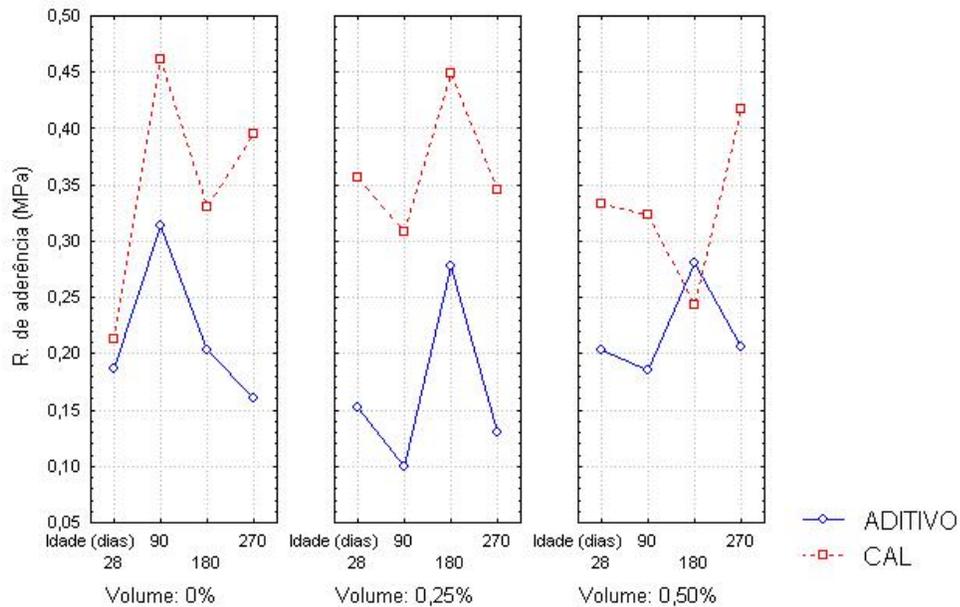


Ilustração 5.5 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com fibra de curauá

Analisando-se o gráfico constata-se que, enquanto as argamassas referências e as argamassas com aditivo e fibra apresentaram resultados abaixo do que é exigido pela NBR 13281/05 para 28 dias de idade (0,30 MPa), as argamassas com cal e fibra satisfizeram a norma. No entanto, nas idades posteriores praticamente todas as argamassas com cal na sua composição atingiram o requisito da norma, enquanto que as argamassas com aditivo se mantiveram aquém do exigido.

Esse baixo desempenho das argamassas com aditivo pode ser explicado pela incorporação de ar nos compósitos. Segundo alguns autores (CARASEK, 1996; ALVES, 2002; MOHAMAD *et al.*, 2000), a resistência de aderência de argamassas de revestimento diminui com o acréscimo do teor de ar incorporado. Isto é atribuído à redução da superfície de contato pela presença das bolhas de ar.

Além disso, Carasek (1996) relata que as argamassas contendo cal preenchem mais facilmente e completamente toda a superfície do substrato, o que acaba por proporcionar uma maior extensão de aderência. Vale ressaltar, também, que a durabilidade da aderência é proporcionada pela habilidade da cal em diminuir a

ocorrência de microfissuras e preencher os vazios do compósito pela sua carbonatação ao longo do tempo.

Carasek (1996) afirma que a maior parcela de acréscimo de resistência de aderência se dá durante os primeiros 28 dias e que, mesmo havendo aumentos após esse período, estes não são significativos. A autora afirma, ainda, que o tipo de cura utilizado tem importante papel nesse ganho de resistência com o tempo. Apesar dessas afirmações, verifica-se um ganho de resistência expressivo para 180 dias, principalmente para as argamassas de aditivo com fibra, bem como uma redução nessa propriedade para os 270 dias. Supõe-se que esse comportamento tenha sido influenciado pelas significativas mudanças nas condições climáticas a que os revestimentos estavam expostos na ocasião dos ensaios, como pode ser observado na Ilustração 5.6 (as setas indicam o mês em que os ensaios foram realizados). Vale ressaltar, porém, que todos os ensaios foram realizados após se verificar visualmente se as paredes não se encontravam úmidas e, ainda, pelo menos 48 horas depois de qualquer precipitação pluviométrica.

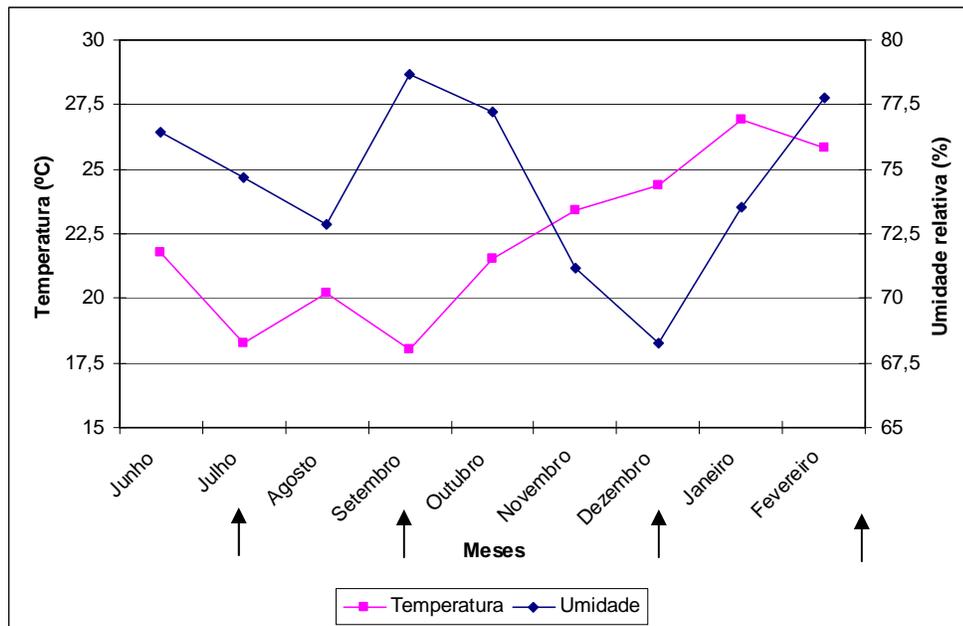


Ilustração 5.6 – Variação média de temperatura e umidade relativa para o período de junho/05 a fevereiro/06

Quando se analisa estatisticamente o comportamento das argamassas com fibra de curauá (Tabela 5.5), constata-se que a única variável que se mostra significativa é o tipo de argamassa utilizada, além de uma interação entre o volume de fibra e o tempo de exposição dos compósitos.

Tabela 5.5 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com fibras de curauá

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,73836	1	0,73836	50,55862	0,00000
B - Volume de fibra	0,00668	2	0,00334	0,22884	0,79581
C - Tempo de exposição	0,06335	3	0,02112	1,44604	0,23300
AxB	0,05312	2	0,02656	1,81870	0,16679
AxC	0,07792	3	0,02597	1,77851	0,15507
BxC	0,34107	6	0,05685	3,89244	0,00140
AxBxC	0,07744	6	0,01291	0,88376	0,50921
Resíduo	1,70868	117	0,01460		
Total	3,06663	140			

b) Argamassas com fibra PET

Apresenta-se na Ilustração 5.7 os resultados dos ensaios de resistência de aderência para as argamassas com fibra PET.

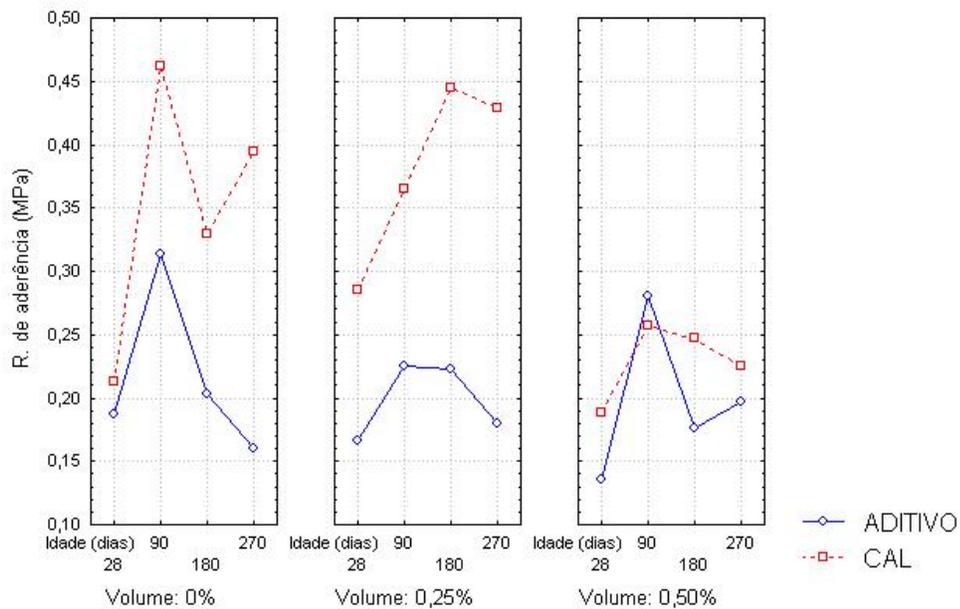


Ilustração 5.7 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com fibra de PET

Selmo, citada por Carasek (1996), afirma, em sua pesquisa que, para argamassas de revestimento, a relação água/cimento é inversamente proporcional à resistência de aderência. Desta forma, acredita-se que as altas relações água/aglomerante das argamassas com PET influenciaram negativamente no que tange à resistência de aderência dos compósitos, principalmente para o traço C0,50PET que possui a maior relação entre todas as argamassas estudadas.

Diferentemente das argamassas com fibra de curauá, as variáveis significativas para as argamassas com fibra de PET são o tipo de argamassa, o volume de fibra, o tempo de exposição e a interação entre tipo de argamassa e volume de fibra, conforme Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com fibras de PET

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,46070	1	0,46070	22,72051	0,00001
B - Volume de fibra	0,16992	2	0,08496	4,19007	0,01748
C - Tempo de exposição	0,27040	3	0,09013	4,44507	0,00538
AxB	0,13692	2	0,06846	3,37624	0,03754
AxC	0,06087	3	0,02029	1,00073	0,39520
BxC	0,09288	6	0,01548	0,76343	0,60011
AxBxC	0,05331	6	0,00889	0,43821	0,85199
Resíduo	2,37239	117	0,02028		
Total	3,61740	140			

c) Argamassas com fibra de polipropileno

Apesar das relações água/aglomerante das argamassas com fibra de PP serem iguais às das argamassas referência, a resistência de aderência apresentou uma tendência de decréscimo com o aumento no teor de fibra para 0,50%, como pode ser observado na Ilustração 5.8.

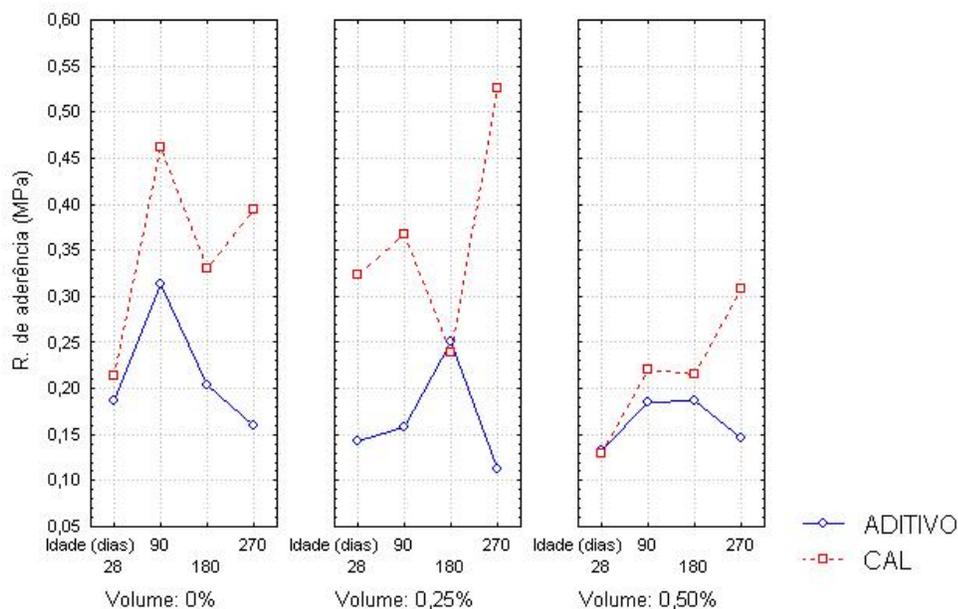


Ilustração 5.8 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com fibra de PP

É possível que o baixo desempenho atingido pela argamassa de cal para o volume de 0,50% de fibra pode ser explicado pelo alto teor de ar incorporado, conforme foi

demonstrado no item 5.1.2, apesar desse traço apresentar uma evolução de resistência mais condizente com o que era esperado. Acredita-se que, mais uma vez, as variações nos fatores climáticos do ambiente exerceram uma grande influência no comportamento dos compósitos.

Neste caso, as variáveis que se mostraram significativas foram semelhantes às encontradas para as com fibra de PET, somando-se a elas uma interação entre o tipo de argamassa e o tempo de exposição, conforme Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com fibras de polipropileno

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,60780	1	0,60780	40,96595	0,00000
B - Volume de fibra	0,21333	2	0,10667	7,18930	0,00114
C - Tempo de exposição	0,20231	3	0,06744	4,54538	0,00474
AxB	0,12130	2	0,06065	4,08785	0,01923
AxC	0,27619	3	0,09206	6,20515	0,00060
BxC	0,12200	6	0,02033	1,37049	0,23222
AxBxC	0,11145	6	0,01857	1,25192	0,28515
Resíduo	1,73589	117	0,01484		
Total	3,39027	140			

d) Estudo comparativo para 28 e 270 dias

A Ilustração 5.9 apresenta os resultados para a resistência de aderência para todas as argamassas estudadas com 28 dias de exposição. Pode-se observar pelo gráfico o melhor desempenho das argamassas de cal com fibra de curauá, sendo que elas atendem à resistência mínima de aderência requisitada pela norma. Outros traços que também atendem a esse requisito são os de cal com 0,25% de fibra de PET e de PP. As misturas com 0,50% dessas fibras não apresentaram bons resultados, provavelmente causados pelo alto teor de ar incorporado pelas fibras e pelo aumento da relação água/aglomerante.

As argamassas contendo aditivo, como já era esperado, apresentaram baixos valores de resistência, não sendo preponderante o tipo ou volume de fibra utilizados em sua composição.

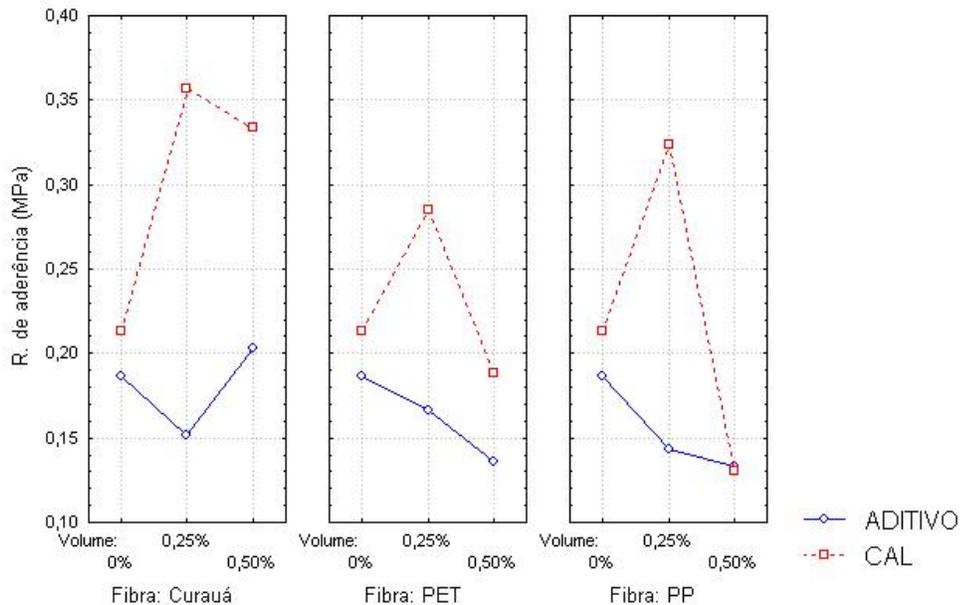


Ilustração 5.9 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com 28 dias

Para os 270 dias de exposição (Ilustração 5.10) não há diferença significativa na incorporação de fibras para as argamassas com aditivo. Ressalta-se, ainda, que nenhuma argamassa com aditivo se mostrou aceitável no que diz respeito à exigência da norma para revestimento externo. Já para as argamassas com cal, enquanto que a incorporação de fibra vegetal parece não ter modificado o desempenho da argamassa, as fibras de PET e de polipropileno, particularmente para os teores de 0,50%, diminuíram sensivelmente essa propriedade quando comparadas ao desempenho da argamassa referência e com 0,25% de fibra em volume.

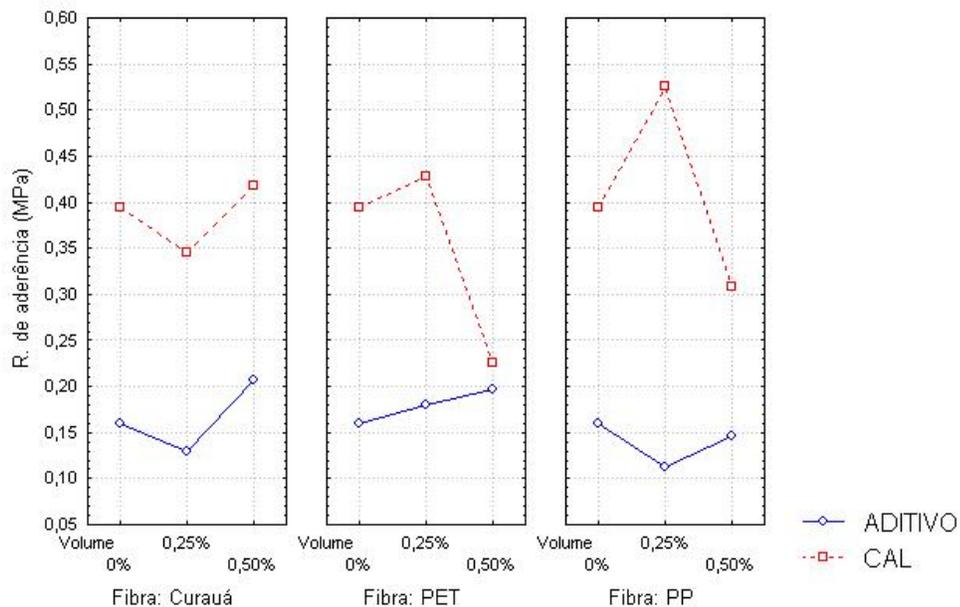


Ilustração 5.10 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência para argamassas com 270 dias

Analisando-se estatisticamente os resultados dos ensaios de resistência de aderência para as duas idades, observa-se que os fatores preponderantes nessa propriedade são o tipo de argamassa utilizado e a interação entre o tipo de argamassa e o volume de fibra, conforme demonstrado nas Tabelas 5.8 e 5.9. Vale ressaltar, porém, que para 28 dias, se fosse adotada uma significância de 90%, a variável tipo de fibra também seria significativa.

Tabela 5.8 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com 28 dias

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,189347	1	0,18935	17,87112	0,00006
B - Tipo de fibra	0,057305	2	0,02865	2,70429	0,07242
C - Volume de fibra	0,049191	2	0,02460	2,32140	0,10405
AxB	0,017399	2	0,00870	0,82107	0,44327
AxC	0,098410	2	0,04921	4,64411	0,01207
BxC	0,070445	4	0,01761	1,66220	0,16584
AxBxC	0,021439	4	0,00536	0,50586	0,73151
Resíduo	0,942970	89	0,01060		
Total	1,446507	106			

Tabela 5.9 - Valores de ANOVA para os ensaios de resistência de aderência com 270 dias

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	1,24742	1	1,24742	59,39418	0,0000
B - Tipo de fibra	0,00278	2	0,00139	0,06616	0,93603
C - Volume de fibra	0,02940	2	0,01470	0,70002	0,49938
AxB	0,04615	2	0,02308	1,09878	0,33791
AxC	0,13147	2	0,06573	3,12983	0,04874
BxC	0,09333	4	0,02333	1,11093	0,35670
AxBxC	0,07248	4	0,01812	0,86279	0,48973
Resíduo	1,80621	86	0,02100		
Total	3,42925	103			

5.2.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

a) Argamassas com fibra de curauá

Apresentam-se, na Ilustração 5.11, os resultados da avaliação de profundidade de carbonatação para as argamassas com fibras de curauá.

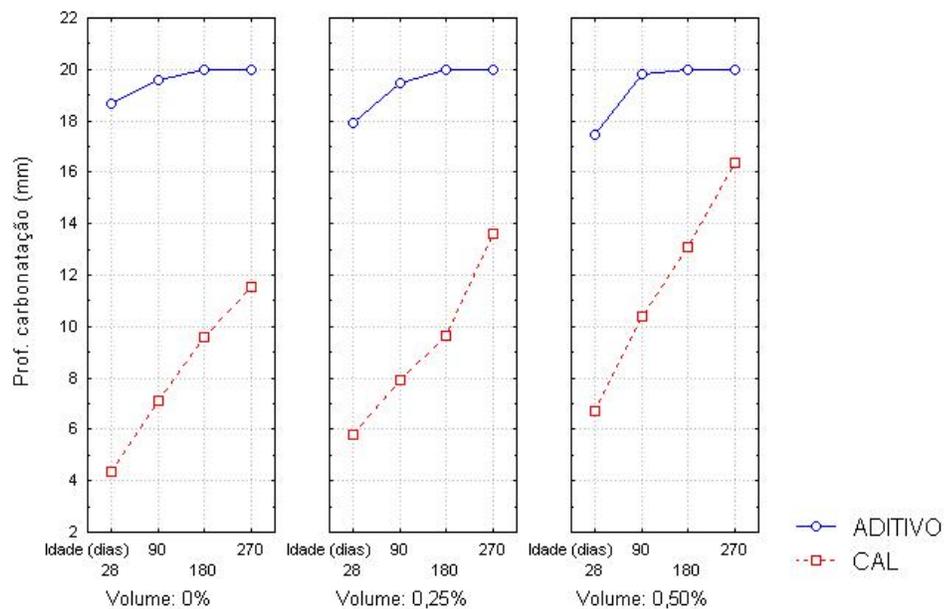


Ilustração 5.11 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de curauá

Como já era esperado, as argamassas com aditivo apresentaram uma profundidade de carbonatação maior do que das argamassas com cal. Isso se deve tanto pela característica básica que a cal confere aos compósitos, como pelo teor de ar incorporado nas argamassas com aditivo. Soma-se a isso o fato da carbonatação da cal resultar em uma argamassa com menos poros e mais densa, dificultando a difusividade do CO₂ (NEVILLE, 1997).

Pode-se perceber, também, que a incorporação de fibras confere às argamassas de cal uma tendência maior à carbonatação quando comparadas às argamassas referências. Há a possibilidade de esse comportamento ser explicado pela maior incorporação de ar dos compósitos com fibra, conforme observado no subitem 5.1.2, o que poderia acabar aumentando a permeabilidade da argamassa e, conseqüentemente, a vulnerabilidade à carbonatação. Atenta-se, ainda, para o aumento da porosidade dos compósitos com fibra devido à maior relação água/aglomerante utilizada.

Já para a argamassa com aditivo, a influência na incorporação de fibras foi bem menor. A Tabela 5.10 apresenta os resultados da análise de variância dos resultados relativos às fibras de curauá.

Tabela 5.10 - Valores de ANOVA para os ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de curauá

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	3507,54028	1	3507,54028	2400,82422	0,00000
B - Volume de fibra	39,69806	2	19,84903	13,58617	0,00001
C – Tempo de exposição	414,68912	3	138,22971	94,61480	0,00000
AxB	67,52869	2	33,76435	23,11086	0,00000
AxC	172,46102	3	57,48701	39,34843	0,00000
BxC	12,56125	6	2,09354	1,43298	0,20817
AxBxC	6,66662	6	1,11110	0,76052	0,60243
Resíduo	165,09001	113	1,46097		
Total	4386,23505	136			

b) Argamassas com fibra de PET e de polipropileno

Conforme as Ilustrações 5.12 e 5.13, observa-se que as argamassas de fibra de PET e de polipropileno apresentaram um comportamento semelhante às das argamassas com fibra de curauá.

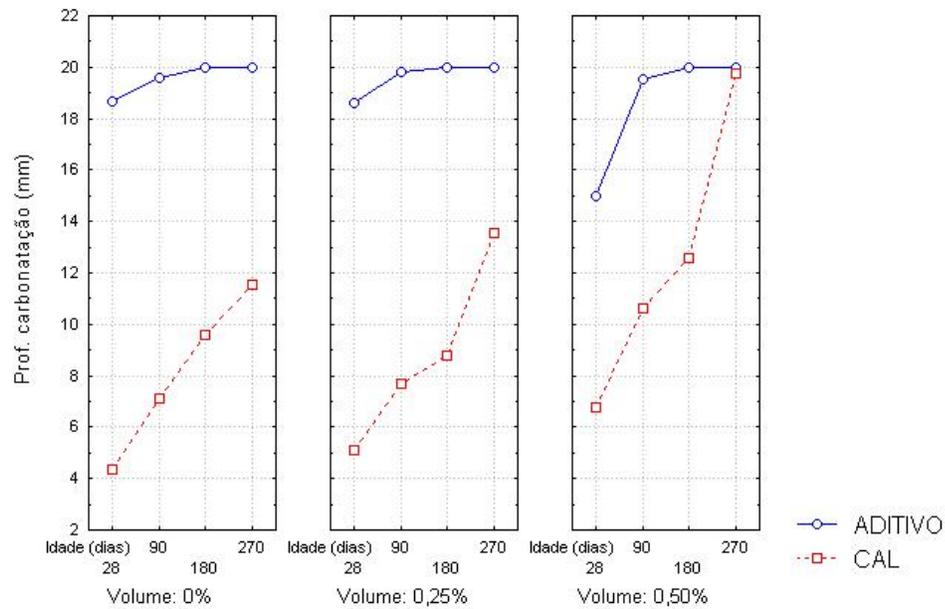


Ilustração 5.12 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de PET

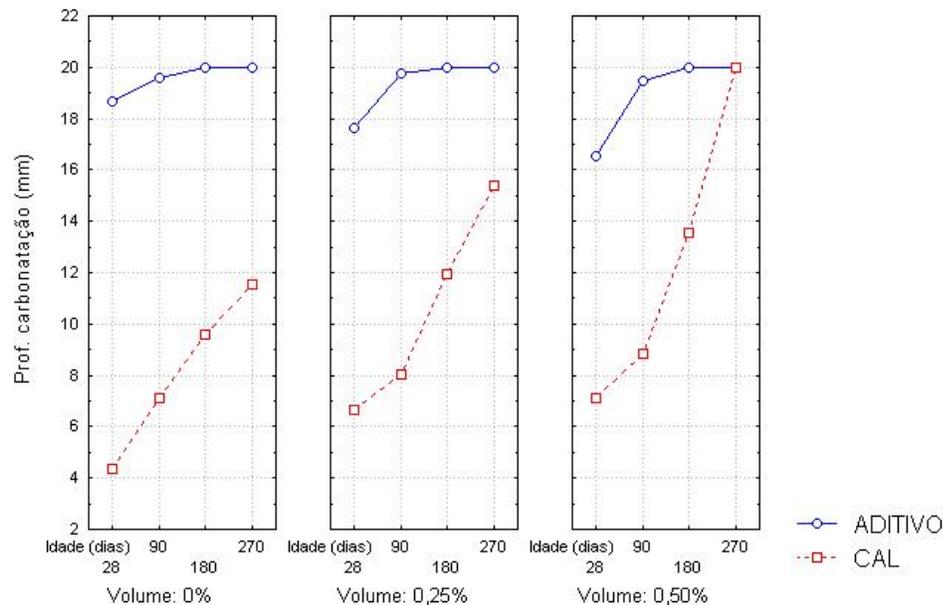


Ilustração 5.13 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com fibra de polipropileno

Como pôde ser observado nas Ilustrações 5.11, 5.12 e 5.13, as fibras estão nitidamente aumentando a permeabilidade das argamassas com cal, o que acaba por facilitar a entrada de CO_2 nas argamassas estudadas. Pode-se constatar que o aumento dessa propriedade é diretamente proporcional ao teor de fibra utilizado.

c) Estudo comparativo para 28 e 180 dias

Na Ilustração 5.14 apresentam-se os resultados da avaliação de frente de carbonatação para as argamassas estudadas com 28 dias de exposição. Pelo gráfico percebe-se, novamente, uma clara tendência ao aumento da carbonatação para as argamassas de cal com a incorporação de fibras. Todavia, não se percebe uma influência significativa do tipo de fibra utilizado nos compósitos, apenas uma interação entre o tipo de argamassa e o volume de fibra utilizada (Tabela 5.11).

Para as argamassas com aditivo, ainda que a carbonatação seja muito maior comparada às argamassas de cal, nota-se uma provável tendência de diminuição da frente de carbonatação com o aumento da adição de fibras no compósito.

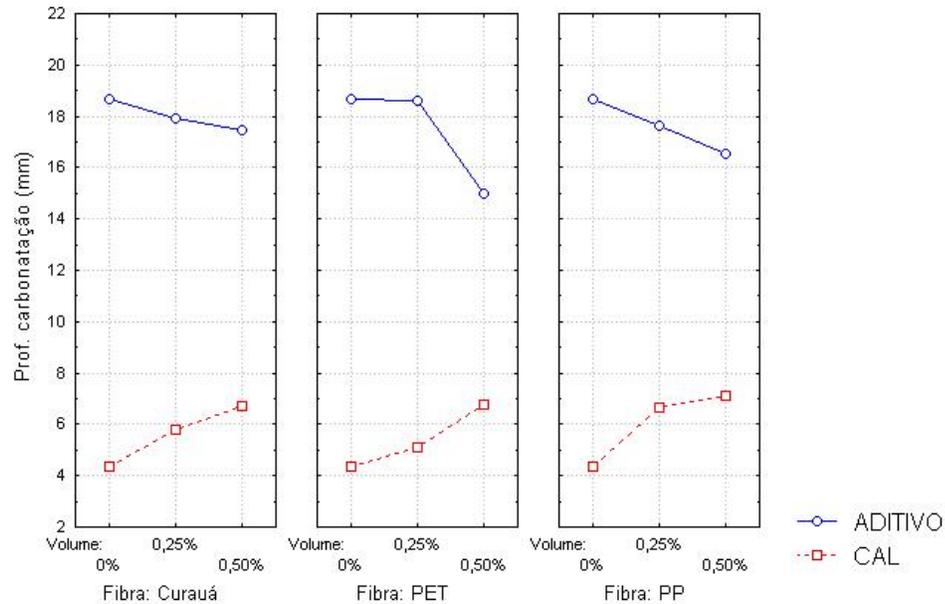


Ilustração 5.14 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 28 dias

Tabela 5.11 - Valores de ANOVA para os ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 28 dias

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	3830,22803	1	3830,22803	1403,38171	0,0000
B - Tipo de fibra	3,83094	2	1,91547	0,70182	0,49840
C - Volume de fibra	3,95249	2	1,97625	0,72409	0,48760
AxB	3,00174	2	1,50087	0,54991	0,57895
AxC	104,49905	2	52,24953	19,14404	0,0000
BxC	6,66644	4	1,66661	0,61064	0,65604
AxBxC	15,97963	4	3,99491	1,46372	0,21997
Resíduo	242,90634	89	2,72928		
Total	4211,06467	106			

Optou-se por analisar o desempenho aos 180 dias, em vez de 270 dias, pois as argamassas com aditivo já se encontravam todas carbonatadas nessa idade, como pode ser visto na Ilustração 5.15. Pelo gráfico e pela Tabela 5.12 nota-se que, para 180 dias de exposição, o tipo de fibra tem influência significativa no desempenho do compósito. Particularmente a adição de 0,25% de fibra de curauá e de PET apresentou, para essa idade, comportamento semelhante às argamassas referências.

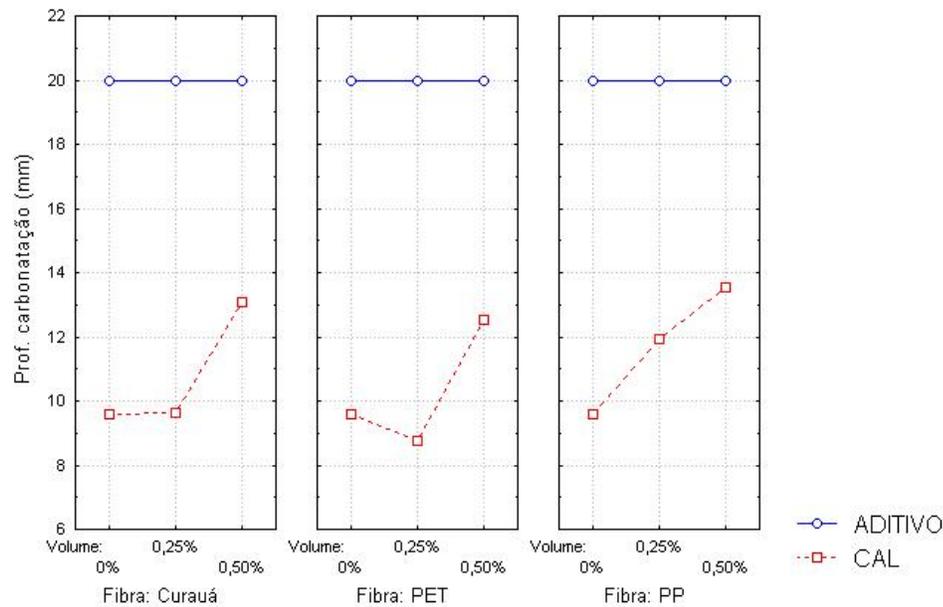


Ilustração 5.15 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 180 dias

Tabela 5.12 - Valores de ANOVA para os ensaios de profundidade de carbonatação para argamassas com 180 dias

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	2128,28687	1	2128,28687	1760,49524	0,0000
B - Tipo de fibra	9,31477	2	4,65738	3,85254	0,02503
C - Volume de fibra	55,28386	2	27,64193	22,86510	0,00000
AxB	8,86588	2	4,43294	3,66688	0,02968
AxC	59,22763	2	29,61382	24,49622	0,00000
BxC	7,27228	4	1,81807	1,50389	0,20831
AxBxC	8,14771	4	2,03693	1,68492	0,16097
Resíduo	102,75766	85	1,20891		
Total	2379,15666	102			

5.2.3 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE

No ensaio de permeabilidade com cachimbo obtiveram-se resultados extremamente díspares para cada tipo de argamassa. Para as argamassas com cal foi possível realizar todas as medições em todas as idades necessárias para o período de 15 minutos. Todavia, para as argamassas com aditivo, a quantidade de água utilizada pelo ensaio foi totalmente absorvida antes do término do período de tempo citado, com

exceção das argamassas onde foram incorporadas fibras para o período de 270 dias de idade. Para essas argamassas foi registrado o tempo necessário para que ocorresse essa absorção.

Desta forma, apresenta-se, a seguir, análise dos resultados de cada tipo de argamassa separadamente, reiterando-se o melhor desempenho das argamassas de cal quando comparadas às argamassas de aditivo.

a) Argamassas com fibra de curauá

Como era esperado, a permeabilidade do revestimento decresceu com o passar do tempo, conforme demonstrado na Ilustração 5.16. É possível que isso se deva ao processo de carbonatação da cal que acaba por fechar os poros da argamassa, conseqüentemente diminuindo sua permeabilidade. No entanto, para a argamassa com 0,50% de fibra ocorre um efeito contrário. Supõe-se que isso se deva à grande quantidade de fibra contida no compósito e à sua elevada absorção de água característica. Ressalta-se, ainda, o melhor desempenho da argamassa referência quando comparada aos compósitos com fibra.

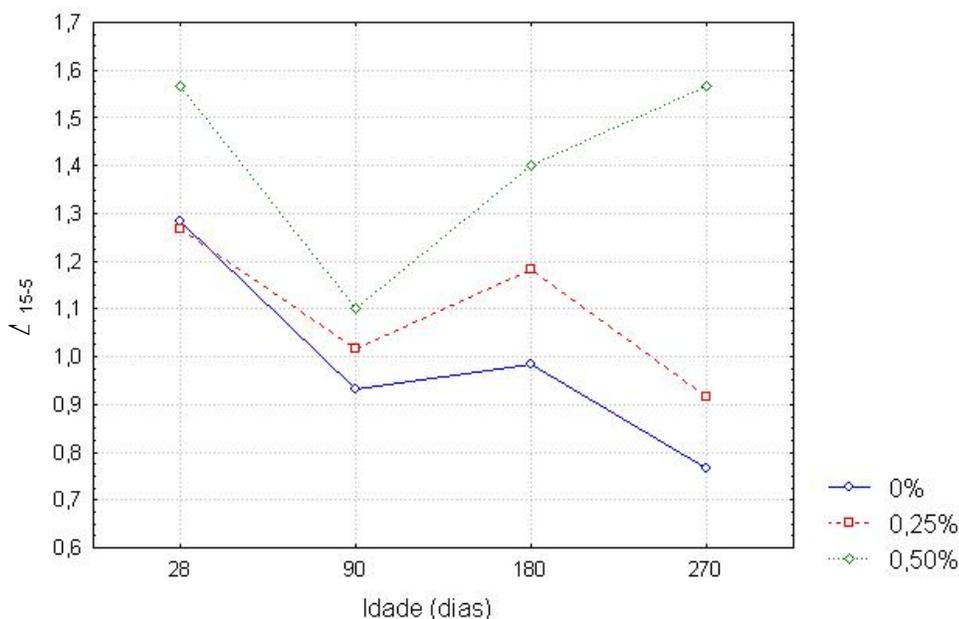


Ilustração 5.16 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com fibra de curauá

Analisando-se estatisticamente (Tabela 5.13) o desempenho das argamassas de cal com fibra de curauá, percebe-se que o volume de fibra e o tempo de exposição dos compósitos são significativos no que diz respeito à sua permeabilidade.

Tabela 5.13 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com curauá

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Volume de fibra	2,25694	2	1,12847	8,28912	0,00066
B - Tempo de exposição	1,29931	3	0,43310	3,18132	0,03025
AxB	0,85861	6	0,14310	1,05115	0,40192
Resíduo	8,16833	60	0,13614		
Total	12,58319	71			

Para as argamassas com aditivo apresentam-se, abaixo, os resultados até os 180 dias de idade. Para o desempenho aos 270 dias foi possível fazer uma análise conjunta com as argamassas de cal, e que será apresentada mais adiante.

Desta forma, analisando o gráfico da Ilustração 5.17, pode-se observar que, se teor de fibra for acrescido, o tempo para absorção de toda a água do ensaio também aumenta.

No entanto, percebe-se que para 180 dias de exposição há um decréscimo substancial do tempo para a argamassa com 0,50% de fibra. Ressalta-se, entretanto, que, mesmo com o expressivo decréscimo, o compósito com fibra porta-se melhor que a argamassa referência no que diz respeito a essa propriedade.

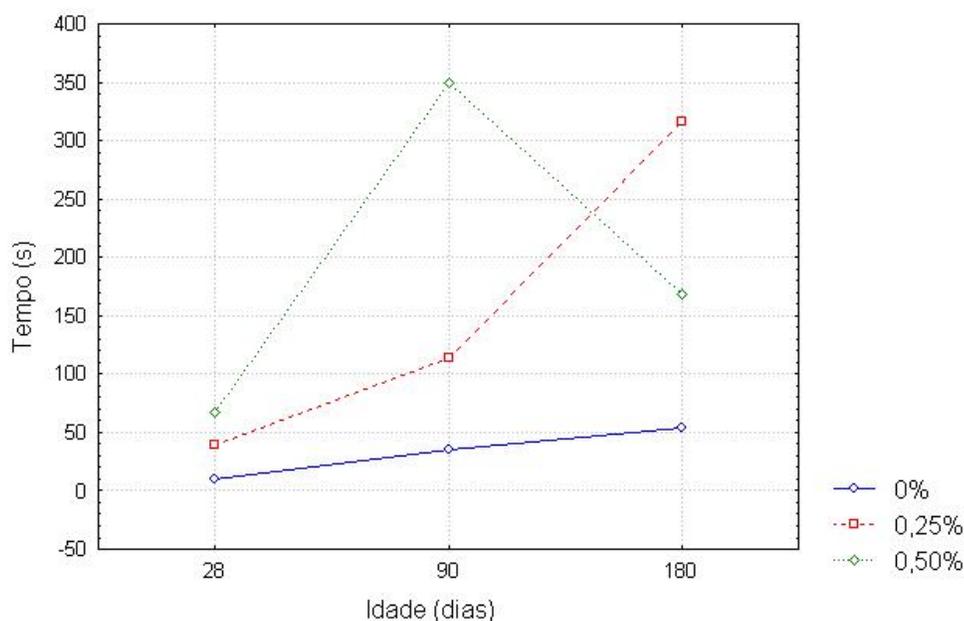


Ilustração 5.17 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas com aditivo e fibra de curauá

Diferentemente das argamassas com cal, para as argamassas com aditivo e fibra de curauá o único efeito significativo no seu desempenho é o volume de fibra utilizado (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com curauá

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Volume de fibra	247150,57813	2	123575,28906	3,33775	0,04516
B - Tempo de exposição	225149,53125	2	112574,76563	3,04063	0,05844
AxB	269857,34375	4	67464,33594	1,82220	0,14252
Resíduo	1554987,65625	42	37023,51563		
Total	2297145,10938	50			

b) Argamassas com fibra de PET

Quando se analisa a Ilustração 5.18, percebe-se que a incorporação de fibras de PET dá ao compósito comportamento semelhante à das argamassas com fibra de curauá, principalmente para o teor de 0,50% de fibra. Todavia, observa-se um desempenho melhor do traço com 0,25% de fibra quando comparado com a argamassa referência, principalmente para as primeiras idades.

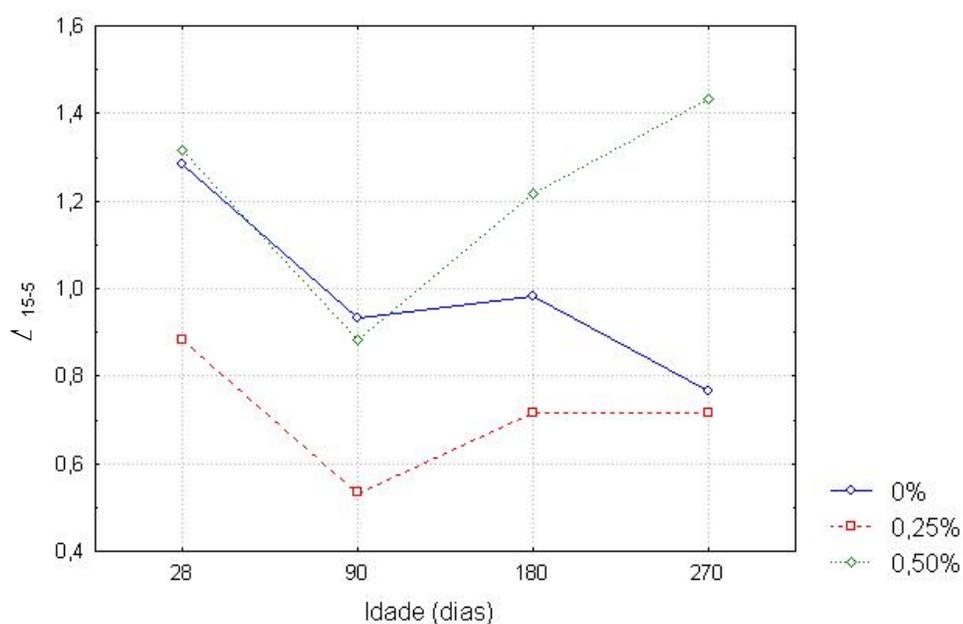


Ilustração 5.18 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com fibra de PET

No gráfico da Ilustração 5.19 observa-se que a diferença significativa no comportamento dos compósitos se dá entre a argamassa referência e as argamassas com fibra, sendo que a diferença no desempenho entre o volume de 0,25% e 0,50% de fibra é praticamente inexistente.

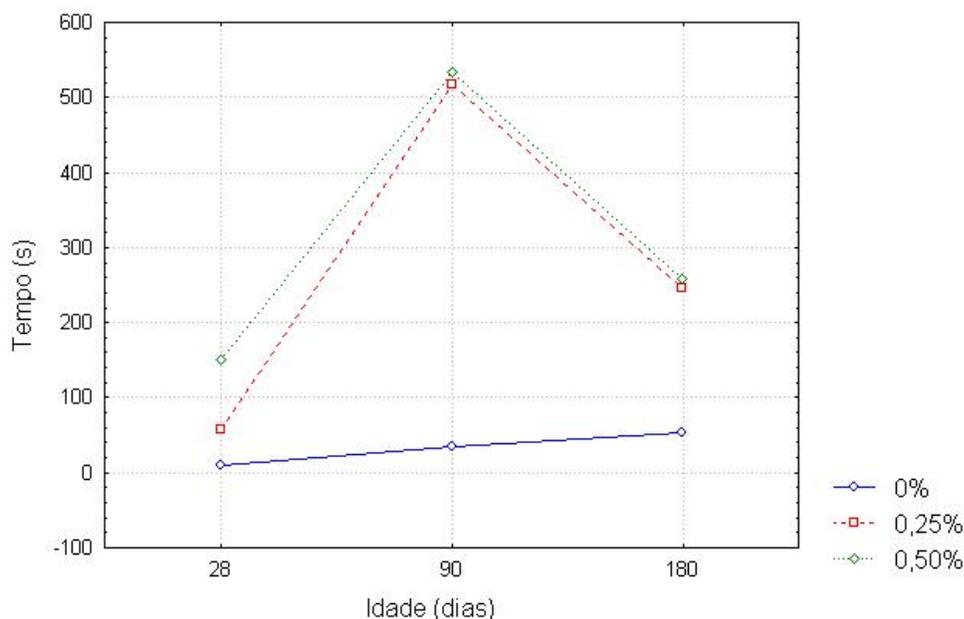


Ilustração 5.19 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com fibra de PET

Para as argamassas com cal com fibra de PET o único efeito estatístico significativo diz respeito ao volume de fibra utilizado nos compósitos (Tabela 5.15). Vale ressaltar, entretanto, que se a análise estatística fosse para 90% de significância, a variável tempo de exposição tornar-se-ia significativa para a propriedade.

Já para a argamassa com aditivo, os fatores preponderantes são o volume de fibra utilizado e o tempo de exposição dos revestimentos, conforme Tabela 5.16.

Tabela 5.15 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com PET

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Volume de fibra	3,01361	2	1,50681	9,00481	0,00038
B - Tempo de exposição	1,28444	3	0,42815	2,55865	0,06342
AxB	0,92639	6	0,15440	0,92270	0,48524
Resíduo	10,04000	60	0,16733		
Total	15,26444	71			

Tabela 5.16 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com PET

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Volume de fibra	835830,81250	2	417915,40625	5,71441	0,00699
B - Tempo de exposição	708307,68750	2	354153,84375	4,84256	0,01372
AxB	311894,15625	4	77973,53906	1,06618	0,38741
Resíduo	2632811,90625	36	73133,66406		
Total	4488844,56250	44			

c) Argamassas com fibra de polipropileno

Pela Ilustração 5.20 verifica-se a diminuição da permeabilidade dos revestimentos contendo fibras PP com o passar do tempo, ressaltando-se, entretanto, o melhor desempenho da argamassa referência.

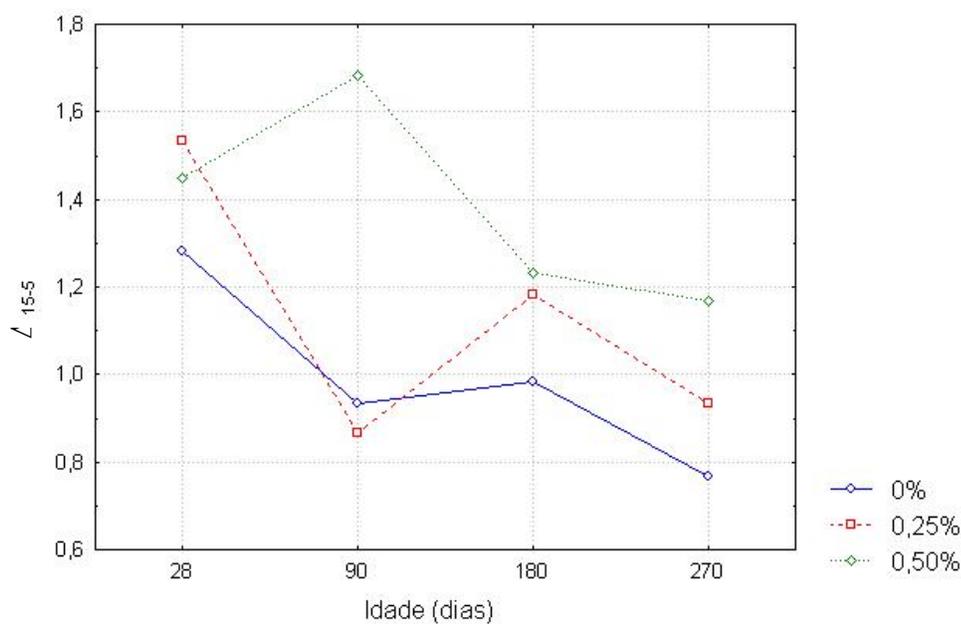


Ilustração 5.20 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com fibra de PP

Novamente, analisando-se estatisticamente, as variáveis significativas para as argamassas de cal com fibra de polipropileno são o volume de fibra e o tempo de exposição, conforme mostrado na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal com PP

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Volume de fibra	1,89528	2	0,94764	6,65659	0,00245
B - Tempo de exposição	1,99819	3	0,66606	4,67870	0,00530
AxB	1,46139	6	0,24356	1,71089	0,13403
Resíduo	8,54167	60	0,14236		
Total	13,89653	71			

Como no caso das outras fibras estudadas, percebe-se, pelo gráfico da Ilustração 5.21, que as argamassas com aditivo e fibra de polipropileno apresentaram resultados melhores do que a argamassa sem fibra. Nota-se, sobretudo, o comportamento semelhante dos compósitos para 180 dias de idade, independentemente do teor de fibra utilizado. Estatisticamente, a única variável que influencia no comportamento das argamassas é o volume de fibra utilizado.

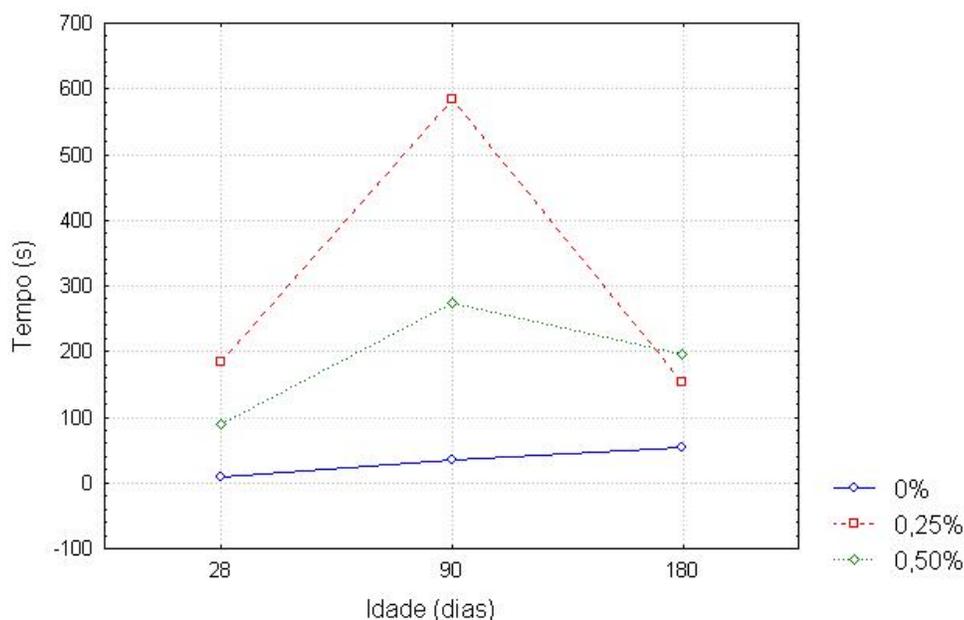


Ilustração 5.21 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo com fibra de PP

d) Estudo comparativo para 28 e 270 dias

Conforme foi exposto no início do presente subitem, a análise para 28 dias será realizada separadamente para cada tipo de argamassa.

Desta forma, pelo gráfico da Ilustração 5.22 pode-se observar que, para o teor de 0,25%, a adição de fibra de PET reduziu a permeabilidade do revestimento, enquanto que a adição de fibras de curauá pouco alterou essa propriedade, e a adição de fibras de polipropileno apresentou uma tendência de aumento de permeabilidade. Entretanto, quando se incorporou 0,50% de fibra, os compósitos apresentaram comportamentos inversos.

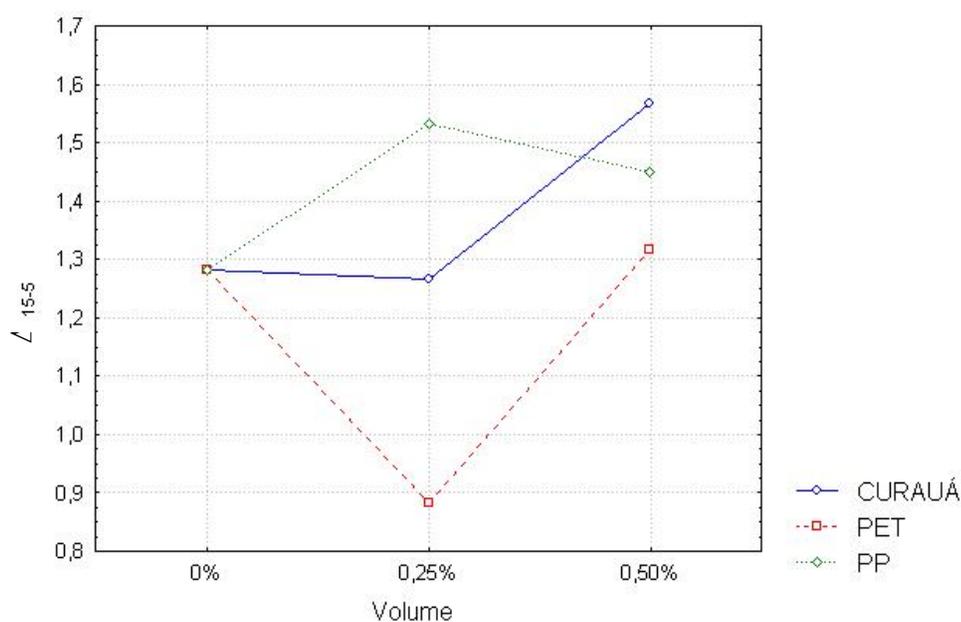


Ilustração 5.22 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de cal para 28 dias

Estatisticamente, para as argamassas de cal nessa idade, não há efeito significativo no seu desempenho quando analisado para 95% de significância, conforme tabela 5.18. No entanto, se for adotado uma significância de 90%, observa-se que o tipo de fibra utilizado é relevante.

Tabela 5.18 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de cal para 28 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de fibra	0,69148	2	0,34574	3,00547	0,05955
B - Volume de fibra	0,45593	2	0,22796	1,98165	0,14969
AxB	0,77741	4	0,19435	1,68947	0,16907
Resíduo	5,17667	45	0,11504		
Total	7,10148	53			

Já para as argamassas com aditivo, percebe-se um aumento no tempo necessário para absorção da água quando são adicionadas fibras no revestimento, conforme demonstrado na Ilustração 5.23. Esse aumento mostra-se mais expressivo principalmente para as fibras de PET (0,50%) e de PP (0,25%). A análise estatística dessa propriedade encontra-se na Tabela 5.19.

É interessante notar o comportamento altamente díspare da fibra de PET quando incorporada em tipos de argamassas de revestimentos diferentes. Para a argamassa de cal um incremento em seu volume aumenta a permeabilidade do material, enquanto que para argamassas de aditivo o efeito é contrário.

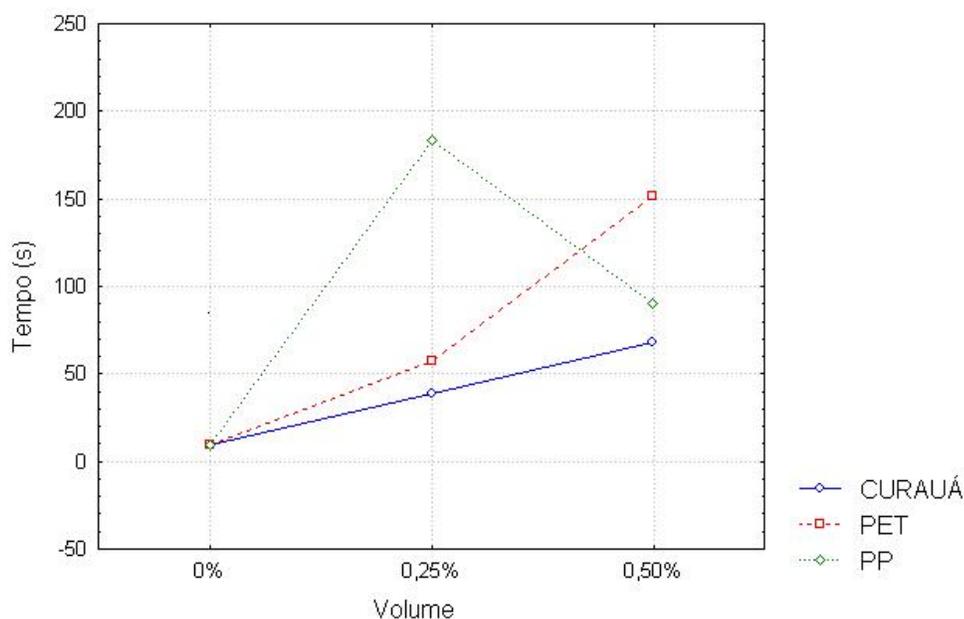


Ilustração 5.23 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo para 28 dias

Tabela 5.19 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas de aditivo para 28 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de fibra	27769,66797	2	13884,83398	2,24074	0,11866
B - Volume de fibra	92385,60156	2	46192,80078	7,45462	0,00166
AxB	64690,49219	4	16172,62305	2,60995	0,04858
Resíduo	266450,75977	43	6196,52930		
Total	451296,52148	51			

Para a idade de 270 dias, pôde-se fazer uma comparação entre os dois tipos de argamassas com fibra utilizados, devido ao melhor desempenho dos compósitos com aditivo. Vale ressaltar, entretanto, que a argamassa referência com aditivo não obteve boa performance, obtendo-se para ela um tempo médio de cerca de 10 segundos para absorção total da água contida no cachimbo, e, por isso, não foi enfocada nessa análise.

Na Ilustração 5.24 mostra-se o comportamento das argamassas citadas para os 270 dias de idade. Observa-se que para essa idade apenas as argamassas de cal com 0,25% de fibra apresentam desempenho semelhante ao da argamassa de cal referência. As argamassas com aditivo, como esperado, apresentaram-se mais permeáveis quando comparadas às de cal, com exceção do traço com 0,50% de fibra PET.

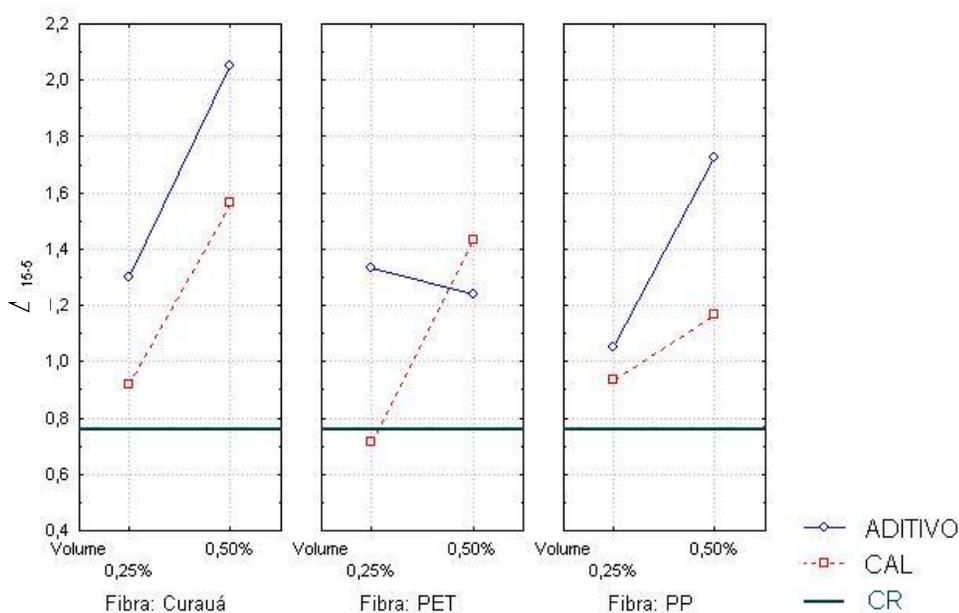


Ilustração 5.24 - Resultados dos ensaios de permeabilidade para argamassas com 270 dias de idade

Pela análise de variância mostrada na Tabela 5.20 observa-se que para a permeabilidade das argamassas com fibra os efeitos significativos encontram-se apenas nas variáveis tipo de argamassa e volume de fibra, não importando o tipo de fibra utilizada nos compósitos.

Tabela 5.20 - Valores de ANOVA para os ensaios de permeabilidade para argamassas com 270 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,98860	1	0,98860	6,05172	0,01780
B - Tipo de fibra	0,52024	2	0,26012	1,59233	0,21470
C - Volume de fibra	3,25712	1	3,25712	19,93840	0,00005
AxB	0,16709	2	0,08354	0,51141	0,60309
AxC	0,05027	1	0,05027	0,30774	0,58181
BxC	0,19783	2	0,09891	0,60550	0,55019
AxBxC	0,96802	2	0,48401	2,96286	0,06183
Resíduo	7,35117	45	0,16336		
Total	13,50035	56			

5.2.4 – ANÁLISE VISUAL DE FISSURAS

Optou-se por fazer uma abordagem qualitativa do eventual aparecimento de fissuração nas argamassas estudadas. Desta forma, observou-se a ausência de qualquer indício de fissuração durante os primeiros meses de observação. No entanto, após cerca de cinco meses de acompanhamento, notou-se o aparecimento de pequenas fissuras em cinco argamassas: C0,25C (I), C0,25PP (II), C0,25PET (III), C0,50C (VI) e CR (VII), conforme pode ser observado nas Ilustrações 5.25, 5.26 e 5.27.



Ilustração 5.25 – Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,25C e C0,25PP com cerca de 150 dias de idade



Ilustração 5.26 – Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,25PET e C0,50C com cerca de 150 dias de idade



Ilustração 5.27 - Localização e quantidade de fissuras na argamassa CR com cerca de 150 dias de idade

Como exposto, houve o aparecimento de fissuras tanto nos compósitos com fibras como no de argamassa referência. Acredita-se, então, que a real causa do aparecimento das fissuras no revestimento foi a provável retração causada pela significativa mudança nas condições climáticas durante o período, conforme demonstrado na Ilustração 5.6.

Outra mudança significativa no comportamento das argamassas de revestimento, no que diz respeito ao aparecimento de fissuras, pôde ser notada por volta de 7 meses de exposição. Para essa idade houve o aparecimento de inúmeras fissuras na argamassa C0,25C, além do aparecimento de algumas fissuras nas argamassas C0,25PET, C0,50PET (V) e CR. As outras argamassas citadas anteriormente que fissuraram após 5 meses de exposição (C0,25PP e C0,50C) praticamente não sofreram nenhuma alteração. Vale ressaltar, ainda, que para essa idade foram registrados os maiores valores de temperatura do período de estudo, chegando-se a uma máxima de cerca de 35°C.

Nas Ilustrações 5.28 e 5.29 abaixo, apresenta-se a evolução do aparecimento de fissuras nas argamassas estudadas para cerca de 7 meses de exposição.



Ilustração 5.28 - Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,25C e C0,25PET com cerca de 210 dias de idade



Ilustração 5.29 - Localização e quantidade de fissuras nas argamassas C0,50PET e CR com cerca de 210 dias de idade

Fazendo uma análise individual de uma fissura das argamassas C0,25C e CR, percebe-se que na argamassa com fibra a fissura se desenvolve em uma trajetória errática, enquanto que na argamassa referência a fissura ocorre praticamente em linha reta (Ilustração 5.30). Provavelmente essa é uma das causas do menor fissuramento da argamassa com 0,50% de fibra vegetal, já que, nesse caso, havia maior quantidade de fibras disponíveis para interceptar o desenvolvimento das fissuras.

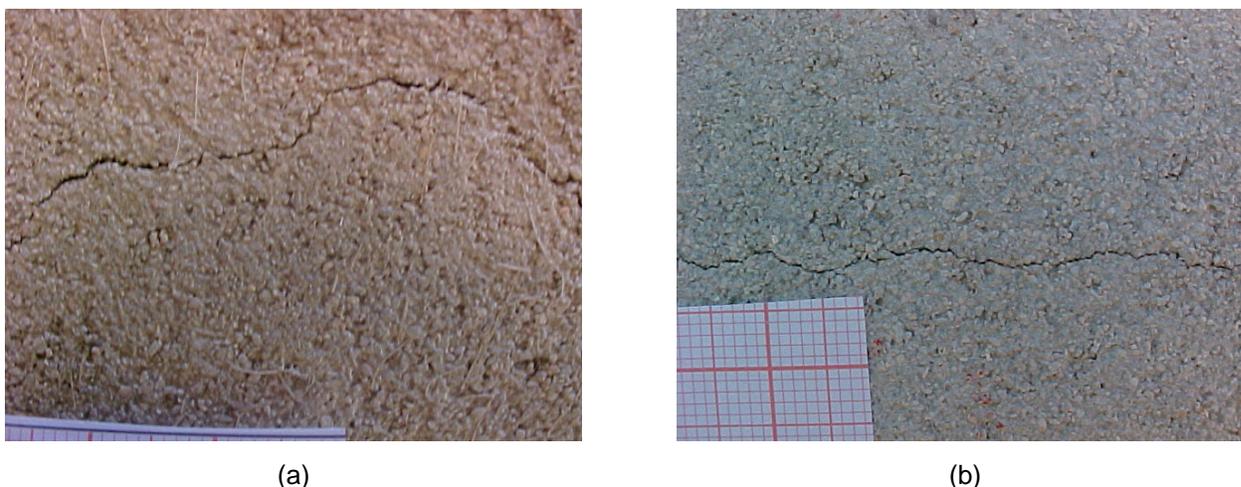


Ilustração 5.30 – (a) Fissura na argamassa 0,25C; (b) Fissura na argamassa CR

Não se pode afirmar que a ausência de fissuras em todas as argamassas com aditivo signifique o seu melhor desempenho. A causa provável desse comportamento se deve aos baixos valores de aderência encontrados e à alta quantidade de ar incorporado, como demonstrado no subitem 5.2.1. O que supõe-se é que quando as argamassas são submetidas às variações dimensionais (causada por alteração climática ou qualquer outro motivo), as tensões internas geradas são muito pequenas ou insuficientes para que ocorra fissuração do revestimento.

5.3 – Ensaio em corpos de prova no estado endurecido

5.3.1 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

a) Argamassas com fibra de curauá

Pelo gráfico apresentado na Ilustração 5.31 pode-se perceber o melhor desempenho das argamassas com aditivo quando comparadas às argamassas com cal. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato dessas argamassas conterem apenas cimento, e não cal, na sua composição. As argamassas com cal possuem uma parte do volume de cimento substituído por cal hidratada, que tem propriedades muito inferiores ao cimento *Portland* depois de endurecidas.

Observa-se, ainda, um melhor desempenho das argamassas referências para os 28 dias de exposição. Há a possibilidade de esse fato ser explicado pela maior relação água/aglomerante utilizada para as argamassas onde foram incorporadas fibras, principalmente para as com cal. No entanto, para a argamassa com aditivo e 0,25% de fibra a relação água/aglomerante foi a mesma para a argamassa referência. Não se descarta, então, que a incorporação de fibra esteja induzindo a uma redução da resistência.

No que diz respeito ao significativo decréscimo de resistência para as idades de 180 e 270 dias, supõe-se, mais uma vez, que a combinação de alta temperatura com baixa umidade foi responsável por esse comportamento. Chegou-se a essa hipótese, pois se observaram inúmeros corpos de prova com fissuras ou até mesmo rompidos antes da realização dos ensaios. Não se descarta, entretanto, a possibilidade de ter ocorrido uma hidratação retardada do MgO, o que ocasiona expansão e, conseqüentemente, ruptura ou fissuramento dos cp's.

Analisando-se estatisticamente os resultados, constata-se que as variáveis significativas nessa propriedade para esse tipo de argamassa são: tipo de argamassa, volume de fibra, tempo de exposição, além de interações entre elas, conforme demonstrado na Tabela 5.21.

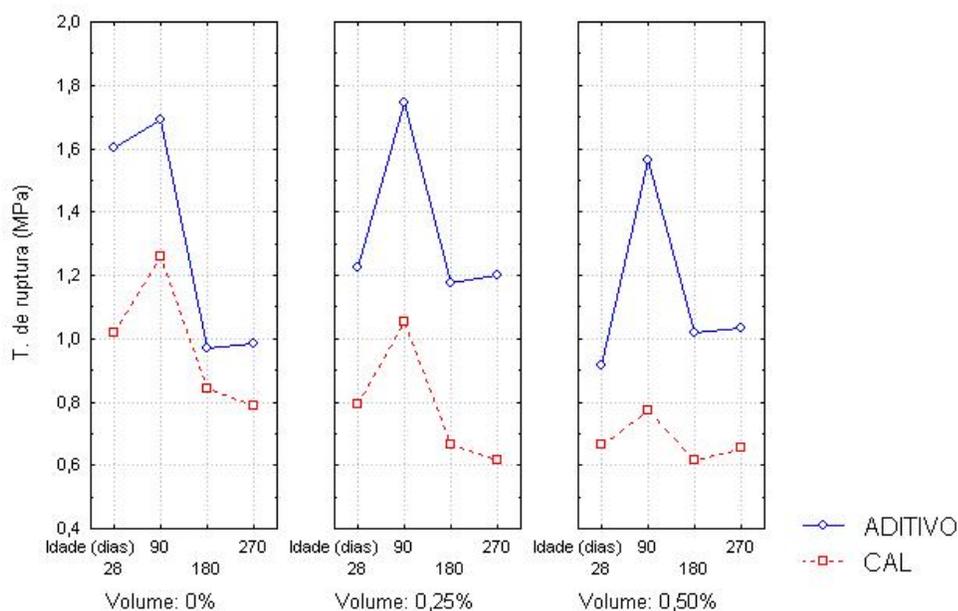


Ilustração 5.31 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de curauá

Tabela 5.21 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de curauá

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	6,86488	1	6,86488	144,04572	0,00000
B - Volume de fibra	1,38578	2	0,69289	14,53885	0,00000
C - Tempo de exposição	5,25740	3	1,75247	36,77198	0,00000
AxB	0,28089	2	0,14045	2,94699	0,05651
AxC	0,43971	3	0,14657	3,07549	0,03050
BxC	0,93877	6	0,15646	3,28304	0,00513
AxBxC	0,51065	6	0,08511	1,78581	0,10811
Resíduo	5,43298	114	0,04766		
Total	21,11106	137			

b) Argamassas com fibra de PET e com fibra de polipropileno

Na Ilustração 5.32 nota-se que para a argamassa com aditivo e 0,50% de fibra PET há uma diminuição na resistência entre as idades de 28 e 90 dias, sendo a tendência oposta para os outros compósitos. No entanto, tratando-se estatisticamente os dados, observou-se que não há diferença significativa entre esses valores.

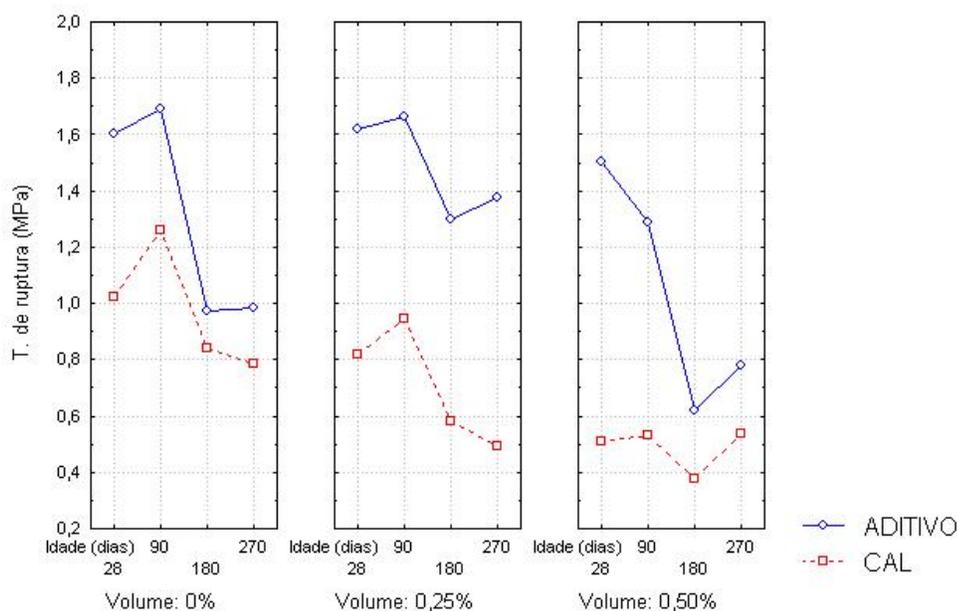


Ilustração 5.32 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PET

O comportamento das argamassas com fibra de polipropileno encontra-se no gráfico da Ilustração 5.33. Nota-se que os compósitos de cal com fibra, apesar de apresentarem mesma relação água/aglomerante das argamassas referência, apresentam resistências à ruptura mais baixas, principalmente nas primeiras idades. No entanto, para as duas últimas idades estudadas não há diferença significativa nos valores de tensão de ruptura entre os tipos de argamassa, excetuando-se as com 0,25% de fibra de polipropileno em que as argamassas de aditivo apresentaram resultados significativamente maiores que as argamassas de cal.

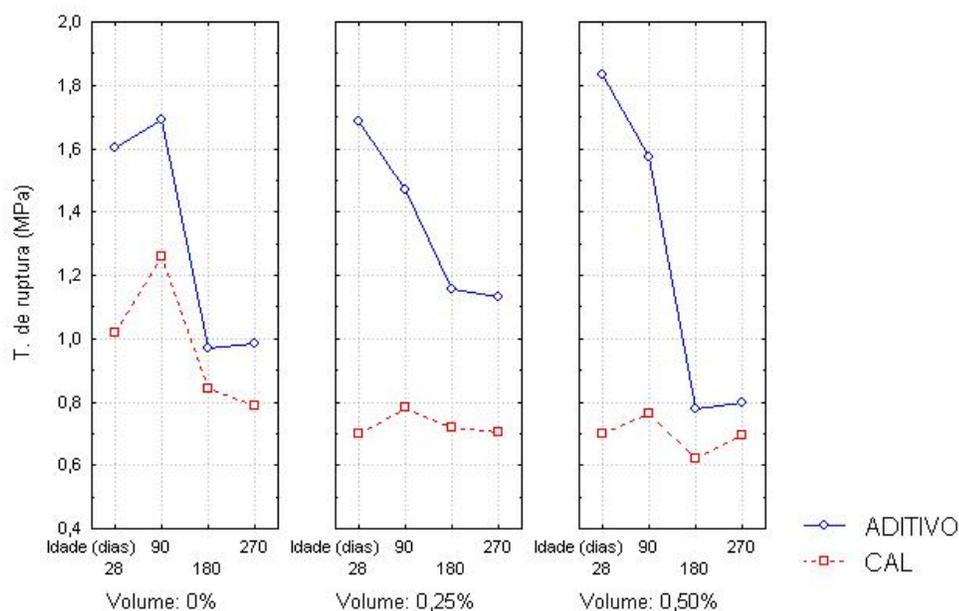


Ilustração 5.33 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PP

Para as argamassas contendo fibras de PET e de polipropileno, todas as variáveis foram significativas no que diz respeito à tensão de ruptura, como pode ser observado nas Tabelas 5.22 e 5.23.

Tabela 5.22 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PET

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	10,65768	1	10,65768	215,14157	0,00000
B - Volume de fibra	3,68711	2	1,84356	37,21500	0,00000
C - Tempo de exposição	5,69542	3	1,89847	38,32357	0,00000
AxB	1,12796	2	0,56398	11,38483	0,00003
AxC	0,85653	3	0,28551	5,76344	0,00108
BxC	0,45490	6	0,07582	1,53046	0,17503
AxBxC	0,63642	6	0,10607	2,14117	0,05440
Resíduo	5,35010	108	0,04954		
Total	28,46611	131			

Tabela 5.23 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com fibra de PP

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	8,98254	1	8,98254	241,79828	0,00000
B - Volume de fibra	0,71264	2	0,35632	9,59162	0,00014
C - Tempo de exposição	6,04561	3	2,01520	54,24664	0,00000
AxB	0,54324	2	0,27162	7,31165	0,00103
AxC	2,82355	3	0,94118	25,33540	0,00000
BxC	0,79011	6	0,13168	3,54479	0,00296
AxBxC	0,45194	6	0,07532	2,02762	0,06756
Resíduo	4,23497	114	0,03715		
Total	24,58460	137			

c) Estudo comparativo para 28 e 270 dias

Para as argamassas com aditivo, a única incorporação de fibra que realmente altera o comportamento dos compósitos é a de curauá. Percebe-se, pela Ilustração 5.34, que a adição dessa fibra diminui sensivelmente a resistência do material, enquanto que as outras fibras pouco influenciam no desempenho.

Já para as argamassas com cal há uma tendência à diminuição da resistência com a incorporação de fibra. Isso pode ter sido ocasionado tanto pelas maiores relações água/aglomerante dos compósitos quanto pelo teor de ar incorporado pelas fibras. Vale ressaltar, ainda, que não se pode afirmar qual das fibras apresenta melhor desempenho nessa propriedade, já que suas diferenças não são significativas quando analisadas estatisticamente por comparação múltipla de médias.

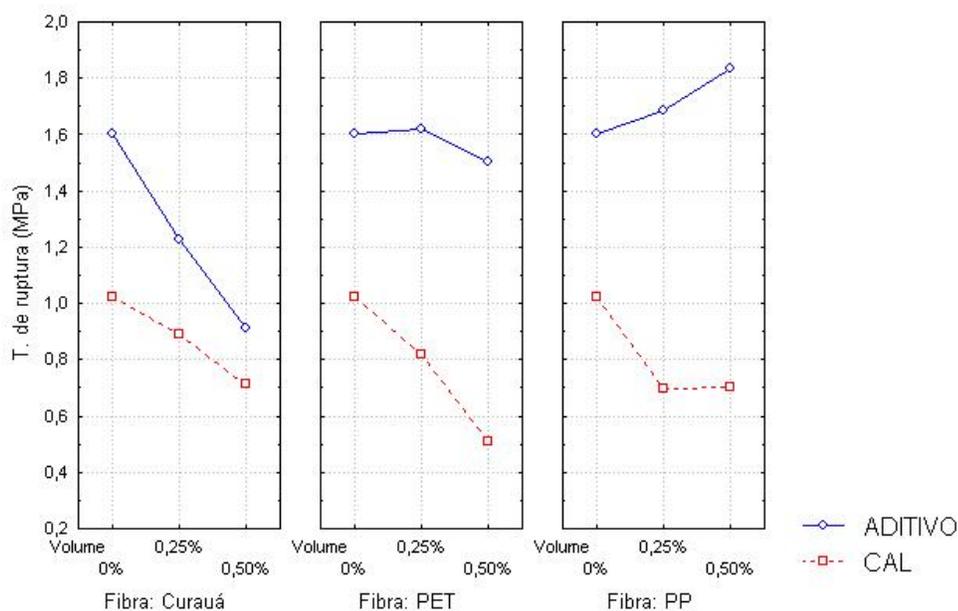


Ilustração 5.34 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 28 dias de idade

Quando essa propriedade foi analisada estatisticamente para os 28 dias de exposição, constatou-se que todas as variáveis influenciaram de forma significativa no desempenho dos compósitos, como mostrado na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 28 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	12,26957	1	12,26957	286,68903	0,0000
B - Tipo de fibra	0,77046	2	0,38523	9,00127	0,0029
C - Volume de fibra	1,32528	2	0,66264	15,48316	0,0000
AxB	1,31567	2	0,65784	15,37093	0,0000
AxC	0,16932	2	0,08466	1,97810	0,14480
BxC	0,78004	4	0,19501	4,55659	0,00224
AxBxC	0,72156	4	0,18039	4,21497	0,00372
Resíduo	3,55219	83	0,04280		
Total	20,90410	100			

Para a idade de 270 dias, o comportamento das diferentes argamassas encontra-se mostrado na Ilustração 5.35. Pode-se observar pelo gráfico que, para os compósitos com aditivo, a incorporação de fibras praticamente não altera o seu desempenho, excetuando-se a argamassa com 0,25% de PET, que apresentou a maior resistência média à ruptura entre todos os corpos de prova. Para os outros traços não houve diferença estatisticamente significativa entre seus valores.

Analisando-se as argamassas de cal observa-se uma tendência à diminuição da resistência com a incorporação de qualquer tipo de fibra. Apenas a incorporação da fibra de polipropileno que praticamente não alterou significativamente o desempenho da argamassa. Vale ressaltar que, para a fibra de curauá e de PET, a diferença significativa encontra-se apenas entre as argamassas referência e as argamassas com fibra, não havendo diferença significativa entre os teores de 0,25% e 0,50%.

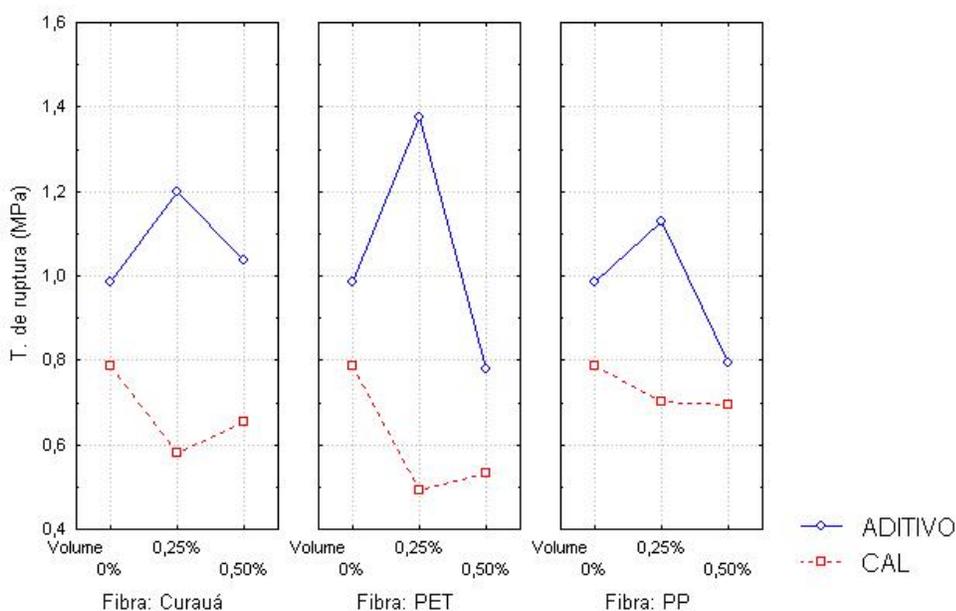


Ilustração 5.35 - Resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 270 dias de idade

A análise estatística apresentada na Tabela 5.25 reitera o que já foi mostrado no gráfico acima, em que o tipo de fibra não é variável preponderante na tensão de ruptura do material.

Tabela 5.25 - Valores de ANOVA para os resultados de resistência à tração na flexão para argamassas com 270 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	3,15397	1	3,15397	121,26559	0,0000
B - Tipo de fibra	0,01697	2	0,00848	0,32621	0,72267
C - Volume de fibra	0,45521	2	0,22761	8,75110	0,00038
AxB	0,22787	2	0,11394	4,38066	0,01587
AxC	0,92494	2	0,46247	17,78132	0,0000
BxC	0,17023	4	0,04256	1,63623	0,17400
AxBxC	0,19699	4	0,04925	1,89346	0,12038
Resíduo	1,95066	75	0,02601		
Total	7,09683	92			

5.3.2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Como exposto no subitem 4.6.2, logo após a ruptura dos corpos de prova no ensaio de tração na flexão, foram realizados ensaios de profundidade de carbonatação.

a) Argamassas com fibra de curauá

Como já era esperado, analisando-se o gráfico da Ilustração 5.36, observa-se uma maior carbonatação para as argamassas com aditivo do que para as argamassas com cal. Analisando-se apenas os compósitos com cal, observa-se um comportamento similar dessa propriedade entre os corpos de prova e as argamassas aplicadas nas paredes aos 28 e 90 dias de idade. No entanto, constata-se uma acentuada carbonatação para os cp's nas idades de 180 e 270 dias, sendo que esta tendência não foi seguida pelas argamassas aplicadas. Acredita-se que isso se deva ao fato dos corpos de prova estarem dispostos de forma diferenciada e ao aparecimento de microfissuras causadas, provavelmente, pelas condições climáticas do período, como exposto no subitem 5.3.1. Tratando-se estatisticamente os dados obtidos, constata-se que todas as variáveis possuem efeito significativo na propriedade, conforme Tabela 5.26.

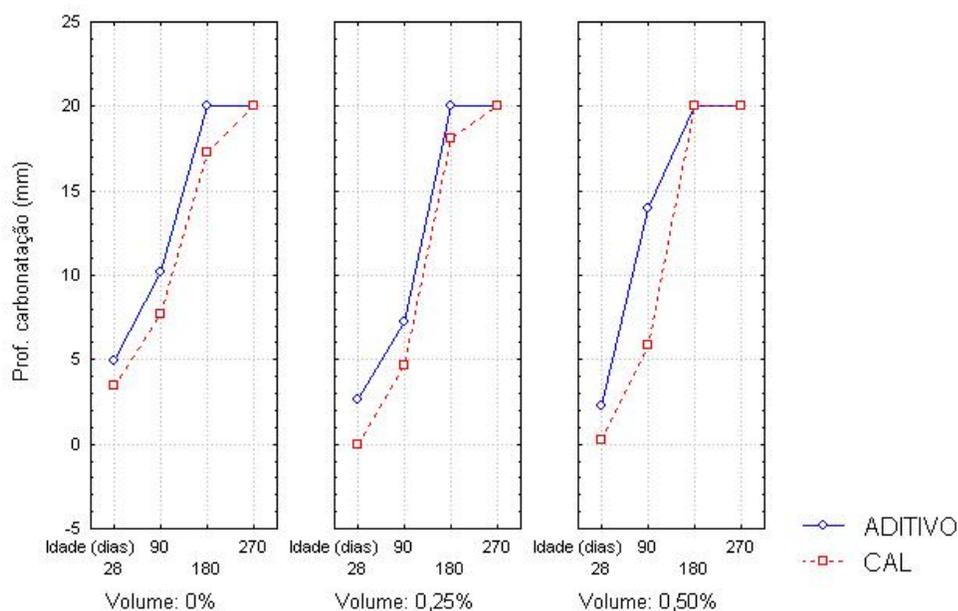


Ilustração 5.36 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de curauá

Tabela 5.26 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de curauá

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	131,31528	1	131,31528	44,64679	0,00000
B - Volume de fibra	80,85231	2	40,42616	13,74477	0,00000
C - Tempo de exposição	7801,06787	3	2600,35596	884,11304	0,00000
AxB	5,00708	2	2,50354	0,85120	0,42953
AxC	90,16524	3	30,05508	10,21863	0,00000
BxC	117,51245	6	19,58541	6,65898	0,00000
AxBxC	70,96567	6	11,82761	4,02135	0,00107
Resíduo	344,12074	117	2,94120		
Total	8641,00663	140			

b) Argamassas com fibra de PET

Obteve-se comportamento semelhante para as argamassas com fibra de PET, tanto para o desempenho demonstrado no gráfico da Ilustração 5.37, quanto para a ANOVA (Tabela 5.27).

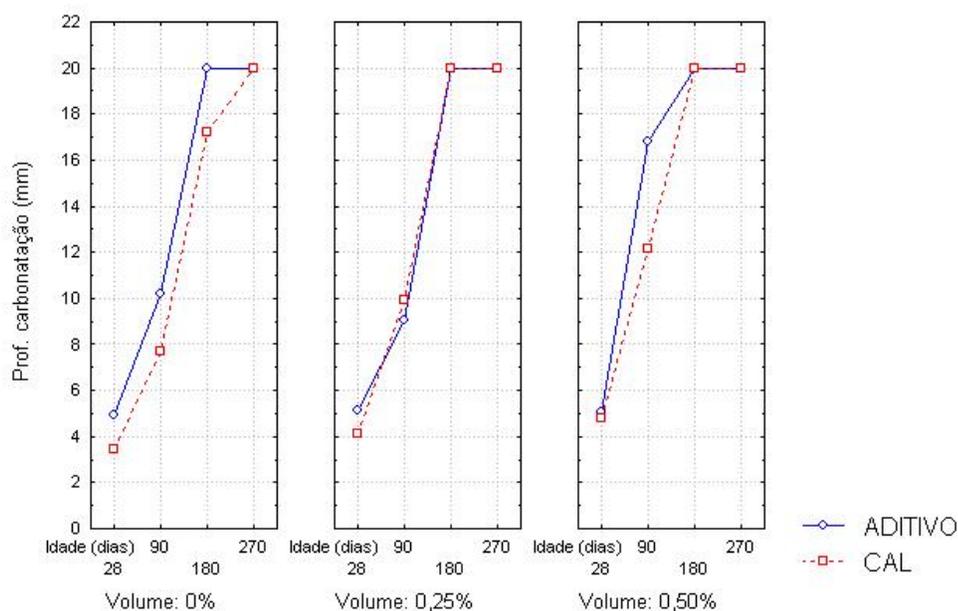


Ilustração 5.37 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de PET

Tabela 5.27 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de PET

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	18,03061	1	18,03061	11,15838	0,00113
B - Volume de fibra	60,25148	2	30,12574	18,64354	0,00000
C - Tempo de exposição	5712,75549	3	1904,25183	1178,46069	0,00000
AxB	16,63493	2	8,31746	5,14733	0,00721
AxC	21,32960	3	7,10987	4,40000	0,00571
BxC	147,07657	6	24,51276	15,16991	0,00000
AxBxC	44,75080	6	7,45847	4,61573	0,00031
Resíduo	187,44216	116	1,61588		
Total	6208,27165	139			

c) Argamassas com fibra de polipropileno

A Ilustração 5.38 demonstra o comportamento praticamente igual entre os dois tipos de argamassa, principalmente para o teor de 0,50% de fibra.

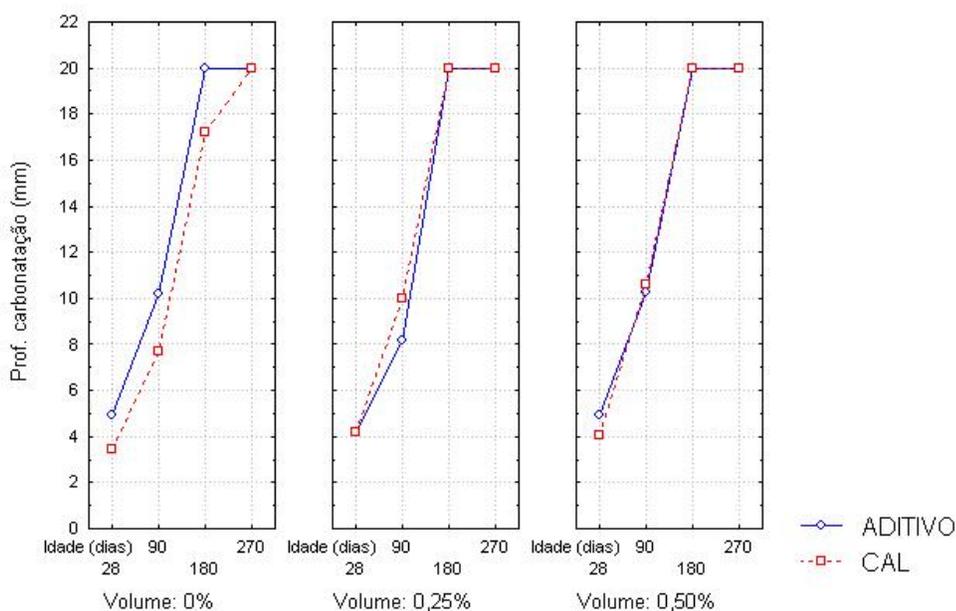


Ilustração 5.38 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de polipropileno

A análise estatística, para os compósitos com a incorporação de fibra de polipropileno, ratifica esse resultado, demonstrando que o tipo de argamassa não é uma variável significativa, conforme pode ser observado na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com fibra de polipropileno

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,41532	1	0,41532	0,63293	0,42794
B – Volume de fibra	4,69351	2	2,34676	3,57640	0,03116
C - Tempo de exposição	6240,55884	3	2080,18628	3170,15210	0,00000
AxB	26,87713	2	13,43857	20,48004	0,00000
AxC	5,53594	3	1,84531	2,81221	0,04254
BxC	16,23382	6	2,70564	4,12332	0,00088
AxBxC	16,81939	6	2,80323	4,27206	0,00064
Resíduo	74,80437	114	0,65618		
Total	6385,93833	137			

d) Estudo comparativo para 28 e 180 dias

Observando-se o gráfico da Ilustração 5.39 percebe-se que a incorporação de fibras de curauá propicia um melhor desempenho para os compósitos, enquanto que as outras fibras praticamente não alteram seu comportamento. Todas as variáveis são significativas quando se analisa estatisticamente essa propriedade (Tabela 5.29).

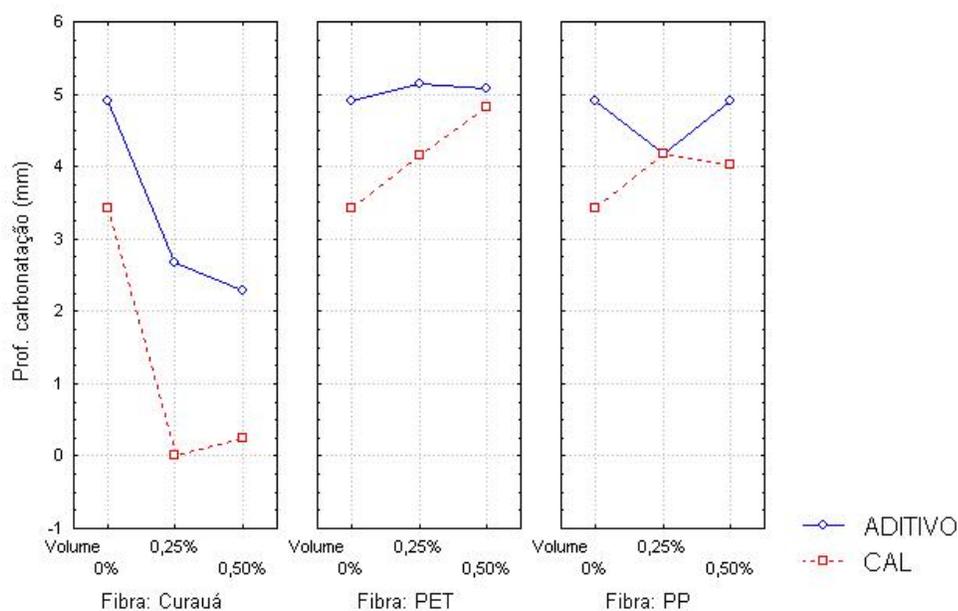


Ilustração 5.39 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com 28 dias de idade

Tabela 5.29 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para 28 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	44,73005	1	44,73005	141,77014	0,0000
B - Tipo de fibra	117,82032	2	58,91016	186,71347	0,0000
C - Volume de fibra	11,09508	2	5,54754	17,58271	0,0000
AxB	14,45982	2	7,22991	22,91492	0,0000
AxC	0,55294	2	0,27647	0,87626	0,42015
BxC	46,37187	4	11,59297	36,74346	0,0000
AxBxC	6,34305	4	1,58576	5,02601	0,00112
Resíduo	26,18742	83	0,31551		
Total	267,56054	100			

Observando-se o gráfico da Ilustração 5.40 verifica-se, novamente, o melhor desempenho da argamassa de cal com 0,25% de curauá quando comparadas aos outros compósitos com fibra. Ressalta-se, ainda, que a incorporação de fibras nas argamassas de cal levou a uma maior profundidade de carbonatação, provavelmente causada pelo maior teor de ar incorporado dessas argamassas. Diferentemente da análise estatística realizada para 28 dias constata-se, para 180 dias de exposição, que o tipo de fibra não é mais considerado uma variável preponderante, como mostrado na Tabela 5.30.

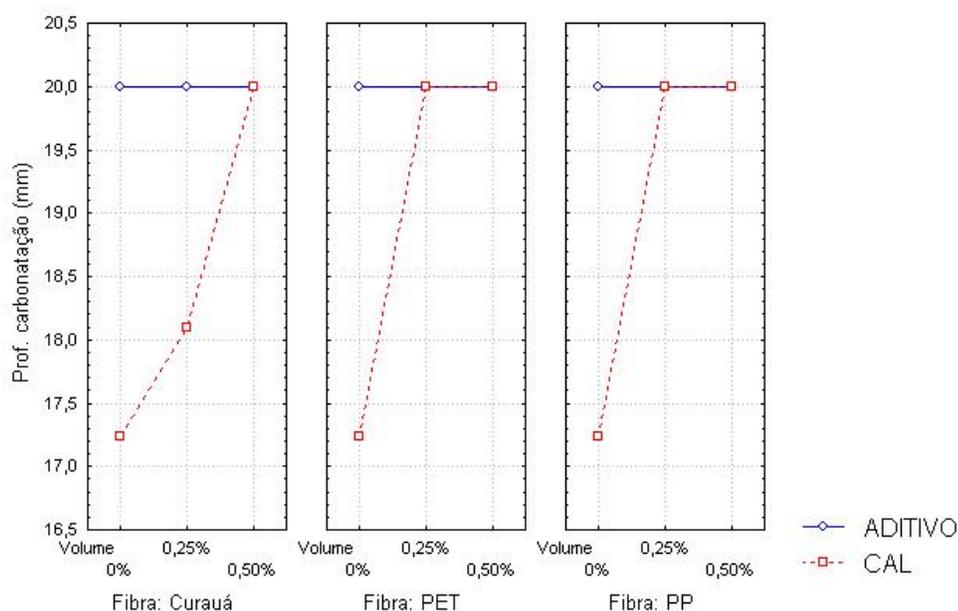


Ilustração 5.40 - Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para corpos de prova com 180 dias de idade

Tabela 5.30 - Valores de ANOVA para os resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação para 180 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	34,68000	1	34,68000	17,05574	0,00008
B - Tipo de fibra	2,40667	2	1,20333	0,59180	0,55547
C - Volume de fibra	37,82000	2	18,91000	9,30000	0,00021
AxB	2,40667	2	1,20333	0,59180	0,55547
AxC	37,82000	2	18,91000	9,30000	0,00021
BxC	4,81333	4	1,20333	0,59180	0,66944
AxBxC	4,81333	4	1,20333	0,59180	0,66944
Resíduo	183,00000	90	2,03333		
Total	307,76000	107			

5.3.3 – ÍNDICE DE TENACIDADE – I5

Previamente à análise dos índices de tenacidade, faz-se necessário ressaltar que os gráficos tensão x deformação, obtidos dos ensaios de resistência à tração na flexão, apresentaram uma área sob a curva ligeiramente maior para as argamassas com fibra quando comparadas às argamassas sem fibra, independentemente do tipo de argamassa utilizado e da idade estudada. Isso pode ser observado nas Ilustrações 5.41 e 5.42.

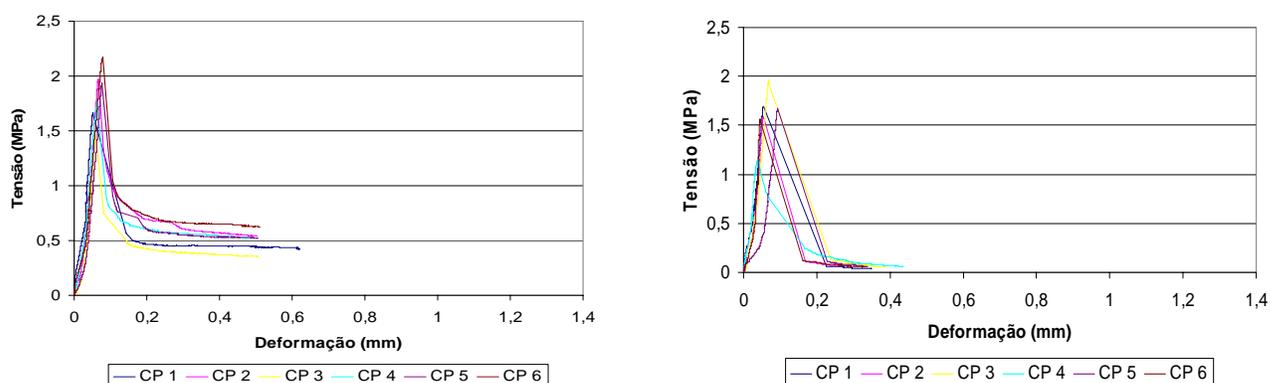


Ilustração 5.41 – Gráficos tensão x deformação para as argamassas A0,50PP e AR para 28 dias

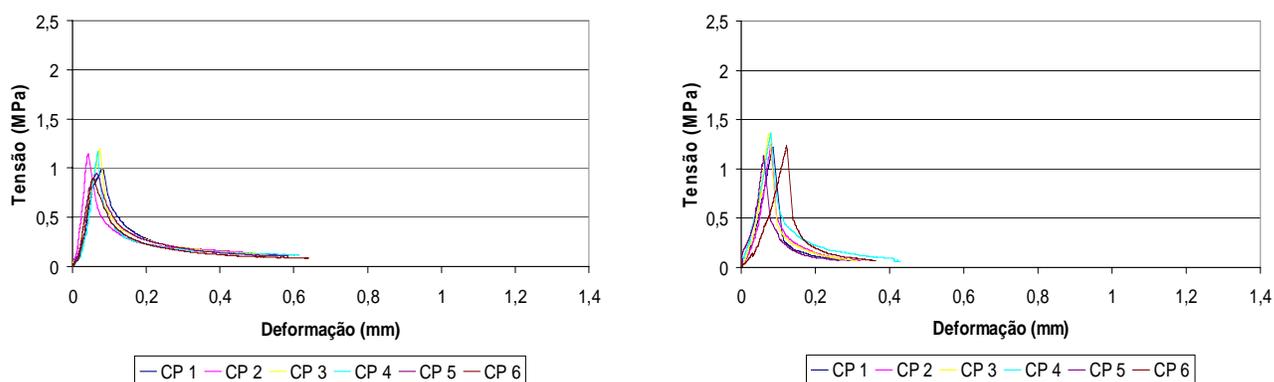


Ilustração 5.42 – Gráficos tensão x deformação para as argamassas C0,25C e CR para 90 dias

Este comportamento indica a influência da incorporação de fibras, principalmente, no estágio de pós-fissuração do compósito.

a) Argamassas com fibra de curauá

Como pode ser observado no gráfico da Ilustração 5.43, para a idade de 28 dias, os compósitos com aditivo apresentam um melhor desempenho do que as argamassas com cal, sendo elas referências ou não. No entanto, com o passar do tempo, essas características se invertem e a argamassa de cal apresenta melhor performance para os 270 dias de exposição. Apesar de não haver diferença significativa entre os valores do índice para as argamassas com cal e fibra e a referência, nota-se uma provável tendência à diminuição dessa propriedade quando se analisa os resultados para os 270 dias. Supõe-se que isso se deva ao processo de petrificação da fibra vegetal, o que acaba por torná-la frágil, diminuindo seu poder de reforço. Na Tabela 5.31 apresenta-se o tratamento estatístico do I5, onde se constata que, apesar do que é mostrado no gráfico, o tipo de argamassa não é preponderante no comportamento geral das argamassas ao longo do tempo.

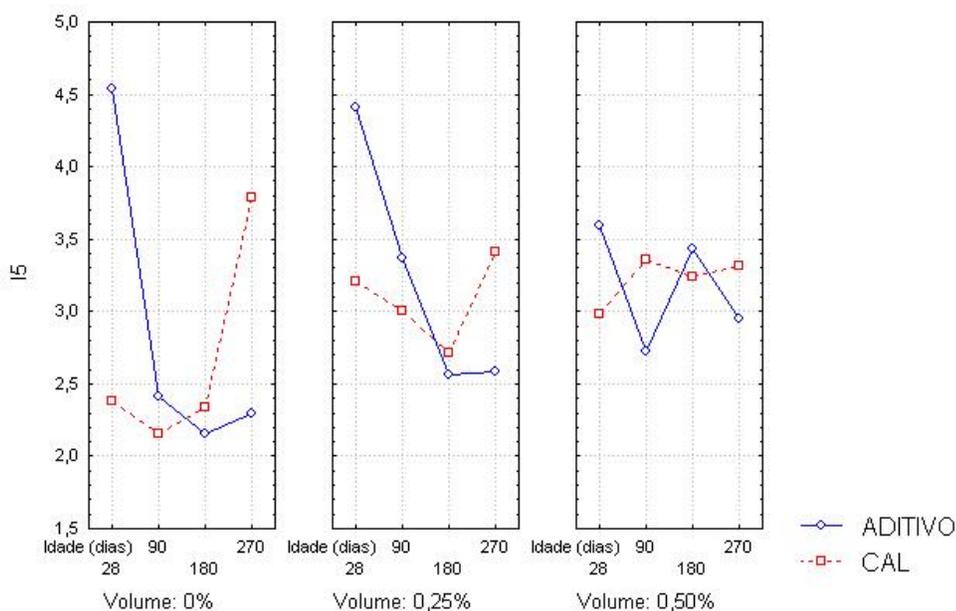


Ilustração 5.43 – Valores do I5 para argamassas com fibra de curauá

Tabela 5.31 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com fibra de curauá

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,63943	1	0,63943	1,76353	0,18737
B - Volume de fibra	4,95869	2	2,47935	6,83797	0,00168
C - Tempo de exposição	14,50750	3	4,83583	13,33709	0,00000
AxB	0,91075	2	0,45538	1,25591	0,28950
AxC	18,84503	3	6,28168	17,32469	0,00000
BxC	6,46896	6	1,07816	2,97354	0,01051
AxBxC	5,55434	6	0,92572	2,55312	0,02457
Resíduo	34,44561	95	0,36259		
Total	86,33032	118			

b) Argamassas com fibra PET

Pela Ilustração 5.44 pode-se observar o melhor desempenho conferido às argamassas com aditivo e fibras, principalmente para os períodos finais de estudo. Esse mesmo comportamento é observado para as argamassas com cal nas primeiras idades. No entanto, com o passar do tempo, nota-se uma diminuição da influência da fibra nessa propriedade. Supõe-se que isso se deva à provável degradação da fibra no interior dos compósitos, fato potencializado pela maior quantidade de íons Ca^{2+} e OH^- , oriundos da hidratação da cal, responsáveis pela reação de despolimerização do PET.

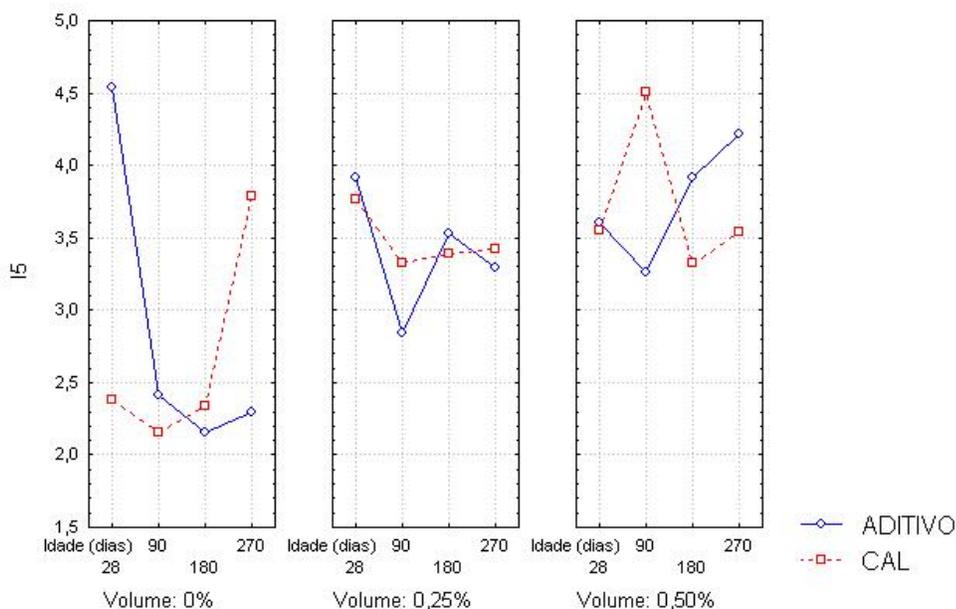


Ilustração 5.44 – Valores do I5 para argamassas com fibra de PET

Da mesma forma, para as argamassas com fibra PET, o tipo de argamassa não é valor significativo para a evolução do valor de I5, conforme pode ser observado na Tabela 5.32.

Tabela 5.32 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com fibra de PET

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,00144	1	0,00144	0,00594	0,93871
B - Volume de fibra	19,84393	2	9,92196	40,99798	0,00000
C - Tempo de exposição	8,59908	3	2,86636	11,84392	0,00000
AxB	0,86044	2	0,43022	1,77769	0,17460
AxC	9,18726	3	3,06242	12,65405	0,00000
BxC	7,84079	6	1,30680	5,39975	0,00008
AxBxC	14,75858	6	2,45976	10,16385	0,00000
Resíduo	22,99105	95	0,24201		
Total	84,08258	118			

c) Argamassas com fibra de polipropileno

Analisando-se o gráfico da Ilustração 5.45 nota-se que a incorporação de fibras de polipropileno aumenta o valor de I5 para os dois tipos de argamassa, com exceção para a argamassa de aditivo aos 28 dias de idade.

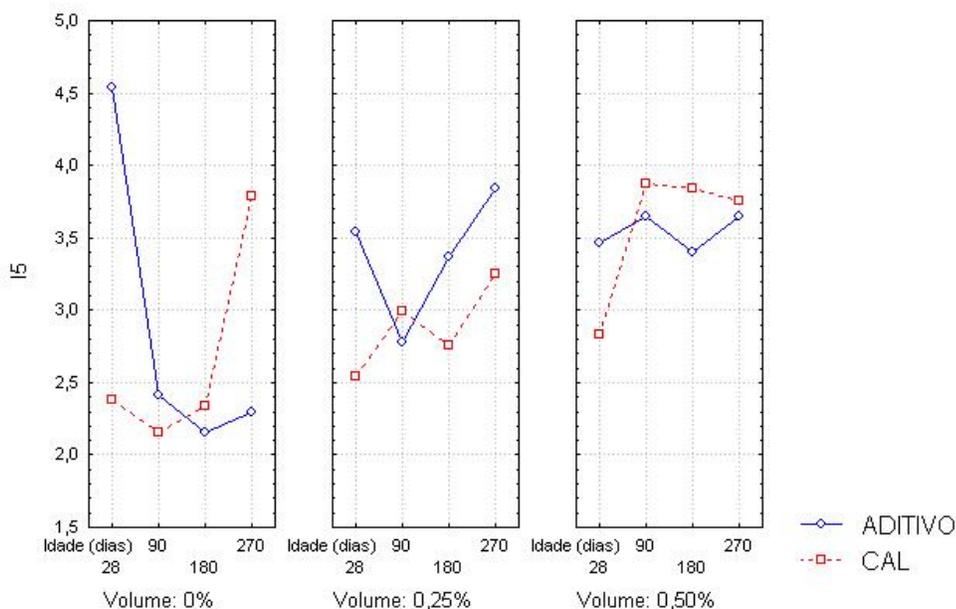


Ilustração 5.45 – Valores do I5 para argamassas com fibra de polipropileno

Diferentemente dos outros tipos de argamassas, na análise de variância das argamassas com fibra de polipropileno todas as variáveis são significativas, conforme pode ser observado na Tabela 5.33.

Tabela 5.33 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com fibra de polipropileno

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	1,35661	1	1,35661	7,20368	0,00850
B - Volume de fibra	14,60029	2	7,30015	38,76427	0,00000
C - Tempo de exposição	4,61517	3	1,53839	8,16896	0,00006
AxB	1,72511	2	0,86256	4,58023	0,01247
AxC	11,10334	3	3,70111	19,65317	0,00000
BxC	13,42352	6	2,23725	11,87997	0,00000
AxBxC	8,84825	6	1,47471	7,83080	0,00000
Resíduo	19,02047	101	0,18832		
Total	74,69278	124			

d) Estudo comparativo para 28 e 270 dias

A Ilustração 5.46 apresenta uma tendência à diminuição do valor de I5 para as argamassas com aditivo e adição de fibras. Por outro lado, nota-se que as argamassas

com cal mostram um comportamento oposto, com aumento de I5 proporcional ao aumento do teor de fibra. Vale ressaltar, entretanto, que a interação do volume de fibra com o tipo de argamassa mostrou-se significativa na análise estatística, demonstrando que, dependendo do tipo de argamassa utilizada, o volume de fibra pode ser fator preponderante.

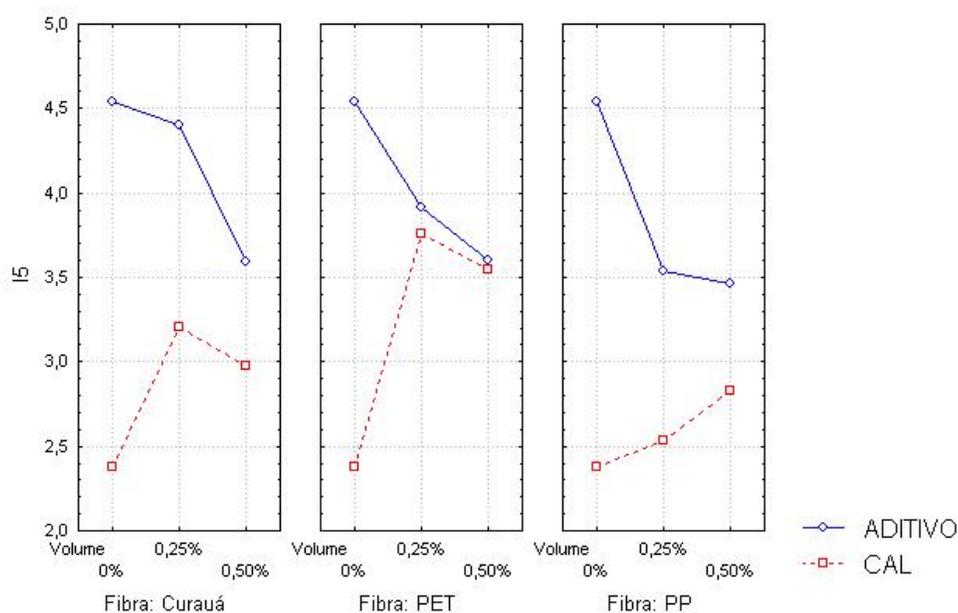


Ilustração 5.46 – Valores do I5 para argamassas com 28 dias de idade

Tabela 5.34 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com 28 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	26,56604	1	26,56604	72,51087	0,0000
B - Tipo de fibra	3,46229	2	1,73115	4,72509	0,01193
C - Volume de fibra	0,89095	2	0,44547	1,21590	0,30271
AxB	1,21608	2	0,60804	1,65962	0,19771
AxC	11,89385	2	5,94692	16,23187	0,0000
BxC	2,08030	4	0,52008	1,41952	0,23671
AxBxC	0,79740	4	0,19935	0,54412	0,70386
Resíduo	25,27975	69	0,36637		
Total	72,18666	86			

No entanto, quando se analisa o comportamento para 270 dias de exposição da argamassa, verifica-se que as argamassas com aditivo apresentam uma tendência a uma melhora expressiva nas suas características com a incorporação de fibras,

conforme é mostrado na Ilustração 5.47. Ressalta-se, principalmente, o desempenho da argamassa com fibra PET que alcançou quase o dobro do valor de tenacidade quando comparado com a argamassa referência.

Para as argamassas de cal não houve diferença significativa entre os valores obtidos. Acredita-se que isso se deva à provável degradação da fibra de PET e da fibra vegetal, fazendo com que os compósitos se comportem como os de referência. No entanto não se pode afirmar o que pode ter ocorrido com os compósitos com fibra de polipropileno, já que de acordo com a literatura a mesma apresenta alto índice de resistência à ambientes agressivos.

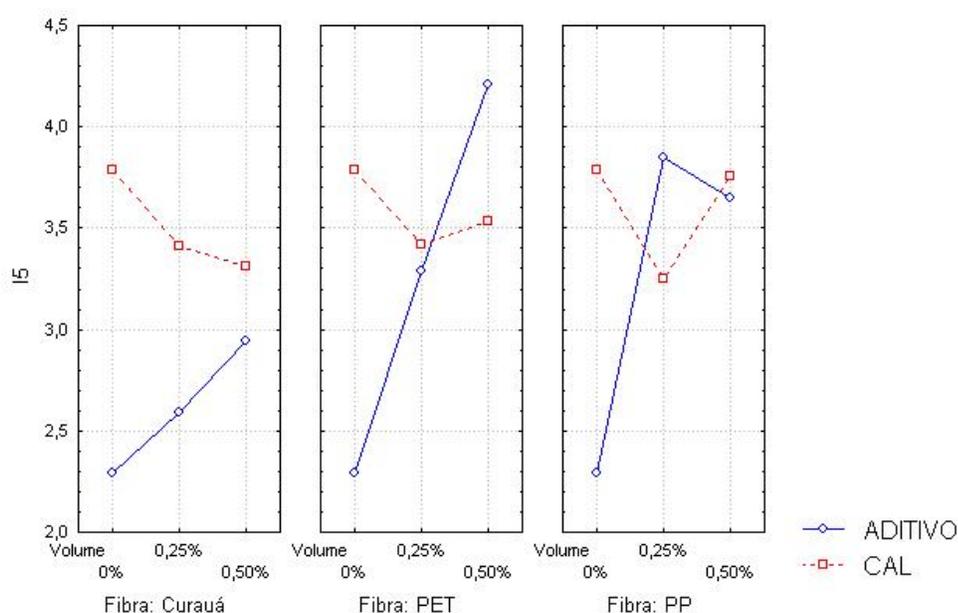


Ilustração 5.47 – Valores do I5 para argamassas com 270 dias de idade

Como era de se esperar, na análise estatística apresentada na Tabela 5.35, todas as variáveis envolvidas mostraram-se significativas, com exceção da interação entre o tipo e volume de fibra utilizado. No entanto, caso fosse utilizada uma significância de 90%, essa interação também seria significativa.

Tabela 5.35 – ANOVA dos valores de I5 para argamassas com 270 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A – Tipo de argamassa	5,54055	1	5,54055	24,58745	0,00000
B - Tipo de fibra	3,01828	2	1,50914	6,69714	0,00218
C - Volume de fibra	4,82010	2	2,41005	10,69515	0,00009
AxB	1,62446	2	0,81223	3,60444	0,03237
AxC	9,46054	2	4,73027	20,99165	0,00000
BxC	1,97975	4	0,49494	2,19639	0,07821
AxBxC	2,26270	4	0,56568	2,51032	0,04944
Resíduo	15,77384	70	0,22534		
Total	44,48021	87			

5.3.4 – ÍNDICE DE TENACIDADE – I10

As mesmas observações feitas para o índice de tenacidade I5 são válidas para I10, já que o comportamento dos compósitos praticamente não se alterou, como pode ser observado nas Ilustrações 5.48, 5.49 e 5.50. Fazendo-se a comparação múltipla de médias constatou-se que, realmente, o desempenho das argamassas manteve-se inalterado.

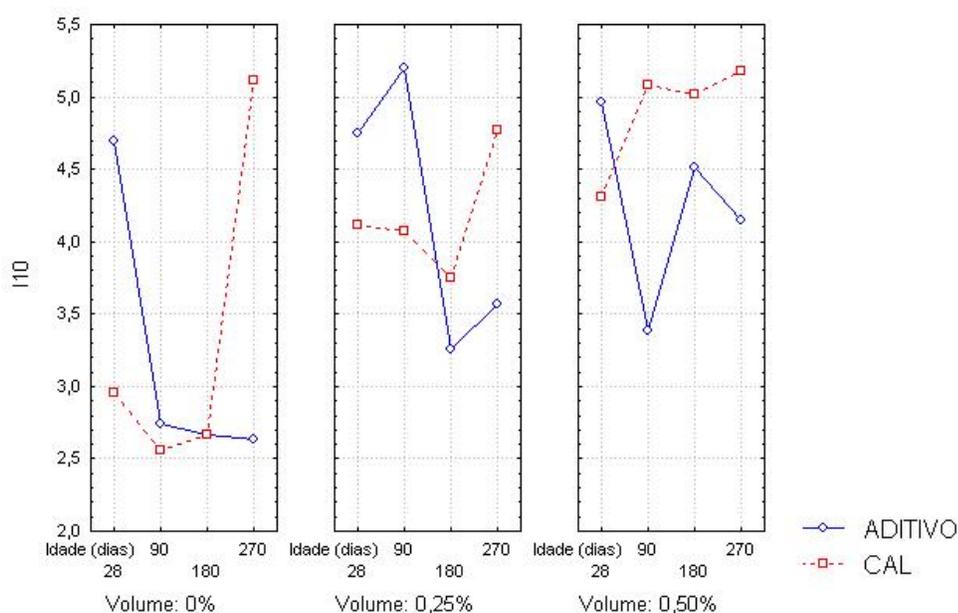


Ilustração 5.48 – Valores do I10 para argamassas com fibra de curauá

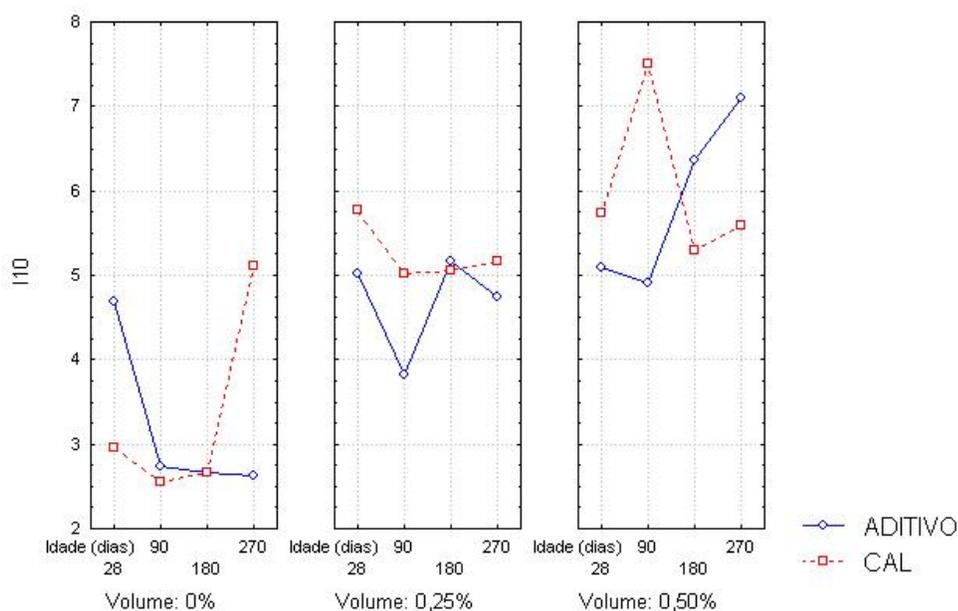


Ilustração 5.49 – Valores do I10 para argamassas com fibra de PET

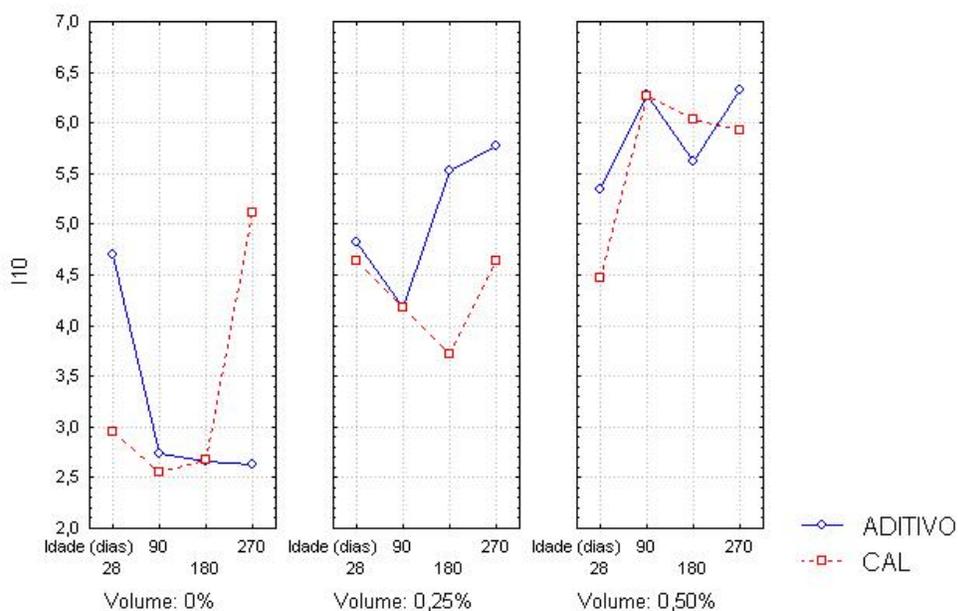


Ilustração 5.50 – Valores do I10 para argamassas com fibra de polipropileno

Procedeu-se, então, a uma análise do comportamento de todas as argamassas para os 28 e 270 dias de exposição, conforme demonstrado pelas Ilustrações 5.51 e 5.52. Para esse nível de deformação, observou-se que as argamassas com aditivo não apresentaram a tendência à diminuição do índice de tenacidade (I10) para os 28 dias,

como foi o caso do I5. Vale ressaltar, entretanto, que a incorporação de fibras não alterou em nada o desempenho da argamassa referência com aditivo, já que seus valores não são significativamente diferentes. Já para as argamassas com cal observou-se o melhor desempenho dos compósitos com fibra PET quando comparado às outras argamassas estudadas.

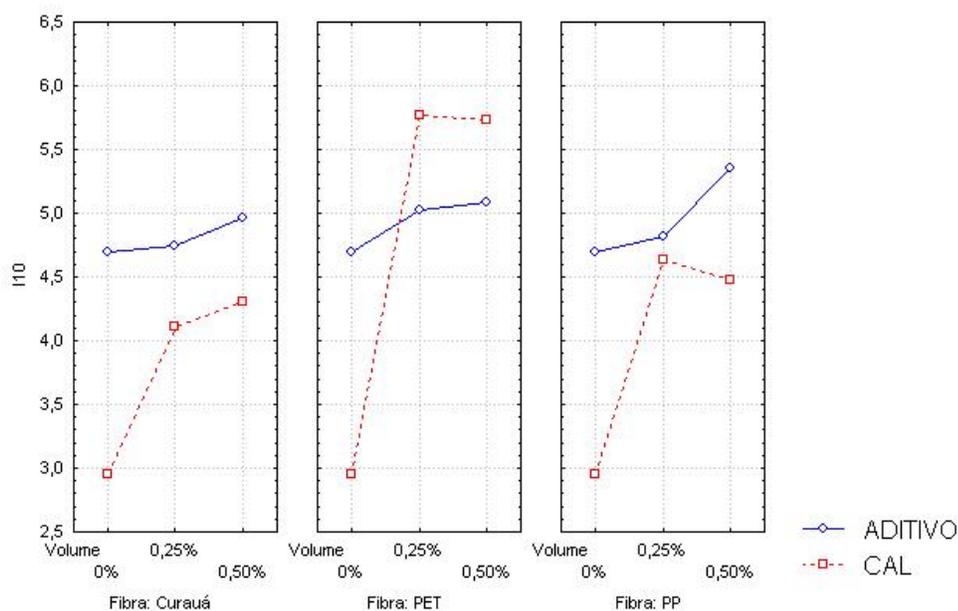


Ilustração 5.51 – Valores do I10 para argamassas com 28 dias de idade

Já para os 270 dias, as argamassas mantiveram o mesmo comportamento observado para o índice I5, como pode ser observado na Ilustração 5.53. Ressalta-se, novamente, o bom desempenho do compósito de aditivo com 0,50% de fibras PET. Esses valores diferem dos encontrados por Betioli (2003) e Pelisser (2002) que observaram diminuição da tenacidade com o passar do tempo, imputado à eventual degradação da fibra.

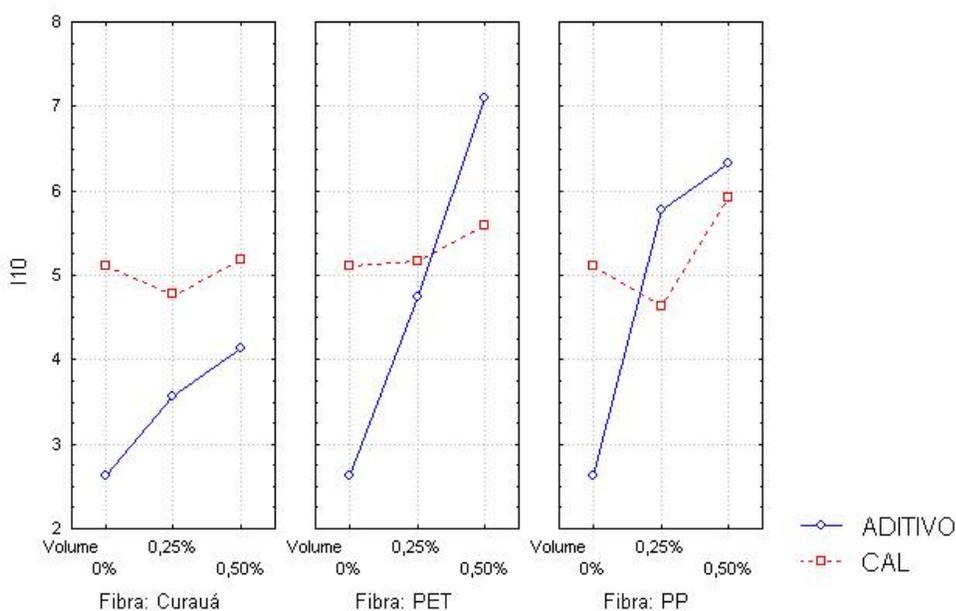


Ilustração 5.52 – Valores do I10 para argamassas com 270 dias de idade

5.3.5 – ÍNDICE DE TENACIDADE – I20

A fim de se verificar a influência da provável degradação e/ou petrificação das fibras em meio cimentício, optou-se por realizar a medida do índice de tenacidade para um maior grau de deformação (I20) com 270 dias de idade. Apresenta-se o desempenho desses compósitos na Ilustração 5.53. Analisando-se o gráfico pode-se confirmar o comportamento já observado para os outros índices de tenacidade calculados.

Para as argamassas com cal e fibras praticamente não houve alteração do I20, com exceção do compósito com fibra de polipropileno que alcançou um valor sensivelmente maior para o teor de 0.50% de fibra. Essa pode ser uma evidência de que a fibra de polipropileno manteve-se incólume após esse período de tempo.

Pelo que foi mostrado até agora, a maior influência no que diz respeito à melhora de tenacidade dos compósitos fica demonstrada quando há a incorporação de fibras nas argamassas com aditivo. No gráfico pode-se perceber que a inclusão de fibra vegetal praticamente não altera a performance das argamassas. No entanto, os compósitos

com fibra de PET e de polipropileno apresentam um aumento expressivo nessa propriedade quando estas fibras são incorporadas.

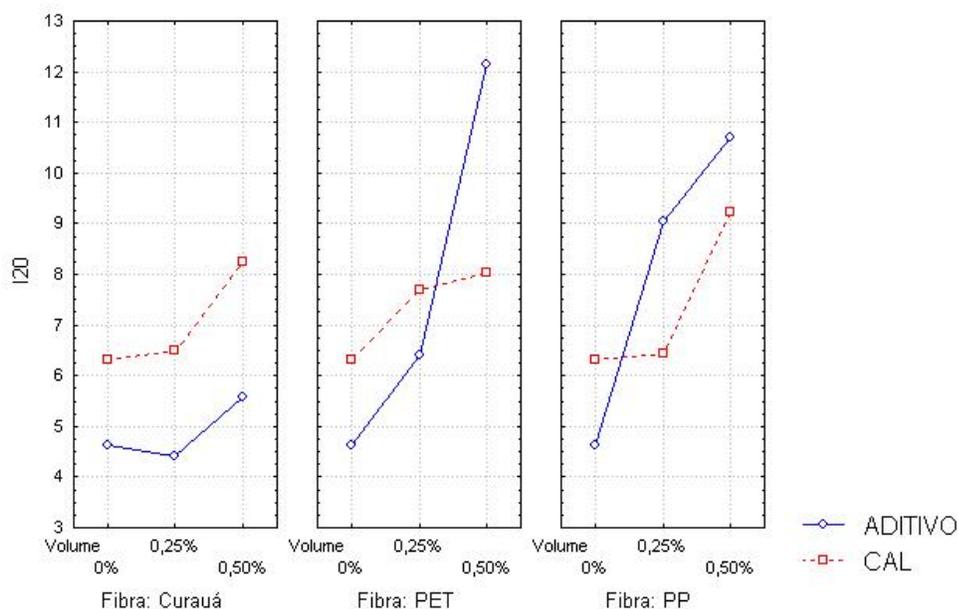


Ilustração 5.53 – Valores do I20 para argamassas com 270 dias de idade

Pela análise estatística apresentada na Tabela 5.36 constata-se que a variável tipo de argamassa não é significativa para essa propriedade. Todavia, as interações dessa propriedade com o tipo de fibra e com o volume de fibra, além de uma interação entre os três fatores, são preponderantes no que diz respeito ao índice de tenacidade I20.

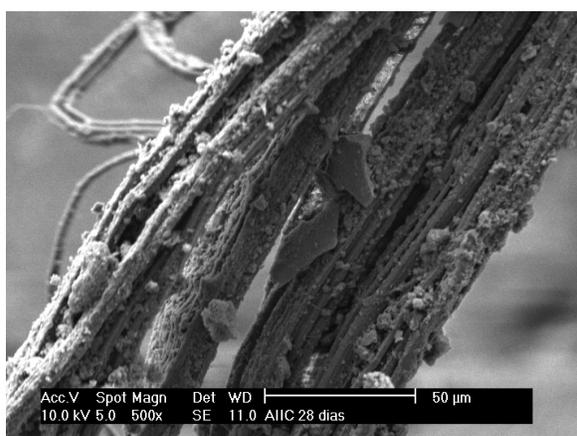
Tabela 5.36 – ANOVA dos valores de I20 para argamassas com 270 dias de idade

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrados Médios	Teste F	Valor p
A - Tipo de argamassa	0,93058	1	0,93058	0,36894	0,54608
B - Tipo de fibra	54,17852	2	27,08926	10,73980	0,00012
C - Volume de fibra	132,41753	2	66,20876	26,24911	0,00000
AxB	36,23651	2	18,11825	7,18316	0,00169
AxC	15,61979	2	7,80989	3,09631	0,05318
BxC	22,37204	4	5,59301	2,21740	0,07895
AxBxC	35,23963	4	8,80991	3,49277	0,01301
Resíduo	138,72784	55	2,52232		
Total	435,72242	72			

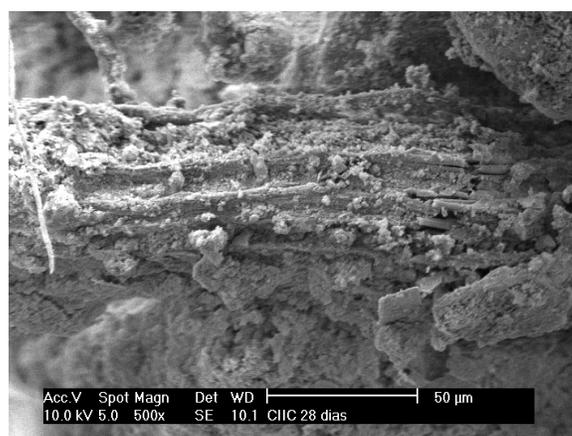
5.3.6 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

a) Argamassas com fibra de curauá

Aos 28 dias de idade pode-se observar, tanto nas argamassas com aditivo (Ilustração 5.54(a)) quanto nas argamassas com cal (Ilustração 5.54(b)) a presença de depósitos superficiais de produtos hidratados do cimento.



(a)



(b)

Ilustração 5.54 – MEV de fibra de curauá aos 28 dias: (a) Argamassa com aditivo; (b) Argamassa com cal

Aos 90 dias de idade constatou-se um ligeiro aumento de deposição de produtos hidratados na argamassa com aditivo. No entanto, na argamassa com cal, a deposição foi bem mais intensa, praticamente encobrendo toda a superfície da fibra, conforme mostrado na Ilustração 5.55. As fibras presentes nas argamassas analisadas aos 180 e 270 dias de idade também se apresentaram totalmente encobertas pelos produtos de hidratação do cimento.

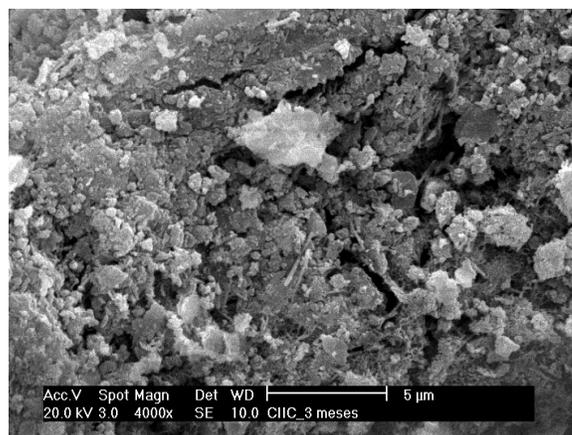
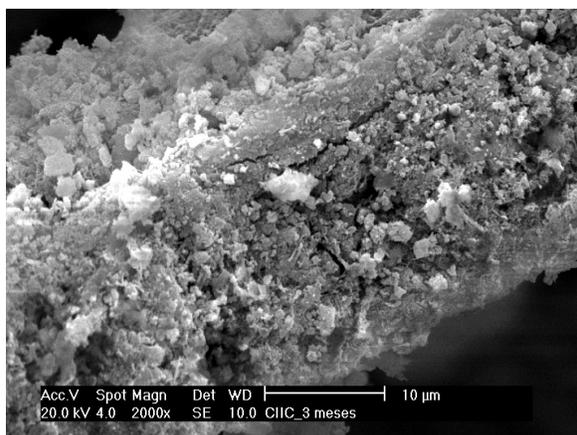
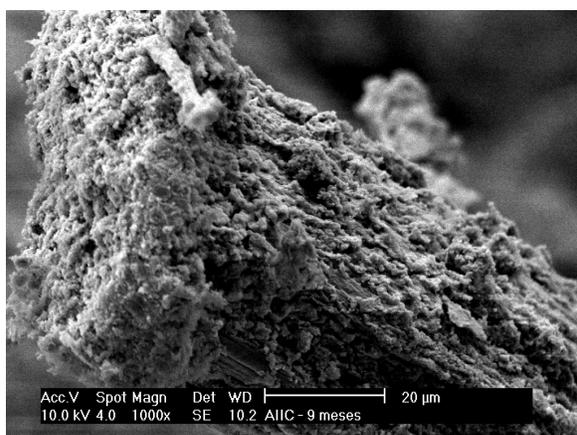
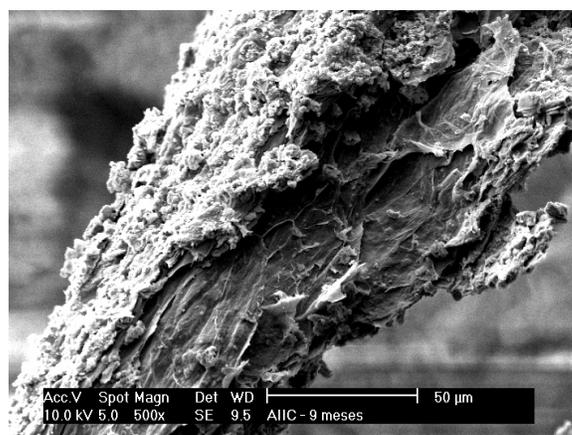


Ilustração 5.55 – MEV de argamassa com cal e fibra de curauá aos 90 dias: Fibra envolta por produtos hidratados

A Ilustração 5.56(a) mostra o aspecto da fibra de curauá em argamassa com aditivo aos 270 dias de idade: há cobertura total da fibra com densa camada, caracterizando, possivelmente, um processo de petrificação. É possível que, devido a esse processo, a tenacidade desses compósitos tenha sido afetada, conforme pode ser observado no subitem 5.3.5. No detalhe mostrado na Ilustração 5.56(b) observa-se o que parece ser uma descamação ou degradação da fibra.



(a)

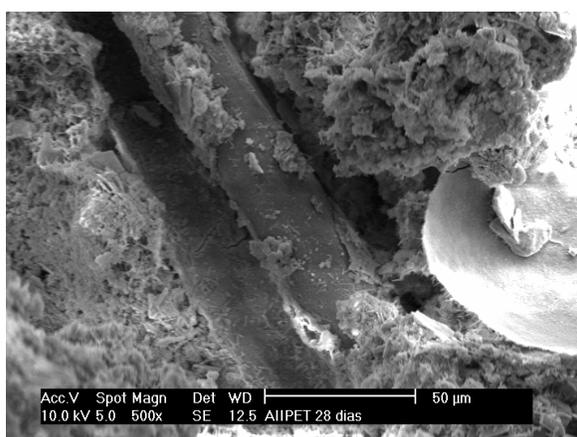


(b)

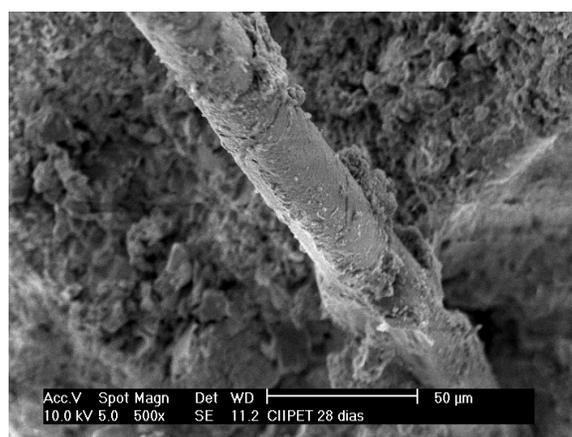
Ilustração 5.56 – MEV de argamassa com aditivo e fibra de curauá aos 270 dias: (a) Fibra envolta por produtos hidratados; (b) Possível degradação da fibra

b) Argamassas com fibra de PET

Da mesma forma que na fibra de curauá, foi observada uma deposição de compostos hidratados na superfície da fibra de PET em argamassas com aditivo e com cal aos 28 dias de idade (Ilustração 5.57). Foram encontrados, ainda, locais na argamassa onde existiam fibras antes da análise com o microscópio (Ilustração 5.58). Esses “leitos” das fibras se devem, possivelmente, ao arrancamento das mesmas durante o ensaio de flexão. Não se pode descartar, entretanto, que esses “leitos” tenham sido causados pela decomposição das fibras, conforme sugerido por Betioli (2003).



(a)



(b)

Ilustração 5.57 – MEV de fibra de PET aos 28 dias: (a) Argamassa com aditivo; (b) Argamassa com cal

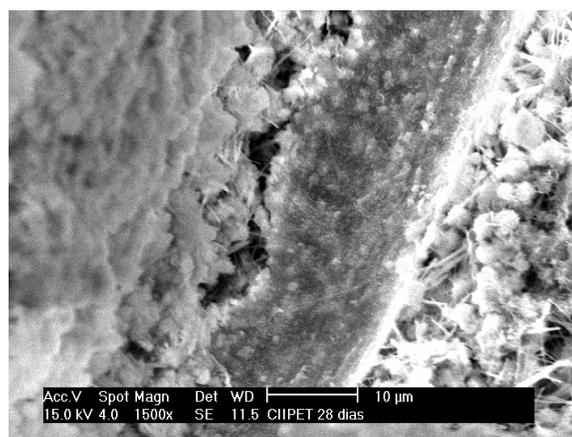
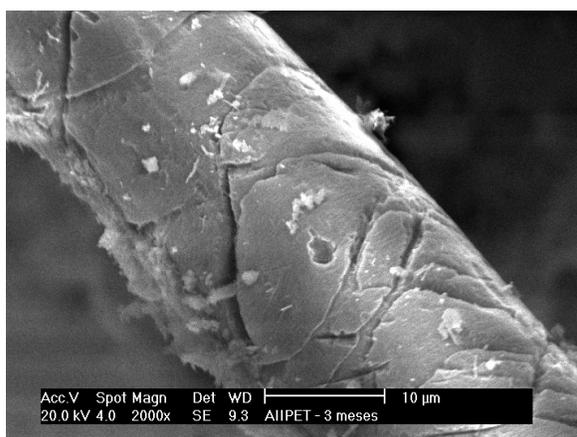
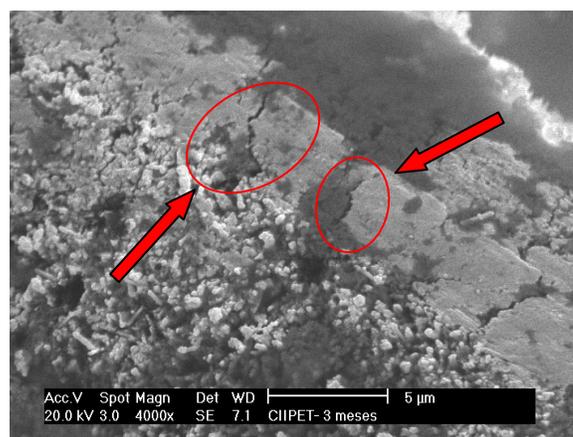


Ilustração 5.58 – “Leitos” das fibras de PET

Analisando-se as fibras de PET em argamassas com 90 dias de idade, percebe-se, nitidamente, o processo de degradação da fibra de PET (Ilustração 5.59). Nessa idade, as fibras aparecem encobertas por produtos de hidratação do cimento e/ou produtos de interação fibra/pasta de cimento nas argamassas com cal (Ilustração 5.59(b)). Já nas argamassas com aditivo, a superfície da fibra aparece limpa, possibilitando a visualização do processo de degradação.



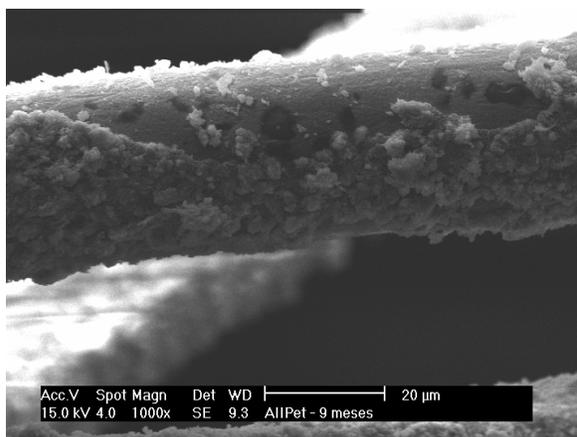
(a)



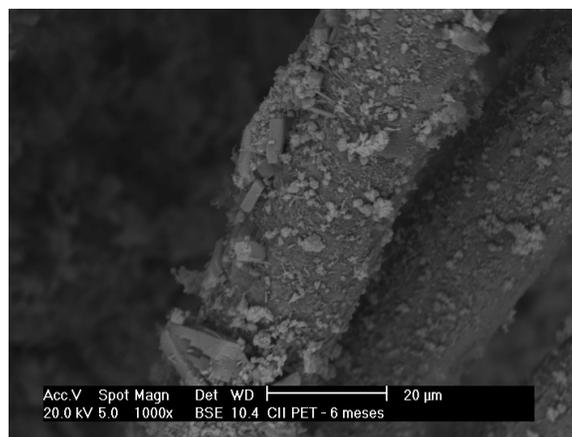
(b)

Ilustração 5.59 – MEV de fibra de PET aos 90 dias: (a) Argamassa com aditivo; (b) Argamassa com cal

Pelo estado das fibras apresentado nas ilustrações anteriores, esperava-se encontrar fibras com alto grau de degradação para as idades posteriores. No entanto, as análises microscópicas aos 180 e 270 dias constatou-se a existência de algumas fibras com baixo grau de degradação, como pode ser observado na Ilustração 5.60. Acredita-se que, por este motivo, os corpos de prova apresentaram bom desempenho no que diz respeito à tenacidade nas últimas idades, principalmente para o compósito de argamassa de aditivo.



(a)

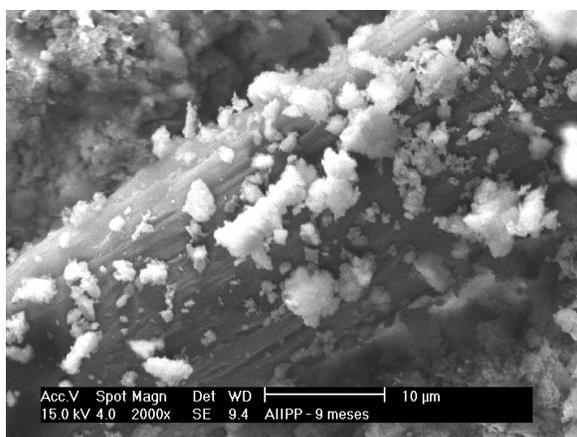


(b)

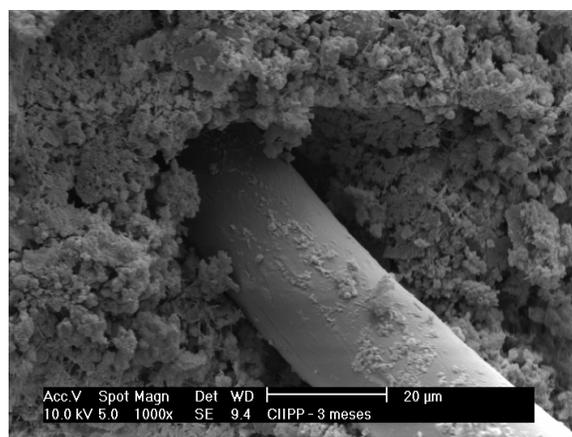
Ilustração 5.60 – MEV de fibra de PET: (a) Argamassa com aditivo aos 270 dias; (b) Argamassa com cal aos 180 dias

c) Argamassas com fibra de polipropileno

Como era esperado, não se constataram grandes mudanças nas fibras PP mantidas nas argamassas estudadas nessa pesquisa até os 270 dias de idade. Da mesma forma que para as outras fibras, houve a deposição de compostos hidratados do cimento e/ou cal sobre a superfície da fibra, conforme mostrado na Ilustração 5.61.



(a)



(b)

Ilustração 5.61 – MEV de fibra de polipropileno: (a) Argamassa de aditivo com 270 dias; (b) Argamassa de cal com 90 dias

Encontrou-se, no entanto, algumas imperfeições na superfície da fibra de polipropileno nas idades de 90 e 180 dias, como mostrado na Ilustração 5.62. É possível que essas

imperfeições se devam ao processo de fabricação da fibra. Não se descarta, entretanto, a possibilidade de uma possível degradação da fibra.

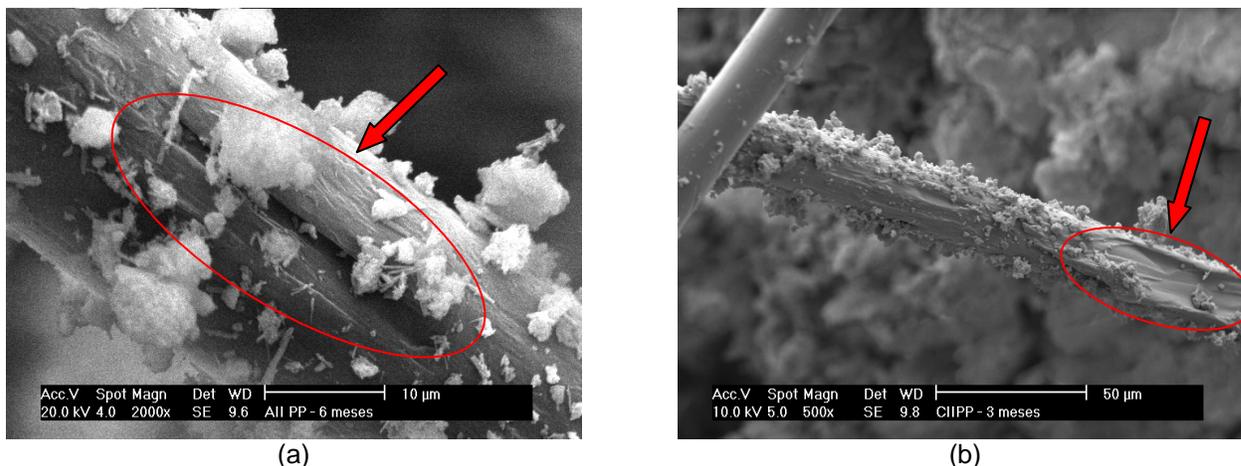


Ilustração 5.62 – MEV de fibra de polipropileno: (a) Argamassa com aditivo aos 180 dias; (b) Argamassa com cal aos 90 dias

d) Aspecto superficial das argamassas

Analisando-se qualitativamente a superfície das argamassas no microscópio eletrônico de varredura, pode-se constatar que aquelas contendo aditivo plastificante mostraram-se extremamente porosas, enquanto que as argamassas com cal apresentaram-se mais densas (Ilustrações 5.63 e 5.64). A grande quantidade de poros de pequeno e grande diâmetro evidenciada nas micrografias, associada à possível conexão destes poros com vazios capilares, pode ter sido a responsável pela alta permeabilidade à água e grande profundidade de carbonatação medida nestas argamassas.

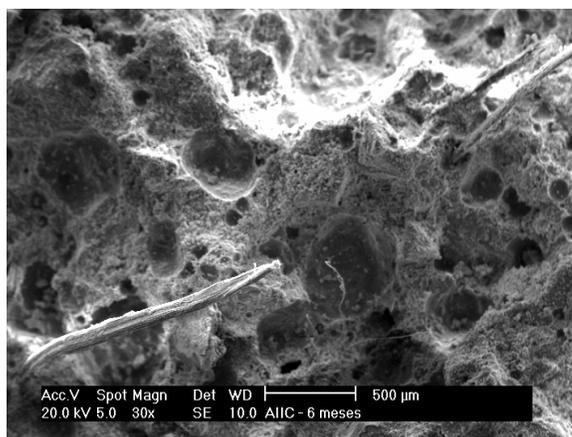
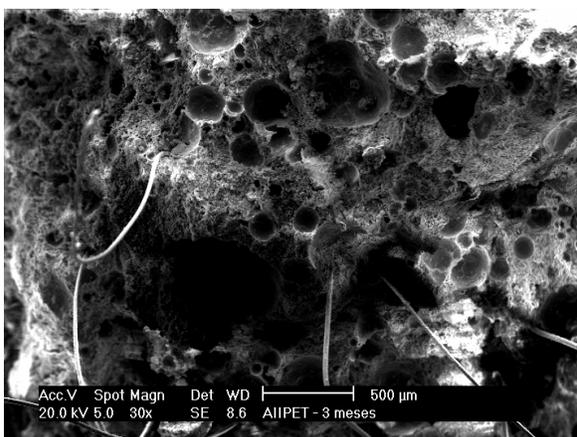


Ilustração 5.63 – Aspecto superficial das argamassas com aditivo

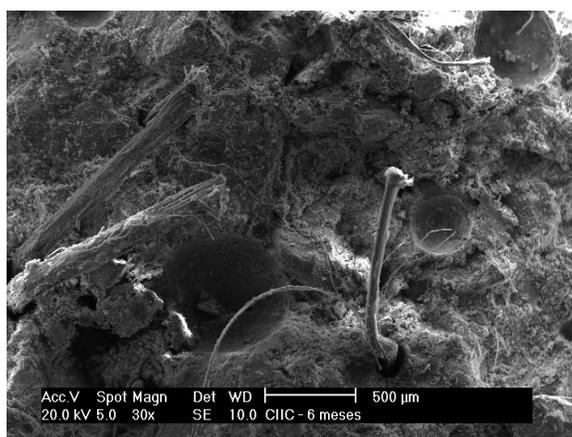
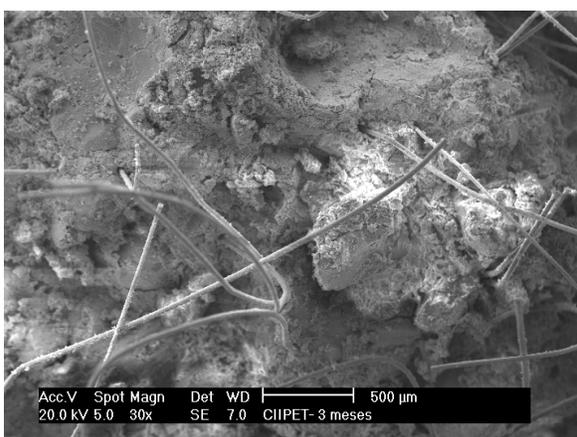


Ilustração 5.64 – Aspecto superficial das argamassas com cal

5.4 – Discussões

Constatou-se, apesar das relações água/aglomerante superiores, um menor índice de consistência das argamassas com fibra quando comparados às argamassas referência. Explica-se esse fato pelo aumento de coesão proporcionada pelas fibras à mistura. Observou-se, ainda, que as argamassas com fibra de PET apresentaram os maiores valores para essa relação, tanto para cal quanto para aditivo. Acredita-se que isso se deva à absorção de água característica da fibra ou a algum tratamento superficial sofrido durante a sua fabricação.

Observou-se, também, que a incorporação de fibras nas argamassas de cal aumentou substancialmente a quantidade de ar incorporado e, conseqüentemente, diminuiu o valor de massa específica para as mesmas. Já para as argamassas de aditivo não se pôde observar uma influência significativa da adição de fibras, uma vez que o uso do aditivo resulta em uma incorporação de certa quantidade de ar.

No que diz respeito à retenção de água, notou-se um aumento dessa propriedade para a incorporação de 0,25% de fibra para praticamente todas as argamassas estudadas e, um decréscimo quando se adicionou 0,50%. Como única exceção, a argamassa de aditivo com PET, que apresentou um comportamento inverso. Vale ressaltar, entretanto, que a quantidade de água adicionada a cada compósito é diferente, o que possivelmente afetou o desempenho dos mesmos.

Analisando-se o comportamento em relação à fissuração das argamassas aplicadas em paredes de blocos cerâmicos expostas ao meio ambiente, pode-se afirmar que as maiores influências se deram pelas alterações climáticas da região e pelo tipo de argamassa utilizada. Afirma-se isso, pois a adição de fibra, bem como o tipo de fibra, não se mostrou significativo no desempenho dos compósitos. Não se pode afirmar, porém, que, embora não se tenha observado o aparecimento de fissuras em todas as argamassas de aditivo, esses compósitos apresentaram um melhor desempenho. Este fato foi causado, provavelmente, pelas baixas tensões internas de retração, devido à reduzida resistência de aderência encontrada.

Em se tratando da resistência de aderência pôde-se observar o melhor desempenho da argamassa de cal com fibra vegetal para as primeiras idades. No entanto, para as idades mais avançadas do estudo não se obteve diferenças significativas entre as argamassas de cal com fibra e referência, observando-se, inclusive, uma diminuição acentuada no compósito com 0,50% de PET. Não pode se descartar a possibilidade que isso se deva à maior relação água/aglomerante dessa mistura.

Como já era esperado, todas as argamassas de aditivo apresentaram resistências de aderência baixas causadas pelo maior teor de ar incorporado nos compósitos. Esse comportamento pode estar associado com o alto grau de carbonatação encontrado. Vale ressaltar, entretanto, que a incorporação de fibras nessas argamassas proporcionou uma tendência ao decréscimo dessa propriedade.

Já para as argamassas de cal, constatou-se um aumento na profundidade de carbonatação quando foram adicionadas fibras na mistura. Acredita-se que isso se deva a uma provável tendência de aumento de permeabilidade causado pela incorporação das fibras.

No que diz respeito à permeabilidade das argamassas pôde-se observar que as de aditivo obtiveram alto grau de permeabilidade quando comparadas com as de cal. No entanto, ao se acrescentar fibras a essas misturas, essa permeabilidade diminuiu, podendo-se, inclusive, compará-las com os compósitos de cal para a idade de 270 dias de exposição. Vale ressaltar, ainda, que o ensaio de cachimbo não se mostrou muito eficiente para medir a permeabilidade das argamassas de aditivo, sendo interessante a adoção de outro método para se medir de uma maneira mais eficiente essa propriedade.

Pelos resultados dos ensaios mecânicos realizados pode-se afirmar que, diferentemente das argamassas aplicadas em paredes de blocos cerâmicos, as argamassas com aditivo apresentaram desempenho melhor do que as argamassas com cal, principalmente no que diz respeito à tensão máxima de ruptura. Acredita-se que esse comportamento se deva a maior quantidade de cimento encontrada nas argamassas com aditivo quando comparada às argamassas com cal.

Para essa propriedade observou-se que, nos dois tipos de argamassa, quanto maior o teor de fibra incorporado à mistura, maior foi a tendência a diminuição do valor de tensão de ruptura encontrado. Não se pode descartar que isso se deva ao efeito conjunto da maior relação água/aglomerante e ao maior teor de ar incorporado pelas

fibras. Atenta-se, também, para a diminuição expressiva desse valor para os compósitos em geral para os 180 dias de exposição, fato causado, provavelmente, pelo aparecimento de microfissuras originadas pela alta variação climática do período ou por possível reação expansiva do MgO.

No que diz respeito à carbonatação dos cp's, observou-se que, praticamente, não houve diferença significativa entre as várias argamassas estudadas. Analisando-se, entretanto, os extremos do tempo de estudo, constatou-se um melhor desempenho dos testemunhos de argamassa de cal com fibra vegetal, principalmente para o teor de 0,25%.

Para todos os índices de tenacidade utilizados (I5, I10 e I20) encontrou-se comportamentos semelhantes para as argamassas estudadas. Como era esperado, observou-se uma tenacidade maior dos compósitos com fibra quando comparados aos correspondentes sem fibra, principalmente para as primeiras idades.

Para as idades posteriores, percebe-se que a incorporação das fibras vegetais e de PET nas argamassas com cal não resulta em grande influência no comportamento dos compósitos. Isso se deve, provavelmente, à petrificação da fibra vegetal e à degradação da fibra de PET, conforme foi observado nas imagens provenientes de MEV.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 – Conclusões gerais do estudo

Foi demonstrada, nesta pesquisa, a viabilidade técnica de utilização de fibra vegetal de curauá e de fibras poliméricas de polietileno tereftalato e polipropileno em argamassas de revestimento, sejam elas mistas de cimento, cal e areia, ou argamassas de cimento e areia contendo aditivo plastificante.

As fibras causaram alteração das propriedades das argamassas no estado fresco, levando à necessidade de adaptação da quantidade de água na mistura, e conseqüentemente da relação água/aglomerante, para uma dada trabalhabilidade. As argamassas contendo fibras apresentaram um menor índice de consistência quando comparadas às argamassas sem fibras, devido ao aumento de coesão proporcionada pelas fibras à mistura. Entretanto, apesar das argamassas com fibra apresentarem-se mais consistentes, não houve qualquer dificuldade em sua posterior aplicação como revestimento de alvenaria de blocos cerâmicos.

A retenção de água, propriedade importante em argamassas de revestimento, foi aumentada pela presença das fibras. Entretanto, os resultados experimentais indicaram que parece haver um teor de fibras ótimo acima do qual há redução da capacidade de retenção de água.

Além do aumento de coesão proporcionado pelas fibras às argamassas, houve um aumento importante da quantidade de ar incorporado nas argamassas com cal. Esse efeito provavelmente é sobreposto pela ação do aditivo plastificante, uma vez que não foi observado aumento adicional da quantidade de ar pela presença das fibras nas argamassas de cimento, areia e aditivo.

Quando aplicadas sobre alvenarias de blocos cerâmicos de 1m², as argamassas com cal apresentaram fissuras esparsas após cinco meses de exposição às intempéries, independentemente da presença de fibras. A análise minuciosa da fissuração indica que as fibras agiram como “ponte”, dificultando a propagação de fissuras, conforme o esperado. Entretanto, é provável que as dimensões das paredes não tenham sido grandes suficientes para causar fissuração por tensões de retração por secagem ou movimentação térmica. As argamassas de cimento com aditivo plastificante, por sua vez, apresentaram grau de fissuração muito baixo, provavelmente devido à baixa aderência com a alvenaria e ao elevado teor de ar incorporado.

A rápida evolução da frente de carbonatação e a elevada permeabilidade à água das argamassas com aditivo evidenciam uma rede interconectada de poros capilares, que foi parcialmente interceptada, com o passar do tempo, na presença de fibras. Ao contrário, as argamassas com cal apresentaram velocidade de carbonatação bem mais lentas, mas houve aumento da profundidade carbonatada na presença de fibras, indicando um aumento de permeabilidade.

Devido à alta permeabilidade das argamassas com aditivo plastificante, o ensaio de cachimbo não se mostrou eficiente, sendo aconselhável a adoção de outro método de ensaio para medição dessa propriedade.

As argamassas com cal e fibra de curauá foram as que apresentaram maior resistência de aderência nas primeiras idades. Entretanto, com o passar do tempo, esta tendência desapareceu e o tipo de fibra não teve efeito significativo nesta propriedade. De forma geral, as argamassas com aditivo plastificante apresentaram resistências de aderência inferiores a 0,30 MPa, que é o valor mínimo recomendado pela NBR 7200 para revestimentos externos. O elevado teor de ar incorporado, evidenciado pelas imagens em microscópio, provavelmente foi o responsável por este desempenho.

Não foi observada correlação entre os ensaios de aderência à tração realizada nas paredes com ensaios de tração na flexão realizados no laboratório, quando as

argamassas com aditivo apresentaram maiores tensões de ruptura se comparadas às argamassas com cal. A presença de fibras nas argamassas causou uma redução do valor de resistência à tração na flexão, como seria de se esperar, tendo em vista os valores dos módulos de elasticidade das fibras estudadas. Entretanto, conforme o esperado, houve aumento da tenacidade dos compósitos no ensaio de flexão, principalmente para as argamassas com aditivo. Vale ressaltar, porém, que não foi possível identificar diferenças muito significativas no desempenho em função do tipo de fibra adicionada à argamassa.

As imagens das argamassas obtidas em microscópio eletrônico de varredura evidenciam processo de degradação e/ou petrificação das fibras de curauá e de PET já nas primeiras idades, e possivelmente também da fibra de PP aos 270 dias. Entretanto, os ensaios mecânicos não evidenciaram com exatidão essa degradação, possivelmente devido à dispersão dos resultados, geralmente alta em ensaios de tração.

6.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de aprofundar os estudos no que concerne ao tema abordado por esta pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros:

- Estudo de fissuração de argamassas de revestimento com fibras em paredes de tamanho real; simulação, em laboratório, de tensões de tração equivalentes ‘as existentes em paredes externas de edifícios, para avaliar o efeito dos diferentes tipos de fibra na fissuração ao longo do tempo.
- Avaliação quantitativa da influência da incorporação de fibras na retração e fissuração de argamassas de revestimento;
- Avaliação de possíveis métodos de tratamento superficial, tanto da fibra vegetal quanto da fibra de PET, a fim de reduzir uma eventual degradação e/ou petrificação em matrizes cimentícias;
- Avaliação do uso de diferentes tipos de aglomerantes e/ou adições em argamassas de revestimento contendo fibras;

- Realização de outros ensaios (massa específica, porosimetria por intrusão de mercúrio, permeabilidade por capilaridade, etc.) nas argamassas no estado endurecido, a fim de verificar a correlação entre as várias propriedades analisadas.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACCETTI, K. M.; PINHEIRO, L. M. **Tipos de fibras e propriedades dos concretos reforçados com fibras**. 42º Congresso Brasileiro do Concreto. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais**. Fortaleza, 2000.
2. AGGARWAL, L. K.; SINGH, J. Effect of plant fibre extractives on properties of cement. **Cement and Concrete Composites**. n. 12, p. 103-108. 1990.
3. ALVES, N. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. 199 f. Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil) – Universidade de Brasília.
4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1018**. Standard Test Method of Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (using beam with third-point loading). 1994.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto – Especificação: NBR 7211**. Rio de Janeiro, 2005.
6. _____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência: NBR 13276**. Rio de Janeiro, 2005.
7. _____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278**. Rio de Janeiro, 2005.
8. _____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos: NBR 13281**. Rio de Janeiro, 2005.
9. _____. **Cal hidratada para argamassas – Determinação de retenção de água: NBR 9290**. Rio de Janeiro, 1996.
10. _____. **Cal hidratada para argamassas - Requisitos: NBR 7175**. Rio de Janeiro, 2003.
11. _____. **Revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânica – Determinação da resistência de aderência à tração: NBR 13528**. Rio de Janeiro, 1995.

12. BALAGURU P.; SLATTUM, K. Test Methods for Durability of Polymeric Fibers in Concrete and UV Light Exposure. Testing of Fiber Reinforced Concrete, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Detroit, Michigan, Ed. D. J. Stevens *et al.* p. 115-136, 1995.
13. BASTOS, P. K. X. **Propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.** 2001. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, São Paulo.
14. BAUER, E.; CORTEZ, I. **Compósitos à base de fibras sintéticas em argamassas para revestimento na prevenção da fissuração.** IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Brasília, 2001.
15. BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 1ª ed. England: Elsevier Science Publishers Ltd, 1990. 449 p.
16. BETIOLI, A. M. **Degradação de fibras PET em materiais à base de cimento Portland.** 2003. 140 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
17. CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. 1996. 285p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
18. CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. **Hydrofuges de surface: choix et mise en oeuvre.** Bruxelles, 1982. 24p. (Note D'Information Technique - NIT n. 140)
19. CEOTTO, L. H.; BANDUK, R. C.; NAKAKURA, E. H. **Revestimento de argamassas: Boas práticas em projeto, execução e avaliação.** V. 1. Porto Alegre: ANTAC, 2005. 96 p.
20. CHEN, P.; FU, X.; CHUNG, D. D. L. Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the new concrete. **Cement and Concrete Research.** V. 25, n. 3, p. 491-496. 1995.
21. CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118 p. (Boletim 68 IPT).

22. COUTTS, R. S. P.; WARDEN, P. G. Sisal pulp reinforced cement mortar. **Cement and Concrete Composites**. V. 14, n. 1, p. 17-21. 1992.
23. DELVASTO, S.; BOTACHE, C. A.; ALBÁN, F.; GUTIÉRREZ, R. M.; PERDOMO, F.; SEGOVIA, F.; AMIGÓ, V. **Effect of fique fiber surface chemical treatments on the physical and mechanical properties of the fiber subjected to aggressive mediums**. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social – NOCMAT 2004. Pirassununga, 2004.
24. DIAS, C. M.; JOHN, V. M.; SAVASTANO JÚNIOR, H. **Efeitos dos ciclos de molhagem e secagem nas propriedades de fibrocimentos com fibras de celulose e PVA**. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social – NOCMAT 2004. Pirassununga, 2004.
25. DIAS, L. A.; CARASEK, H. **Avaliação da permeabilidade e da absorção de água de revestimentos de argamassa pelo método do cachimbo**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. São Paulo, 2003.
26. FECHINE, G. J. M.; RABELLO, M. S.; SOUTO-MAIOR, R. M. The effect of ultraviolet stabilizers on the photodegradation of poly(ethylene terephthalate). **Polymer Degradation and Stability**. n. 75, p. 153-159. 2002.
27. FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 2000. 69 p. (Série Boletim Técnico BT/PCC/260).
28. FIGUEIREDO, A.; TANESI, J.; NINCE, A. **Concreto com fibras de polipropileno (CFP)**. Revista Técnica 66. Editora PINI. São Paulo, 2002.
29. FUJYAMA, R. T.; DARWISH, F. A.; GHAVAMI, K. **Caracterização do comportamento em compressão uniaxial de argamassa de cimento reforçada por fibras de sisal**. In: SEMENGE 99. Niterói, 1999.
30. GARCÉS, P.; FRAILE, J.; VILAPLANA-ORTEGO, E.; CAZORLA-AMORÓS, D.; ALCOCEL, E. G.; ANDIÓN, L. G. Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced Portland cement mortars. **Cement and Concrete Research**. n. 35, p. 324-331. 2005.

31. GRIFFITHS, R.; BALL, A. An assessment of the properties and degradation behavior of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete. **Composites Science and Technology**. n. 60, p. 2747-2753, 2000.
32. HOUGET, V. **Etude des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de composites ciments-fibres organiques**. 1992. 237 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França.
33. HUANG, W. Properties of cement-fly ash grout admixed with bentonite, silica fume or organic fiber. **Cement and Concrete Research**. V. 27, n. 3, p. 395-406. 1997.
34. JELIDI, A. **Conception d'un matériau composite à matrice cimentaire renforcée par des fibres de polyester**. 1991. 170f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França.
35. JOHNSTON, C. D. **Fiber-reinforced cements and concretes**. Canada: V. M. Malhotra, 2001. Vol. 3. 364 p.
36. KAWAMATA, A.; MIHASHI, H.; KANEKO, Y.; KIRIKOSHI, K. Controlling fracture toughness of matrix for ductile fiber reinforced cementitious composites. **Engineering Fracture Mechanics**. n. 69, p. 249-265. 2002.
37. LEAL, A. F.; NASCIMENTO, J. W.; BARBOSA, N. P. **Telhas longas à base de argamassa de cimento Portland reforçadas com fibras de sisal**. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social – NOCMAT 2004. Pirassununga, 2004.
38. MAIA, M. A. **Trabalhabilidade do compósito fibra de coco e argamassa**. In: Congresso Técnico-Científico de Engenharia Civil. Florianópolis, 1996.
39. MARIKUNTE, S.; SOROUSHIAN, P. Statistical evaluation of long-term durability characteristics of cellulose fiber reinforced cement composites. **ACI Materials Journal**. V. 91, n. 6. 1994.
40. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

41. MODLER, L. E.; SPECHT, L. P.; CORÓ, A. G.; BECK, J. J. **Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras**. In: Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora, 2000.
42. MOHAMAD, G.; RIZZATTI, E.; ROMAN, H. **Estudo das argamassas de revestimento aditivadas em relação às de cal**. In: Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora, 2000. v.1 p. 489-497.
43. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
44. NINCE, A.; FIGUEIREDO A.; BITTENCOURT, T. **Absorção e índice de vazios em concreto reforçado com fibra de polipropileno exposto a 400°C e 600°C**. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, 2003.
45. NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 1998. 18p. (Série Boletim Técnico BT/PCC/225).
46. OKAFOR, F. O.; EZE-UZOMAKA, O. J.; EGBUNIWE, N. The structural properties and optimum mix proportions of palmtree fibre-reinforced mortar composite. **Cement and Concrete Research**. V. 26, n. 7, p. 1045-1055. 1996.
47. OLIVEIRA, M.; GLEIZE, P.; ROMAN, H. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. São Paulo, 2003.
48. PACIORNIK, S. Curso de Ciência e Engenharia dos Materiais. Disponível em: http://www.dcm.puc-rio.br/cursos/cemat/index_files/frame.html>. Acesso em: 12 de março de 2006.
49. PELISSER, F. **Avaliação do desempenho de concreto reforçado com fibras de polietileno tereftalato**. 2002. 112 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
50. RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas**. São Paulo: EPUSP, 1999. 29p. (Série Boletim Técnico BT/PCC/233).
51. RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study. **Cement and Concrete Composites**. n. 27, p. 547-553. 2005.

52. RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T.; MANIKANDAN, P. **Polymer-modified sisal fibre mortar composites: workability strength and durability.** In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social – NOCMAT 2004. Pirassununga, 2004.
53. REBEIZ, K. S. Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. **Cement and Concrete Composites.** n. 17, p. 119-124. 1995.
54. REBEIZ, K. S.; ROSETT, J. W.; NESBIT, S. M.; CRAFT, A. P. Tensile properties of polyester mortar using PET and fly ash wastes. **Journal of Materials Science Letters.** n. 15, p. 1273-1275. 1996.
55. RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos.** 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Belo Horizonte, 2002.
56. SANJUÁN, M. A.; ANDRADE, C.; BENTUR, A. Effect of crack control in mortars containing polypropylene fibers on the corrosion of steel in a cementitious matrix. **ACI Materials Journal.** V. 94, n. 2. 1997.
57. SAVASTANO JÚNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** 2000. 152 p. Tese de Livre Docência apresentada junto ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
58. SAVASTANO JÚNIOR, H. **Materiais reforçados com fibras – Correlação entre a zona de transição fibra matriz e as propriedades mecânicas.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT. Editora PINI. São Paulo, 1998.
59. SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Ground iron blast furnace slag as a matrix for cellulose-cement materials. **Cement and Concrete Composites.** n. 23, p. 389-397. 2001.

60. SEGRE, N.; TONELLA, E.; JOEKES, I. Evaluation of the stability of polypropylene fibers in environments aggressive to cement-based materials. **Cement and Concrete Research**. v. 28, n. 1, p. 75-81. 1998.
61. SENA, C. **Cultura do curauá: um pouco de história e potencialidades**. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Pará – EMATER. Santarém, 1999.
62. SENA, J.; COLARES, R. **Informações básicas sobre a cultura do curauá**. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Pará – EMATER. Santarém, 1996.
63. SILVA, A. C.; JOHN, W. M. **Compósitos reforçados com fibras de celulose (CRFC): aspectos relativos à durabilidade**. São Paulo: EPUSP, 2003. 14p. (Série Boletim Técnico BT/PCC/342).
64. SILVA, M. Projeto lixo seletivo. Disponível em: <www.marcelosilva.com.br>. Acesso em: 21 de outubro 2005.
65. SOROUSHIAN, P.; RAVANBAKHS, S. High-early-strength concrete: mixture proportioning with processed cellulose fibers for durability. **ACI Materials Journal**. V. 96, n. 5. 1999.
66. TANESI, J. & FIGUEIREDO, A. **Materiais com fibras de polipropileno para construção civil**. Congresso Internacional de não tecidos e tecidos técnicos. **Anais**. 1999.
67. TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR THE TESTING AND USE OF CONSTRUCTION MATERIALS - RILEM. **Initial rate of suction (IRS) of masonry units: LUMA 5**. Londres, 1991.
68. _____. **Water absorption and water porosity of masonry units: LUMA 4**. Londres, 1991.
69. _____. **Measurement of hardened concrete carbonation depth: CPC 18**. Londres, 1988.
70. TOLÊDO FILHO, R. D. e SANJUÁN, M. A. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. **Cement and Concrete Research**. v. 29, p. 1597-1604. 1999.

71. TOUTANJI, H. Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. **Construction and Building Materials**. n. 13, p. 171-177. 1999.
72. WANG Y., BACKER S.; LI V. C. An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites. **Journal of Materials Science**. V. 22, p. 4281-4291. 1987.
73. ZEIML, M.; LEITHNER, D.; LACKNER, R.; MANG, H. How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? **Cement and Concrete Research**. n. 36, p. 929-942. 2006.
74. ZHU, M.; CHUNG, D. D. L. Improving brick-to-mortar bond strength by the addition of carbon fibers to the mortar. **Cement and Concrete Research**. V. 27, n. 12, p. 1829-1839. 1997.

APÊNDICE A
CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)
DAS FIBRAS

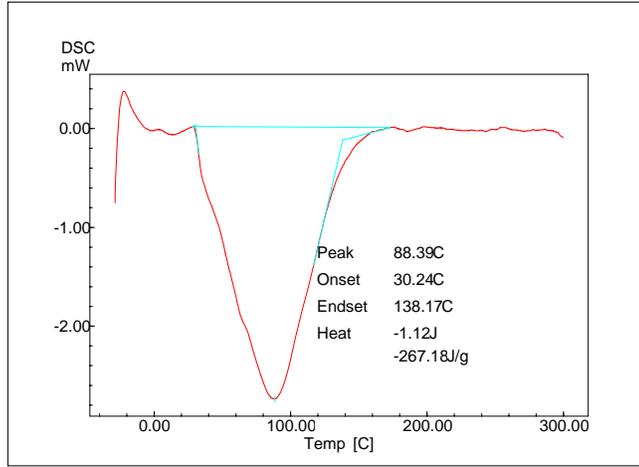


Ilustração A.1 – DSC da fibra de curauá

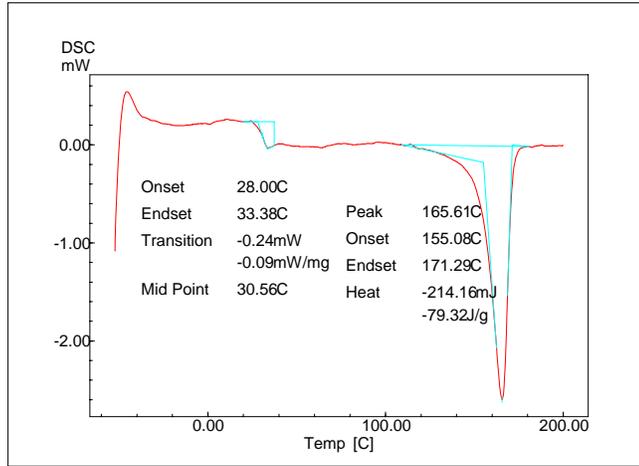


Ilustração A.2 – DSC da fibra de polipropileno

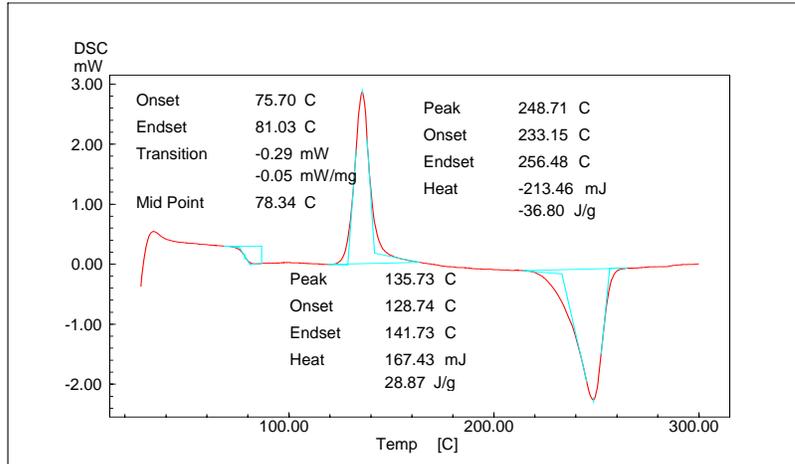


Ilustração A.3 – DSC da fibra de PET

APÊNDICE B

**RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NAS
PAREDES DE BLOCOS CERÂMICOS E EM CORPOS
DE PROVA**

Tabela B.1 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 28 dias de idade

Argamassa	R. de Aderência (MPa)				Argamassa	R. de Aderência (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,42	0,36	0,11	31,15%	A0,25C	0,08	0,15	0,10	67,16%
	0,25					0,30			
	0,36					0,15			
	0,32					0,25			
	0,25					0,06			
	0,54					0,07			
C0,25PET	0,28	0,29	0,13	44,54%	A0,25PET	0,04	0,17	0,09	55,34%
	0,42					0,27			
	0,40					0,11			
	0,19					0,24			
	0,33					0,11			
	0,09					0,23			
C0,25PP	0,36	0,32	0,15	44,89%	A0,25PP	0,27	0,14	0,11	76,13%
	0,12					0,08			
	0,35					0,24			
	0,49					0,21			
	0,44					0,03			
	0,18					0,03			
C0,50C	0,36	0,33	0,11	32,90%	A0,50C	0,07	0,20	0,09	44,06%
	0,39					0,31			
	0,31					0,18			
	0,15					0,26			
	0,31					0,14			
	0,48					0,26			
C0,50PET	0,22	0,19	0,06	31,04%	A0,50PET	0,16	0,14	0,03	21,18%
	0,24					0,13			
	0,13					0,17			
	0,21					0,10			
	0,23					0,12			
	0,10								
C0,50PP	0,08	0,13	0,03	25,28%	A0,50PP	0,08	0,13	0,08	58,61%
	0,17					0,13			
	0,13					0,27			
	0,13					0,13			
	0,16					0,04			
	0,11					0,15			
CR	0,35	0,21	0,11	51,41%	AR	0,15	0,19	0,12	62,54%
	0,13					0,13			
	0,28					0,05			
	0,27					0,24			
	0,05					0,16			
	0,20					0,39			

Tabela B.2 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 90 dias de idade

Argamassa	R. de Aderência (MPa)				Argamassa	R. de Aderência (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,24	0,31	0,08	26,86%	A0,25C	0,10	0,10	0,02	15,81%
	0,32					0,08			
	0,31					0,12			
	0,46								
	0,29					0,11			
	0,23					0,09			
C0,25PET	0,40	0,37	0,21	56,65%	A0,25PET	0,38	0,23	0,14	63,90%
	0,59					0,34			
	0,40					0,05			
	0,05					0,11			
	0,20					0,13			
	0,55					0,34			
C0,25PP	0,16	0,37	0,16	44,80%	A0,25PP	0,06	0,16	0,11	66,77%
	0,54					0,11			
	0,22					0,11			
	0,40					0,23			
	0,32					0,10			
	0,56					0,34			
C0,50C	0,29	0,32	0,14	41,75%	A0,50C	0,13	0,19	0,10	56,67%
	0,43					0,34			
	0,53					0,29			
	0,23					0,10			
	0,16					0,09			
	0,30					0,16			
C0,50PET	0,32	0,26	0,12	46,80%	A0,50PET	0,09	0,28	0,15	52,44%
	0,13					0,17			
	0,42					0,22			
	0,12					0,32			
	0,22					0,40			
	0,33					0,48			
C0,50PP	0,11	0,22	0,09	41,26%	A0,50PP	0,13	0,19	0,10	56,67%
	0,28					0,34			
	0,25					0,29			
	0,11					0,10			
	0,24					0,09			
	0,33					0,16			
CR	0,29	0,46	0,20	43,13%	AR	0,28	0,31	0,13	40,05%
	0,70					0,14			
	0,60					0,24			
	0,25					0,36			
	0,31					0,51			
	0,62					0,35			

Tabela B.3 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 180 dias de idade

Argamassa	R. de Aderência (MPa)				Argamassa	R. de Aderência (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,55	0,45	0,13	29,03%	A0,25C	0,10	0,28	0,13	47,20%
	0,37					0,47			
	0,34					0,24			
	0,29					0,24			
	0,60					0,23			
	0,54					0,39			
C0,25PET	0,68	0,45	0,22	49,74%	A0,25PET	0,22	0,22	0,08	33,94%
	0,66					0,27			
	0,54					0,11			
	0,23					0,16			
	0,41					0,27			
	0,15					0,31			
C0,25PP	0,42	0,24	0,18	75,17%	A0,25PP	0,23	0,25	0,10	39,92%
	0,08					0,19			
	0,04					0,13			
	0,44					0,22			
	0,33					0,32			
	0,12					0,41			
C0,50C	0,10	0,24	0,13	52,35%	A0,50C	0,23	0,28	0,16	56,33%
	0,39					0,54			
	0,13					0,39			
	0,38					0,10			
	0,17					0,21			
	0,29					0,21			
C0,50PET	0,05	0,25	0,14	57,88%	A0,50PET	0,12	0,18	0,07	39,49%
	0,24					0,11			
	0,10					0,24			
	0,38					0,26			
	0,34					0,15			
	0,37								
C0,50PP		0,22	0,01	6,00%	A0,50PP	0,11	0,19	0,11	60,48%
	0,22					0,23			
	0,21					0,03			
						0,14			
	0,23					0,28			
	0,20					0,33			
CR	0,28	0,33	0,10	29,63%	AR	0,20	0,20	0,07	36,36%
	0,38					0,24			
	0,36					0,16			
	0,16					0,08			
	0,44					0,27			
	0,36					0,27			

Tabela B.4 – Resultados dos ensaios de resistência de aderência para 270 dias de idade

Argamassa	R. de Aderência (MPa)				Argamassa	R. de Aderência (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,41	0,35	0,11	32,21%	A0,25C	0,03	0,13	0,07	54,61%
	0,37					0,18			
	0,34					0,16			
	0,32					0,22			
	0,48					0,12			
	0,15					0,07			
C0,25PET	0,59	0,43	0,24	57,08%	A0,25PET	0,27	0,18	0,12	65,97%
	0,71					0,34			
	0,31					0,13			
	0,37								
	0,03					0,09			
	0,56					0,07			
C0,25PP	0,61	0,53	0,13	24,12%	A0,25PP	0,13	0,11	0,04	38,59%
	0,68					0,18			
	0,62					0,13			
	0,38					0,07			
	0,41					0,09			
	0,45					0,07			
C0,50C	0,4	0,42	0,04	10,42%	A0,50C	0,23	0,21	0,07	33,34%
	0,38					0,17			
	0,48					0,18			
	0,41					0,24			
						0,11			
						0,31			
C0,50PET	0,29	0,23	0,12	52,49%	A0,50PET	0,36	0,20	0,14	68,72%
	0,29					0,11			
	0,34					0,16			
	0,07					0,16			
	0,28					0,03			
	0,08					0,36			
C0,50PP	0,31	0,31	0,09	28,89%	A0,50PP		0,15	0,08	52,97%
	0,23					0,04			
	0,47					0,20			
	0,23					0,13			
	0,33					0,24			
	0,28					0,12			
CR	0,16	0,40	0,24	59,73%	AR	0,20	0,16	0,11	69,48%
	0,48					0,05			
	0,74					0,34			
	0,13					0,14			
	0,54					0,04			
	0,32					0,19			

Tabela B.5 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 28 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	5,1	5,80	0,70	12,09%	A0,25C	18,3	17,90	1,47	8,20%
	6,2					17,5			
	6,2					16,7			
	5,9					20,0			
	6,6					18,9			
	4,8					16,0			
C0,50C	7,1	6,70	0,95	14,16%	A0,50C	20,0	17,47	2,99	17,12%
	5,6					13,8			
	5,5					13,5			
	7,9					19,7			
	7,0					19,0			
	7,1					18,8			
C0,25PET	4,8	5,08	0,43	8,51%	A0,25PET	20,0	18,60	1,43	7,69%
	4,7					18,6			
						19,1			
	5,5					20,0			
	4,8					17,5			
	5,6					16,4			
C0,50PET	5,0	6,77	1,34	19,73%	A0,50PET	13,7	14,97	2,78	18,58%
	7,1					14,9			
	7,8					10,4			
	7,1					18,3			
	5,3					15,3			
	8,3					17,2			
C0,25PP	6,2	6,63	0,91	13,67%	A0,25PP	17,7	17,63	1,12	6,34%
	7,1					18,9			
	8,1					18,2			
	5,4					18,0			
	6,5					15,6			
	6,5					17,4			
C0,50PP	8,4	7,12	1,09	15,27%	A0,50PP	15,2	16,53	3,16	19,10%
	6,5					18,2			
	7,7					20,0			
	7,6					19,6			
	5,3					13,5			
	7,2					12,7			
CR	3,0	4,38	1,37	31,23%	AR	17,4	18,65	1,36	7,28%
	3,0					18,7			
	3,9					16,7			
	6,2					20,0			
	4,4					19,1			
	5,8					20,0			

Tabela B.6 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 90 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	9,5	7,90	1,21	15,36%	A0,25C	20,0	19,50	0,44	2,24%
	7,8					19,8			
	8,4					19,6			
	8,2					19,0			
	5,8								
	7,7					19,1			
C0,50C	12,1	10,42	0,96	9,24%	A0,50C	20,0	19,82	0,21	1,08%
	9,4					19,6			
	10,6					19,9			
	10,7					20,0			
	9,9					19,5			
	9,8					19,9			
C0,25PET	6,6	7,72	0,93	12,11%	A0,25PET	19,8	19,82	0,15	0,75%
	7,7					20,0			
	8,8								
	6,6					19,6			
	8,2					19,8			
	8,4					19,9			
C0,50PET	11,9	10,65	1,47	13,76%	A0,50PET		19,52	0,59	3,02%
	9,4					18,6			
	11,4					20,0			
	8,6					20,0			
	10,3					19,7			
	12,3					19,3			
C0,25PP	7,8	8,05	1,00	12,47%	A0,25PP	19,7	19,78	0,26	1,30%
	9,2					20,0			
	7,0					20,0			
	7,4					19,6			
	9,4					19,4			
	7,5					20,0			
C0,50PP	7,2	8,85	1,84	20,84%	A0,50PP	19,7	19,50	0,44	2,27%
	7,9					19,4			
	10,7					19,9			
	9,9					20,0			
	6,6					19,1			
	10,8					18,9			
CR	6,0	7,12	1,07	15,07%	AR	19,1	19,60	0,35	1,77%
	5,8					19,3			
	7,3					20,0			
	7,5					19,7			
	7,4					19,6			
	8,7					19,9			

Tabela B.7 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 180 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	11,5	9,64	2,22	23,02%	A0,25C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	9,1					20,0			
	10,8					20,0			
	6,0					20,0			
	10,8					20,0			
C0,50C	13,1	13,07	1,03	7,84%	A0,50C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	11,6					20,0			
	12,5					20,0			
	14,7					20,0			
	13,4					20,0			
C0,25PET	8,0	8,76	0,69	7,93%	A0,25PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
	8,4					20,0			
	9,5					20,0			
	9,5					20,0			
	8,4					20,0			
C0,50PET	12,5	12,55	0,06	0,46%	A0,50PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
						20,0			
	12,5					20,0			
	12,6					20,0			
	12,6					20,0			
C0,25PP	11,6	11,94	0,81	6,79%	A0,25PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	11,2					20,0			
	13,0					20,0			
	12,6					20,0			
	11,3					20,0			
C0,50PP	16,8	13,53	2,10	15,51%	A0,50PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	13,3					20,0			
	12,4					20,0			
	13,8					20,0			
	14,4					20,0			
CR	10,5	9,58	1,85	19,28%	AR	20,0	20,00	0,00	0,00%
	7,7					20,0			
	6,9					20,0			
	10,6					20,0			
	11,6					20,0			

Tabela B.8 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação das paredes de blocos cerâmicos para 270 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	15,1	13,60	1,42	10,48%	A0,25C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	14,0					20,0			
	12,1					20,0			
	14,7					20,0			
	12,1					20,0			
						20,0			
C0,50C	15,9	16,37	0,90	5,48%	A0,50C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	17,4					20,0			
	15,8					20,0			
						20,0			
						20,0			
						20,0			
C0,25PET	14,1	13,55	1,26	9,27%	A0,25PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
	12,6					20,0			
	15,5					20,0			
	14,2					20,0			
	12,6					20,0			
	12,3					20,0			
C0,50PET	19,1	19,76	0,39	1,98%	A0,50PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	19,7					20,0			
	20,0					20,0			
						20,0			
	20,0					20,0			
C0,25PP	15,8	15,37	1,54	9,99%	A0,25PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	13,5					20,0			
	15,1					20,0			
	18,1					20,0			
	15,0					20,0			
	14,7					20,0			
C0,50PP	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,50PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
CR	11,2	11,52	1,80	15,64%	AR	20,0	20,00	0,00	0,00%
	11,9					20,0			
	14,2					20,0			
	9,2					20,0			
	11,1					20,0			
						20,0			

Tabela B.9 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 28 dias de idade

Argamassa	Δ_{15-5}				Argamassa	Tempo (s)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,8	1,27	0,41	32,23%	A0,25C	7,9	38,72	32,40	83,67%
	0,9					18,5			
	1,0					53,5			
	1,7					49,3			
	1,6					11,3			
	1,6					91,7			
C0,50C	1,1	1,57	0,23	14,92%	A0,50C	23,6	67,81	85,40	125,93%
	1,6					20,0			
	1,6					6,8			
	1,7					14,0			
	1,7					125,5			
	1,7					217,1			
C0,25PET	0,6	0,88	0,26	29,01%	A0,25PET	96,2	57,05	33,14	58,09%
	0,8					9,9			
	0,6					47,6			
	1,1					79,9			
	1,0								
	1,2					51,7			
C0,50PET	1,1	1,32	0,29	22,23%	A0,50PET	121,4	151,45	109,37	72,22%
	1,3					98,0			
	1,2					22,1			
	1,5					306,4			
	1,0					209,3			
	1,8								
C0,25PP	1,1	1,53	0,41	26,94%	A0,25PP	138,3	183,07	165,45	90,38%
	1,9					15,0			
	1,1					85,5			
	2,1					80,9			
	1,6					417,1			
	1,4					361,6			
C0,50PP	1,8	1,45	0,37	25,71%	A0,50PP	36,9	89,93	84,26	93,69%
	1,1					219,0			
	1,3					9,0			
	1,9					19,4			
	1,0					99,0			
	1,6					156,3			
CR	0,9	1,28	0,34	26,73%	AR	14,0	9,31	3,00	32,22%
	0,9					5,8			
	1,4					7,5			
	1,4					9,7			
	1,3					7,6			
	1,8					11,3			

Tabela B.10 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 90 dias de idade

Argamassa	Δ_{15-5}				Argamassa	Tempo (s)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	1,2	1,02	0,24	23,62%	A0,25C	10,4	113,80	80,46	70,70%
	1,0					78,6			
	1,4					227,6			
	0,9					107,4			
	0,8					145,0			
	0,8								
C0,50C	1,1	1,10	0,14	12,86%	A0,50C	17,9	349,60	381,63	109,16%
	1,0					58,4			
	1,1					439,1			
	1,3					5,6			
	0,9					893,5			
	1,2					683,1			
C0,25PET	0,4	0,53	0,12	22,71%	A0,25PET	960,3	516,55	359,42	69,58%
	0,6					510,8			
	0,4					170,5			
	0,6					810,0			
	0,5					614,4			
	0,7					33,3			
C0,50PET	1,1	0,88	0,25	28,11%	A0,50PET	1333,3	533,27	560,86	105,17%
	0,8					95,8			
	0,8					540,4			
	0,5					1090,9			
	1,2					55,3			
	0,9					83,9			
C0,25PP	0,8	0,87	0,23	26,98%	A0,25PP	248,7	583,53	612,69	105,00%
	0,6					47,2			
	1,3					320,0			
	0,9					1565,2			
	0,8					1125,0			
	0,8					195,1			
C0,50PP	1,8	1,68	0,41	24,47%	A0,50PP	33,4	275,17	291,39	105,90%
	2,4					21,7			
	1,4					22,1			
	1,4					649,0			
	1,3					344,2			
	1,8					580,6			
CR	0,5	0,93	0,46	49,64%	AR	9,5	34,92	48,02	137,51%
	0,8					34,6			
	0,8					118,1			
	1,6					8,2			
	1,4					4,2			
	0,5								

Tabela B.11 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 180 dias de idade

Argamassa	Δ_{15-5}				Argamassa	Tempo (s)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	1,9	1,18	0,40	33,56%	A0,25C	17,8	316,03	275,68	87,23%
	0,8					751,6			
	1,0					385,4			
	0,9					29,0			
	1,2					430,1			
	1,3					282,4			
C0,50C	2,1	1,40	0,45	31,94%	A0,50C	6,0	168,84	267,41	158,38%
	1,3					336,4			
	1,6					6,8			
	1,5					8,6			
	1,1					644,3			
	0,8					10,9			
C0,25PET	0,4	0,72	0,23	32,32%	A0,25PET		245,06	283,12	115,53%
	0,7								
	0,6								
	0,8					44,9			
	0,7								
	1,1					445,3			
C0,50PET	1,1	1,22	0,74	60,71%	A0,50PET	357,1	259,30	254,98	98,33%
	0,7					82,1			
	2,7					654,1			
	0,9					183,8			
	0,9								
	1,0					19,5			
C0,25PP	1,2	1,18	0,39	32,69%	A0,25PP	290,2	153,53	144,08	93,85%
	0,8					16,4			
	1,1					42,4			
	1,2								
	0,9								
	1,9					265,2			
C0,50PP	1,5	1,23	0,29	23,31%	A0,50PP	551,3	195,80	227,24	116,05%
	0,8					23,1			
	1,4					35,0			
	1,0					74,7			
	1,5								
	1,2					295,0			
CR	0,5	0,98	0,52	53,20%	AR	12,2	53,65	55,59	103,62%
	0,8					146,0			
	1,9					31,1			
	1,1					15,0			
	0,5					63,9			
	1,1								

Tabela B.12 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para 270 dias de idade

Argamassa	Δ_{15-5}				Argamassa	Δ_{15-5}			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,8	0,92	0,24	26,20%	A0,25C		1,30	0,46	35,25%
	1,1								
	0,9								
	0,7								
	1,3								
	0,7								
C0,50C	2,0	1,57	0,49	31,18%	A0,50C		2,05	0,21	10,35%
	0,9								
	2,1								
	1,8								
	1,5								
	1,1								
C0,25PET	0,4	0,72	0,30	41,78%	A0,25PET		1,33	0,32	24,11%
	0,4								
	0,7								
	0,8								
	0,8								
	1,2								
C0,50PET	0,9	1,43	0,64	44,71%	A0,50PET	1,8	1,24	0,40	32,56%
	1,2								
	1,2								
	2,7								
	1,4								
	1,2								
C0,25PP	0,8	0,93	0,37	39,90%	A0,25PP	1,1	1,05	0,06	5,50%
	1,1								
	0,6								
	1,5								
	1,1								
	0,5								
C0,50PP	1,0	1,17	0,35	30,02%	A0,50PP	2,3	1,73	0,49	28,55%
	1,4								
	1,7								
	1,0								
	0,7								
	1,2								
CR	0,7	0,77	0,27	35,64%	AR	7,1	9,56	5,62	58,74%
	0,5								
	0,7								
	1,3								
	0,7								
	0,7								

* Para a argamassa AR o valor do ensaio de permeabilidade é expresso em unidade de tempo (s)

Tabela B.13 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 28 dias de idade

Argamassa	T. de Ruptura (MPa)				Argamassa	T. de Ruptura (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,90	0,89	0,05	5,06%	A0,25C	1,24	1,22	0,05	3,94%
	0,89					1,29			
	0,90					1,22			
	0,94					1,14			
						1,25			
	0,82					1,22			
C0,50C		0,71	0,04	5,99%	A0,50C	1,27	0,91	0,25	27,45%
	0,66					1,10			
	0,72					0,93			
	0,77					0,58			
	0,69					0,71			
	0,72					0,89			
C0,25PET	0,77	0,82	0,07	8,27%	A0,25PET	1,25	1,62	0,41	25,43%
	0,88					1,83			
	0,81					2,11			
	0,71					1,83			
	0,88					1,67			
	0,85					1,01			
C0,50PET	0,56	0,51	0,20	39,96%	A0,50PET	1,56	1,50	0,16	10,74%
	0,17					1,38			
	0,65					1,47			
	0,60					1,35			
	0,36					1,75			
	0,71								
C0,25PP	0,96	0,70	0,27	38,35%	A0,25PP	1,67	1,69	0,25	14,84%
	0,30					1,84			
	0,79					1,30			
	0,80					2,00			
	0,44					1,78			
	0,90					1,52			
C0,50PP	0,71	0,70	0,04	6,41%	A0,50PP	1,66	1,83	0,25	13,41%
	0,65					1,97			
	0,76					1,48			
	0,72					1,78			
	0,66					1,94			
						2,17			
CR	1,07	1,02	0,04	3,82%	AR	1,69	1,60	0,26	16,37%
						1,58			
	1,03					1,96			
	1,01					1,16			
	0,96					1,68			
	1,03					1,55			

Tabela B.14 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 90 dias de idade

Argamassa	T. de Ruptura (MPa)				Argamassa	T. de Ruptura (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,98	1,06	0,13	12,31%	A0,25C	1,83	1,75	0,27	15,40%
	1,15					1,29			
	1,19					1,57			
	1,17					1,97			
	0,95					1,86			
	0,89					1,96			
C0,50C	0,71	0,85	0,09	10,51%	A0,50C	1,72	1,72	0,04	2,25%
	0,93					1,77			
	0,92					1,72			
	0,82								
						1,72			
	0,88					1,67			
C0,25PET	0,74	0,95	0,18	19,17%	A0,25PET	2,29	1,66	0,53	31,69%
	1,14					1,80			
	0,81					1,43			
	0,90					0,74			
	1,13					1,89			
						1,81			
C0,50PET	0,59	0,53	0,13	24,19%	A0,50PET	1,53	1,29	0,15	11,99%
	0,53					1,28			
	0,54					1,11			
	0,52					1,26			
	0,70					1,39			
	0,31					1,15			
C0,25PP	0,91	0,78	0,22	28,69%	A0,25PP	1,63	1,47	0,33	22,30%
	0,70					1,73			
	0,69					1,06			
	0,73					1,57			
	0,50					1,06			
	1,15					1,78			
C0,50PP	0,50	0,76	0,17	21,85%	A0,50PP	1,71	1,57	0,15	9,78%
	0,92					1,58			
	0,65					1,79			
	0,73					1,53			
	0,90					1,39			
	0,88					1,45			
CR	1,22	1,26	0,09	7,01%	AR	1,59	1,69	0,28	16,83%
	1,25					1,73			
	1,36					1,69			
	1,37					2,10			
	1,13					1,23			
	1,23					1,80			

Tabela B.15 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 180 dias de idade

Argamassa	T. de Ruptura (MPa)				Argamassa	T. de Ruptura (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,71	0,66	0,07	11,06%	A0,25C	1,44	1,18	0,28	23,54%
	0,67					0,83			
	0,55					1,31			
	0,71					1,31			
	0,60					1,35			
	0,73					0,82			
C0,50C	0,64	0,62	0,08	12,83%	A0,50C	0,47	1,02	0,31	30,26%
	0,51					0,91			
	0,74					1,32			
	0,58					1,23			
	0,64					1,16			
	0,58					1,01			
C0,25PET	0,68	0,58	0,06	10,34%	A0,25PET	1,43	1,30	0,22	17,26%
	0,57					0,95			
	0,51					1,54			
	0,53					1,20			
	0,58					1,20			
	0,61					1,48			
C0,50PET	0,36	0,38	0,02	4,15%	A0,50PET	0,61	0,62	0,13	21,27%
	0,38					0,79			
	0,41					0,76			
	0,38					0,51			
	0,38					0,62			
	0,37					0,45			
C0,25PP	0,74	0,72	0,05	6,81%	A0,25PP	1,13	1,15	0,08	7,12%
	0,65					1,14			
	0,77					1,27			
	0,77					1,18			
	0,67					1,05			
	0,73					1,05			
C0,50PP	0,74	0,62	0,07	11,77%	A0,50PP	0,76	0,78	0,21	26,99%
	0,64					0,89			
	0,66					0,66			
	0,54					1,03			
	0,57					0,44			
	0,59					0,90			
CR	0,98	0,84	0,10	12,13%	AR	0,92	0,97	0,36	36,90%
						1,04			
	0,75					0,35			
	0,86					1,38			
	0,89					1,25			
	0,74					0,89			

Tabela B.16 – Valores de tensão de ruptura para os ensaios de tração na flexão para 270 dias de idade

Argamassa	T. de Ruptura (MPa)				Argamassa	T. de Ruptura (MPa)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,63	0,58	0,05	7,79%	A0,25C	1,47	1,20	0,28	23,10%
	0,54					0,98			
	0,52					1,26			
	0,61					0,75			
	0,59					1,43			
						1,30			
C0,50C		0,65	0,06	8,49%	A0,50C	1,21	1,04	0,25	24,39%
	0,60					1,07			
	0,62					1,24			
	0,69					0,89			
	0,71					0,59			
						1,19			
C0,25PET	0,52	0,49	0,08	17,14%	A0,25PET	1,16	1,38	0,15	10,57%
	0,57					1,32			
	0,47					1,44			
	0,53					1,55			
	0,36					1,49			
						1,29			
C0,50PET	0,27	0,53	0,39	73,29%	A0,50PET	0,76	0,78	0,03	4,42%
	0,35								
	0,98								
						0,74			
						0,79			
						0,82			
C0,25PP	0,73	0,70	0,06	8,38%	A0,25PP	1,21	1,13	0,08	6,78%
	0,70					1,10			
	0,80					1,20			
	0,64					1,09			
	0,64					1,01			
	0,70					1,17			
C0,50PP	0,69	0,69	0,05	7,73%	A0,50PP	1,03	0,80	0,21	25,81%
	0,67					0,87			
	0,75					1,00			
	0,63					0,53			
	0,67					0,70			
	0,77					0,63			
CR		0,79	0,18	22,27%	AR	1,03	0,98	0,13	12,82%
	0,8692358					0,86			
	0,93596676					0,81			
	0,80283971					1,00			
	0,5364487					1,06			
						1,14			

Tabela B.17 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 28 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	0,0	0,00	0,00	-	A0,25C	2,8	2,67	0,48	17,81%
	0,0					2,5			
	0,0					3,0			
	0,0					2,0			
	0,0					3,4			
	0,0					2,4			
C0,50C	0,0	0,25	0,39	156,97%	A0,50C	2,4	2,29	0,32	13,93%
	0,7					2,1			
	0,0					2,7			
	0,0					2,5			
	0,0								
	0,9					1,9			
C0,25PET	4,3	4,15	0,25	6,14%	A0,25PET	6,6	5,15	0,79	15,35%
	4,2					4,7			
	4,1					4,2			
	4,0					5,1			
	3,9					5,1			
	4,6					5,4			
C0,50PET	5,6	4,82	0,68	14,03%	A0,50PET	5,1	5,08	0,74	14,62%
	4,9					5,2			
	3,8					4,0			
	4,3					4,6			
	5,1					5,8			
	5,3					5,9			
C0,25PP	4,0	4,18	0,32	7,66%	A0,25PP	4,6	4,17	0,64	15,30%
	4,0					4,7			
	4,7					4,8			
	3,9					3,2			
	4,5					3,8			
	4,1					4,1			
C0,50PP	4,4	4,03	0,40	9,90%	A0,50PP	5,5	4,91	0,48	9,80%
	3,7					4,6			
	4,5					5,4			
	4,3					4,5			
	3,5					5,2			
	3,9					4,4			
CR		3,43	0,06	1,88%	AR	4,1	4,90	0,85	17,36%
						5,2			
	3,5					4,0			
	3,5					4,6			
	3,4					5,8			
	3,4					5,9			

Tabela B.18 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 90 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	6,1	4,64	0,84	18,12%	A0,25C	8,6	7,25	1,49	20,52%
	4,9					6,0			
	3,8					5,5			
	4,7					7,0			
	3,8					7,1			
	4,7					9,4			
C0,50C	4,6	5,82	1,32	22,64%	A0,50C	20,0	13,93	6,67	47,90%
	8,1					8,7			
	5,2					20,0			
	6,6					20,0			
	4,8					7,6			
	5,7					7,3			
C0,25PET	10,6	9,90	0,53	5,37%	A0,25PET	7,5	9,02	0,94	10,39%
	9,6					9,4			
	9,3					10,1			
	10,4					9,2			
	9,8					9,0			
C0,50PET	12,4	12,16	0,46	3,81%	A0,50PET	20,0	16,83	4,92	29,25%
	11,4					20,0			
	12,4					10,3			
	12,3					20,0			
	12,0					20,0			
	12,7					10,7			
C0,25PP	8,8	9,99	0,91	9,07%	A0,25PP	8,2	8,16	1,01	12,41%
						9,7			
	10,9					8,4			
	10,3					7,8			
	10,0					6,9			
C0,50PP	12,7	10,58	1,27	11,99%	A0,50PP	8,9	10,28	1,01	9,87%
	9,7					11,4			
						9,6			
	9,9					9,8			
	11,0					10,7			
	9,7					11,3			
CR	7,9	7,71	0,27	3,44%	AR	10,5	10,17	0,60	5,95%
	7,9					10,1			
	7,6					10,4			
	7,7					9,4			
	8,1					11,1			
	7,3					9,6			

Tabela B.19 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 180 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	13,8	18,10	2,96	16,38%	A0,25C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	14,9					20,0			
C0,50C	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,50C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,25PET	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,25PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,50PET	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,50PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,25PP	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,25PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,50PP	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,50PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
CR	14,0	17,23	3,04	17,67%	AR	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	14,6					20,0			
	20,0					20,0			
	14,9					20,0			

Tabela B.20 – Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação dos corpos de prova para 270 dias de idade

Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)				Argamassa	Prof. de carbonatação (mm)			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,25C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,50C	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,50C	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,25PET	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,25PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,50PET	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,50PET	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,25PP	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,25PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
C0,50PP	20,0	20,00	0,00	0,00%	A0,50PP	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
CR	20,0	20,00	0,00	0,00%	AR	20,0	20,00	0,00	0,00%
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			
	20,0					20,0			

Tabela B.21 – Valores do índice de tenacidade I5 para 28 dias de idade

Argamassa	I5				Argamassa	I5			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	4,1	3,21	0,73	22,90%	A0,25C	4,1	4,41	0,24	5,49%
	3,1					4,5			
	3,2					4,5			
	3,5					4,2			
						4,3			
	2,1					4,8			
C0,50C		2,98	0,44	14,69%	A0,50C	3,5	3,60	0,46	12,78%
	3,0					4,2			
						3,1			
	3,3								
	3,3								
	2,4					3,5			
C0,25PET	4,2	3,76	0,86	22,77%	A0,25PET	3,6	3,91	0,35	8,94%
	3,3					3,5			
	3,5					4,1			
	3,2					4,0			
	3,1					4,3			
	5,3								
C0,50PET	4,4	3,55	0,71	19,92%	A0,50PET		3,60	0,07	1,93%
						3,5			
	3,5					3,6			
	3,6					3,6			
	2,7								
C0,25PP	2,7	2,54	0,19	7,55%	A0,25PP	2,3	3,54	0,76	21,45%
	2,7					4,1			
	2,5					4,5			
						3,3			
						3,7			
	2,4					3,4			
C0,50PP	3,1	2,83	0,55	19,58%	A0,50PP	4,0	3,47	0,31	9,06%
	3,4					3,4			
	2,3					3,6			
	3,1					3,3			
	2,1					3,4			
						3,1			
CR	2,3	2,38	0,27	11,15%	AR	4,8	4,54	0,84	18,57%
						4,0			
						4,3			
	2,1					4,5			
	2,7					3,5			
	2,4					6,0			

Tabela B.22 – Valores do índice de tenacidade I5 para 90 dias de idade

Argamassa	I5				Argamassa	I5			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	2,6	3,00	0,50	16,79%	A0,25C	6,1	3,37	1,66	49,45%
	3,1					4,7			
	2,5					2,6			
	2,9					2,2			
	3,0					2,3			
	3,9					2,2			
C0,50C		3,36	0,06	1,78%	A0,50C	3,3	2,73	0,36	13,27%
	3,3					2,6			
	3,4					2,7			
	3,4								
						2,7			
	3,4					2,4			
C0,25PET	2,6	3,32	0,43	13,05%	A0,25PET	2,5	2,84	0,30	10,54%
	3,6					2,9			
	3,6					3,3			
	3,6								
	3,2					2,7			
						2,8			
C0,50PET	4,1	4,50	0,94	20,98%	A0,50PET	3,0	3,26	0,19	5,70%
	4,1					3,3			
	5,0					3,3			
	4,0					3,1			
	3,6					3,5			
	6,2					3,4			
C0,25PP	3,5	2,99	0,45	14,96%	A0,25PP	3,0	2,77	0,16	5,62%
	2,9					2,7			
	3,0					2,8			
						2,6			
	2,5					2,9			
C0,50PP	3,4	3,87	0,53	13,60%	A0,50PP	3,3	3,65	0,30	8,16%
	3,3					3,4			
	4,1								
	4,8					4,1			
	3,8					3,6			
	3,9					3,8			
CR	1,9	2,16	0,20	9,18%	AR	1,9	2,42	0,32	13,06%
	2,2					2,2			
	2,3					2,8			
	2,3					2,6			
	2,3					2,5			
	1,9					2,5			

Tabela B.23 – Valores do índice de tenacidade I5 para 180 dias de idade

Argamassa	I5				Argamassa	I5			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	2,9	2,72	0,72	26,35%	A0,25C	2,8	2,57	0,27	10,70%
	2,1					2,8			
	2,5					2,4			
	2,2					2,2			
	3,8								
C0,50C	2,6	3,24	0,59	18,35%	A0,50C		3,44	0,01	0,33%
	4,0					3,4			
	2,8					3,4			
	2,9					3,4			
	3,3								
	3,8								
C0,25PET	2,5	3,39	0,52	15,45%	A0,25PET	3,6	3,53	0,27	7,51%
	3,1					3,5			
	3,8					3,9			
	3,9					3,3			
	3,4					3,3			
	3,7								
C0,50PET	3,2	3,32	0,26	7,82%	A0,50PET	3,9	3,92	0,18	4,62%
						4,0			
	3,6								
	3,1					4,1			
	3,1					3,7			
	3,5								
C0,25PP	3,2	2,75	0,28	10,14%	A0,25PP	3,3	3,37	0,22	6,56%
	3,0					3,7			
	2,7					3,5			
	2,8					3,1			
	2,5					3,4			
	2,4								
C0,50PP	3,5	3,84	0,51	13,21%	A0,50PP	3,6	3,40	0,14	4,14%
	4,1					3,2			
	3,4					3,4			
	3,3								
	4,1					3,3			
	4,6								
CR	2,6	2,34	0,22	9,34%	AR	2,4	2,16	0,28	12,88%
						2,2			
	2,5					1,7			
	2,0					2,1			
	2,2					2,3			
	2,3								

Tabela B.24 – Valores do índice de tenacidade I5 para 270 dias de idade

Argamassa	I5				Argamassa	I5			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	3,2	3,41	0,28	8,33%	A0,25C	2,6	2,59	0,04	1,54%
	3,7					2,6			
	3,7					2,6			
	3,4					2,6			
	3,1					2,5			
						2,5			
C0,50C		3,31	0,19	5,67%	A0,50C	4,3	2,94	0,84	28,52%
	3,5					2,5			
	3,3					1,8			
	3,0					2,9			
	3,4					3,2			
						3,1			
C0,25PET	3,7	3,42	0,22	6,51%	A0,25PET	2,7	3,29	0,46	14,01%
	3,5					3,2			
	3,2					3,1			
	3,4					3,2			
	3,2					4,1			
						3,5			
C0,50PET	3,5	3,54	0,42	11,96%	A0,50PET	4,2	4,21	0,52	12,33%
	4,0								
	3,1					4,2			
						3,6			
						4,9			
C0,25PP	3,0	3,25	0,23	6,93%	A0,25PP	4,1	3,85	0,38	9,82%
	3,5					3,8			
	3,0					4,3			
	3,5					4,0			
	3,2					3,4			
						3,4			
C0,50PP	3,6	3,76	0,38	10,16%	A0,50PP	3,4	3,65	0,49	13,39%
	3,2					3,9			
	4,3					2,9			
	3,9					4,0			
	3,5					4,2			
	4,0					3,6			
CR		3,79	0,78	20,68%	AR	2,1	2,29	0,29	12,70%
	3,2					2,5			
	3,2								
	3,8					2,7			
	4,9					2,2			
						2,0			

Tabela B.25 – Valores do índice de tenacidade I10 para 28 dias de idade

Argamassa	I10				Argamassa	I10			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	4,8	4,11	0,70	17,09%	A0,25C	4,5	4,75	0,19	4,01%
	4,2					5,0			
	4,1					4,9			
	4,5					4,6			
						4,6			
	3,0					4,9			
C0,50C		4,31	0,77	17,86%	A0,50C	5,2	4,97	0,24	4,90%
	4,5					5,0			
						4,6			
	4,6								
	4,9								
	3,2					5,1			
C0,25PET	7,2	5,76	1,28	22,27%	A0,25PET	5,1	5,02	0,18	3,62%
	4,9					5,2			
	5,2					4,9			
	5,0					4,8			
	4,7					5,2			
	7,6								
C0,50PET	7,3	5,73	1,39	24,18%	A0,50PET		5,09	0,58	11,33%
						5,5			
	5,4					5,4			
	6,1					4,2			
						5,2			
	4,0								
C0,25PP	4,4	4,64	1,52	32,78%	A0,25PP	3,1	4,82	1,02	21,24%
						5,5			
	4,1					6,0			
	6,8					4,3			
						4,8			
	3,2					5,1			
C0,50PP	5,0	4,47	0,92	20,61%	A0,50PP	5,6	5,35	0,27	5,01%
	5,4					5,4			
	3,7					5,6			
	5,0					5,2			
	3,3					5,4			
						4,9			
CR	2,7	2,96	0,34	11,34%	AR	4,9	4,70	0,32	6,78%
						4,3			
						4,5			
	2,7					5,0			
	3,4								
	3,0								

Tabela B.26 – Valores do índice de tenacidade I10 para 90 dias de idade

Argamassa	I10				Argamassa	I10			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	3,5	4,08	0,75	18,39%	A0,25C	8,3	5,20	2,71	52,18%
	4,3					6,5			
	3,3					3,3			
	3,9					2,6			
	4,1								
	5,4								
C0,50C	5,1	5,08	0,13	2,62%	A0,50C	3,3	3,38	0,16	4,72%
	5,0								
	5,3								
						3,5			
	5,0								
C0,25PET	3,6	5,03	0,86	17,08%	A0,25PET	3,2	3,83	0,61	15,90%
	5,4					4,0			
	5,7					4,8			
	5,7								
	4,8					3,4			
						3,8			
C0,50PET	7,3	7,50	0,99	13,22%	A0,50PET	4,4	4,90	0,35	7,19%
	7,0					5,0			
	8,9					5,1			
	6,7					4,5			
						5,3			
						5,1			
C0,25PP	5,0	4,18	0,70	16,81%	A0,25PP	4,4	4,19	0,42	10,00%
	4,0								
	4,4					4,5			
						3,7			
	3,3								
C0,50PP	5,4	6,26	1,07	17,15%	A0,50PP	5,4	6,28	0,82	13,06%
	5,1					5,5			
	6,4								
	8,2					7,3			
	6,1					6,4			
	6,3					6,8			
CR		2,56	0,13	5,14%	AR	2,1	2,74	0,45	16,30%
	2,4					2,3			
	2,5					3,4			
	2,7					2,9			
	2,6					2,9			
						2,8			

Tabela B.27 – Valores do índice de tenacidade I10 para 180 dias de idade

Argamassa	I10				Argamassa	I10			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	4,1	3,75	1,12	29,82%	A0,25C	3,5	3,25	0,52	15,95%
	2,8					3,8			
	3,4					3,0			
	3,0					2,7			
	5,5								
C0,50C	3,7	5,02	1,15	22,85%	A0,50C	4,7	4,51	0,82	18,09%
	6,5					5,2			
	4,2					4,9			
	4,3					3,3			
	5,0								
	6,3								
C0,25PET	3,4	5,06	0,94	18,61%	A0,25PET	5,1	5,16	0,53	10,36%
	4,6					5,3			
	5,9					6,0			
	5,7					4,6			
	5,1					4,8			
	5,6								
C0,50PET	5,0	5,29	0,55	10,39%	A0,50PET	6,4	6,37	0,41	6,39%
						6,4			
	5,9								
	4,9					6,9			
	4,8					5,9			
	5,9								
C0,25PP	4,4	3,72	0,46	12,30%	A0,25PP		5,53	0,47	8,59%
	4,0					6,0			
	3,7					5,8			
	3,8					4,9			
	3,3					5,4			
	3,2								
C0,50PP	5,4	6,04	0,91	15,12%	A0,50PP	6,3	5,61	0,46	8,22%
	6,4					5,2			
	5,2								
	5,3					5,6			
	6,5								
	7,5					5,3			
CR	3,1	2,67	0,35	13,26%	AR		2,69	0,10	3,79%
						2,7			
	2,8								
	2,2					2,6			
	2,6					2,8			

Tabela B.28 – Valores do índice de tenacidade I10 para 270 dias de idade

Argamassa	I10				Argamassa	I10			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	4,3	4,77	0,62	13,01%	A0,25C	3,4	3,56	0,42	11,81%
	5,5					4,3			
	5,3					3,8			
	4,7					3,5			
	4,0					3,1			
						3,2			
C0,50C		5,18	0,26	5,07%	A0,50C	7,4	4,14	1,84	44,41%
	5,4					2,9			
	5,3					2,0			
	4,8					3,8			
	5,2					4,7			
						4,0			
C0,25PET	5,6	5,17	0,38	7,41%	A0,25PET	3,6	4,75	0,89	18,67%
	5,5					4,6			
	5,0					4,3			
	5,1					4,7			
	4,7					6,3			
						5,0			
C0,50PET	6,1	5,58	1,17	21,01%	A0,50PET	7,2	7,09	1,09	15,30%
	6,4								
	4,2								
						7,0			
						5,7			
						8,4			
C0,25PP	4,2	4,63	0,38	8,18%	A0,25PP	6,6	5,77	0,72	12,39%
	5,0					5,6			
	4,3					6,4			
	5,0					6,1			
	4,6					4,9			
						5,0			
C0,50PP	5,7	5,93	0,78	13,14%	A0,50PP	5,7	6,32	1,12	17,66%
	4,9					7,0			
	7,1					4,7			
	6,2					6,9			
	5,4					7,3			
	6,4								
CR		5,12	1,42	27,83%	AR	2,4	2,63	0,37	13,93%
	4,1					2,8			
	4,1								
	5,1					3,2			
	7,1					2,5			
						2,3			

Tabela B.29 – Valores do índice de tenacidade I20 para 270 dias de idade

Argamassa	I20				Argamassa	I20			
	Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação		Individuais	Média	D. Padrão	C. Variação
C0,25C	5,7	6,51	1,15	17,62%	A0,25C	4,4	4,41	0,68	15,30%
	7,9					5,5			
	7,4					4,4			
	6,5					3,8			
	5,1					4,0			
C0,50C	8,5	8,26	0,33	3,98%	A0,50C		5,57	0,85	15,26%
	8,6					4,9			
	7,9					6,5			
	8,1					5,3			
C0,25PET	8,1	7,70	0,68	8,80%	A0,25PET	6,2	6,40	0,40	6,21%
	8,5					6,0			
	7,8					6,5			
	7,4					6,9			
	6,7								
C0,50PET	10,4	8,03	3,29	41,00%	A0,50PET	11,6	12,13	1,16	9,52%
	5,7					11,3			
						13,5			
C0,25PP	5,7	6,45	0,60	9,35%	A0,25PP	10,6	9,03	1,33	14,68%
	7,1					8,8			
	6,1					10,1			
	7,1					9,7			
	6,3					7,3			
						7,8			
C0,50PP	8,7	9,21	1,26	13,69%	A0,50PP	9,8	10,71	2,33	21,74%
	7,5					7,8			
	11,0					12,5			
	9,9					12,7			
	8,4								
	9,9								
CR	4,8	6,32	2,17	34,34%	AR		4,63	2,49	53,84%
	4,8					7,5			
	6,3					3,6			
	9,4					2,8			

APÊNDICE C

**GRÁFICOS TENSÃO x DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS
DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 28 DIAS DE IDADE**

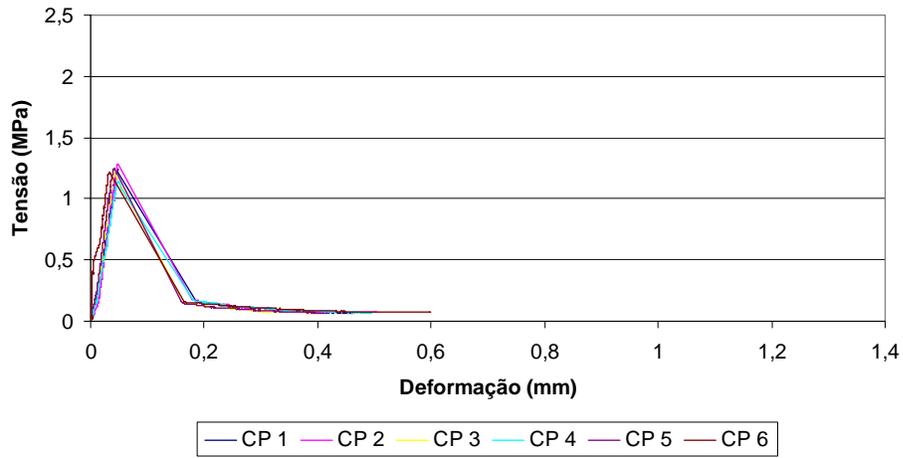


Ilustração C.1 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25C

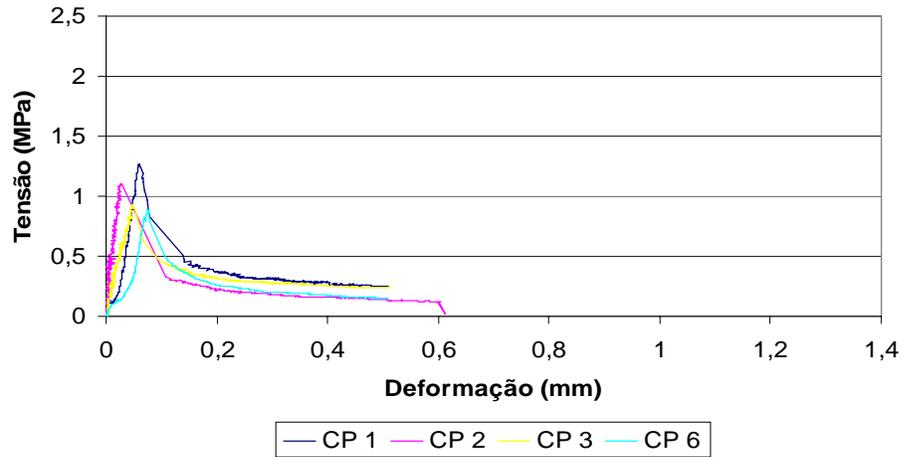


Ilustração C.2 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50C

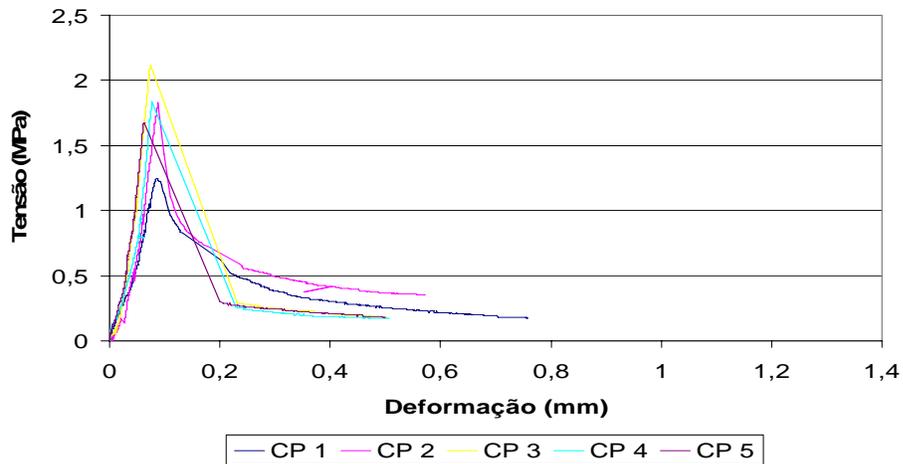


Ilustração C.3 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PET

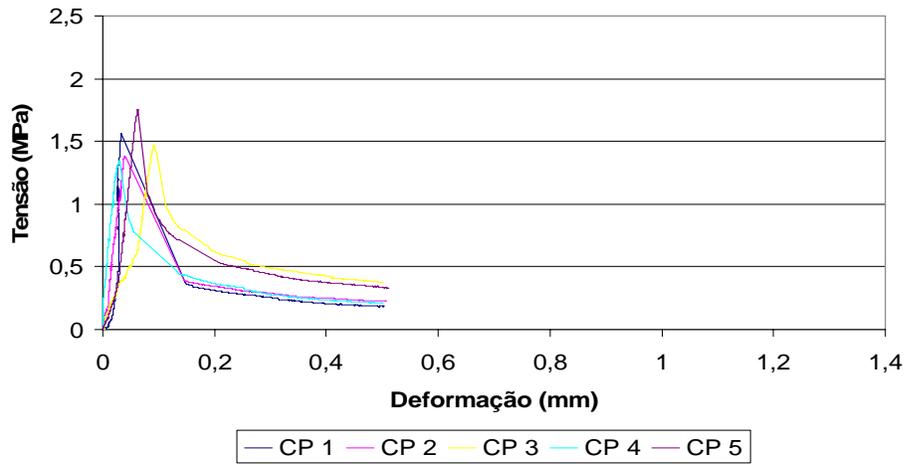


Ilustração C.4 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PET

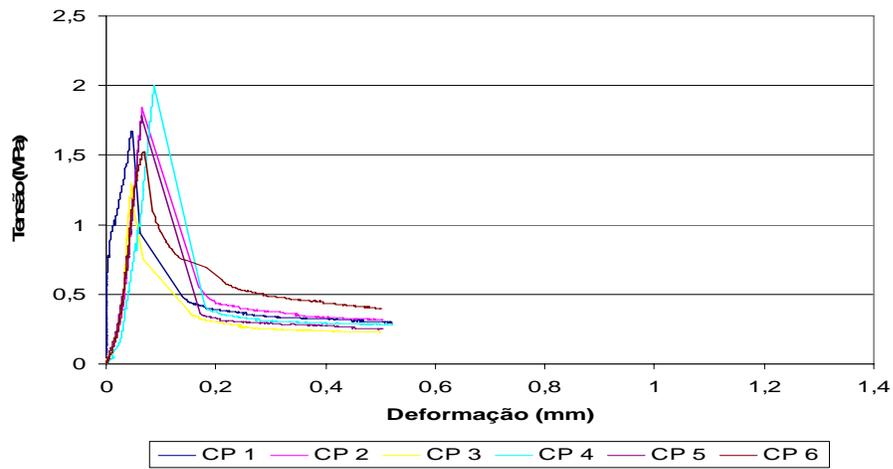


Ilustração C.5 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PP

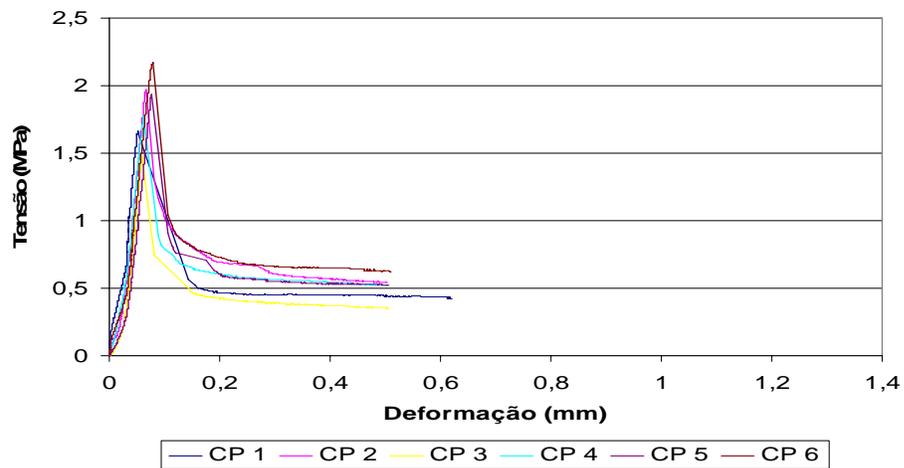


Ilustração C.6 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PP

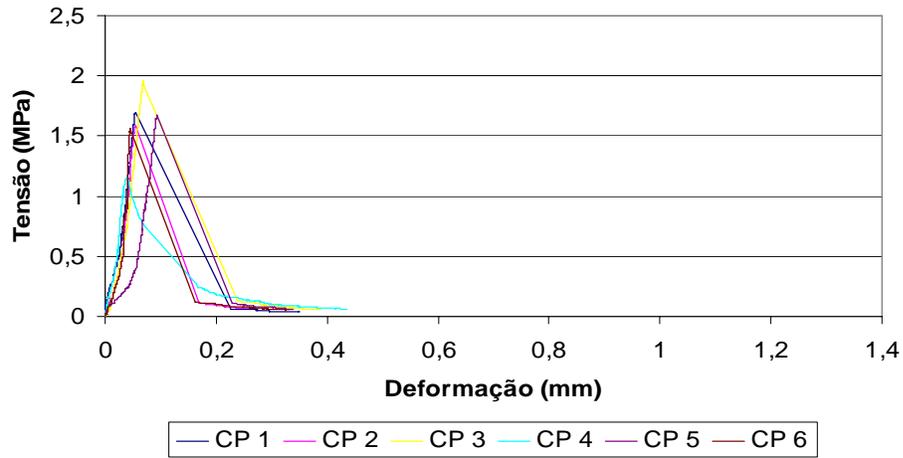


Ilustração C.7 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa AR

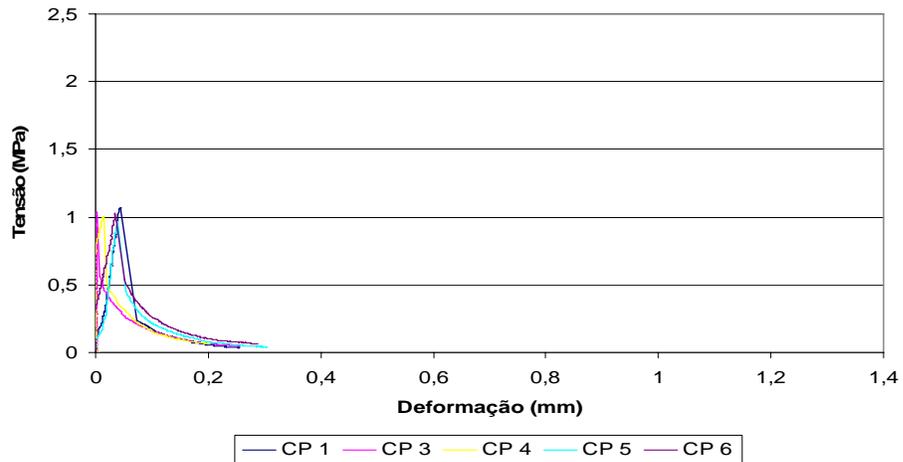


Ilustração C.8 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa CR

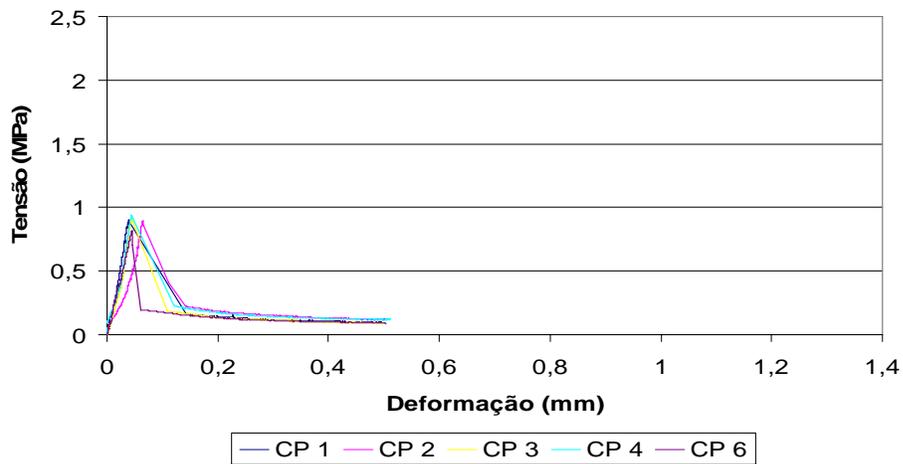


Ilustração C.9 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25C

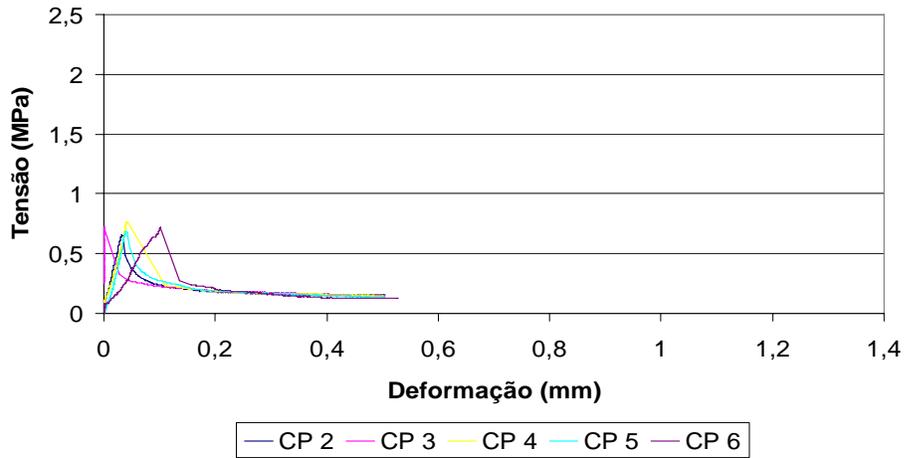


Ilustração C.10 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50C

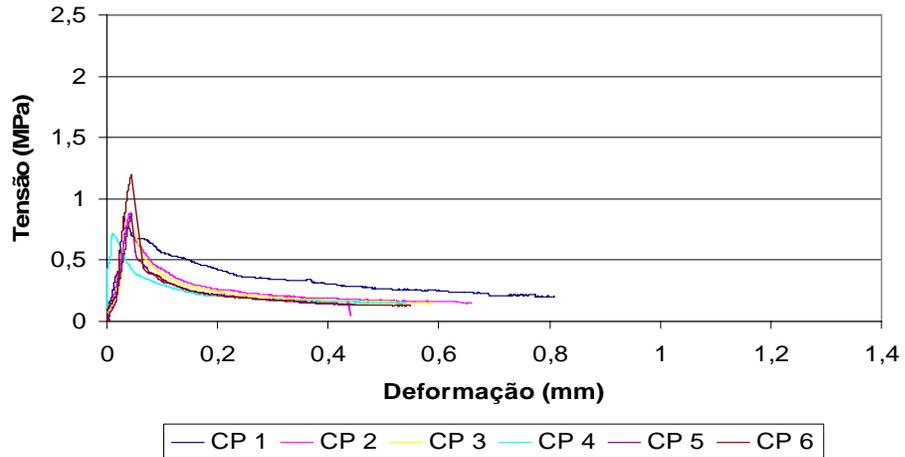


Ilustração C.11 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PET

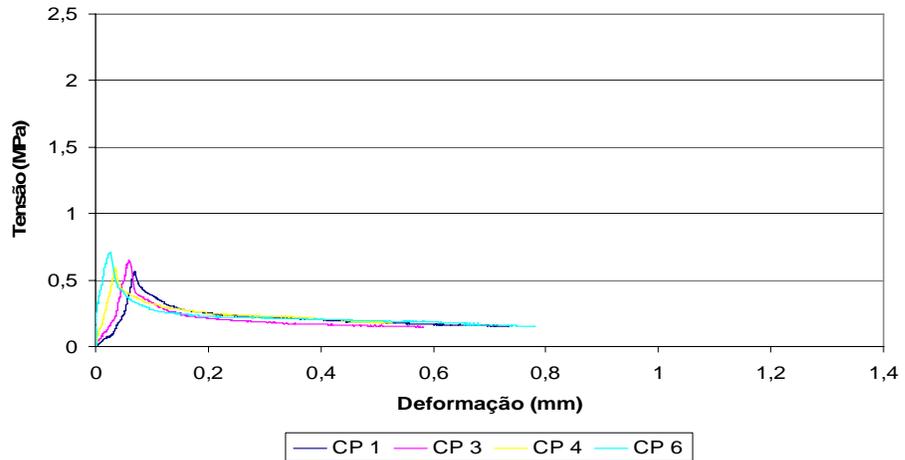


Ilustração C.12 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PET

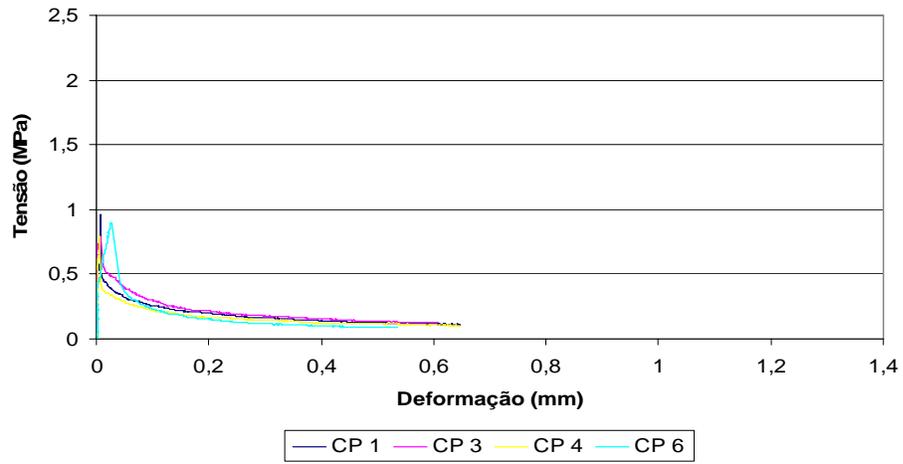


Ilustração C.13 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PP

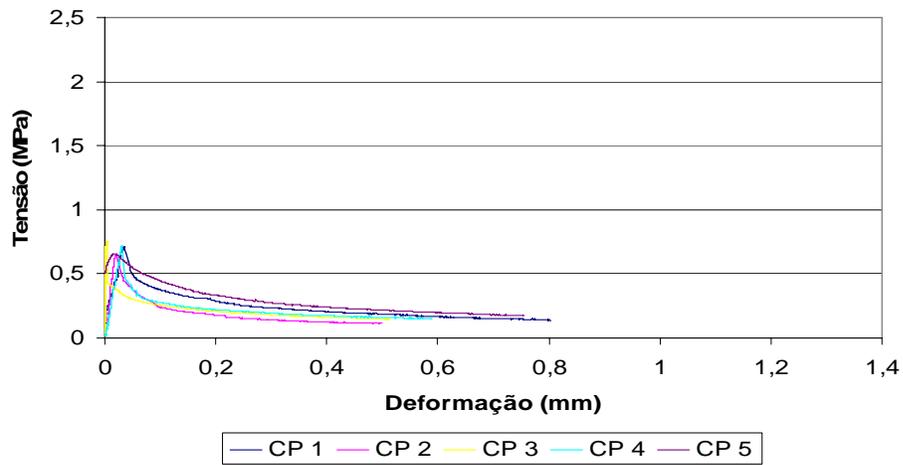


Ilustração C.14 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PP

APÊNDICE D

**GRÁFICOS TENSÃO x DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS
DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 90 DIAS DE IDADE**

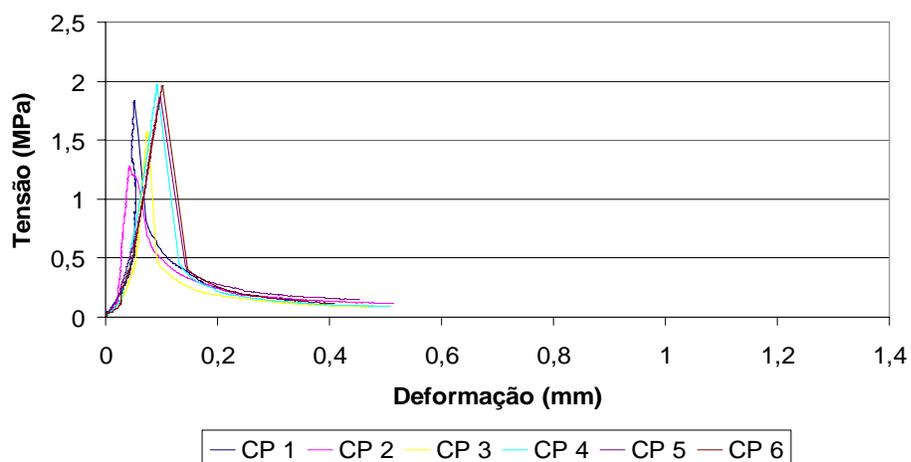


Ilustração D.1 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25C

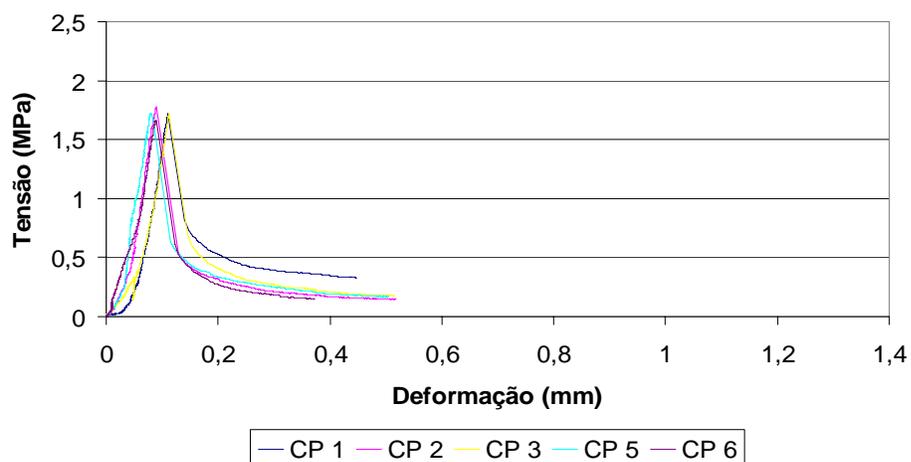


Ilustração D.2 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50C

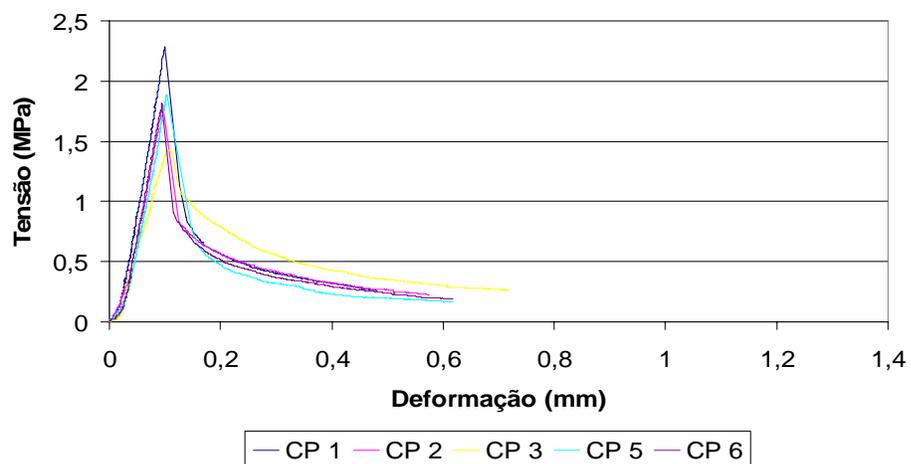


Ilustração D.3 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PET

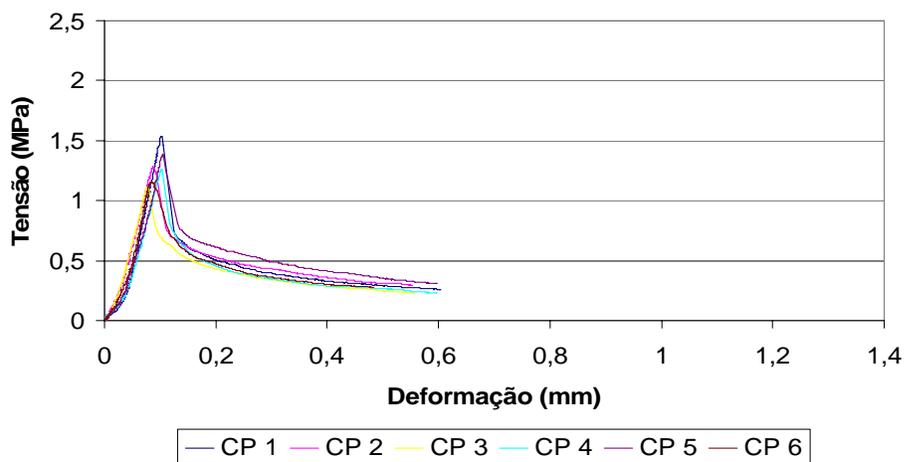


Ilustração D.4 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PET

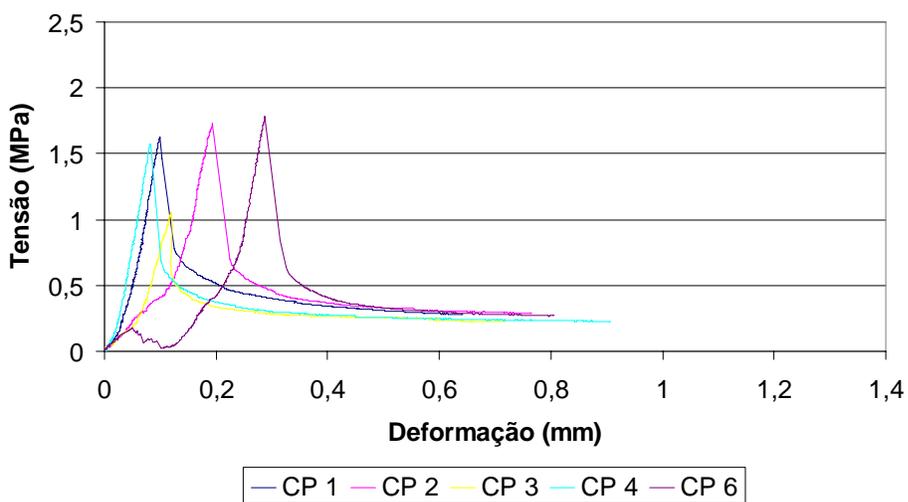


Ilustração D.5 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PP

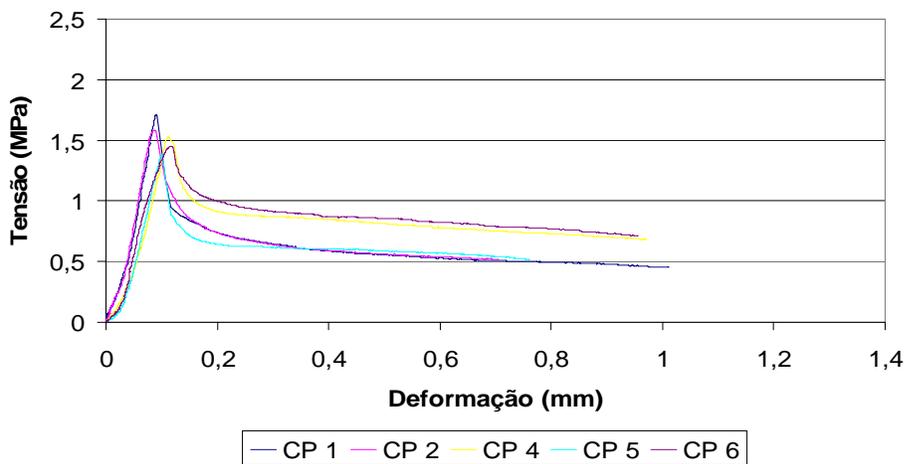


Ilustração D.6 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PP

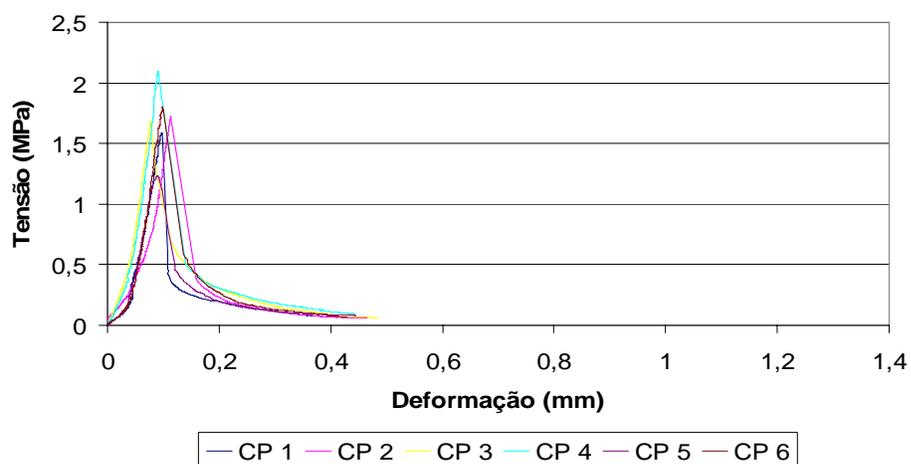


Ilustração D.7 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa AR

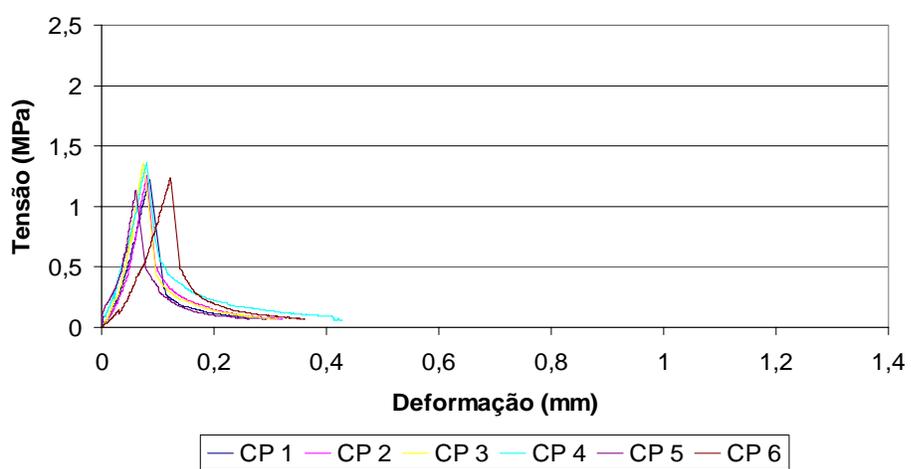


Ilustração D.8 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa CR

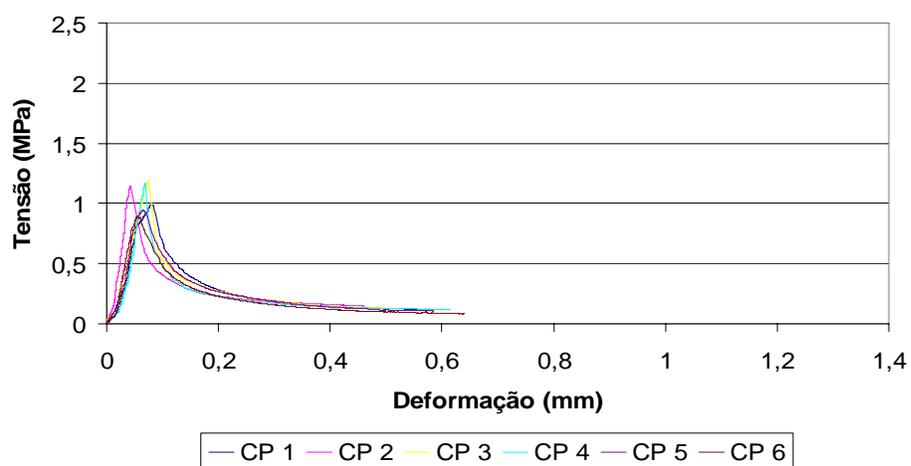


Ilustração D.9 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25C

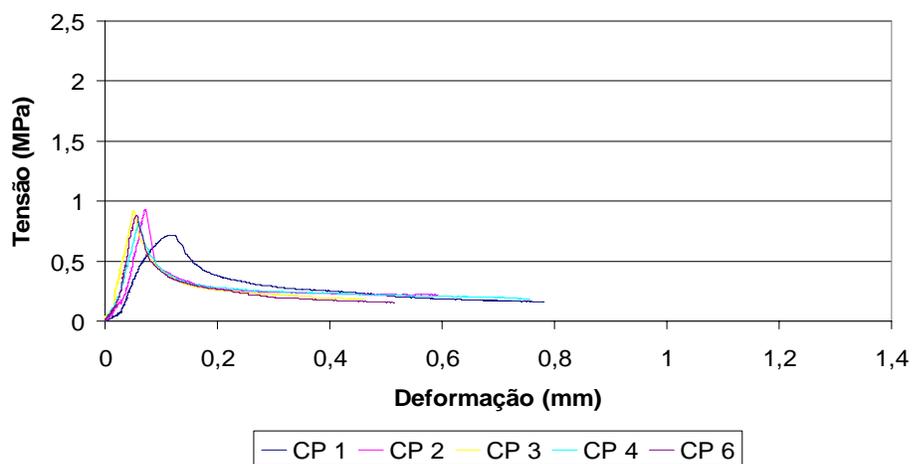


Ilustração D.10 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50C

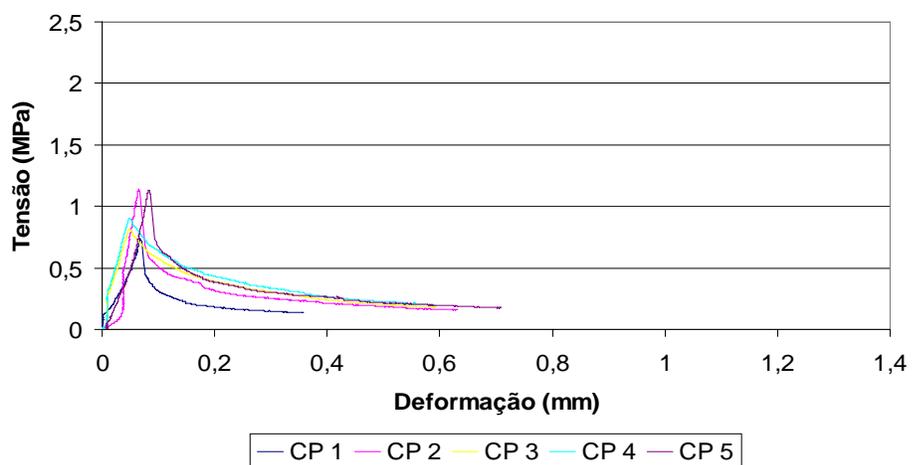


Ilustração D.11 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PET

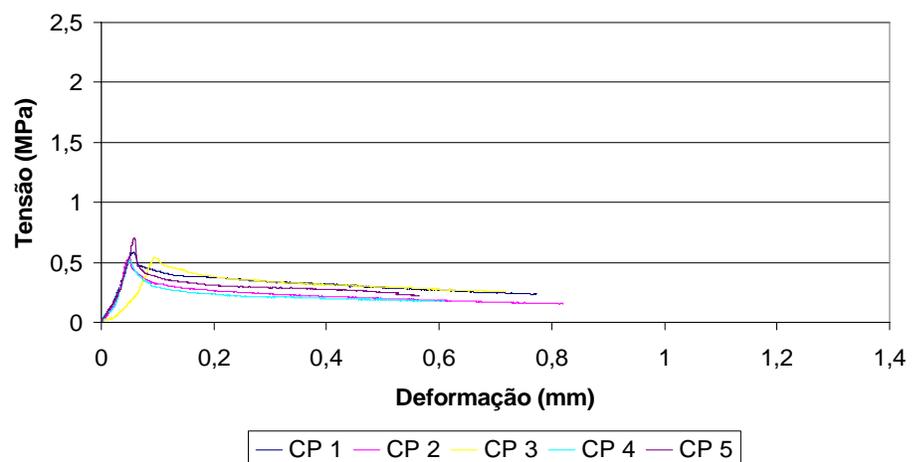


Ilustração D.12 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PET

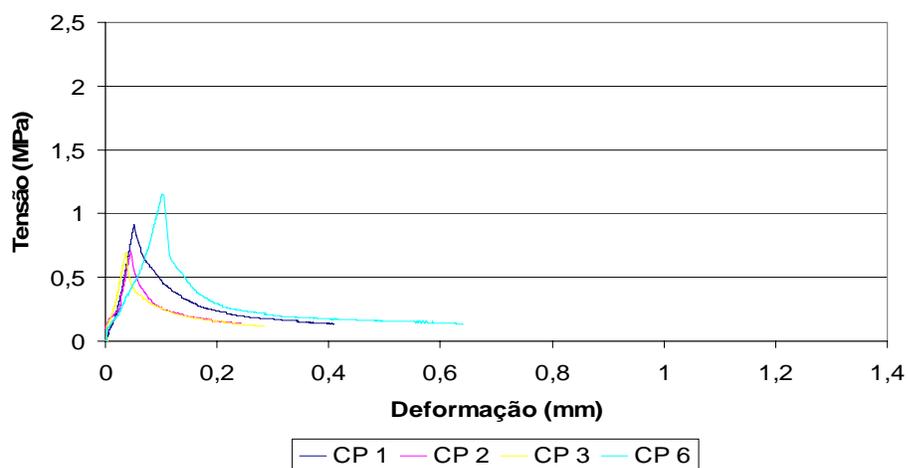


Ilustração D.13 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PP

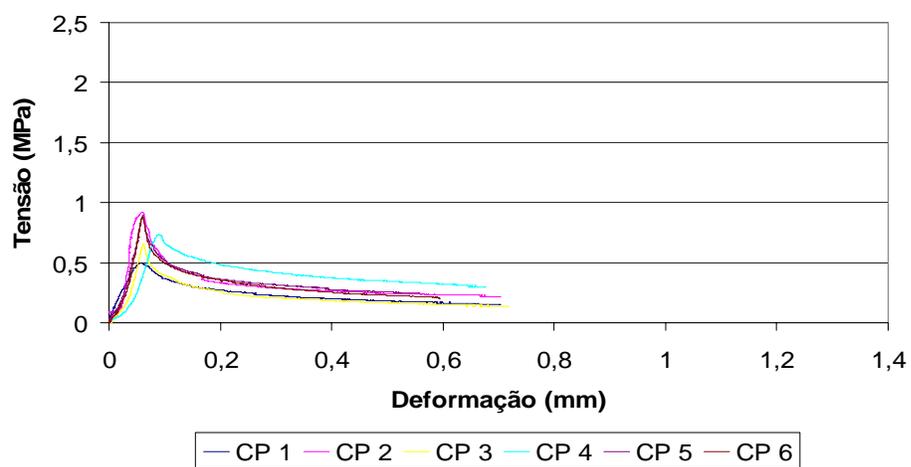


Ilustração D.14 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PP

APÊNDICE E

**GRÁFICOS TENSÃO x DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS
DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 180 DIAS DE IDADE**

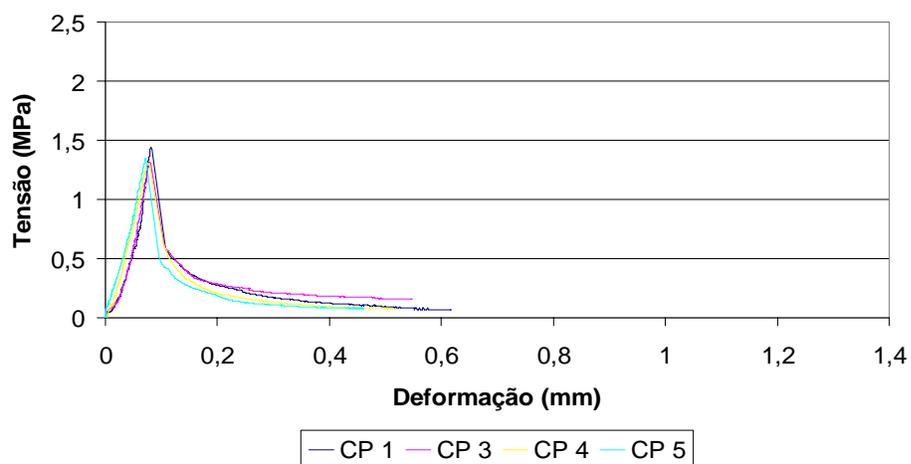


Ilustração E.1 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25C

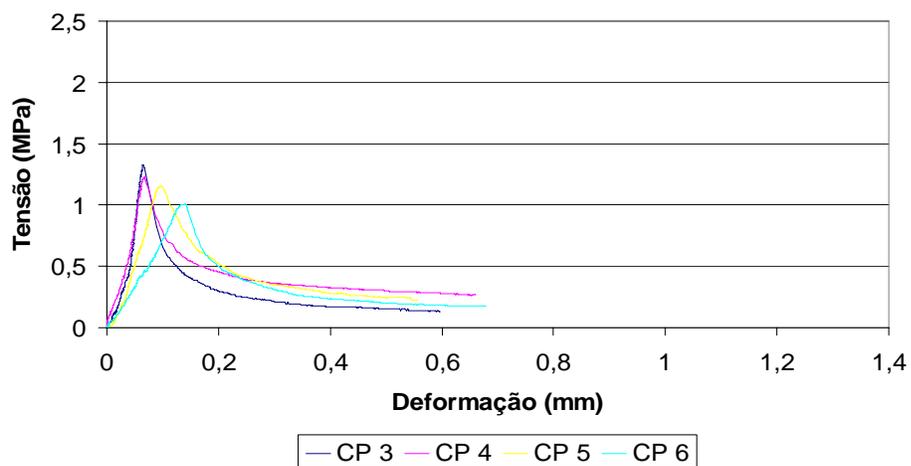


Ilustração E.2 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50C

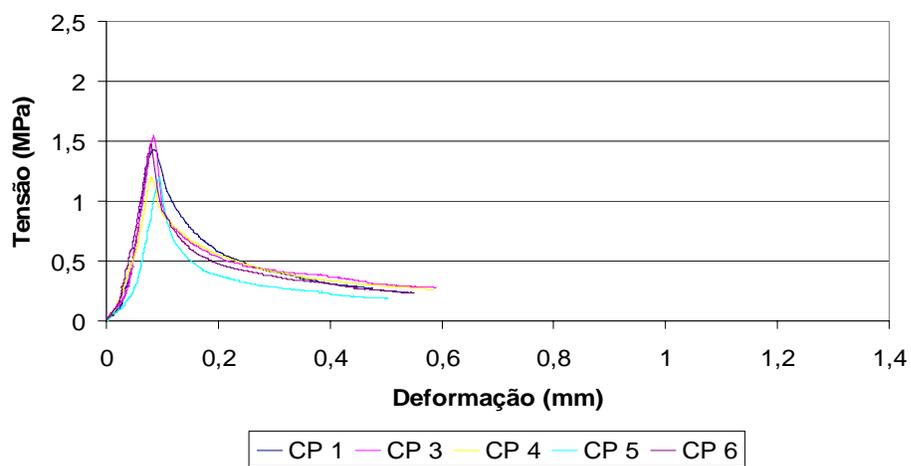


Ilustração E.3 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PET

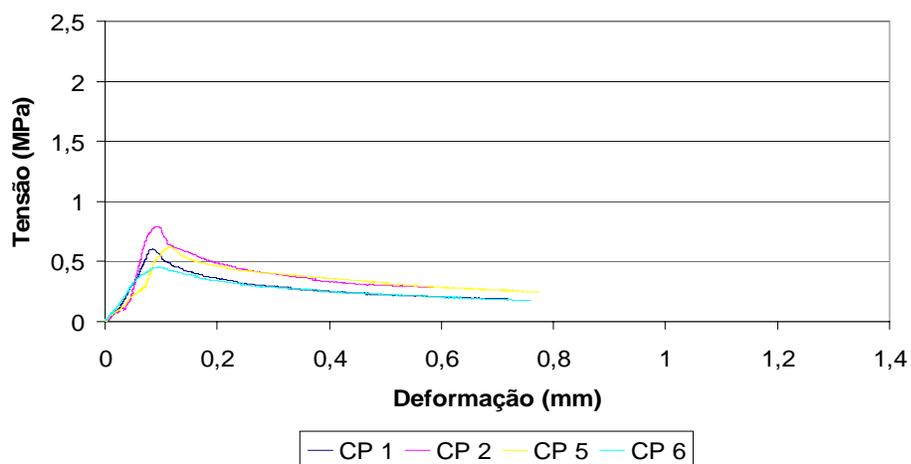


Ilustração E.4 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PET

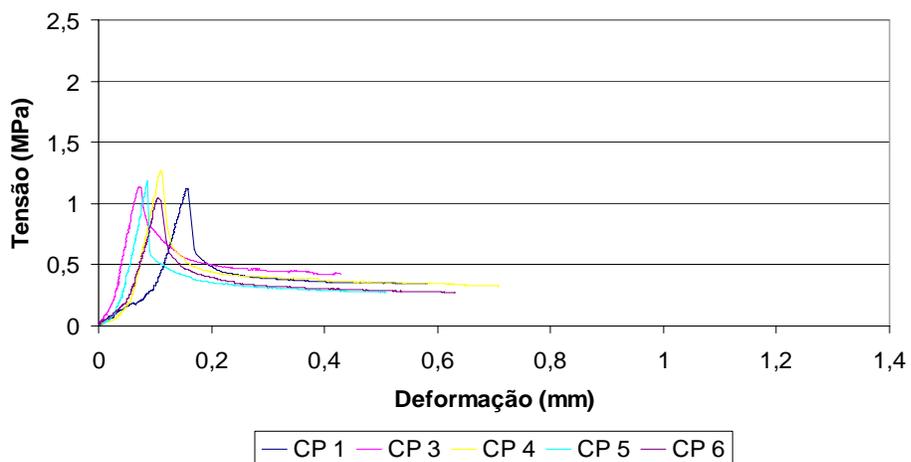


Ilustração E.5 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PP

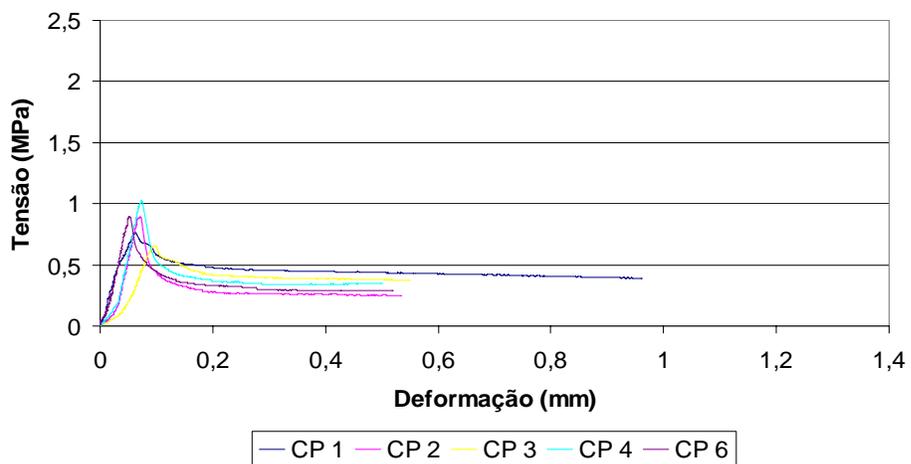


Ilustração E.6 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PP

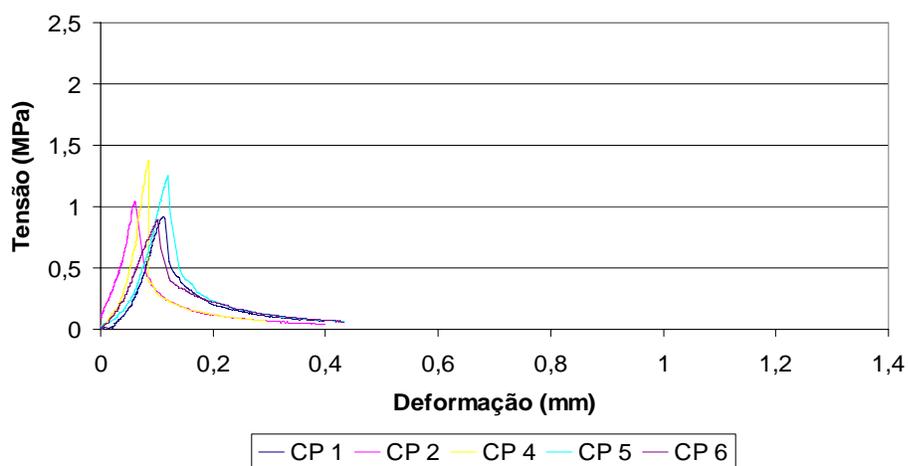


Ilustração E.7 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa AR

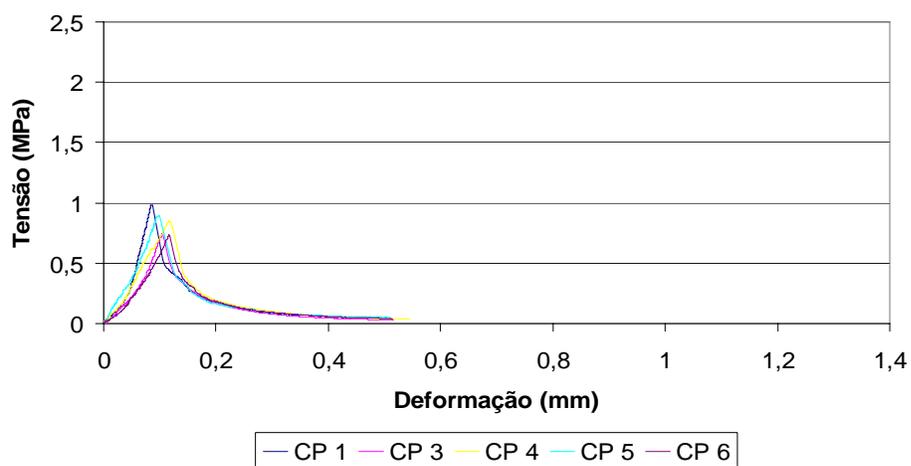


Ilustração E.8 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa CR

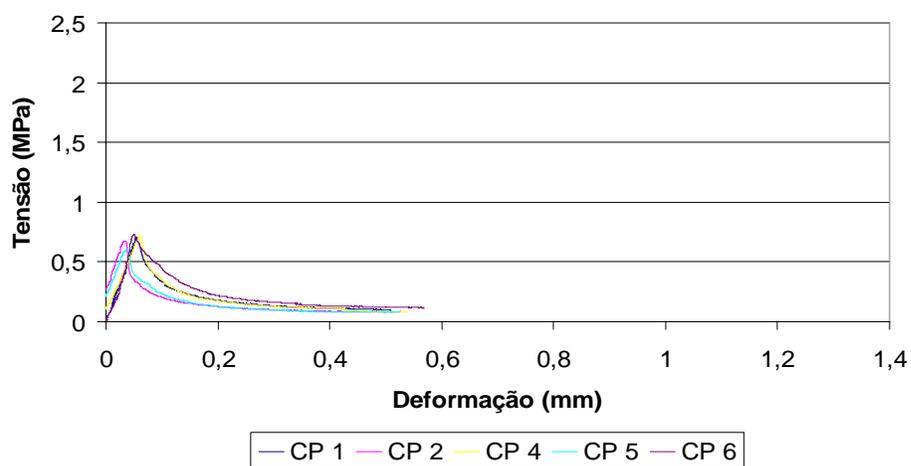


Ilustração E.9 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25C

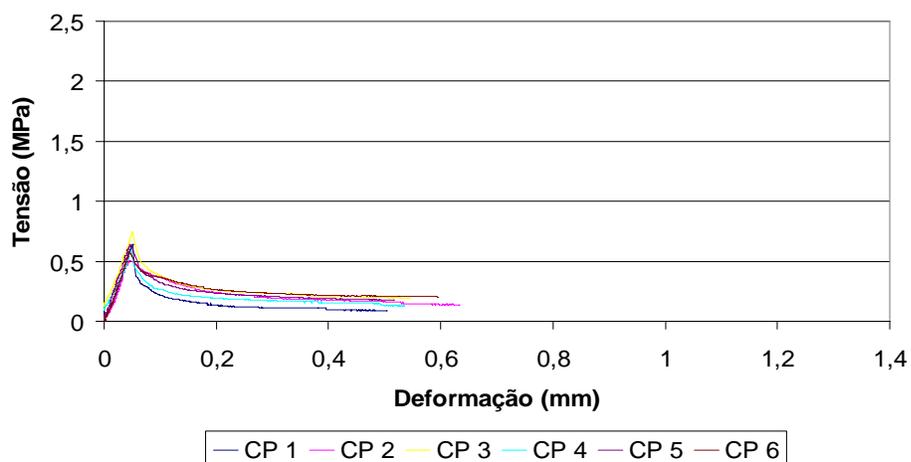


Ilustração E.10 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50C

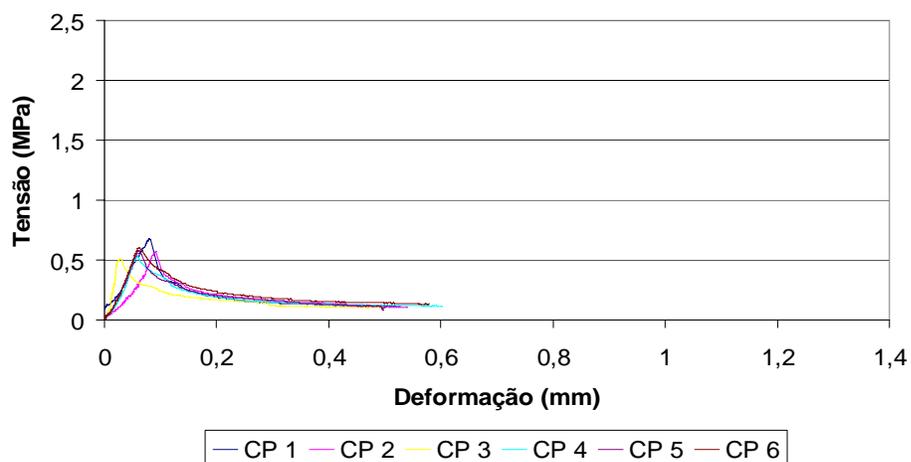


Ilustração E.11 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PET

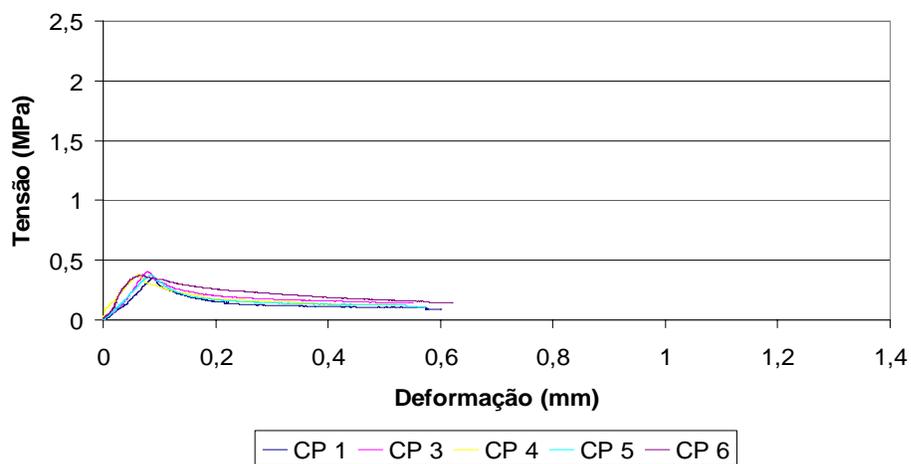


Ilustração E.12 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PET

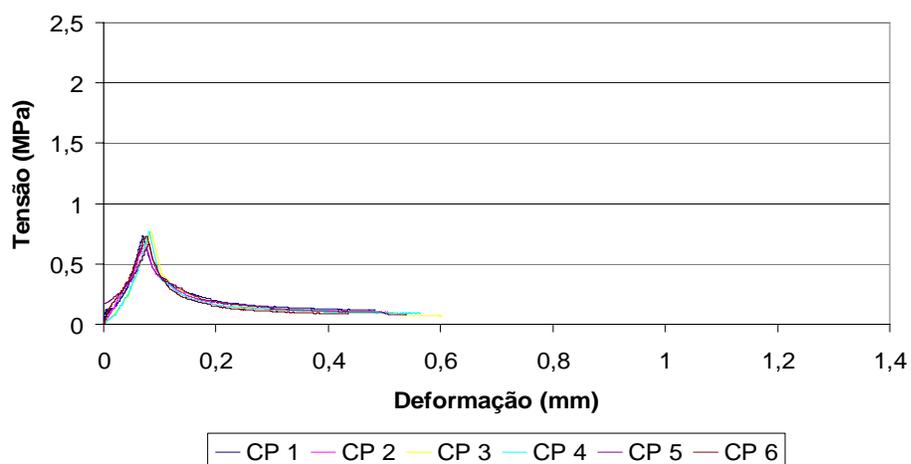


Ilustração E.13 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PP

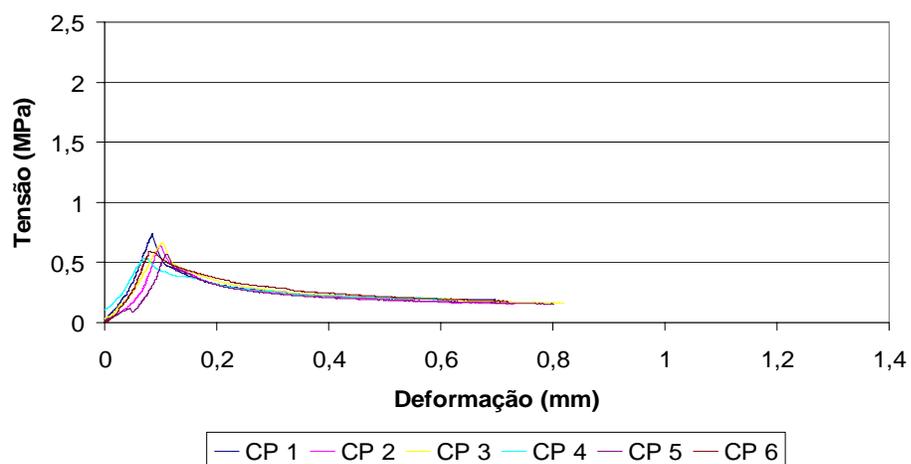


Ilustração E.14 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PP

APÊNDICE F

**GRÁFICOS TENSÃO x DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS
DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 270 DIAS DE IDADE**

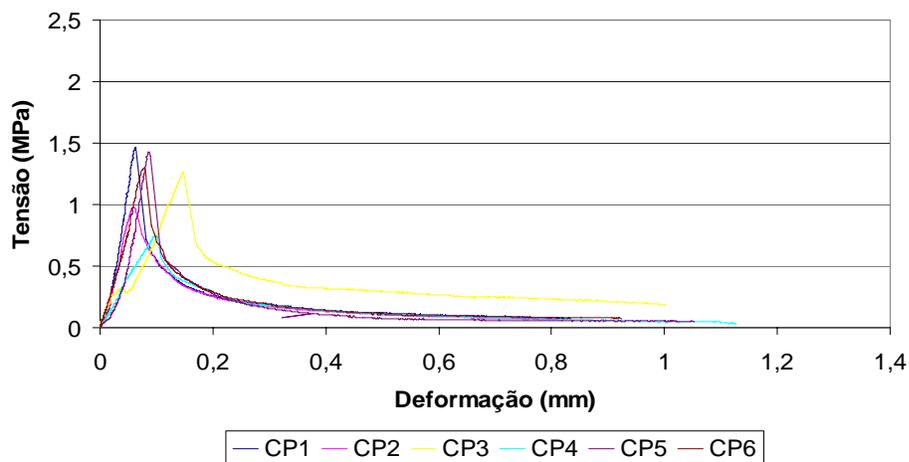


Ilustração F.1 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25C

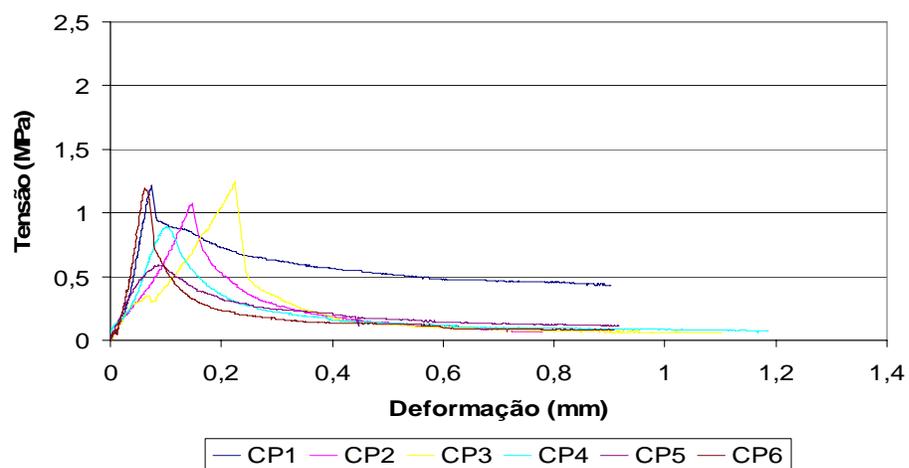


Ilustração F.2 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50C

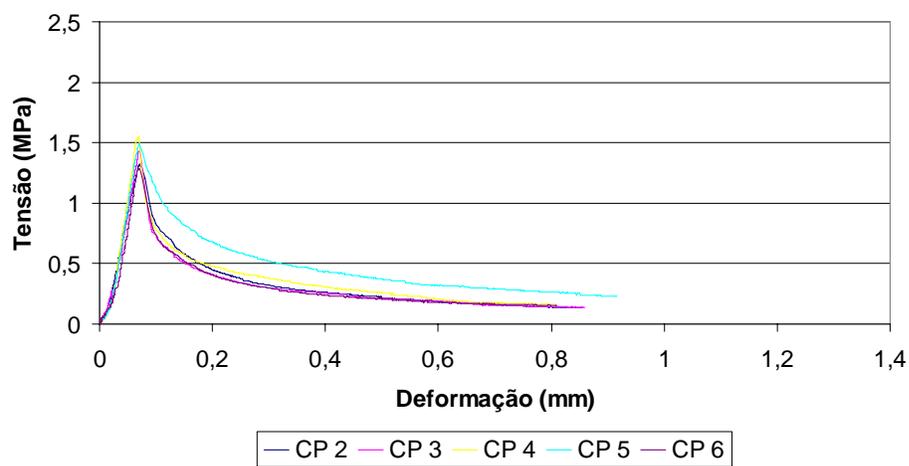


Ilustração F.3 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PET

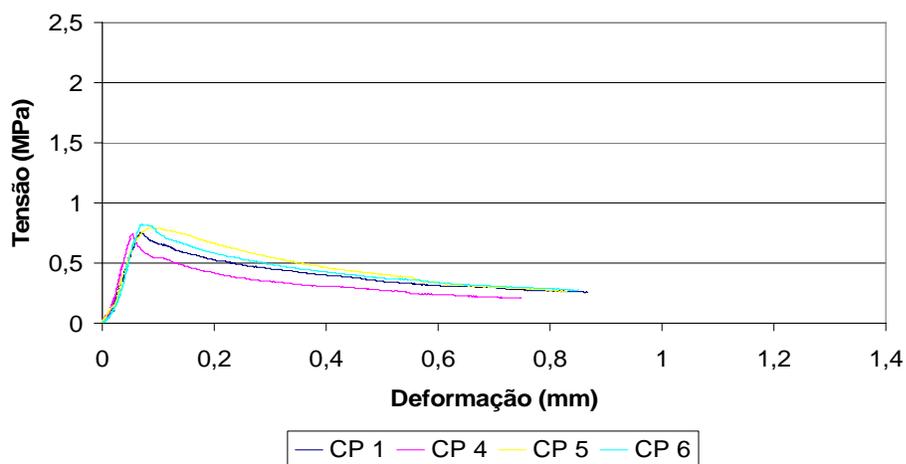


Ilustração F.4 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PET

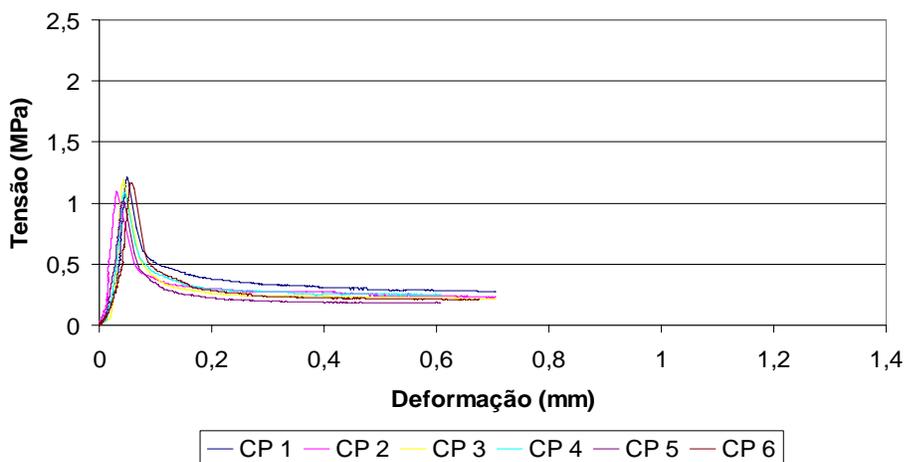


Ilustração F.5 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,25PP

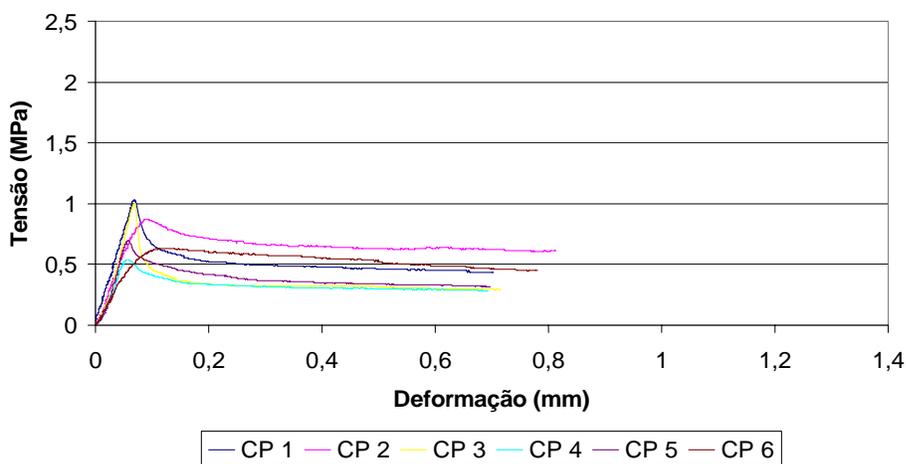


Ilustração F.6 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa A0,50PP

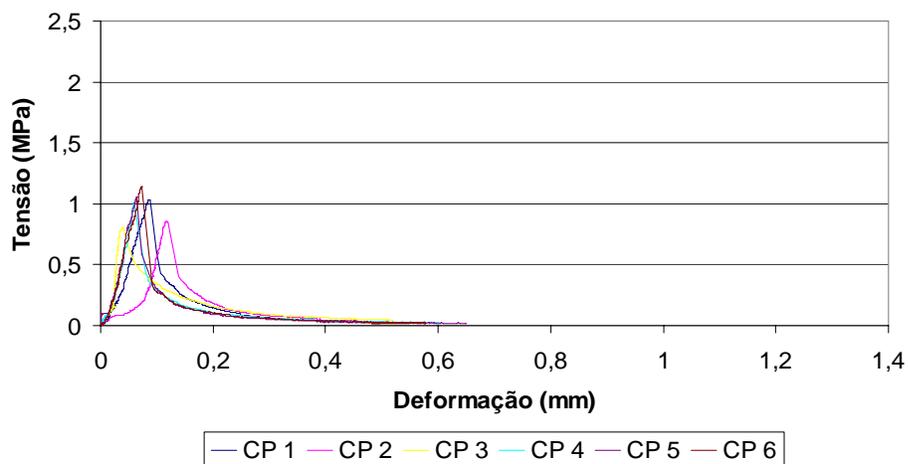


Ilustração F.7 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa AR

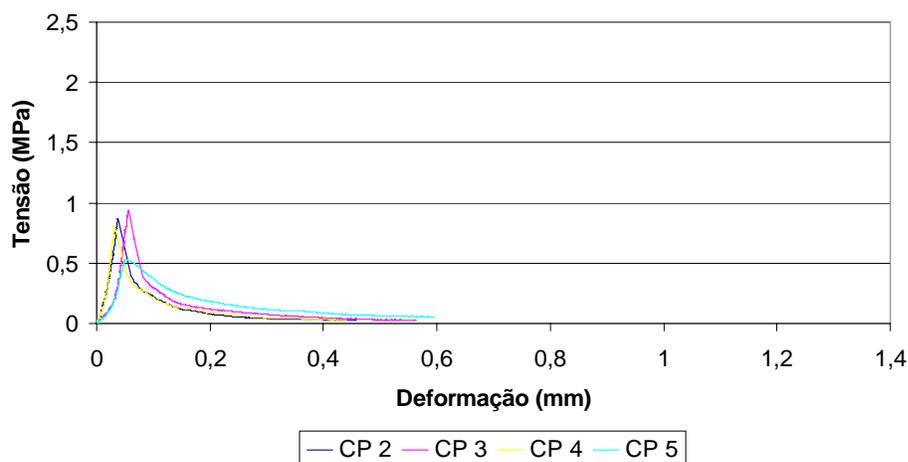


Ilustração F.8 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa CR

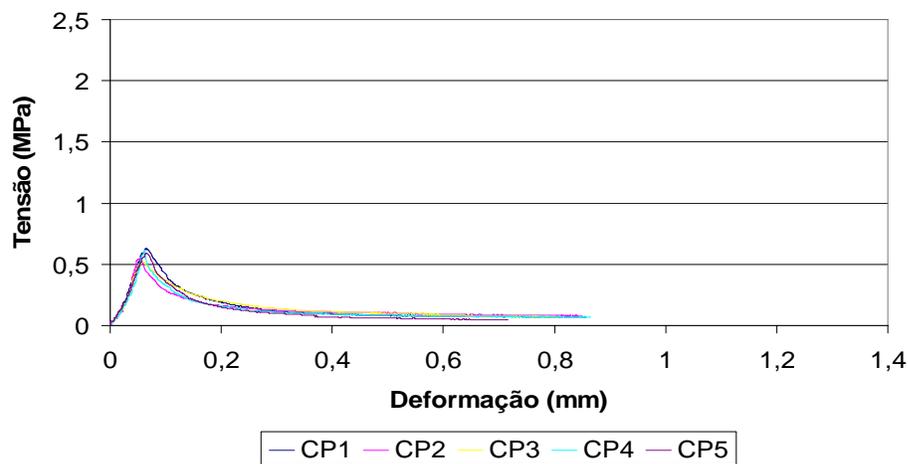


Ilustração F.9 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25C

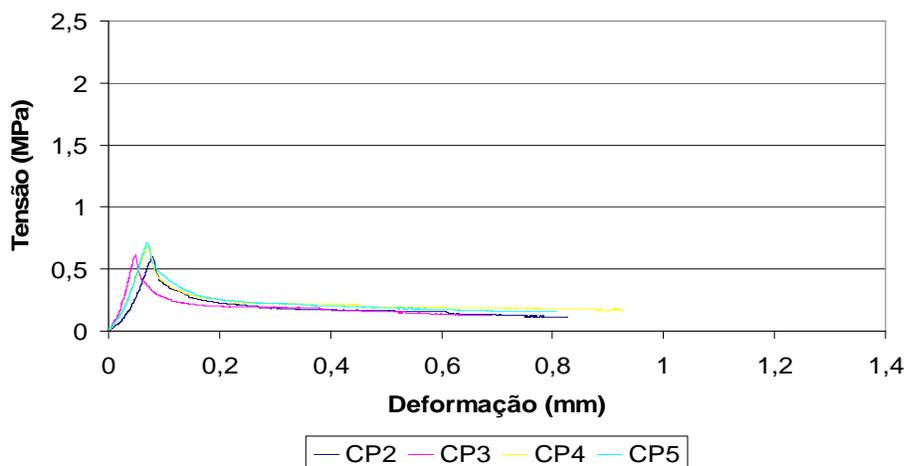


Ilustração F.10 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50C

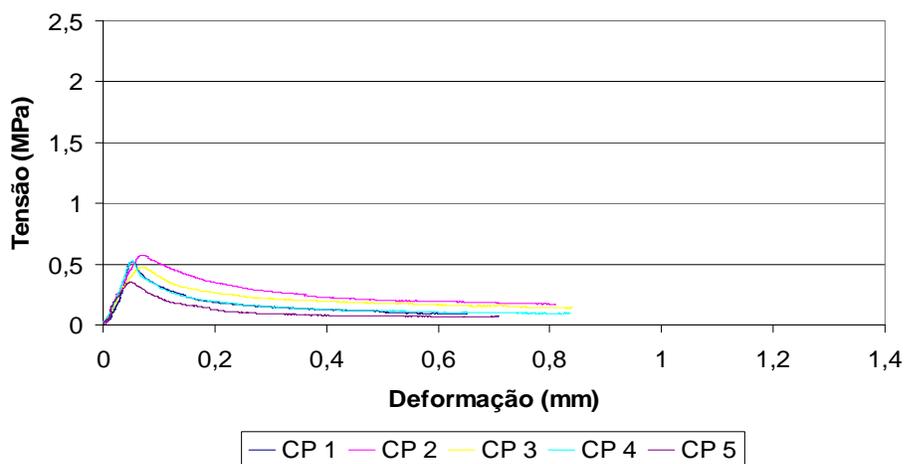


Ilustração F.11 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PET

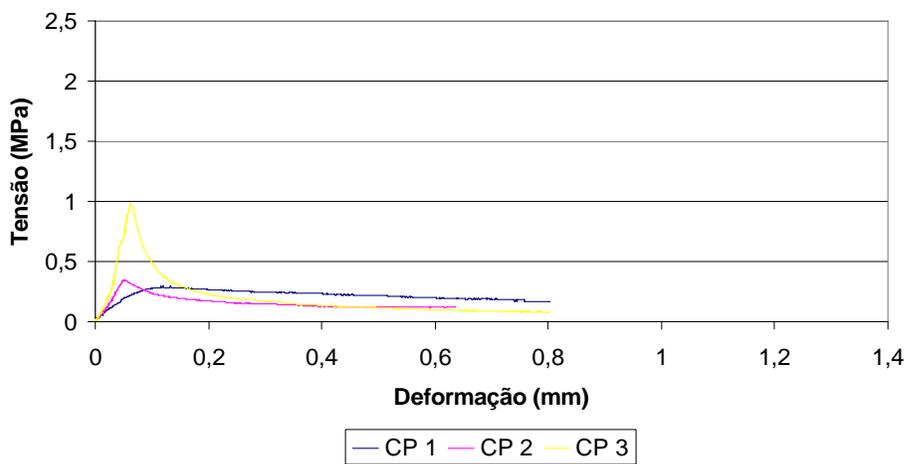


Ilustração F.12 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PET

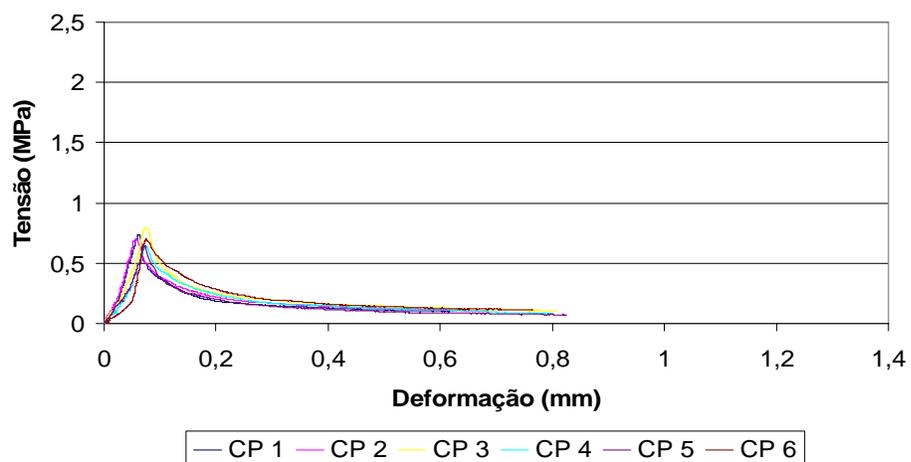


Ilustração F.13 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,25PP

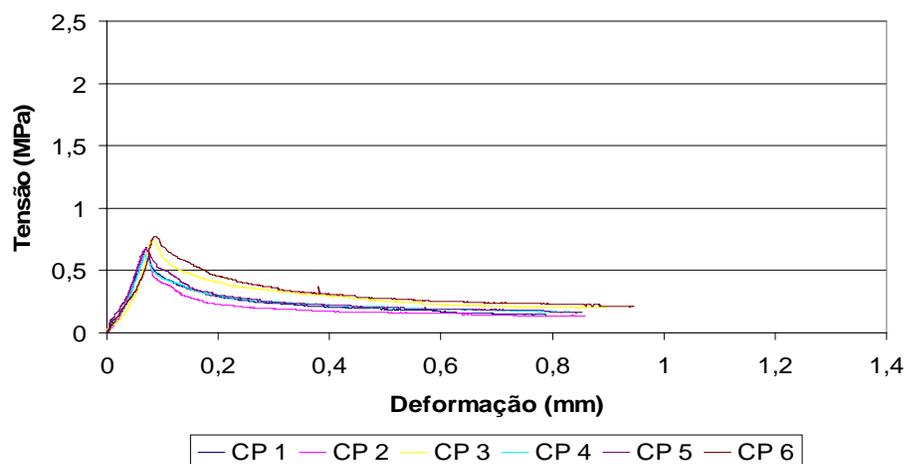


Ilustração F.14 – Gráfico tensão x deformação para a argamassa C0,50PP