

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**TESE DE DOUTORADO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS RESINAS POLIÉSTER  
ISOFTÁLICA E ORTOFTÁLICA E DO TEOR DE CINZA VOLANTE  
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE DO  
CONCRETO POLÍMERO**

**Jane Proszek Gorninski**

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Co-orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak**

**Porto Alegre**  
**2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**TESE DE DOUTORADO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS RESINAS POLIÉSTER ISOFTÁLICA E  
ORTOFTÁLICA E DO TEOR DE CINZA VOLANTE NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE DO CONCRETO  
POLÍMERO**

**Jane Proszek Gorninski**

**Tese apresentada ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Co-orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak**

**Porto Alegre**  
**2002**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador, co-orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof.<sup>ca</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

---

Prof. Claudio de Souza Kazmierczak  
Dr. pela Universidade de São Paulo  
Co-orientador

---

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**BANCA EXAMINADORA:**

Vladimir Antônio Paulon- UNICAMP  
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP

Maria Madalena de Camargo Forte – UFRGS  
Dra. Pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho - UFRGS  
Dr. pela Leeds University - Inglaterra

*"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer."*

*Albert Einstein*

*"Nas crianças reside a esperança do mundo."*

*Albert Einstein*

*Ao grande amor de minha vida, meu filho  
Caio Henrique*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>xix</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xx</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xxi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
1.1 Importância da pesquisa.....	04
1.2 Objetivos.....	06
1.3 Estrutura da pesquisa.....	07
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>09</b>
2.1 Nomenclatura e histórico.....	09
2.2 Conceituação de polímeros.....	12
2.3 Tipos de polímeros e polimerizações.....	13
2.3.1 Composição do polímero e estrutura.....	14
2.4 Características das resinas mais utilizadas na produção de concreto polímero.....	18
2.4.1 Resina epóxi.....	18
2.4.2 Resina poliéster.....	20
2.4.2.1 Fatores que afetam o tempo de utilização da resina após catalisada.....	26
2.4.2.2 Flamabilidade.....	26
2.4.2.3 Mecanismo de corrosão/ataque químico.....	27
2.5 Aspectos químicos dos materiais constituintes do sistema aglomerante.....	29
2.5.1 Monômeros.....	29
2.5.2 Inibidores.....	30
2.5.3 Iniciadores.....	31
2.5.4 Aceleradores.....	32

2.6	Características dos polímeros.....	33
2.7	Controle de qualidade das resinas, padronizações e eventos do PC.....	36
2.8	Concreto impregnado de polímero.....	41
2.8.1	Introdução.....	41
2.8.2	Métodos de produção.....	41
2.8.3	Propriedades do material.....	42
2.9	Concreto modificado por polímero ou concreto de cimento e polímero.....	42
2.9.1	Generalidades.....	42
2.10	Concreto Polímero .....	44
2.10.1	Generalidades.....	44
2.10.2	Materiais utilizados na produção de concreto polímero.....	46
2.10.3	Procedimentos para mistura e adensamento.....	50
2.11	Aplicações dos compostos de concreto polímero.....	54
2.12	Situação atual e conceituação do concreto polímero.....	57
<b>3</b>	<b>PESQUISA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>62</b>
3.1	Seleção e caracterização dos materiais.....	62
3.1.1	Materiais.....	62
3.1.1.1	Resina.....	62
3.1.1.2	Adição.....	72
3.1.1.3	Agregado.....	75
3.1.2	Mistura cinza volante e agregado miúdo.....	76
3.1.3	Sumário dos componentes da formulação.....	78
3.1.4	Dosagens utilizadas no concreto polímero.....	78
3.1.5	Mistura, moldagem e cura.....	82
3.2	Metodologia dos ensaios para o concreto endurecido.....	83
3.2.1	Resistência à compressão axial.....	83
3.2.2	Resistência à tração na flexão.....	83
3.2.3	Absorção de água.....	83
3.2.4	Ataque químico.....	84
3.2.5	Módulo de elasticidade.....	84
3.2.6	Desgaste por abrasão.....	85

<b>4 RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO ENDURECIDO.....</b>	<b>86</b>
4.1 Resistência à compressão axial e absorção de água do concreto polímero, em função da variação dos teores de resina.....	86
4.2 Propriedades mecânicas e químicas em função da variação dos teores de cinza volante.....	87
4.2.1 Ensaio de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e ataque químico.....	88
4.2.2 Módulo de elasticidade.....	94
4.2.3 Desgaste por abrasão.....	103
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO CONCRETO POLÍMERO.....</b>	<b>105</b>
5.1 Resistência à compressão axial e absorção de água em função do teor de resina.....	106
5.1.1 Análise estatística para resistência à compressão axial.....	106
5.1.2 Discussão dos resultados de resistência à compressão axial.....	108
5.1.3 Análise estatística para absorção de água.....	110
5.1.4 Discussão dos resultados do ensaio de absorção de água.....	111
5.2 Resistência à compressão axial em função do teor de cinza volante.....	111
5.2.1 Análise estatística.....	111
5.2.2 Discussão dos resultados para compressão axial.....	114
5.3 Resistência à tração na flexão em função do teor de cinza volante.....	116
5.3.1 Análise estatística.....	116
5.3.2 Discussão dos resultados de resistência à tração na flexão.....	119
5.4 Ataque químico.....	121
5.4.1 Análise estatística.....	121
5.4.2 Discussão dos resultados do ensaio de ataque químico.....	122
5.5 Módulo de elasticidade.....	142
5.5.1 Análise estatística.....	142
5.5.2 Discussão dos resultados do módulo de elasticidade.....	145
5.6 Desgaste por abrasão.....	146
5.6.1 Análise estatística.....	146

5.6.2	Discussão dos resultados do ensaio de desgaste por abrasão.....	147
5.7	Relação entre as propriedades mecânicas e a resistência à compressão.....	148
5.7.1	Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão.....	149
5.7.2	Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.....	150
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>153</b>
6.1	Resistência à compressão axial e absorção de água do concreto polímero em função do teor de resina.....	153
6.1.1	Em relação à resistência à compressão axial.....	153
6.1.2	Em relação à absorção de água.....	154
6.2	Resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, ataque químico, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão em função do teor de cinza volante.....	154
6.2.1	Em relação à resistência à compressão axial.....	154
6.2.2	Em relação à resistência à tração na flexão.....	155
6.2.3	Em relação ao ataque químico.....	155
6.2.4	Em relação ao módulo de elasticidade.....	156
6.2.5	Em relação ao desgaste por abrasão.....	156
6.3	Relação entre as propriedades.....	157
6.4	Conclusão geral.....	157
6.5	Sugestões para trabalhos posteriores.....	157
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>159</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>167</b>



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> Cadeias macromoleculares em homopolímeros e copolímeros.....	13
<b>Tabela 2.2</b> Polímeros de interesse industrial.....	17
<b>Tabela 2.3</b> Resultados obtidos utilizando-se PET reciclado.....	25
<b>Tabela 2.4</b> Características gerais de alguns sistemas poliméricos.....	34
<b>Tabela 2.5</b> Padronizações e regulamentações para os compostos de concreto polímero em países desenvolvidos.....	40
<b>Tabela 2.6</b> Principais instituições padronizadoras, as especificações e guias para os compostos de concreto polímero nos países desenvolvidos.....	40
<b>Tabela 2.7</b> Pesquisas e desenvolvimentos mais recentes em concretos e argamassas de polímero.....	49
<b>Tabela 3.1</b> Propriedades das resinas poliéster insaturadas dos tipos isoftálica e ortoftálica.....	65
<b>Tabela 3.2</b> Tempo de gelatinização, e temperatura máxima da resina poliéster isoftálica em função do teor de iniciador, e com teor de promotor fixado em 1%.....	68
<b>Tabela 3.3</b> Tempo de gelatinização, e temperatura máxima da resina poliéster ortoftálica pré-acelerada em função do teor de iniciador.....	69
<b>Tabela 3.4</b> Variação do tempo de gelatinização, temperaturara máxima atingida em função do teor de promotor para resina isoftálica.....	70
<b>Tabela 3.5</b> Resistência à compressão axial das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica.....	71
<b>Tabela 3.6</b> Resistência à tração na flexão das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica.....	71
<b>Tabela 3.7</b> Composição granulométrica da cinza volante.....	75
<b>Tabela 3.8</b> Resultados do ensaio de granulometria da areia.....	76
<b>Tabela 3.9</b> Variação da massa unitária da mistura cinza e areia em função do teor de cinza volante.....	77
<b>Tabela 3.10</b> Composição do concreto polímero utilizada na primeira parte do presente estudo.....	80
<b>Tabela 3.11</b> Composições do concreto polímero utilizadas na segunda parte do presente estudo.....	80
<b>Tabela 4.1</b> Resistência à compressão axial para as resinas isoftálica e ortoftática em função dos teores de resina.....	87
<b>Tabela 4.2</b> Absorção de água para o concreto polímero produzido com as resinas poliéster isoftálica e ortoftática.....	87

<b>Tabela 4.3</b> Resistência à compressão axial do concreto polímero de resinas poliéster, isoftálica e ortoftática, em função dos teores de cinza volante.....	88
<b>Tabela 4.4</b> Resistência à tração na flexão do concreto polímero de resinas poliéster, isoftálica e ortoftática em função dos teores de cinza volante.....	88
<b>Tabela 4.5</b> Efeito da solução de ácido acético 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.....	89
<b>Tabela 4.6</b> Efeito da solução de ácido cítrico 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.....	89
<b>Tabela 4.7</b> Efeito da solução de ácido fórmico 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.....	90
<b>Tabela 4.8</b> Efeito da solução de ácido láctico 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.....	90
<b>Tabela 4.9</b> Efeito da solução de ácido sulfúrico 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.....	91
<b>Tabela 4.10</b> Efeito da solução de refrigerante a base de cola sobre a perda de massa do concreto polímero.....	91
<b>Tabela 4.11</b> Efeito da água destilada sobre a perda de massa do concreto polímero.....	92
<b>Tabela 4.12</b> Potencial hidrogeniônico (pH) das soluções utilizadas para ataque químico.....	92
<b>Tabela 4.13</b> Resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova submetidos à agressão química.....	93
<b>Tabela 4.14</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-8A.....	95
<b>Tabela 4.15</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-8B.....	95
<b>Tabela 4.16</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-8C.....	95
<b>Tabela 4.17</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-12A.....	96
<b>Tabela 4.18</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-12B.....	96
<b>Tabela 4.19</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-12C.....	96
<b>Tabela 4.20</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-16A.....	97
<b>Tabela 4.21</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-16B.....	97
<b>Tabela 4.22</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-16C.....	97
<b>Tabela 4.23</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-20A.....	98
<b>Tabela 4.24</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova I-20B.....	98
<b>Tabela 4.25</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-8A.....	99
<b>Tabela 4.26</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-8B.....	99
<b>Tabela 4.27</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-8C.....	99

<b>Tabela 4.28</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-12A.....	100
<b>Tabela 4.29</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-12B.....	100
<b>Tabela 4.30</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-12C.....	100
<b>Tabela 4.31</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-16A.....	101
<b>Tabela 4.32</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-16B.....	101
<b>Tabela 4.33</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-16C.....	101
<b>Tabela 4.34</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-20A.....	102
<b>Tabela 4.35</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-20B.....	102
<b>Tabela 4.36</b> Deformações longitudinais obtidas para o corpo-de-prova O-20C.....	102
<b>Tabela 4.37</b> Módulo de elasticidade para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica com 8,12,16 e 20% de cinza volante.....	103
<b>Tabela 4.38</b> Resultados do ensaio de desgaste por abrasão para o concreto polímero de resinas poliéster insaturadas, isoftálica e ortoftálica, variando-se o teor de cinza volante.....	104
<b>Tabela 5.1</b> Análise de variância da resistência à compressão axial em função do teor de resina.....	106
<b>Tabela 5.2</b> Subgrupos homogêneos para resistência à compressão axial em função da variação do teor de resina.....	107
<b>Tabela 5.3</b> Análise de variância na absorção de água.....	110
<b>Tabela 5.4</b> Subgrupos homogêneos para absorção de água em função da variação do teor de resina.....	110
<b>Tabela 5.5</b> Análise de variância para resistência à compressão axial em função da variação do teor de cinza volante.....	112
<b>Tabela 5.6</b> Subgrupos homogêneos para resistência à compressão axial variando o teor de cinza.....	112
<b>Tabela 5.7</b> Análise de variância para resistência à tração na flexão em função da variação do teor de cinza volante.....	117
<b>Tabela 5.8</b> Subgrupos homogêneos para resistência à tração na flexão variando o teor de cinza.....	117
<b>Tabela 5.9</b> Análise de variância para o ensaio de ataque químico.....	121
<b>Tabela 5.10</b> Subgrupos homogêneos da resistência à tração na flexão medida para amostras que sofreram ataque químico nas diferentes soluções.....	122

<b>Tabela 5.11</b> Subgrupos homogêneos em função do teor de cinza para o ensaio de ataque químico.....	122
<b>Tabela 5.12</b> Perda de massa, em porcentagem, do concreto de cimento com adição de 9% de sílica ativa.....	123
<b>Tabela 5.13</b> Resistência à tração na flexão do concreto polímero de resina isoftálica e ortoftálica com 8 e 20% de cinza volante, após agressão química.....	124
<b>Tabela 5.14</b> Resistência à tração na flexão do concreto de cimento após agressão química.....	125
<b>Tabela 5.15</b> Resistência à tração na flexão das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica submetidas ao ataque químico.....	128
<b>Tabela 5.16</b> Análise de variância para o ensaio do módulo de elasticidade.....	142
<b>Tabela 5.17</b> Subgrupos homogêneos do módulo de elasticidade para o concreto polímero com 8, 12, 16 e 20% de cinza volante.....	142
<b>Tabela 5.18</b> Análise de variância do ensaio de desgaste por abrasão.....	146
<b>Tabela 5.19</b> Subgrupos homogêneos para o ensaio de desgaste por abrasão.....	147
<b>Tabela 5.20</b> Desgaste por abrasão em concreto de cimento do tipo CPV ARI.....	147

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Classificação e composição das de concreto polímero.....	10
<b>Figura 2.2</b> Esquema de cura de uma resina poliéster.....	23
<b>Figura 2.3</b> Resinas mais utilizadas em concreto polímero e suas classificações.....	28
<b>Figura 2.4</b> Misturador contínuo equipado para 02 tipos de fíler, resina, iniciador, acelerador e exaustor para os vapores de estireno.....	54
<b>Figura 2.5</b> Misturador para pulverização de argamassa polimérica equipada para 02 tipos de fíler e dois tipos de aglomerante.....	54
<b>Figura 3.1</b> Ácido ftálico(resina ortoftálica) e ácido isoftálico(resina isoftálica).....	63
<b>Figura 3.2</b> Configuração da resina poliéster insaturada ortoftálica.....	64
<b>Figura 3.3</b> Configuração da resina poliéster insaturada isoftálica.....	64
<b>Figura 3.4</b> Variação do tempo de gelatinização em função do teor de catalisador para resina poliéster isoftálica.....	68
<b>Figura 3.5</b> Variação do tempo de gelatinização em função do teor de iniciador para resina poliéster ortoftálica.....	69
<b>Figura 3.6</b> Efeito do teor de promotor sobre o tempo de gelatinização para resina poliéster isoftálica.....	70
<b>Figura 3.7</b> Resina isoftálica com aumento de 2000 vezes.....	73
<b>Figura 3.8</b> Resina ortoftálica com aumento de 2000 vezes.....	73
<b>Figura 3.9</b> Resina isoftálica + microssílica com aumento de 1200 vezes.....	73
<b>Figura 3.10</b> Resina ortoftálica + cinza de casca de arroz com aumento de 2000 vezes.....	73
<b>Figura 3.11</b> Resina isoftálica + cinza volante com aumento de 2000 vezes.....	73
<b>Figura 3.12</b> Resina ortoftálica + cinza volante com aumento de 2000 vezes.....	73
<b>Figura 3.13</b> Resina isoftálica + calcário com aumento de 2000 vezes.....	73
<b>Figura 3.14</b> Curva granulométrica da cinza volante.....	75
<b>Figura 3.15</b> Fluxograma das dosagens e ensaios do concreto polímero.....	81
<b>Figura 4.1</b> Resistência à tração na flexão após agressão química no concreto de resina poliéster isoftálica.....	93
<b>Figura 4.2</b> Resistência à tração na flexão após agressão química no concreto de resina poliéster ortoftálica.....	94
<b>Figura 4.3</b> Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova I-8 (A,B e C).....	95
<b>Figura 4.4</b> Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova I-12 (A,B e C).....	96

<b>Figura 4.5</b>	Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova I-16 (A,B e C).....	97
<b>Figura 4.6</b>	Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova I-20 (A e B).....	98
<b>Figura 4.7</b>	Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova O-8 (A,B e C).....	99
<b>Figura 4.8</b>	Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova O-12 (A,B e C).....	100
<b>Figura 4.9</b>	Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova O-16 (A,B e C).....	101
<b>Figura 4.10</b>	Diagrama tensão deformação referente aos corpos-de-prova O-20 (A,B e C).....	102
<b>Figura 4.11</b>	Corpo-de-prova submetido ao desgaste por abrasão.....	103
<b>Figura 5.1</b>	Efeito do tipo e teor de resina sobre a resistência à compressão axial.....	107
<b>Figura 5.2</b>	Resistência à compressão observada e modelo de regressão para o concreto polímero em função do teor de resina.....	108
<b>Figura 5.3</b>	Efeito do tipo de resina e do teor de cinza sobre a resistência à compressão axial....	112
<b>Figura 5.4</b>	Resistência à compressão observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.....	113
<b>Figura 5.5</b>	Resistência à compressão observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.....	114
<b>Figura 5.6</b>	Efeito do tipo de resina e do teor de cinza sobre a resistência à tração na flexão.....	117
<b>Figura 5.7</b>	Resistência à tração na flexão observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.....	118
<b>Figura 5.8</b>	Resistência à tração na flexão observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.....	118
<b>Figura 5.9</b>	Corpos-de-prova durante o ataque químico.....	123
<b>Figura 5.10</b>	Corpos-de-prova de concreto polímero de resina isoftálica submetidos ao ataque de ácido fórmico, após rompimento.....	123
<b>Figura 5.11 a,b,c</b>	Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica (padrão) com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	129
<b>Figura 5.11 d,e,f</b>	Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica (padrão) com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	129
<b>Figura 5.12 a,b,c</b>	Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica (padrão) com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	130
<b>Figura 5.12 d,e,f</b>	Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica (padrão) com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	130

- Figura 5.13 a,b,c** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de ácido acético com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....131
- Figura 5.13 d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de ácido acético com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....131
- Figura 5.14 a,b,c** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de ácido acético com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....132
- Figura 5.14 d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de ácido acético com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....132
- Figura 5.15 a,b,c** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de ácido sulfúrico com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....133
- Figura 5.15 d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de ácido sulfúrico com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....133
- Figura 5.16 a,b,c** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de ácido sulfúrico com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....134
- Figura 5.16 d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de ácido sulfúrico com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....134
- Figura 5.17 a,b,c** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de refrigerante a base de cola com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....135
- Figura 5.17 d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de refrigerante a base de cola com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....135
- Figura 5.18 a,b,c** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de refrigerante a base de cola com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....136
- Figura 5.18 d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de refrigerante a base de cola com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....136

<b>Figura 5.19 a,b,c</b> Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de água destilada com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	137
<b>Figura 5.19 d,e,f</b> Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de água destilada com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	137
<b>Figura 5.20 a,b,c</b> Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de água destilada com 8% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	138
<b>Figura 5.20 d,e,f</b> Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de água destilada com 20% de cinza volante e magnitude de 100, 450 e 900.....	138
<b>Figura 5.21</b> Resistência à flexão após ataque químico em ácido acético para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	139
<b>Figura 5.22</b> Resistência à flexão após ataque químico em ácido cítrico para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	139
<b>Figura 5.23</b> Resistência à flexão após ataque químico em ácido fórmico para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	139
<b>Figura 5.24</b> Resistência à flexão após ataque químico em ácido sulfúrico para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	139
<b>Figura 5.25</b> Resistência à flexão após ataque químico em refrigerante a base de cola para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	140
<b>Figura 5.26</b> Resistência à flexão após ataque químico em água destilada para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	140
<b>Figura 5.27</b> Resistência à flexão após ataque químico em ácido láctico para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	140
<b>Figura 5.28</b> Módulo de elasticidade para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.....	143
<b>Figura 5.29</b> Módulo de elasticidade observado e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.....	144
<b>Figura 5.30</b> Módulo de elasticidade observado e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.....	144
<b>Figura 5.31</b> Relação da resistência à tração na flexão com a resistência à compressão para o concreto polímero de resina isoftálica.....	149



**Figura 5.32** Relação da resistência à tração na flexão com a resistência à compressão para o concreto polímero de resina ortoftálica.....150

**Figura 5.33** Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina isoftálica.....151

**Figura 5.34** Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina ortoftálica.....152

**LISTA DE EQUAÇÕES**

<b>Equação 1</b> Resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster, dos tipos isoftálica e ortoftálica, em função do teor de resina.....	107
<b>Equação 2</b> Resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza.....	113
<b>Equação 3</b> Resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica em função de teor de cinza.....	114
<b>Equação 4</b> Resistência à tração na flexão do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza.....	118
<b>Equação 5</b> Resistência à tração na flexão do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica em função de teor de cinza.....	118
<b>Equação 6</b> Módulo de elasticidade do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza.....	143
<b>Equação 7</b> Módulo de elasticidade do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica em função de teor de cinza.....	144
<b>Equação 8</b> Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.....	149
<b>Equação 9</b> Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.....	150
<b>Equação 10</b> Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza.....	151

# **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS RESINAS POLIÉSTER ISOFTÁLICA E ORTOFTÁLICA E DO TEOR DE CINZA VOLANTE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE DO CONCRETO POLÍMERO**

**Jane Proszek Gorninski**

## **RESUMO**

Os compostos de concreto polímero vem se tornando, em países desenvolvidos, uma boa opção para a construção civil, especialmente onde se necessita resistência elevada, cura rápida e boa durabilidade. Grande parte destes compostos são produzidos com as resinas epóxi e poliéster, em especial, a isoftálica. No Brasil, entretanto, não se tem conhecimento da aplicação e nem mesmo de grupos de pesquisa e desenvolvimento sistematizados, atuando na área, possivelmente devido ao desconhecimento das propriedades, da metodologia de produção e do alto custo do concreto polímero.

Diante deste panorama, o presente trabalho tem como objetivo produzir e analisar composições de concreto polímero de custos reduzidos, utilizando como aglomerante a resina poliéster ortoftálica, em função de seu custo, e a resina poliéster isoftálica, que tem sido tradicionalmente utilizada.

Inicialmente foram determinadas a resistência à compressão axial e absorção de água em composições de concreto polímero, com variados teores de resina, visando a escolha de um teor de aglomerante mínimo. Na segunda parte do programa experimental foi analisada a influência do teor de cinza volante (fíler) e do tipo de resina na resistência à compressão axial, na resistência à tração na flexão, no comportamento frente ao ataque químico, no módulo de elasticidade e no desgaste por abrasão. A microestrutura das amostras que sofreram ataque químico foi analisada em microscópio eletrônico de varredura.

Os resultados mostraram que os concretos polímeros de resina poliéster isoftálica e ortoftálica exibiram bom comportamento mecânico e químico. A cinza volante contribui tanto no aspecto mecânico, quanto no químico.

Constatou-se que a resina ortoftálica, quando utilizada simultaneamente com areia e cinza volante, exibe comportamento semelhante à resina isoftálica no concreto polímero, apesar das propriedades da resina poliéster ortoftálica serem inferiores as da isoftálica.

# **A STUDY OF THE EFFECT OF THE CONCENTRATION OF ISOPHTHALIC AND ORTHOPHTHALIC POLYESTER RESINS AND FLY ASH ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF POLYMER CONCRETE**

**Jane Proszek Gorninski**

## **ABSTRACT**

Polymer concrete has become a material of important choice for the civil construction sector in developed countries, particularly in applications requiring high strength, fast curing and superior durability. Many of these materials are produced using epoxy and polyester resins, particularly in their isophthalic form. In Brazil, however, polymer concrete is virtually unknown, and no applications or proper research and development groups working in this field are found. This is possibly due to ignorance of its the properties, production process and the high cost attributed to it.

To counter this situation, this study was established to produce and analyze different formulations of reduced cost polymer concrete using orthophthalic polyester resin as binder (because of its lower cost) and compare it to isophthalic polyester resin, the traditional binder used in PC.

First, tests of axial compressive strength and water absorption in compositions of polymer concrete were made using different resin concentrations to establish the minimum binder concentrations to be used. The second part of the experimental program analyzed the effect of fly ash concentration, a filler, and of the resin type on axial compressive strength, flexural strength, chemical resistance, elasticity modulus and abrasion wear. The microstructure of the samples that underwent chemical attack was examined using SEM.

Results show that polymer concrete samples prepared with isophthalic or orthophthalic resin display superior mechanical and chemical behavior and that the addition of fly ash also improves both chemical and mechanical properties.

It was found that the combination of orthophthalic resin with sand and fly ash yields a behavior similar to the isophthalic resin in PC, even though the properties of the orthophthalic resin are inferior to those of the isophthalic polymer.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de uma interação entre diversas pessoas e duas instituições, UFRGS e UNISINOS. Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, me auxiliaram na realização do trabalho e, em especial:

A Deus, pelo poder infinito e realizador que atribuis a mim, pela coragem e confiança na vida.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Denise Dal Molin, por seus valiosos ensinamentos, por suas diretrizes seguras, pelo seu carinho e amizade inestimáveis.

Ao meu co-orientador, Prof. Claudio de Souza Kazmierczak, pois sem sua ajuda, esse trabalho nem teria iniciado, por sua parceria no projeto experimental, pela sua colaboração inestimável durante todo o trabalho e pela sua amizade.

A Cristiane Pauletti, minha bolsista, pela sua grande contribuição em toda parte experimental desse trabalho.

A Dr. David Fowler, da Universidade do Texas, que apesar da distância sempre me auxiliou enviando *papers* e apontando caminhos que acabaram por nortear esta pesquisa.

A Antônio Carvalho, da Reichhold do Brasil, pelos *papers* e pela grande ajuda na discussão dos resultados.

A bibliotecária, Ana Maria Porcello, pela sua primorosa ajuda nas referências bibliográficas.

A minha amiga e colega Viviane Todt Diverio, pela sua amizade e pela valiosa ajuda ao longo deste trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Materiais de Construção da UNISINOS pelo precioso auxílio no desenvolvimento do trabalho experimental.

A toda equipe do LEME da UFRGS pelo apoio incondicional nos ensaios.

A UNISINOS, especialmente a direção do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, pelo investimento e incentivo nestes quatro anos de trabalho.

Ao PPGEC, por me aceitar como aluna, embora não tendo dedicação integral.

A Mário Wolfart Junior, pelo estímulo, compreensão e ajuda, que geraram condições para minha dedicação a este trabalho, e pelos diversos dias dedicados a me ajudar nas análises no MEV.

A minha Mãe, Tereza Gorninski, por sempre encontrar uma maneira especial de me ajudar.

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo CZARNECKI (2001), para suprir a demanda da população mundial nos próximos 25 anos é necessário que se construa tantos prédios novos, quanto os que existem atualmente. A necessidade de dobrar o número de construções na superfície terrestre, leva a analisar o passado da construção civil, e refletir de modo a não repetir alguns aspectos problemáticos ocorridos. Portanto, a aplicação de novos materiais poderá contribuir para que se tenha um novo panorama na construção civil. De acordo com o autor, a produção anual de cimento é de aproximadamente um bilhão e duzentos milhões de toneladas, das quais são produzidos em torno de 4 milhões de m<sup>3</sup> de concreto. Se apenas em uma pequena fração forem utilizados os compostos de concreto, teremos um bom mercado para o concreto polímero.

De acordo com OHAMA (1997), nos últimos anos, a indústria da construção civil tem progredido consideravelmente. Este fato provavelmente está relacionado com a pesquisa de alta qualidade e com a multifuncionalidade dos materiais de construção, que vem se adaptando com as inovações tecnológicas. Particularmente, observa-se que esta tendência tem sido acelerada em virtude das novas fronteiras da indústria da construção, como por exemplo, a necessidade de prédios muito altos, construções subterrâneas bastante profundas e construções destinadas a ambientes agressivos. Do ponto de vista da proteção ambiental global, o desenvolvimento dos materiais de construção devem prezar pela preservação ambiental e pela economia de energia. Segundo o autor, em diversas partes do mundo tem sido mostrado um grande interesse pelos compostos de concreto polímero.

O concreto polímero (PC) é produzido utilizando-se agregados secos e monômeros (aglomerantes) que serão polimerizados (endurecidos). A composição do concreto polímero é determinada por sua aplicação.

CZARNECKI (2001), em recente trabalho de pesquisa, observa que existem grandes investimentos na área de concreto polímero. De acordo com o autor, o grande volume de informações e estudos sobre concretos poliméricos são indicativos dos progressos que vem obtendo estes materiais; Como por exemplo:

- mais de sete mil artigos publicados;
- cinco mil patentes registradas;
- 10 congressos internacionais (International Congress of Polymers in Concrete - ICPIC);
- 9 seminários (ICPIC);
- 8 simpósios organizados pela RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories).

O uso de polímeros em concretos envolve uma mistura da química aplicada com os procedimentos utilizados na produção do concreto convencional. Os polímeros são compostos de um grande número de moléculas chamadas monômeros, que ficam quimicamente ligadas umas às outras após sofrerem ação de aditivos químicos.

De acordo com VIPULANANDAN (1993), nos últimos anos os polímeros estão sendo cada vez mais utilizados na engenharia civil como adesivos, modificadores e material matriz no concreto. Como material de reparo e estrutural, polímeros e seus compostos devem ser capazes de resistir às altas tensões, especialmente à compressão, à tração por compressão diametral e à tração na flexão, em condições extremas de serviço. A versatilidade na formulação e no processamento tem comandado a maioria das aplicações do concreto polímero, como reparos e revestimentos para pavimentos de auto estradas e de pontes, pavimentação geral e componentes pré - moldados de vários tipos.

Segundo VARUGHESE E CHATURVEDI (1996), a resistência e o comportamento durante a cura do concreto polímero dependem do tipo e da quantidade de resina (aglomerante polimérico), dos agentes de cura, da temperatura e dos agregados utilizados.

Como um material composto, o PC tem um potencial infinito de aplicações que podem ser desenvolvidas utilizando-se uma ou mais de suas propriedades:

- alta resistência mecânica;
- excelentes propriedades dielétricas;
- baixa porosidade e absorção de água;
- resistência química e à corrosão;



- ótima aderência aos substratos.

Conforme VIPULANANDAN (1996), as propriedades do concreto polímero fazem destes compostos materiais potenciais para reparos estruturais e para novas construções expostas a ambientes agressivos. VIPULANANDAN, ao estudar o comportamento do concreto polímero com fibras de vidro e, associando a este trabalho o tratamento dos agregados com um agente de acoplamento a fim de melhorar a resistência da ligação resina/agregado, obteve valores de resistência à tração na flexão de 41,6 MPa, aproximadamente o dobro da resistência sem adição da fibra e tratamento dos agregados. Observou também em sua pesquisa que ao aumentar o teor de resina de 10 para 18% em massa em relação aos agregados, obteve aumento na resistência à compressão mas o módulo de elasticidade não acompanhou este crescimento.

Atualmente, o concreto polímero já apresenta ampla aceitação nas indústrias de processamento de alimentos, química, na engenharia civil e de minas (MATTHEWS,1992). Para MAASS (1997), nos revestimentos de estradas e pontes o crescente interesse na aplicação do concreto polímero deve-se especialmente aos fatos seguintes:

- permite o retorno rápido na utilização da estrutura logo após sua aplicação;
- protege o aço das estruturas de concreto armado da ação de agentes como a água, o gás carbônico e íons cloretos, os quais aceleram o processo de corrosão das armaduras;
- acrescenta um peso próprio reduzido à estrutura;
- forma uma superfície duradoura e altamente resistente ao desgaste e ao deslizamento de veículos;
- reduz o custo indiretamente, por minimizar a obstrução do tráfego.

Segundo MAASS (1997), o departamento de trânsito da Califórnia, por intermédio da Cal - Trans Materials and Research, optou pelo concreto polímero para utilizar como revestimento em 25 pontes que vinham apresentando grande deterioração. Após cinco anos os engenheiros da Cal-Trans observaram que nenhuma destas pontes mostraram fissuras ou qualquer outro problema quanto ao uso do concreto polímero com sistema poliéster-estireno como aglomerante. Seguindo estes resultados o departamento de transporte de Nevada utilizou o revestimento de poliéster na *free-way* que conduz ao aeroporto de Los Angeles, bem como nas pontes Benicia-Martinez e Golden-Gate, onde também obtiveram bons resultados.

Em virtude das propriedades relacionadas por MASS, o concreto polímero vem ampliando seu leque de aplicações e, portanto, contribuindo de forma a suprir algumas demandas específicas onde o concreto convencional não apresenta as propriedades requeridas. Tais fatos justificam as contínuas pesquisas que vem sendo realizadas e as conseqüentes aplicações em diversas partes do mundo. FOWLER (1998) constatou que nos Estados Unidos, as aplicações estão direcionadas, mais frequentemente, aos revestimentos das pavimentação e pontes e nas indústrias petroquímicas, no Canadá e no Japão aplicam-se, especialmente, nas construções subterrâneas e nas pavimentações, principalmente devido aos problemas de intemperismo. Já nos países da Europa, grande parte das aplicações estão destinadas aos componentes pré-moldados para construção civil, na indústria metal-mecânica em substituição aos metais fundidos, e na produção de reservatórios e revestimentos para as indústrias químicas e de alimentos.

## **1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA**

O desenvolvimento de novos materiais compostos, mais resistentes e duráveis que os convencionais, é essencial para utilização nos reparos e na melhoria da infraestrutura. Para REBEIZ e FOWLER (1992 e 1996), o Concreto Polímero (PC) é um exemplo de material relativamente novo e que apresenta alto desempenho. A excelente resistência mecânica e a durabilidade reduzem a manutenção e a necessidade de reparos destes materiais. Segundo os autores, o rápido tempo de cura do PC é uma vantagem na maioria das aplicações nas construções (o PC cura em poucos minutos ou em horas enquanto que os concretos de cimento em dias ou semanas). Segundo DIKEON e KAEDING (1992), isto ocorre em função da troca do aglomerante cimento por aglomerante polimérico.

Sabendo-se que nosso País é bastante carente de materiais alternativos que possam suprir certas demandas, especialmente na área de pavimentação, que apresenta sérios problemas, a criação de materiais compatíveis com o concreto convencional para reparos em estradas, pontes, vias públicas, e a investigação destes, num espectro mais amplo, pode trazer benefícios tecnológicos necessitados de longa data. Cabe ressaltar que o concreto polímero é também muito eficiente na produção de peças pré-moldadas, cuja demanda vem apresentando grande potencial de crescimento conforme mostra a literatura (KANE, 1991; REBEIZ e FOWLER, 1991).

Na UFRGS, mais especificamente no laboratório de polímeros (LAPOL), esta linha de pesquisa foi iniciada por GORNINSKI (1996). A continuidade deste trabalho é considerado relevante devido ao fato de que em nosso País não se tem conhecimento de grupos de pesquisa sistematizadas sobre o assunto, ao passo que em países da Europa, no Japão, no Canadá e nos Estados Unidos o concreto polímero já apresenta pesquisas consistentes e comercialização. Existe um grande número de indústrias destinadas à produção destes materiais, dentre estas citam-se:

a) ITW Polymer Castings (Estados Unidos), que produz componentes estruturais e bases para máquinas industriais;

b) PPC Granfield Ltd (Inglaterra e Alemanha), que produz pré-moldados que servem como bases para máquinas;

c) Emergin Construction Technologies (Estados Unidos), que produz tubulações para serem utilizadas em ambientes agressivos, como meios corrosivos;

d) ACO Polymer Products, Inc. (Estados Unidos), que produz sistemas de drenagens;

e) Sewers and Manholes with Polymer Concrete (Alemanha), que produz tubulações resistentes aos meios ácidos e efluentes cáusticos;

f) Electrimold Company (Estados Unidos), que produz containers, caixas, boxes e outros pré-moldados altamente resistentes mecânica e quimicamente;

g) ACO Technic (Inglaterra), que produz reparos para pavimentação e para estradas de ferro (dormentes) e pré-moldados, como tampos de bueiros, painéis para sistemas de drenagem e peças decorativas imitando o mármore (pias, balcões, lajes e azulejos);

h) Polycrete Ltd. (Inglaterra), que produz reparos e revestimentos a prova de água para estradas, pontes e estacionamentos e estruturas marinhas (piers, construção de muros no mar) e estações de tratamento de águas;

i) Arizona Polymer Flooring, Inc.(Estados Unidos), que produz revestimentos decorativos e de alta durabilidade;

j) GeoCHEM, Incorporated (Estados Unidos), que produz reparos para estradas, pontes, aeroportos, entre outros.

Entretanto, de acordo com WHITE e MONTANI (1997), a tecnologia de aprimoramento das propriedades do concreto endurecido por adição de polímeros vem ocorrendo somente nas últimas seis décadas, e ainda existe muito a ser investigado a fim de se conhecer melhor as propriedades destes materiais, podendo, deste modo, destinar-se aplicações específicas conforme

a estrutura química e as conseqüentes propriedades mecânicas e de durabilidade da composição do concreto polímero. Durante a última década, muitos estados nos Estados Unidos e várias províncias no Canadá têm aplicado camadas finas de concreto polímero como cobertura dos tabuleiros de pontes de concreto de cimento. A cobertura de concreto polímero é dos mais promissores métodos de reabilitação dos tabuleiros de pontes de concreto de cimento devido a sua alta resistência, excelente durabilidade e boa aderência ao concreto de cimento Portland. Os revestimentos de concreto polímero tem vantagem sobre os revestimentos de concreto convencional quando o peso próprio é considerado, pois o concreto polímero pode ser utilizado em camadas muito finas e, conseqüentemente, mais leves (WHITE e MONTANI, 1997).

De acordo com FOWLER (1998 e 2001), os compostos pré-moldados vem obtendo cada vez mais aceitação na área da construção civil. Segundo o autor, uma das mais fortes tendências das pesquisas em concreto polímero visa reduzir o teor de aglomerante, através do proporcionamento dos agregados e, como conseqüência, a utilização de um teor de polímero mínimo necessário, deste modo, reduzindo-se o custo destes materiais. Nestas situações, somente os pré-moldados podem enquadrar-se, pois tanto para revestimentos, quanto para grande parte dos reparos, são comumente utilizadas composições mais fluídas. Assim sendo, e após troca de informações com este autor, optou-se por trabalhar com composições compostas por teores baixos de aglomerante, resina poliéster insaturada isoftálica comumente utilizada como aglomerante em concretos poliméricos, e com a resina poliéster ortoftálica, de custo bastante inferior, a qual não vem sendo utilizada na produção de concreto polímero, especialmente quando este tenha que submeter-se à ambientes agressivos, como meios ácidos, alcalinos ou água. As composições terão como fíler, a cinza volante, que será utilizada na compacidade máxima entre o agregado e a cinza, e em diferentes teores, acima e abaixo da compacidade máxima, buscando-se uma avaliação mais abrangente do comportamento da cinza volante nas propriedades mecânicas e químicas dos compostos de concreto polímero.

## **1.2 OBJETIVOS**

O presente trabalho tem como objetivo geral formular e caracterizar, quanto a propriedades mecânicas e químicas, compostos de concreto polímero, utilizando dois diferentes

aglomerantes, as resinas poliéster isoftálica e ortoftálica, bem como avaliar a influência do teor de cinza volante nestas composições.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Determinar a influência da variação dos teores de resina poliéster isoftálica e ortoftálica, na resistência à compressão axial e absorção de água, dos concretos poliméricos.
- Investigar as propriedades mecânicas do concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica, com adição de cinza volante, por meio de ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão.
- Analisar o comportamento do concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica, com adição de cinza volante, frente a sete soluções agressivas: os ácidos acético, cítrico, fórmico, láctico e sulfúrico, refrigerante a base de cola e água destilada.

### **1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos, descritos da seguinte forma:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao assunto em estudo, enfocando as propriedades, aplicações e investimentos na área de concreto polímero. Também são apresentados os objetivos da pesquisa, a importância do tema proposto e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura que traz a nomenclatura e o histórico dos compostos de concreto polímero, a conceituação de polímeros, os tipos de polímeros e polimerizações, as resinas mais utilizadas na produção de concreto polímero, e os aspectos químicos das resinas, além das características gerais de polímeros. A última parte deste capítulo trata dos tipos de concretos polímero, das aplicações destes compostos, e finalmente mostra a situação atual do concreto polímero.

O capítulo três denominado pesquisa experimental, apresenta o item seleção e caracterização dos materiais, abrangendo os materiais e as dosagens utilizados, além dos

processos de mistura, moldagem e cura dos compostos de concreto polímero. A segunda parte trata da metodologia utilizada para os ensaios do concreto endurecido.

O capítulo quatro mostra os resultados obtidos no programa experimental, e no capítulo cinco estes resultados são analisados com base na literatura e estatisticamente. Finalmente, no capítulo cinco, apresentam-se as relações entre propriedades mecânicas e a resistência à compressão axial.

O capítulo seis apresenta as conclusões obtidas nesta pesquisa e as sugestões para futuros estudos com relação ao tema proposto neste trabalho.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordados aspectos referentes aos tipos de concreto e padronizações, tipos de polímeros e processos de polimerizações, aditivos utilizados nos polímeros e produção de concreto polímero.

### 2.1 Nomenclatura e histórico

Compostos de concreto polímero são materiais produzidos por substituição de parte ou todo o aglomerante, que é normalmente o cimento Portland, do concreto convencional, ou pela adição de um polímero à matriz hidratada do concreto. Segundo PRUSINSKI (1978), “o verdadeiro concreto polímero é um produto híbrido, uma combinação sofisticada de uma tecnologia ancestral da produção do concreto de cimento hidratado com a moderna química de polímeros. A areia de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), utilizada como agregado, é aglomerada com um monômero (resina polimérica), que é polimerizada (endurecida), formando um material resistente”

Em geral, conforme OHAMA (1997), os compostos de concreto polímero estão classificados pelos princípios de seus processos tecnológicos, em três categorias<sup>(1)</sup>:

- Argamassa modificada por polímero (PCM)<sup>1</sup>, e concreto modificado por polímero (PCC)<sup>1</sup>, também conhecido como concreto de cimento e polímero (substituição de parte do aglomerante cimento por polímeros);
- Argamassa de polímero (PM)<sup>1</sup> e concreto polímero (PC)<sup>1</sup>, nestes ocorre a substituição de todo aglomerante cimento por polímeros;
- Argamassa impregnada por polímero (PIM) e concreto impregnado por polímero (PIC), nesta categoria o concreto de cimento Portland hidratado recebe a difusão de monômeros em seus poros.

A figura 2.1 apresenta a classificação dos compostos de concreto polímero.

---

<sup>1</sup> Salienta-se que as siglas acima relacionadas são as utilizadas na literatura internacional.

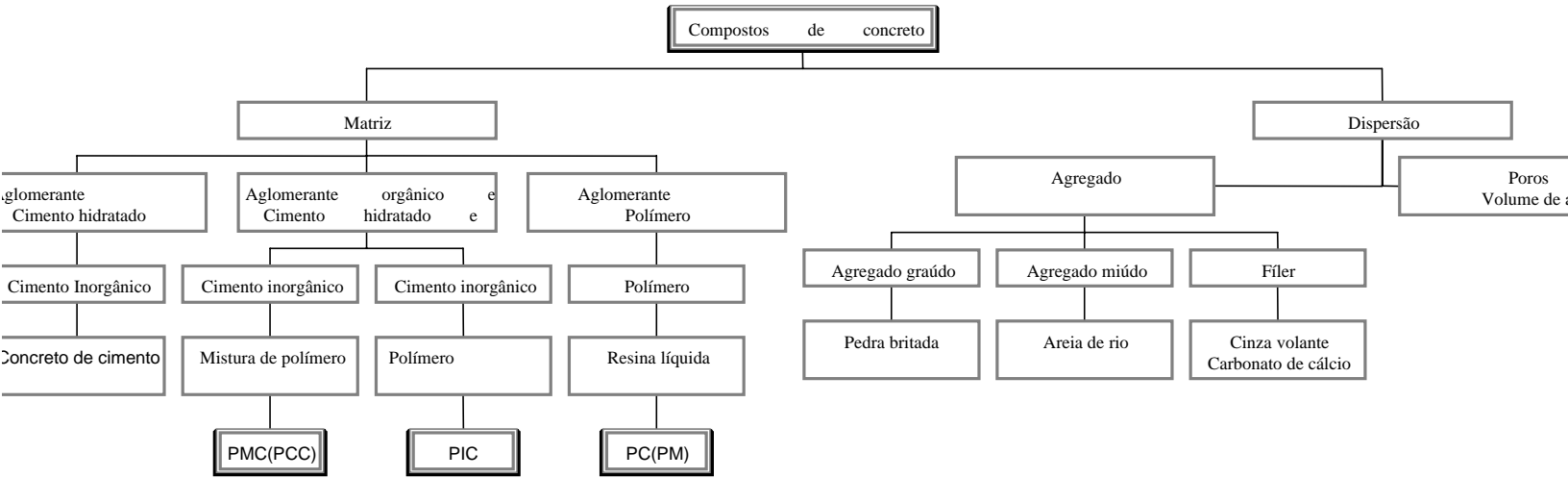


FIGURA....



Segundo STEINBERG et al.(1968), as pesquisas relacionadas a estes materiais, inicialmente, desenvolveram-se nos Estados Unidos, mais especificamente, por pesquisadores da NASA, que foram seguidos pelos japoneses que, além de pesquisas, atribuíram aplicações imediatas aos novos materiais.

De acordo com FOWLER (2001), o concreto impregnado por polímeros foi um dos materiais mais fascinantes desenvolvidos nos anos 60. Os resultados de resistência à compressão de 103 a 138 MPa e à flexão 8,3 a 13,8 MPa, e a ótima durabilidade medida pela resistência ao gelo e degelo, e pelo desgaste por abrasão impressionaram muito os pesquisadores naquela época. Segundo o autor, nos anos seguintes, nos Estados Unidos, aproximadamente vinte pontes foram tratadas com concreto impregnado por polímero. Um presídio muito deteriorado foi totalmente reformado. Sendo que, a mais importante aplicação foi a impregnação do Dworshak Dam em Idaho, a terceira maior barragem deste país. Os reparos foram realizados utilizando a técnica desenvolvida pela Universidade do Texas de Austin.

Entretanto, atualmente, o concreto impregnado por polímeros tem poucas aplicações, devido ao longo tempo consumido na sua produção, que necessita controle de temperatura e pressão. O concreto polímero e o concreto modificado por polímeros tem sido utilizados mais amplamente. CZARNECKI (2001), em sua pesquisa, observou que em torno de 50% das publicações atuais estão direcionadas para o PCC, 40% para o PC e 10% para PIC.

OHAMA (1992) considera que as pesquisas e o desenvolvimento destes três tipos de compostos de concreto polímero foram competitivamente conduzidas nos anos 70. Nos anos 80, a argamassa modificada por polímero e a argamassa e o concreto polímero aparecem como materiais predominantes. Em contrapartida, a argamassa e o concreto impregnado por polímero são dificilmente empregados devido ao insatisfatório balanço entre seu desempenho e custo, ocasionado pelo complicado processo de impregnação do material. OHAMA (1997) observa que, no Japão, a argamassa modificada por polímeros é bastante utilizada para reparos e trabalhos de acabamentos. Entretanto, relata que, nos Estados Unidos, o concreto modificado por polímeros é amplamente utilizado como revestimento de pontes e como material de reparo. Segundo estimativas foram revestidos 1,2 milhões de m<sup>2</sup> de pontes com concreto modificado por polímeros. Nos últimos anos, cerca de 60.300 m<sup>3</sup> de concreto modificado por polímeros foram utilizados em estruturas novas e estruturas de concreto deterioradas nos Estados Unidos.

Mais recentemente, OHAMA (2001) relata que no Japão as pesquisas estão direcionadas aos compostos de concreto polímero, concreto modificado por polímeros e concreto impregnado por polímeros de desenvolvimento sustentável. Segundo o autor, a argamassa de concreto de resina epóxi sem iniciadores tóxicos, os polímeros em pó sem solventes, a reciclagem da PET Poli(etileno tereftalato), entre outros, já mostram que os compostos de concreto polímero podem ser materiais de construção altamente sustentáveis.

## 2.2 Conceituação de polímeros

Polímeros ou macromoléculas são compostos orgânicos construídos por encadeamento de um grande número de moléculas muito menores. As pequenas moléculas que se combinam para formar as moléculas poliméricas são chamadas de monômeros ou meros e as reações pelas quais elas se combinam são chamadas de polimerizações. Podem existir centenas, milhares ou centenas de milhares de moléculas encadeadas numa molécula polimérica. Grau de polimerização, geralmente simbolizado pela sigla DP ou n, é o número de meros presentes na cadeia polimérica. Quando há mais de um tipo de mero na composição do polímero, este é designado copolímero e os monômeros que lhes dão origem, comonômeros. Por exemplo, o elastômero SBR é um copolímero de butadieno e estireno. O termo copolímero é geral; quando há três monômeros em jogo, pode-se ainda particularizar esse número, usando a expressão terpolímero (MANO, 1985; ODIAN, 1981).

Para o polímero que é constituído apenas de um tipo de mero, usa-se a expressão homopolímero, em contraposição à expressão copolímero. Copolímeros cujas unidades químicas não seguem qualquer ordenação, dispondo-se ao acaso, são chamados de copolímeros estatísticos. No outro extremo, quando há perfeita regularidade de constituição, dispondo-se as unidades químicas diferentes de modo alternado, são chamados de copolímeros alternados. Se ao invés de uma unidade química de cada tipo, alternam-se seqüências de unidades químicas iguais, o produto é denominado copolímero em bloco. No caso particular de esses blocos existirem como ramificações poliméricas do esqueleto principal da macromolécula, o copolímero é dito grafitizado ou enxertado (*graft copolymer*). Na tabela 2.1, a seguir, apresentam-se sumarizados esses conceitos (MANO,1985).

**Tabela 2.1** Cadeias macromoleculares em homopolímeros e copolímeros (MANO, 1985)

---

<b>Macromoléculas (grandes e complexas)</b>	
Monômeros → polímeros	$\left\{ \begin{array}{l} \text{homopolímeros} \\ \text{copolímeros (alternados, em bloco, estatísticos)} \end{array} \right.$
<b>nA</b>	~~A-A-A-A-A-A-A-A-A-A~~
Monômero →	homopolímero
<b>mB</b>	~~B-B-B-B-B-B-B-B-B-B~~
Monômero →	homopolímero
<b><u>nA + mB</u> Comonômeros</b>	
~~A-B-A-B-A-B-A-B-A~~ Copolímero alternado	
~~A-A-A-B-B-B-A-A-A~~ Copolímero em bloco	
$  \begin{array}{c}  \text{B} \quad \text{B} \quad \text{B} \quad \text{---} \\  / \\  \text{---A-A-A-A-A-A-A---} \\    \\  \text{B-B-B---} \quad \text{Copolímero grafitizado ou enxertado}  \end{array}  $	
~~A-B-B-A-A-B-A-A-A~~ Copolímero estatístico	

---

### 2.3 Tipos de polímeros e polimerizações

As reações de polimerização dividem-se em duas classes: de adição ou de condensação. Conforme o tipo de reação (adição ou condensação), o mecanismo do processo difere fundamentalmente. As reações por adição ou as poliadições diferem das policondensações em diversos aspectos. As poliadições são reações em cadeia, que apresentam três diferentes etapas reacionais: iniciação, propagação e terminação, todas com velocidade e mecanismos distintos.

Já a policondensação é uma reação em etapas, em que não há distinção reacional entre o início da formação do polímero, ou o crescimento macromolecular, e a interrupção desse crescimento (MANO, 1985).

### 2.3.1 Composição do polímero e estrutura

De acordo com MANO (1985) e MILES (1975), os polímeros foram originalmente classificados por Carothers[1929] em polímeros de condensação e de adição baseado na diferença composicional entre o polímero e os monômeros dos quais foram sintetizados. Polímeros de condensação são aqueles polímeros que foram formados por monômeros polifuncionais por várias reações de condensação da química orgânica com eliminação de pequenas moléculas como por exemplo água, cloreto de hidrogênio, entre outras. Este tipo de polimerização intervém na obtenção de poliamidas, poliésteres, resinas alquídicas, fenol-formaldeídos, entre outros. As reações de policondensação podem levar à obtenção de polímeros termoplásticos ou termofixos, de acordo com a funcionalidade dos reagentes.

Como exemplo de polimerização por condensação tem-se a síntese das poliamidas, que formam-se a partir da reação entre uma diamina e um diácido com eliminação de moléculas de água, conforme o exemplo:



onde R e R\* são grupos alifáticos ou aromáticos.

Segundo MANO (1991), as poliamidas podem ser empregadas como fibras de reforço em compósitos, materiais esportivos, vasos de alta pressão, na indústria aeroespacial, na indústria petrolífera, em tubulações submarinas, entre outras aplicações.

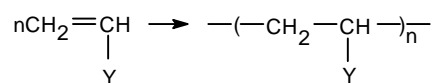
A unidade entre parênteses na poliamida repete-se muitas vezes na cadeia polimérica, sendo denominada unidade repetitiva.

Outros exemplos são os poliésteres que se formam da reação dos diácidos e dióis também com eliminação de água, e os policarbonatos da reação de um dihidróxido aromático e fosfogênio com eliminação de cloreto de hidrogênio.

Conforme ODIAN (1981) e MANO (1985), polimerização por adição foi classificada por Carothers como aquela formada por monômeros sem perda de uma pequena molécula. Diferente da polimerização por condensação, a unidade repetitiva de uma polimerização por adição tem

quase a mesma composição do monômero. Em outras palavras, o polímero resultante é a soma dos reagentes, contadas as quantidades totais usadas. Os polímeros formados a partir das reações de adição são sempre termoplásticos. As polimerizações por adição são aquelas formadas pela reação sucessiva de monômeros contendo dupla ligação carbono-carbono, denominados monômeros vinílicos. O termo vinílico é aplicado a todos os monômeros contendo dupla ligação carbono-carbono, incluindo monômeros como metil metacrilato (MMA), cloreto de vinilideno, 2-buteno, como também cloreto de vinila e estireno.

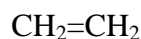
Monômeros vinílicos podem reagir com eles mesmos formando polímeros por conversão de suas duplas ligações, por exemplo:



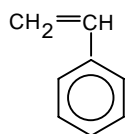
onde Y pode ser um grupo substituinte como hidrogênio, alquil, aril, nitrila, éster, cetona, éter ou halogênio. O polietileno e o poliestireno são exemplos típicos de polimerização por adição. As seguintes estruturas químicas apresentam os monômeros do polietileno e poliestireno e seus respectivos meros.

#### Monômeros

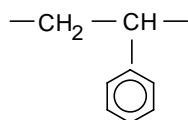
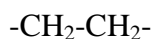
◆ polietileno



◆ poliestireno



#### Unidades repetitivas



O polietileno, segundo MANO (1985), é um plástico de grande importância industrial, de boa resistência química, baixo custos e suas principais aplicações estão direcionadas às embalagens para produtos alimentícios, farmacêuticos e químicos. Já o poliestireno também apresenta boa resistência química e aparência semelhante ao vidro e se aplica na produção de utensílios domésticos rígidos, embalagens de equipamentos e pranchas, dentre outras. O poliestireno é também utilizado na formação de copolímeros, BR (borracha de butadieno) grafitizado com o estireno, resina SAN, um copolímero de estireno e acrilonitrila e no poliéster insaturado que é dissolvido em estireno, formando as ligações cruzadas, entre outras aplicações.

Neste tipo de polimerização a molécula origina seus pontos de reação pela ruptura de uma dupla ligação e formação de duas ligações simples.

Os polímeros podem ter suas cadeias sem ramificações, admitindo conformação em zigue-zague - polímeros lineares - ou podem apresentar ramificações, cujo grau e complexidade pode ir até o extremo da formação de retículos, resultando então o que se denomina polímero reticulado, ou polímero com ligações cruzadas, ou polímero tridimensional. A formação de retículos, devido às ligações cruzadas entre moléculas, “amarra” as cadeias, impedindo o seu deslizamento, umas sobre as outras. Como consequência imediata, surgem propriedades diferentes no produto, especialmente em relação à fusibilidade e solubilidade.

As ramificações dificultam a aproximação das cadeias poliméricas, portanto diminuindo as interações moleculares, acarretando prejuízo às propriedades mecânicas, “plastificando” internamente o polímero, sendo este um caráter intrínseco, permanente, do material, em contraposição a igual efeito obtido através da adição de plastificantes externos, que são removíveis por meios físicos e, assim, vão modificando progressivamente as qualidades do produto (MANO, 1985).

De acordo com MANO (1985) e MANO (1991) as características de fusibilidade, que impõem diferentes processos tecnológicos na sua aplicação, são a base da classificação dos polímeros em termoplásticos e termofixos ou termorrígidos. Os polímeros lineares ou ramificados, que permitem fusão por aquecimento e solidificação por resfriamento, constituem os chamados termoplásticos. Os polímeros que, por aquecimento ou outra forma de tratamento, assumem a estrutura tridimensional, reticulada, com ligações cruzadas, tornando-se insolúveis e infusíveis, são chamados termorrígidos.

De acordo com seu comportamento mecânico, os polímeros são divididos em três grandes grupos: borrachas ou elastômeros, plásticos e fibras. Em sua aplicação, esses termos envolvem a expressão resina. A tabela 2.2 apresenta alguns polímeros de interesse industrial.

**Tabela 2.2** Polímeros de interesse industrial (MANO,1985)

---

A. Polihidrocarbonetos

- a. Polietileno
- b. Polipropileno
- c. Poliestireno

B. Poli-hidrocarbonetos substituídos

- a. Por halogênio
  - Poli(cloreto de vinila)
  - Poli(tetrafluoro-etileno)
- b. Por grupo éster
  - Poli(acetato de vinila)
  - Poli(acrilato de alquila)
  - Poli(metacrilato de metila)
- c. Por grupo nitrila
  - Poliacrilonitrila

C. Poliéteres

- a. Polioximetileno

D. Poliamidas

- a. Policaprolactama (poliamida 6)

**2. Resultantes da policondensação (reação em etapas)**A. Poliéteres

- a. Poliglicóis
- b. Resinas epóxicas

B. Poliésteres

- a. Saturados
  - Poli(tereftalato de etileno)
  - Policarbonato
- b. Insaturados
  - Poli(ftalato-maleato de etileno) estirenizado

C. Poliamidas

- a Poliamida 11
- b Poliamida 66
- c. Poliamida 610

D. Resinas fenólicas

- a. Resina de fenol-formaldeído

E. Resinas aminadas

- a. Resina de uréia-formaldeído
- b. Resina de melamina-formaldeído

**3. Resultantes de outras polirreações**

Poliuretanos (poliadição)

**4. Resultantes de modificação de polímeros**

A. Celulose

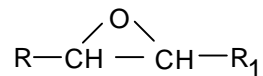
- a. Nitrato de celulose
  - b. Acetato de celulose
  - c. Metil-celulose
  - d. Carboxi- metil-celulose
- 

**2.4 Características das resinas mais utilizadas na produção de concreto polímero**

A seguir discute-se em maiores detalhes, as características de algumas resinas que são utilizadas como aglomerante na produção de compostos de concreto polímero.

**2.4.1 Resina epóxi**

Segundo MORRISON e BOYD (1990), resinas epóxi são formadas tipicamente pela reação do bisfenol e da epicloridrina. Todos os epóxidos tem a sua estrutura química caracterizada pelo grupo epóxi onde um átomo de oxigênio é ligado lateralmente aos carbonos dispostos na cadeia polimérica, conforme pode se observar na seguinte estrutura:



Tecnicamente, a resina epóxi é muitas vezes definida pela sua viscosidade e seu equivalente epóxi, que indica o número de gramas de resina que contém o equivalente de um grama de grupos epóxi. Assim, resinas que apresentam alta proporção de grupo epóxi são mais fluídas do que aquelas que contém grupos atômicos pesados. Portanto, dependendo do tamanho e



complexidade das moléculas, as resinas epóxis variam desde um fluído viscoso até um sólido de elevado ponto de fusão.

De acordo com TEZUKA (1979), as resinas epóxi fluídas e os epóxis alifáticos são comercialmente pouco utilizados, ao contrário dos epóxis aromáticos sólidos que tem baixo custo e são amplamente usados na forma de solução ou pó. Entre estes extremos há os epóxis aromáticos líquidos que são os mais utilizados em trabalhos de engenharia. Os epóxis aromáticos líquidos variam desde xaropes de cor clara que podem ser misturados ou espalhados facilmente, até aos que apresentam grande viscosidade e que precisam ser diluídos para serem aplicados satisfatoriamente.

Uma variedade de reagentes são usados para curar a resina epóxi, sendo as poliaminas os agentes de cura mais comuns com reação envolvendo a abertura do anel. A cura da resina epóxi pode também se realizar por abertura do anel polimerizando os grupos epóxi, usando ácidos ou bases de Lewis.

TEZUKA (1979) e POPOVICS (1992) fizeram as seguintes considerações em relação à resina epóxi:

a) a resina epóxi possui alta resistência química e à corrosão, dureza e flexibilidade, bom comportamento mecânico e elétrico, e notável adesão à maioria dos substratos;

b) na sua utilização uma ampla variedade de produtos podem ser obtidos variando-se as propriedades na cura, na seleção dos monômeros, aditivos e agentes de cura. As principais aplicações dos epóxis na construção civil situam-se em duas categorias - revestimentos e estruturais. Em outras aplicações, apresentam-se incluídos os pisos, os reparos no concreto deteriorado de auto-estradas, os revestimentos para rodovias em geral, especialmente nas pontes e uma vasta demanda para as aplicações adesivas;

c) devido às suas excelentes características técnicas (elevadas resistências, mecânica e química), o campo de aplicação da resina epóxi é muito grande, sendo utilizado como aglomerante em argamassas e concretos, como cola de peças pré-moldadas ou como camada protetora de superfícies na forma de tintas.

### 2.4.2 Resina poliéster

Conforme MORRISON (1990), várias combinações de reagentes e processos estão potencialmente disponíveis para sintetizar poliésteres. Poliésteres podem ser produzidos por esterificação direta de um diácido com um diol ou pela própria condensação de um ácido hidróxi-carboxílico.

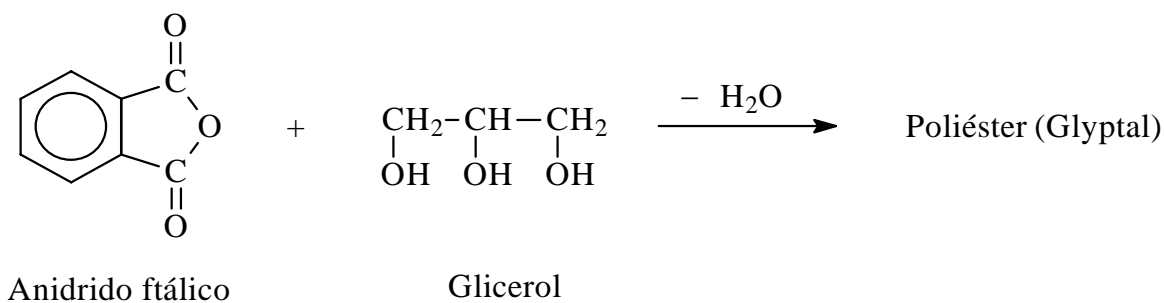
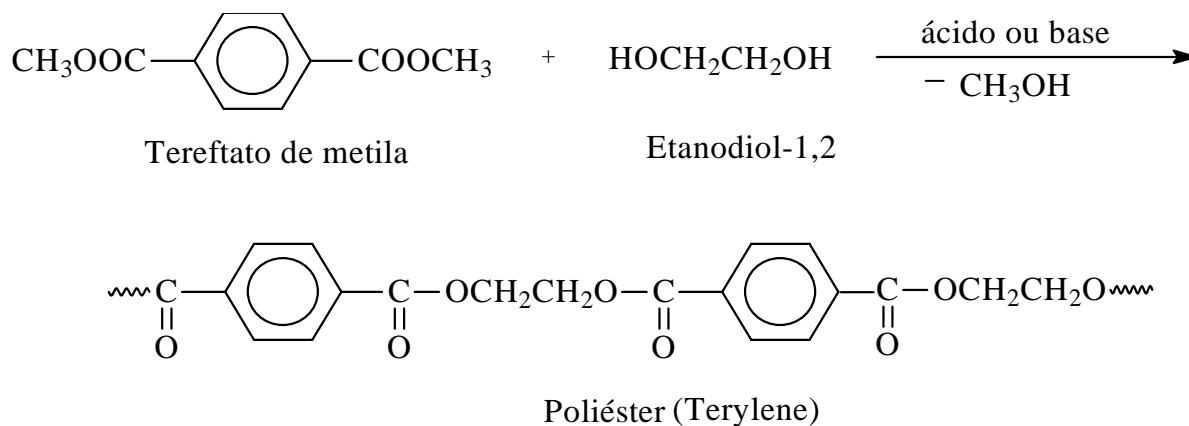
Os ácidos carboxílicos reagem com os álcoois formando ésteres. Se o ácido contiver mais de um grupo carboxílico ( $-COOH$ ), e o álcool mais de um grupo  $-OH$ , formam-se, como produtos de reação, poliésteres (MORRISON e BOYD 1990).

Segundo MORRISON e BOYD, os poliésteres classificam-se em poliésteres saturados termoplásticos, poliésteres termoestáveis, poliésteres não saturados (insaturados) endurecidos por condensação e poliésteres não saturados endurecidos por copolimerização. Os poliésteres saturados termoplásticos são obtidos pela policondensação a  $200^{\circ}C$  de ácidos dibásicos saturados como ácido malônico, succínico, adípico, sebácico, ftálico, com álcoois bivalentes também saturados como glicóis etilênico, propilênico, butilênico, entre outros. São polímeros que apresentam cadeias lineares e podem apresentar-se no estado líquido ou sólido de baixo ponto de fusão, e geralmente são solúveis em solventes orgânicos.

De acordo com HAWLEY(1971), os poliésteres saturados termoestáveis são obtidos pela condensação de um diácido saturado, geralmente anidrido ftálico com glicerina, de onde vem o nome de resina gliceroftálica. Estas resinas, pela sua fragilidade e pouca solubilidade em solventes orgânicos, têm um emprego limitado.

Os poliésteres não saturados endurecidos por copolimerização ou resinas poliésteres são os poliésteres lineares obtidos pela policondensação de um glicol saturado com um diácido não saturado, dissolvidos num monômero do tipo vinílico, como o estireno, capaz de copolimerizar com o poliéster (HAWLEY, 1971).

As reações a seguir mostram exemplos de policondensação, que produzem dois tipos de poliéster, o Terylene e o Glyptal.



De acordo com CARVALHO FILHO (1975 e 1986) e REICHHOLD (2002), a resina poliéster insaturada pertence aos sintéticos termoestáveis<sup>1</sup> e é geralmente fornecida no estado líquido. São endurecidas ou "curadas" por meio de polimerização, durante a qual forma-se uma estrutura molecular tridimensional. Da reação química do processo resulta uma ligação molecular rígida insolúvel e infusível, tornando assim o processo irreversível. As resinas após curadas, não amolecem quando expostas ao calor. Aumentando-se a temperatura de uma resina curada termofixa, pode-se chegar a queimá-la, porém não fundi-la ou despolimerizá-la.

<sup>1</sup>Categoria que será utilizada no presente estudo

As matérias primas para a fabricação das resinas poliéster são:

- a) os ácidos orgânicos insaturados como o ácido maleico ou anidrido maleico ou o isômero ácido fumárico;
- b) os ácidos orgânicos saturados como o ácido ortoftálico ou o anidrido ftálico, o ácido isoftálico ou o ácido tereftálico;
- c) os glicóis como o etileno glicol, propileno ou neopentil glicol;
- d) os monômeros bifuncionais como o estireno ou vinil benzeno;
- e) inibidores como terc-butil catecol.

Os ácidos insaturados são utilizados para fornecer as insaturações ao polímero, sem as quais não há formação das ligações cruzadas ou formação do retículo tridimensional, que é o que caracteriza uma resina poliéster insaturada.

O ácido insaturado fornece os pontos reativos para formação das ligações cruzadas.

O ácido saturado, além de determinar o grau de espaçamento ou contração das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia, determina também o tipo de resina. Se fossem empregados apenas ácidos insaturados na produção do poliéster, o espaçamento entre as duplas ligações seria muito pequeno e daria como resultado um poliéster muito quebradiço, de pouca utilidade prática.

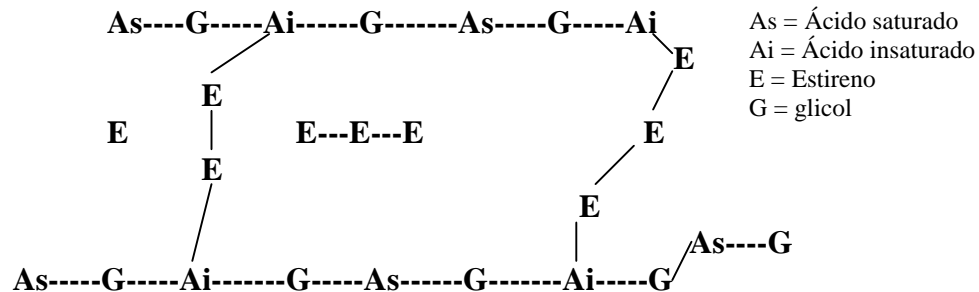
Os glicóis desempenham um papel fundamental nas características do produto final. Flexibilidade, cristalinidade, sensibilidade à água e ao calor, inércia química, entre outras, são particularmente afetadas pela escolha do glicol. Diálcoois são também utilizados para controlar o comprimento da cadeia molecular.

Os monômeros insaturados são utilizados para formar as ligações cruzadas(interligar) com os pontos de insaturação presentes na cadeia molecular do poliéster, formando uma "ponte" entre os mesmos. Esta copolimerização transforma massa do poliéster do estado líquido em estado sólido, liberando calor, formando um retículo tridimensional insolúvel e infusível.

Esta reação química é iniciada por radicais contidos no iniciador. Estes iniciadores, porém, exigem uma ativação mediante aplicação de calor, ou por meio de aceleradores.

Antes da interligação, ou cura, o monômero tem também a função de solvente e veículo para baixar a viscosidade da resina. O estireno é o mais popular dos monômeros utilizados por razões técnicas e econômicas. Através da ruptura da dupla ligação presente no grupo vinílico é que o estireno forma ponte de interligação entre as moléculas adjacentes do poliéster.

Na figura 2.2 está representado um esquema ilustrando a cura da resina poliéster insaturada.



**Figura 2.2** Esquema de cura de uma resina poliéster

Através da figura 2.4 observa-se a formação das ligações cruzadas de poliestireno "amarrando" as macromoléculas de poliéster. Pode-se perceber a presença de poliestireno que não está ligado ao poliéster, assim como podem restar pontos de insaturação no poliéster que não formou copolímero.

Os inibidores são substâncias que reagem com os radicais livres, neutralizando-os e impedindo a gelatinização prematura da resina. Após o inibidor é acrescentado o estireno.

A cura do poliéster se inicia na presença de radicais livres. O mecanismo de proteção de inibidores consiste na absorção desses radicais livres, impedindo a propagação da reação de cura, pois todo radical livre será neutralizado pelo inibidor.

Quando são adicionados iniciadores na resina e sendo o número de radicais inibidores grande, o iniciador irá "consumir" o inibidor, permitindo que a reação de cura se processe normalmente.

REBEIZ et al. (1992), REBEIZ e FOWLER (1991), REBEIZ e FOWLER (1996a, 1996b) conduziram trabalhos utilizando resinas poliésteres a partir do Poli (etileno tereftalato). Destas pesquisas chegaram às seguintes considerações:

a) sabendo-se que a resina de poliéster insaturado oriundo do PET reciclado pode ser utilizada na produção de concreto polímero com alta qualidade e preços mais competitivos, a indústria do concreto polímero pode ser beneficiada com a utilização do mesmo;

b) os rejeitos do poli (etileno tereftalato), PET, tipicamente encontrados em garrafas de bebidas que são coletadas e recicladas em muitas regiões dos Estados Unidos, são depolimerizados utilizando-se etileno glicol, propileno glicol ou neopentilglicol. O produto glicolizado resultante consiste de oligômeros e monômeros, que são colocados em reação com ácidos dibásicos insaturados a fim de formar a resina de poliéster insaturada;

c) o alto custo das resinas poliéster insaturadas, excetuando a ortoftálica, estão cada vez mais direcionando os pesquisadores no sentido de buscar alternativas de produção de um aglomerante polimérico (principal responsável pelo custo do concreto polímero) de mais baixo custo. O poliéster insaturado produzido a partir dos rejeitos de PET apresenta-se com uma boa fonte de resina para utilização no concreto polímero. A principal vantagem da reciclagem do PET para utilização em concreto polímero é que os rejeitos de PET não necessitam sofrer purificação ou remoção de cores, o que facilita a operação de reciclagem e minimiza os custos;

d) uma ampla variedade de aditivos podem ser adicionados à resina proporcionando características como flexibilidade ou rigidez. Para produção de resina de poliéster insaturada a partir de matéria prima virgem, utiliza-se o anidrido ftálico ou ácido isoftálico ao invés de ácido tereftálico.

A tabela 2.3 apresenta alguns resultados obtidos por REBEIZ e FOWLER(1991) quando adicionaram PET nos teores 15 a 40%, em massa, na resina virgem e utilizaram na produção de concreto polímero.

**Tabela 2.3** Resultados obtidos na produção do PC utilizando-se como parte do aglomerante o PET reciclado.

<b>Propriedades Mecânicas para o PC</b>	
Resistência à compressão (MPa)	42 a 105
Resistência à flexão (Mpa)	15 a 25
Retração total ( $10^{-3}$ mm/mm)	2,1 a 20,6
Módulo de elasticidade na compressão(GPa)	6,6 a 28,7
Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	5,9 a 26,6
Resistência da ligação ao concreto de cimento Portland (MPa)	1,4 a 4,2

Segundo FOWLER (2001), atualmente o custo das resinas recicladas ainda não estão significativamente mais baixos que os das resinas virgens. Com o aumento da ênfase no desenvolvimento sustentável, o custo das resinas recicladas devem ficar menores.

REBEIZ e FOWLER (2001) produziram concretos poliméricos reforçados com fibras de aço, e utilizaram como aglomerante o PET reciclado. Os resultados de resistências à tração na flexão de 15 a 35 MPa e à compressão de 95 a 96 MPa, mostraram-se comparáveis, se não superiores, aos obtidos para o concreto polímero que tem como aglomerante resina virgem.

A utilização de resinas em concreto é relativamente recente, assim sendo é necessário conhecer alguns aspectos importantes relacionados com estes materiais, a fim de que se possa realizar uma utilização adequada e segura. CARVALHO (1975 e 1986) e REICHHOLD (2002) tratam dos fatores que afetam o tempo de utilização, da flamabilidade e do mecanismo de ataque químico que podem afetar as resinas poliéster, conforme apresentado a seguir:

#### **2.4.2.1 Fatores que afetam o tempo de utilização da resina após catalisada**

- a) temperaturas mais elevadas diminuirão o tempo de manuseio da resina;
- b) grandes quantidades de resina catalisada tendem a ter um tempo de utilização mais curto;
- c) materiais isolantes (moldes de madeira) diminuirão o tempo de gelatinização da resina;
- d) materiais que dissipam calor (moldes metálicos) prolongam o tempo de gelatinização da resina;
- e) ambiente com alto teor de umidade prolonga o tempo de gelatinização da resina;
- f) a incorporação de cargas irá aumentar o tempo de gelatinização;
- g) a incidência de raios solares irá diminuir o tempo de manuseio da resina.

#### **2.4.2.2 Flamabilidade**

Um dos aspectos importantes na avaliação do desempenho dos materiais é a flamabilidade.

Considera-se que uma resina poliéster é resistente ao fogo ou retardante de chamas ou ainda auto-extinguível quando os corpos-de-prova com ela produzidos e ensaiados exibem baixa velocidade de espalhamento de chamas quando em presença da fonte de calor e rápida suspensão das chamas quando a fonte de calor é removida.

O poliéster, como a maioria dos compostos orgânicos contendo carbono e hidrogênio, queimam com facilidade, liberando no processo grande quantidade de fumaça ( presença de grupos aromáticos).

A temperatura de ignição das resinas poliéster situa-se próximo a 400°C, quando então na presença de oxigênio, o processo de queima tem início.

Existem vários artifícios que permitem ao fabricante obter poliésteres classificados como auto-extinguíveis. Os mais usuais consistem de composto contendo fósforo em suas moléculas, sendo também utilizados, o trióxido de antimônio, a alumina trihidratada e os compostos halogenados.



### 2.4.2.3 Mecanismo de corrosão/ataque químico

O mecanismo pelo qual os metais são corroídos é bastante distinto em relação aos materiais poliméricos e, por isso, o termo corrosão se aplica bem aos metais e não aos polímeros, que é definido por ataque químico em virtude da forma como ele ocorre.

No caso dos metais ou suas ligas, a sua deterioração está intimamente ligada à passagem de corrente elétrica através da estrutura metálica e o ambiente corrosivo (eletrólito) com o qual mantém contato.

O polímeros, em geral, não conduzem corrente elétrica, portanto a maioria dos fenômenos que ocorrem para deterioração dos polímeros são de natureza química, podendo ocorrer de diversas maneiras, que de modo geral podem ser assim classificados:

a) Fenômenos químicos:

- ◆ Oxidação
- ◆ Hidrólise
- ◆ Radiação eletromagnética
- ◆ Degradação térmica
- ◆ Desidratação

b) Fenômenos físicos

- ◆ Desintegração ou degradação da natureza física, em virtude de absorção, permeabilidade, ação de solventes, e outros.
- ◆ Distorção térmica (amolecimento).

São vários os mecanismos que, isolados ou combinadamente, podem atacar os polímeros. Entretanto, os pontos mais sujeitos ao ataque estão relacionados com as insaturações (C=C) e as ligações ésteres (O=C-O).

Basicamente as resinas que apresentam melhor comportamento sob ação de agentes agressivos possuem as seguintes características:

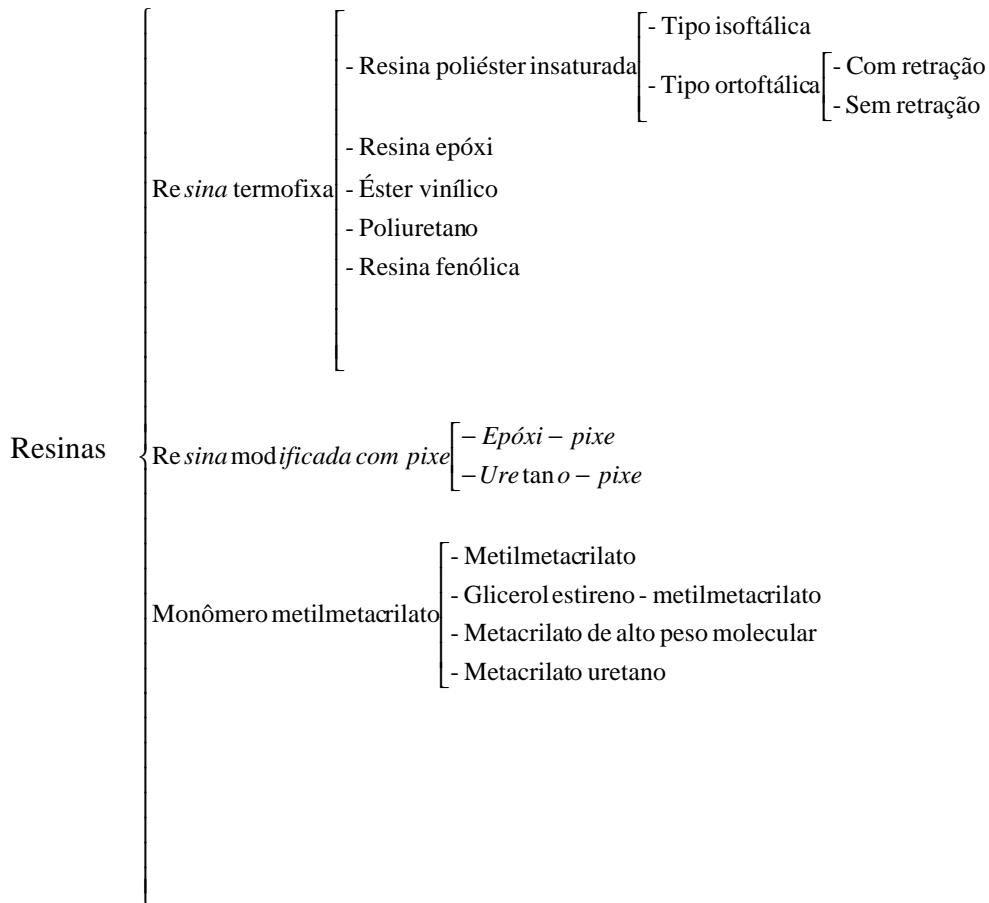
- ◆ Baixa densidade de grupos ésteres
- ◆ Alto peso molecular

◆ Maior quantidade de duplas ligações (C=C) antes da polimerização e menor quantidade após a polimerização

◆ Alto ponto de termodistorção.

Além destas características, outros fatores importantes devem ser considerados para se selecionar um material polimérico para utilização em ambientes agressivos. Por exemplo: o tipo de polímero, o tipo de agente agressivo, e a concentração e temperatura das soluções.

O esquema apresentado na figura 2.3 apresenta a classificação e as resinas comumente utilizadas na produção de concretos com aglomerante polimérico.



**Figura 2.3** Resinas mais utilizadas em concreto polímero e suas classificações (OHAMA,1997).

## 2.5 Aspectos químicos dos materiais constituintes do sistema aglomerante

Apesar da produção do concreto polímero ser relativamente simples, onde se mistura ao sistema agregado o aglomerante, similar ao processo de produção do concreto de cimento Portland, o concreto polímero envolve uma química refinada, pois para que ocorra o endurecimento da resina (polimerização), são necessários aditivos. Portanto, na utilização dos compostos de concreto polímero, torna-se importante o treinamento de pessoal, levando-se em consideração as questões de saúde e de tempo de aplicação destes compostos, que são de cura rápida.

Os produtos químicos requeridos para produção do concreto polímero são relativamente novos para a indústria da construção. Portanto é importante que os construtores que os utilizem tenham um bom conhecimento de suas propriedades, o que possibilitará a obtenção dos resultados esperados nas aplicações, e uma utilização segura do concreto polímero.

### 2.5.1 Monômeros

Segundo DIKEON e KAEDING (1992), os monômeros podem ser utilizados sozinhos ou misturados em concreto polímero. Eles são líquidos voláteis, combustíveis e tóxicos. Entretanto, a prática tem demonstrado que eles apresentam prolongada estabilidade, desde que sejam tomadas precauções na sua estocagem e manuseio. Alguns dos monômeros amplamente utilizados em concretos poliméricos são: o metil metacrilato (MMA), o butil acrilato (BA), o estireno e uma solução de poliéster insaturado em monômero estireno. É importante que os fabricantes apresentem junto do produto as instruções para o manuseio e os cuidados que devem ser observados quando da utilização dos mesmos.

FOWLER (1976), ao perceber que aumentava o interesse pela utilização dos compostos de concreto polímero, preocupou-se com a química que envolve a produção dos mesmos, e realizou uma ampla pesquisa sobre as propriedades químicas dos monômeros, iniciadores e aceleradores. Deste estudo resultaram as seguintes informações:

a) os principais fatores que influenciam na estabilidade dos monômeros e determinam os métodos seguros para o manuseio são:

- nível e efetividade de inibidores
- temperatura de estocagem
- flamabilidade e combustibilidade
- toxicidade
- efeito nos materiais de construção com os quais serão usados (compatibilidade).

b) efeitos secundários a serem considerados incluem sensibilidade à luz, à mistura e oxigênio. O odor pode causar problemas indiretos devido ao desconforto, porém não acarreta riscos físicos.

É importante salientar que na produção de concreto polímero são necessários alguns cuidados na utilização do aglomerante e aditivos. Durante a mistura e a moldagem deve-se utilizar máscaras dotadas de filtros para solventes orgânicos, em virtude da presença do solvente estireno na composição, e luvas face à grande aderência que exibem os polímeros utilizados.

### **2.5.2 Inibidores**

Para prevenir a polimerização prematura, a maioria dos monômeros contém algum inibidor que são adicionados pelos fabricantes, sendo em geral do tipo capturadores de radicais livres. Mais especificamente, eles servem para duas funções: a primeira, reagir com o radical livre e desativá-lo, impedindo o crescimento da cadeia polimérica, e a segunda, reagir como antioxidante e prevenir a polimerização por reação com produtos da oxidação, os quais podem ser formados na estocagem através de contaminação ou por formação de peróxidos por reação com o oxigênio do ar.

O Metilmetacrilato é freqüentemente inibido com o metil éter da hidroquinona (MEHQ) em níveis que alcançam de 10 a 100 ppm. Estireno e o sistema poliéster-estireno podem ser inibidos com t-butil pirocatecol em níveis de 45 a 55 ppm e 10 a 20 ppm, respectivamente. Hidroquinona (HQ), em concentrações de 100 a 200 ppm, é usada para o trimetilolpropano trimetacrilato (TMPTMA). Salienta-se que o nível de inibidor deve ser mantido acima da concentração mínima exigida pelo fabricante todo o tempo, assegurando, deste modo, que não houve polimerização antes da utilização do monômero.

No caso de períodos prolongados de estocagem, o produto deverá ser submetido à análise periódica para verificar se já está ocorrendo o início da polimerização. Em caso positivo é necessária a introdução de inibidor e borbulhamento de ar através do monômero.

### 2.5.3 Iniciadores

Iniciadores, erroneamente chamados de catalisadores, são agentes que iniciam a reação de formação da cadeia polimérica por decomposição em radicais livres. Estes reagem com o monômero, efetivando o começo do crescimento da cadeia. A velocidade da reação de polimerização depende tanto da temperatura como da concentração do iniciador.

Os iniciadores geralmente utilizados nas polimerizações são os peróxidos orgânicos ou compostos nitrogenados contendo grupamentos azo ( $-N=N-$ ). Estes devem ser guardados em lugares frescos, longe de calor ou qualquer fonte de faísca e luz, bem como ser estocados separadamente, longe do monômero e, em particular, longe dos promotores ou outros materiais oxidantes. Iniciadores têm um tempo de vida limitado, portanto, perdem a eficiência com o tempo.

Os iniciadores mais usados na produção de materiais de concreto de polímero são os peróxidos, de metil etil cetona (PMEK), de benzoíla (BzP), o 2,2'-azobis(isobutironitrila) comumente abreviado como AIBN; e o 2,2-azobis-(2,4-dimetilvaleronitrila) (AMVN). A quantidade de iniciador empregada é calculada em relação ao monômero e situa-se na faixa de 0,5-4% (em massa).

O peróxido de benzoíla (BzP) é estável à temperatura ambiente, mas em altas temperaturas fica sujeito à decomposição. É caracterizado como explosivo, tanto através de choque como por ignição.

O peróxido de metil etil cetona (PMEK) é geralmente usado em solução a 60%. É considerado relativamente seguro, mas recomendam-se cuidados, devendo ser embalado e usado conforme recomendações do fabricante. A solução de PMEK é razoavelmente estável e pode ser guardada por longos períodos de tempo. Os peróxidos orgânicos em geral são materiais altamente oxidantes, também considerados de leve a medianamente tóxicos e altamente irritantes.

O mais reativo iniciador do tipo azo é o AMVN, e têm sido utilizado no concreto impregnado de polímero em campo. A estocagem e manuseio deste material deve ser mais cuidadosa do que para o AIBN. A temperatura de estocagem recomendada é de 0 a 10°C.

#### 2.5.4 Aceleradores

Aceleradores (também conhecidos como ativadores ou promotores) são geralmente usados nas formulações do concreto polímero (PC) quando se deseja que a polimerização ocorra a temperatura ambiente (25°C). O acelerador é um composto químico que aumenta grandemente a taxa de decomposição de iniciadores peróxidos. O sistema acelerador-iniciador pode ser empregado para se obter a polimerização além dos alcances comuns de tempos e temperaturas, como por exemplo em temperaturas inferiores a 0°C. Nestas temperaturas geralmente são necessárias maiores concentrações deste sistema para obtenção da cura.

Alguns dos aceleradores mais comumente usados são o naftenato de cobalto, a dimetil anilina (DMA) e N,N-dimetil-p-toluidina (DMT). O naftenato de cobalto é geralmente usado na conjunção com o PMEK para uma rápida cura do sistema poliéster-estireno. DMT e DMA podem ser empregados individualmente ou aliados ao BzP para cura do MMA.

Aceleradores são usados em quantidades menores comparadas ao monômero. Porém, devem ser manuseados similarmente aos monômeros, devendo ser estocados em lugares frios, fora de luminosidade direta, e nunca na mesma área dos iniciadores peróxidos. Recomenda-se que sejam tratados como combustíveis e materiais tóxicos.

Um cuidado particular a ser tomado é evitar a mistura direta dos aceleradores com iniciadores peróxidos, pois esta mistura pode reagir explosivamente. Aceleradores devem ser adicionados primeiramente ao monômero e homogeneizados. Então, apenas neste momento, pode ser adicionado o peróxido. Assim sendo, um procedimento altamente recomendado para mistura dos compostos de PC é o que segue: dividir o monômero em partes iguais, A e B. Adicionar o promotor à parte A e o iniciador à parte B. Tomar quantidades iguais da parte A (monômero com acelerador) e parte B (monômero com iniciador). Adicionar a parte B à parte A, procedendo em seguida à mistura.

## 2.6 Características dos polímeros

As propriedades das resinas a serem utilizadas em concreto polímero podem ser escolhidas conforme a aplicação que se deseja para o material a ser produzido. Assim, para os componentes pré-moldados, é relevante levar em consideração aspectos que conduzam a um material de alta resistência, alto módulo de elasticidade, boa estabilidade dimensional, baixo coeficiente de expansão térmica, e baixa retração. Para utilizações em revestimentos é importante gerar materiais com boa resistência, baixo módulo de elasticidade, boa resistência e aderência ao substrato.

O uso de resinas com baixa viscosidade (100 a 500 cps) é importante pois proporciona um melhor controle do endurecimento do concreto polímero. Para uma mistura de agregados bem compactada é importante a utilização de uma resina com baixa viscosidade, o que é indicado na produção de peças pré-moldadas, por exemplo. As resinas de viscosidade alta são mais indicadas na produção de revestimentos com várias camadas e quando se utiliza agregados irregulares (SPRINKEL,1997).

A tabela 2.4 apresenta algumas características, mecânicas e químicas, obtidas com vários sistemas de resinas. As descrições são bastante genéricas e incluem propriedades que podem ser conferidas pelo uso de aditivos.

**Tabela 2.4** Características gerais de alguns sistemas poliméricos (MANO,1985)

<b>Propriedades</b>	<b>Epóxi</b>	<b>Furano</b>	<b>MMA</b>	<b>Poliéster</b>	<b>Bis-fenol A Poliéster</b>	<b>Éster vinílico</b>
Módulo de elasticidade <math><6,2 \times 10^3 \text{ MPa}</math>	X		X	X		
Módulo de elasticidade >math>>6,2 \times 10^3 \text{ MPa}</math>	X	X	X	X	X	X
Resistência à ácidos fortes		X			X	X
Resistência às bases fortes	X				X	X
Resistência a solventes	X	X			X	X
Resistência química geral	X	X	X	X	X	X
Resist. Mecânica >math>>110 \text{ MPa}</math>	X		X			
Resistência à água		X	X	X		
Envelhecimento / Resistência à UV	X	X	X			
Conteúdo aglomerante <math>< 10\%</math>	X		X	X		
Baixa retração na polimerização	X					

Entre as resinas citadas na tabela 2.4, a resina de poliéster normalmente é a de menor custo, apresentando, porém, certa retração, a qual impõe algumas limitações quanto à sua utilização. Entretanto, ao combinar-se uma resina isoftálica com aditivos termoplásticos de baixa viscosidade torna-se possível eliminar completamente a retração no PC.

MAASS (1996) e ZALATIMO (1996), em seus trabalhos, relataram dados comparativos da retração entre uma resina epóxi, em geral de baixa retração, porém de custo elevado, e uma resina poliéster, que em geral apresenta certa retração, porém de baixo custo e resistências química e mecânica semelhantes às da resina epóxi. Os resultados indicaram que a retração do poliéster de baixa retração foi menor, comparando-se com a resina epóxi, no concreto polímero. As medidas da variação linear, foram de -0,0001 mm/mm para o PC de resina poliéster e de -



0,0027 mm/mm quando se trabalhou com epóxi. As medidas foram obtidas para um mês de idade.

A partir da otimização de uma formulação de concreto polímero, onde foi utilizado bom empacotamento dos agregados, adições como sílica microcristalina e um estudo do teor de aglomerante polimérico adequado, obteve-se um concreto polímero de baixa retração, que pode ser utilizado em máquinas-ferramentas em substituição aos metais fundidos principalmente, devido ao fato de o concreto polímero não sofrer corrosão, fazer bom amortecimento, ser resistente e não condutor. Este mercado vem se apresentando como um novo nicho da indústria do concreto polímero e está em crescimento, especialmente na Europa.

Outros estudos realizados em revestimentos de estradas e pontes sobre, o concreto convencional, tem demonstrado que o sistema de cura lento é mais favorável para utilização em revestimentos de concreto polímero, diminuindo a retração, a qual tem se mostrado mais relevante no concreto de baixa idade.

MAASS (1996) relata que dentre os polímeros utilizados na produção de concreto polímero, os que vem sendo mais utilizados são epóxi, o metilmetacrilato, e o sistema de resina poliéster insaturada e estireno.

Revestimentos poliméricos a base de resina epóxi são utilizados geralmente para proteger as construções contra a corrosão, entretanto, a fragilidade e o alto preço inicial do polímero restringem seu uso. A fragilidade do revestimento pode ser atenuada a partir da adição de um composto de baixo peso molecular à resina epóxi. A melhora nas propriedades físico-químicas pode se dar igualmente pela introdução de filers minerais à composição polimérica.

Segundo STEINBERG et al., (1968) os ésteres vinílicos são utilizados quando necessita-se de altas resistências e/ou quando resistência a altas temperaturas sejam requeridas em serviço.

De acordo com FAITELSON (1992), os compostos de concretos polímero produzidos com aglomerantes termoplásticos, como o metil metacrilato (MMA), são utilizados como pisos, e outras aplicações, onde se deseja resistência a ataques químicos. O aglomerante, e um filer mineral granular, são os componentes básicos da formulação. O uso do MMA é limitado pela flamabilidade e indesejável odor, que lhe são característicos. Por outro lado, sua utilização

proporciona boa trabalhabilidade e curas em temperaturas ambientais para argamassa e concreto polímero.

OHAMA (1992) mostra em seu trabalho que a escolha do aglomerante(resina) é dependente do tipo necessidade do usuário e da disponibilidade local da matéria prima, assim:

No Japão a resina epóxi, o sistema poliéster-estireno, os ésteres vinílicos e o monômero metil metacrilato, vem sendo os mais empregados nas argamassas poliméricas, enquanto que a resina de poliéster insaturada é a mais utilizada nos concretos poliméricos.

O monômero metil metacrilato, e a resina poliéster instaurada, normalmente, de mais baixo custo, são utilizadas em grandes proporções nos Estados Unidos, e no oeste Europeu. Porém, também a resina epóxi apresenta boa aceitação nestes locais.

As resinas furânicas têm sua maior aplicabilidade em concretos poliméricos na União Soviética e no Oeste Europeu.

CZARNECKI (2001), considera que um dos principais campos de pesquisa do momento está em busca de novos aglomerantes poliméricos. Segundo o autor além das resinas epóxis, poliéster e metilmetacrilato, outras como por exemplo, os ésteres vinílicos serão utilizadas em concreto polímero.

## **2.7 Controle de qualidade das resinas, padronizações e eventos do concreto polímero**

Nos últimos anos , vem crescendo o interesse pelo concreto polímero no mundo inteiro, e desde 1967, vários simpósios e congressos internacionais tem discutido o assunto. Até o momento já ocorreram dez ICPIC(*International Congress on Polymers in Concrete*). As datas e locais dos eventos estão listadas a seguir:

1. Londres (Inglaterra),1975 (*The Concret Society*);
2. Austin (Estados Unidos), 1978 (Universidade do Texas em Austin);
3. Koriyama (Japão), 1981 ( Universidade Nihon);
4. Darmstadt (Alemanha Ocidental), 1984 (*Technische Hochschule Darmstadt*);
5. Brighton (U.K.), 1987 (*Brighton Polytechnic*);
6. Shanghai (China), 1990 (Universidade Tongji);

7. Moscou (Russia), 1992 (*NIIZHB - Scientific Inst. for Concrete and Reinforced Concrete*)
8. Oostende (Bélgica), 1995 (*Katholieke universiteit Leuvin, Royal Flemisch Soc Engrs*)
9. Bologna (Itália), 1998 (Universidade de Bologna)
10. Honolulu (Hawaii). Este foi o último ICPIC e ocorreu entre os dias 21 e 24 de Maio do ano 2001. O evento teve como abordagem "Polymers in Concrete in the Third Millennium: Challenges and Opportunities". Os trabalhos aceitos para este evento, foram distribuídos entre as seguintes áreas: reparos, construção, compostos de polímero, pisos industriais, concreto polímero, concreto modificado por polímero, análise e aplicações estruturais, pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para engenharia.

Segundo OHAMA (1997) existe um interesse mundial em compostos de concreto polímero, o que justifica na última década terem ocorrido, além dos congressos internacionais, outros eventos como simpósios e workshops na área de concreto polímero. Por exemplo em:

- Bochum, na Alemanha, 1991 (*International Symposium on Concrete-Polymer Composites*);
- San Francisco, Estados Unidos, 1991 (*ACI - North American Workshop on Polymers in Concrete*);
- Johannesburg, Africa do Sul, 1992 (*Second Conference on Polymers in Concrete*);
- Salvador, Brasil, 1993 (*ICPIC / IBRACON Workshop on Polymers in Concrete*);
- Chuncheon, Korea, 1994 (*First East Asia Symposium on Polymers in Concrete*).

Ainda dos trabalhos de OHAMA (1992), DIKEON e KAEDING (1992) resultaram as seguintes informações a respeito da padronização e transferência de informações sobre concreto polímero:

Na Europa, o comitê técnico (TC)-105-CPC (compostos de concreto polímero) da União Internacional de Testes e Pesquisas Laboratoriais para Materiais e Estruturas (RILEM) está ativa na preparação do estado da arte e terminologias para os compostos de concreto polímero. A RILEM TC-113-CPT (Métodos para Testes em Compostos de Concreto Polímero) está preparando vários métodos de testes para compostos de concreto polímero, principalmente para argamassa e concreto modificado por polímero, e argamassa e concreto polímero.

Nos Estados Unidos, o comitê 548, de "Polymers in Concrete" do American Concrete Institute (ACI), tem mantido um simpósio a cada dois ou três anos, publicando os respectivos artigos. O comitê tem também publicado o estado da arte e guias para usuários. A American

Society for Testing and Materials (ASTM), estabeleceu o subcomitê C 09.03.19 para concreto modificado por polímero, e tem também publicado muitas padronizações para argamassa de polímero.

No Japão, o Comitê da Society of Materials Science (JSMS), e o comitê Polymers-in-Concrete criaram a Associação de Transferência de Tecnologia (JTS), que estão atualmente liderando a normatização no campo dos compostos de concreto polímero. Outros órgãos competentes tem emitido guias , normas, e elaborado o estado da arte para compostos de concreto polímero, como: Architectural Institute of Japan (AIJ), Japan Concrete Institute (JCI).

Nos países onde os compostos de concreto polímero estão sendo pesquisados e utilizados, os trabalhos de padronizações de métodos e testes e o controle de qualidade estão progredindo cada vez mais, como acontece nos Estados Unidos, Japão, e Reino Unido. A Japanese Industrial Standards (JIS), e British Standards (BS) tem feito várias publicações para compostos de concreto polímero.

Nos Estados Unidos, um número grande de especificações têm sido publicadas para o uso da resina epóxi na construção, incluindo as duas publicadas pela U. S. Army Corps of Engineers, MMM-3-3500 e MMM-G-650.

SPRINKEL (1997) observou que alguns testes, por exemplo o de permeabilidade aos íons cloretos, tem seguido normas da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)(R,R1). O American Concrete Institute desenvolveu em 1994 um guia para concreto polímero, que vem sendo bastante utilizados pelos pesquisadores. A Associated General Contractors of America (AGC) e a American Road and Transportation Builders Association (ARTBA) publicaram em 1995, especificações das características necessárias para revestimentos de pontes em concreto polímero.

OHAMA(1997) em seu trabalho de pesquisa, fez um levantamento dos avanços obtidos com relação aos compostos concreto polímero em alguns países. O autor salienta que a normatização e o requerimento de qualidade estão progredindo, conforme pode-se observar nas seguintes tabelas.

A tabela 2.5 mostra as padronizações nacionais e as regulamentações governamentais para compostos de concreto polímero e a tabela 2.6 apresenta as principais instituições padronizadoras, as especificações e guias para compostos de concreto polímero em países desenvolvidos.

**Tabela 2.5** Padronizações nacionais e regulamentações governamentais para compostos de concreto polímero em países desenvolvidos (OHAMA,1997).

<b>Tipo de padronização ou regulamento</b>	<b>Tipo de concreto polímero</b>	<b>Designação</b>
Padonizações nacionais	JIS	PMC e PC JIS A 1171 ~1174, 6203, 6909, 6916 JIS A 1181 ~1186, 5350
	ASTM	PC ASTM C 267, 307, 3087, 321, 395,399, 413, 531, 579, 580, 658, 881, 882, 884, 905 ASTM D 3262, 3517, 3840
	BS	PMC e PC BS 6319 parte 1 ~12
	DIN	PC DIN 51290
	GOST	PC GOST 25246-82, 25991-83
Regulamentações governamentais	Ministério Federal dos Transportes	PMC TP BE-PCC, TL BE-PCC
	Regulamentação técnica (Alemanha)	PC TP BE-PC, TL BE-PC
	Guia CIS (Russia)	PC VSN-12-84, SN-525-80

**A tabela 2.6** Principais instituições padronizadoras, as especificações e guias para os compostos de concreto polímero nos países desenvolvidos (OHAMA,1997).

<b>Instituição</b>	<b>Tipo de concreto polímero</b>	<b>Designação ou título</b>
JCI (Japan)	PMC	JCI Padronizações para métodos de teste de argamassa modificada por polímeros 1 -17
SPI (EUA)	PC	SPI Métodos de testes para concreto polímero 1,0 - 7,0, 9,0-11,0, 13,0-14,0
ACI (EUA)	PMC	ACI 548.4 Especificações padronizadas para concreto modificado por látex (LMC). Recomendações de revestimentos para estruturas de concreto polímero de resina poliéster
JSMS (Japão)	PC	Recomendações para estruturas de concreto polímero de resina poliéster Guia para tipos de misturas de concreto polímero de resina poliéster
AIJ (Japão)	PMC, PC e PIC	Guia para uso ou execução de compostos de concreto polímero
ACI (EUA)	PMC, PC e PIC	ACI 548.1 R Guia para a utilização de concreto polímero
	PC	ACI 548.5 R Guia para revestimentos de concreto polímero

## 2.8 Concreto impregnado de polímero

### 2.8.1 Introdução

De acordo com DIKEON (1992) a primeira amostra de concreto impregnado de polímero foi produzida no Brookhaven National Laboratory em 1965 e as primeiras medidas das propriedades físicas e durabilidade foram realizadas em 1966 pela U. S. Bureau of Reclamation. A notável medida de 141 MPa na resistência à compressão e o grande aumento na durabilidade veio a impressionar os pesquisadores que, até 1965, conheciam resistência à compressão máxima para o concreto de 35,3 MPa e durabilidade na ordem de apenas centenas de ciclos. Devido a estes resultados promissores a Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos, o Departamento de Águas Salinas, a Administração Federal de Auto-estradas, e outros órgãos nos Estados Unidos e em outros países passaram a desenvolver e aplicar estes materiais.

### 2.8.2 Métodos de produção

Segundo STEINBERG (1973) o concreto impregnado por polímero é basicamente formado por secagem do concreto convencional, e curado pelo método que seja mais conveniente, removendo-se ou deslocando-se o ar dos vazios abertos (vácuo ou injeção de monômero sob pressão), difundindo-se o monômero de baixa viscosidade através destes vazios, o qual satura o concreto e polimeriza in-situ por métodos como, radiação, calor, ou iniciação química. Normalmente, o processo de polimerização se dá via radical livre, utilizando-se monômeros vinílicos, como MMA, estireno, acrilonitrila, t-butil estireno e outros monômeros termoplásticos. O trimetilpropano trimetacrilato (TMPTMA) serve como agente de cruzamento, bem como é utilizado também para diminuir o tempo de polimerização.

De acordo com FOWLER (2001), o tempo consumido, pelo longo período de secagem do concreto com temperaturas atingindo 120 °C ou mais, e ainda, depois desta etapa, necessita ser resfriado antes de receber a introdução do monômero. O monômero é introduzido durante horas e uma camada fina de areia é ainda colocada na superfície. Após é feita a cura com temperaturas elevadas. Para todo este processo são utilizadas 48 horas. Outro fator a ser considerado é a inflamabilidade do monômero, sendo necessário a utilização com cuidado.

Segundo o autor em função deste processo complicado e demorado, outros materiais competem perfeitamente com o PIC. Revestimentos de concreto polímero podem ser aplicados, utilizando tecnologia prática, atingindo bons resultados. Concretos de cimento e polímero preparados adequadamente para as devidas aplicações e pré-moldados de concreto polímero são materiais de grande durabilidade e resistência.

### **2.8.3 Propriedades do material**

TEZUKA (1988) considera que o concreto impregnado de polímero é um pré-moldado de concreto de cimento hidratado e curado, o qual foi impregnado com um monômero de baixa viscosidade e subsequentemente polimerizado *in situ*. Um grande aumento nas propriedades estruturais e na durabilidade tem sido obtido com o concreto impregnado de polímero (PIC). Além da resistência à compressão, a absorção de água é reduzida em 99% e outras propriedades são significativamente melhoradas. Segundo a autora, o mecanismo de formação do sistema do concreto polímero e o fenômeno físico-químico são muito complexos portanto, ainda não estão bem claros. Estes processos, são conhecidos apenas de maneira geral, baseados nas observações dos fenômenos externos. Um dos principais fatores no controle das propriedades do PIC é a porosidade.

## **2.9 Concreto modificado por polímero ou concreto de cimento e polímero**

### **2.9.1 Generalidades**

Para STEINBERG (1973) e TEZUKA(1988) o concreto de cimento e polímero é uma pré-mistura da pasta de cimento e agregados na qual um monômero é adicionado antes do assentamento e da cura. Em outras palavras, o concreto de cimento e polímero (PCC) é um material onde o aglomerante é formado por dois componentes ativos, sendo um o cimento Portland e o outro é uma dispersão polimérica em água, como o látex SBR (borracha de butadieno-estireno), emulsão de éster poliacrílico (PAE). Segundo os autores, as propriedades dependem grandemente da compatibilidade entre estes dois componentes. Os resultados obtidos no que se refere ao aumento de resistência e durabilidade são um pouco modestos. Em excelentes



condições o aumento na resistência à compressão têm sido de 50% sobre o concreto convencional com concentrações de polímeros relativamente altas, em torno de 30%. Sistemas poliéster-estireno, epóxi-estireno, monômeros furânicos e o cloreto de vinilideno têm sido empregados, e atingem limitado sucesso. Isto ocorre pelo fato de que os materiais orgânicos são incompatíveis com sistemas aquosos e na maioria dos casos, interagem com o processo de hidratação do cimento alcalino. O incentivo para produção destes materiais está vinculado ao fato de que estes podem ser moldados no próprio local das aplicações em campo, enquanto o PIC requer uma estrutura pré-moldada.

Entretanto, de acordo com POPOVICS (1992) os estudos comprovaram que o aumento na qualidade do concreto, no que se refere a resistência quando se utiliza a resina epóxi no concreto modificado, é bastante superior comparando-se com concreto convencional e com o concreto modificado por látexes.

Em levantamento realizado por OHAMA (1997), abrangendo as últimas cinco décadas, verifica-se que um grande número de pesquisas e aplicações vem ocorrendo na área de concretos e argamassas modificadas por polímeros. Estes materiais começaram ser utilizados em grande quantidade na indústria da construção a partir de 1980, e atualmente são utilizados como materiais de construção popular em certos países desenvolvidos, como Japão e Estados Unidos.

Segundo FOWLER (2001), argamassas de cimento e polímero tem sido amplamente utilizadas em reparos de garagens e tabuleiros de pontes. As argamassas "spray" tem sido aplicadas em superfícies verticais e em reparos gerais no concreto de cimento. Este sistema foi desenvolvido, em virtude de não ser possível a utilização de mangueiras longas para aplicação das argamassas poliméricas devido sua rápida cura. Este sistema sido bastante utilizado como adesivos de cerâmicas para pisos.

De acordo com FOWLER a argamassa de cimento e polímero talvez venha a ser o material mais promissor da área de concreto polímero. Isto deve-se ao fato de se utilizar menor teor de resina comparada ao concreto polímero e por ser produzida com tecnologia semelhante a da produção do concreto de cimento Portland.

## 2.10 Concreto Polímero

### 2.10.1 Generalidades

O concreto polímero é um material composto produzido com uma resina (monômero ou prepolímero) e materiais inorgânicos (agregados graúdos, areia e fílers como a cinza volante). Os agregados e fílers devem estar secos, a fim de garantir uma boa ligação entre a matriz polimérica e os agregados. A resina líquida, previamente tratada com aditivos, é misturada com os agregados e o fíler e segue-se uma reação de polimerização. A cura é controlada pelo teor de aditivos adicionados ao aglomerante (TEZUKA, 1988).

Este material é chamado de concreto, segundo VIPULANANDAN E DHARMARAJAN (1987), devido à definição geral, onde concreto consiste de um agregado qualquer ligado por um aglomerante. Os principais parâmetros de produção do PC visam minimizar o volume de vazios na massa do agregado, como também reduzir a quantidade de polímero necessária para ligação do agregado, reduzindo o custo do concreto polímero. Isto pode ser obtido por classificação e mistura dos agregados, a fim de minimizar o volume de vazios. Segundo os autores pode-se obter um volume de vazios menor do que 20%, com a seguinte mistura de agregados: agregado graúdo 9,5 - 12,7 mm (60,7% em massa), agregado miúdo entre as peneiras ASTM 20-30 (6,1%), os quais são misturados e vibrados juntos em um molde. O monômero então é difundido através dos agregados e a polimerização é iniciada por radiação ou por um método químico.

Para REBEIZ e FOWLER (1991), a composição do concreto polímero deve ser formulada levando-se em consideração a trabalhabilidade, a resistência e economia, juntamente com o interesse de aplicação. Por exemplo, uma mistura com 10% de resina, 45% de pedra britada, 32% de areia e 13% de cinza volante é adequada para aplicações em pré-moldados. Já para os revestimentos a quantidade de resina e tipo de agregados devem mudar. Pode-se utilizar um teor de 20% de resina, 60% de areia e 20% de cinza volante, percentuais em massa. Obviamente, em todos os casos, devem ser levadas em consideração as características químicas e físicas do aglomerante e as características dos materiais secos.

Em alguns casos são utilizadas fibras para reforço, tais como as fibras de vidro. Estas passam a fazer parte da composição do concreto polímero, especialmente em compostos pré-

moldados para aplicações nas estruturas hidráulicas, as quais vem sendo produzidos nos Estados Unidos desde a última metade da década de 70 (FOWLER,1988). Vigas de concreto polímero, de alta resistência, duráveis, impermeáveis e de cura rápida, também estão sendo produzidas utilizando aço como reforço (REBEIZ e FOWLER,1996).

O interesse no desenvolvimento do PC, conforme relatam STEINMBERG (1973) e KUKACKA e ROMANO (1973), justifica-se pela necessidade de contornar alguns inconvenientes do concreto convencional. O concreto de cimento Portland tem pH alcalino em virtude da formação de produtos de hidratação, como os hidróxidos de metais alcalinos e alcalinos terrosos. O concreto, em contato com meios ácidos, tende a reagir reduzindo o pH e, conseqüentemente, despassivando a armadura e ainda perdendo massa e resistência. Entretanto, com um aglomerante polimérico, grande parte destas dificuldades tendem a ser eliminadas: o polímero pode ser compactado com um mínimo de vazios e a maioria dos polímeros são hidrófobos e resistentes ao ataque químico.

A maioria dos problemas que podem ocorrer nos concretos poliméricos originam-se das propriedades viscoelásticas do polímero. Os polímeros termoplásticos usualmente tem um baixo módulo de elasticidade, o que significa que são flexíveis e exibem propriedades de deformação. Por isto, principalmente, os plásticos não costumam ser empregados em elementos estruturais, sem a presença de um filer, de agregados, ou de ambos (STEINMBERG, 1973). Entretanto os polímeros termorrígidos, em virtude das reticulações, exibem baixa fluência e altos valores de módulo de elasticidade.

Para REBEIZ e FOWLER (1991), as resinas de baixa viscosidade são as mais indicadas na produção de concreto polímero, pois apresentam maior capacidade de molhabilidade e conseqüente trabalhabilidade, com isto proporcionando uma boa razão agregado/resina, o que auxilia no aspecto econômico. Entretanto, deve-se levar em consideração também que os agregados apresentam um maior módulo de elasticidade que o sistema aglomerante, o que diminui o coeficiente de expansão térmica, pois os agregados tem coeficiente de expansão térmica menor que o aglomerante e, conseqüentemente, sua incorporação propicia um decréscimo na retração e liberação de calor. Outro fator importante é o teor de resina. Quando se utilizam menores teores de resina diminuem também aqueles efeitos provocados pela temperatura gerada durante a reação(reação exotérmica) de polimerização, auxiliando nas propriedades de

resistência. Finalmente, vale ressaltar que para aumentar a resistência da ligação entre a matriz macromolecular e os agregados, pode-se adicionar um agente de acoplamento silano ao monômero (KUKACKA e ROMANO, 1973).

AHN e FOWLER (2001), em recente pesquisa, analisaram o efeito de compostos metálicos como o diacrilato de zinco(ZDA) e o diacrilato de cálcio(CDA) nas propriedades mecânicas de concretos poliméricos produzidos com dois tipos de resinas epóxi e agregados úmidos. Os autores observaram que o ZDA melhora a trabalhabilidade e o aumenta o tempo de utilização do concreto polímero em obra, e o CDA proporciona aumento nas resistências à compressão e tração na flexão.

### **2.10.2 Materiais utilizados na produção de concreto polímero**

De acordo com MANO (1985) e SPRINKEL(1997), uma ampla variedade de componentes pode ser combinada na formulação de um concreto polímero, por isto os pesquisadores continuam investigando para que se possa maximizar as propriedades produzindo materiais visando as aplicações cujas demandas crescem cada vez mais. A seguir serão listados alguns sistemas de resina e de agregados utilizados atualmente em concreto polímero, com quais obtêm-se bons resultados.

#### **a) Tipos de aglomerantes e aditivos**

- (a) resinas de poliéster instaurada dissolvida em estireno
- (b) epóxi
- (c) metil metacrilato
- (d) poliuretano
- (e) epóxi - uretano
- (f) agentes de cruzamento: Divinilbenzeno; Trimetilol Propano Trimetacrilato
- (g) agente de acoplamento silano:  $\gamma$ -metacriloxipropiltrimetoxisilano
- (h) Iniciadores: Peróxido de Metil etil Cetona; Azobi(isobutironitrila)
- (i) aceleradores: N-N-Dimetilanilina, e Naftenato de cobalto.

Em geral, segundo TEZUKA (1977) e OHAMA (1973), as propriedades do concreto polímero estão bastante relacionadas com as propriedades do agente aglomerante, ou seja, as propriedades correspondentes das resinas utilizadas na sua produção. A quantidade do aglomerante determina a influência das propriedades da resina nas propriedades do concreto.

## **b) Agregados e fílers**

(a) agregados naturais (areia e pedra) normalmente utilizados no concreto convencional (granito, calcário e basalto)

(b) cinza volante

(c) carbonato de cálcio

(d) sílica microcristalina

(e) fibras de vidro

(f) fibras de aço

As propriedades do concreto polímero estão ligadas à forma dos grãos, à natureza mineralógica, à química dos agregados à elevada resistência das resinas. Em todos os casos, a ruptura do concreto polímero ocorre por quebra dos agregados. Assim sendo, eles devem ser particularmente resistentes. A granulometria dos materiais inertes é de importância fundamental no caso de concreto polímero, não apenas do ponto de vista da resistência mas, principalmente, do ponto de vista do consumo de aglomerante (TEZUKA, 1979). Particularmente em relação à areia, segundo a autora, sua natureza e origem não são fatores essenciais, necessitando apenas que seja provada a sua alta resistência e que apresente partículas razoavelmente arredondadas. De modo geral pode-se dizer que as areias utilizadas em concreto convencional servem também para o concreto polímero.

OHAMA (1992) e (1976) relata que, além dos agregados miúdo e graúdo, nos concretos poliméricos são normalmente introduzidos fílers de baixa granulometria para melhorar a tixotropia do material. O fíler vai aumentar a coesão do concreto polímero, impedindo a segregação dos materiais constituintes da formulação, que é causada pela diferença substancial entre a massa específica dos agregados e a massa específica da resina, que é bem menor. Outros motivos pelos quais se utilizam os fílers são a melhora na trabalhabilidade da mistura fresca e o

aumento na resistência mecânica do concreto polímero. São empregados como fílers, normalmente, o carbonato de cálcio, a sílica e a cinza volante. Para MAASS (1996), o pequeno tamanho das partículas que compõem os fílers fazem aumentar a área superficial. Portanto, a utilização destes em grandes quantidades pode resultar em aumento do consumo do aglomerante polímero. Os fílers são mais importantes em termos de fluência, resistência e textura. Adições de sílica microcristalina, que apresentam um grande área superficial, tem produzido concretos de maior módulo de elasticidade.

Conforme relatou TEZUKA (1977), outros fatores que influenciam nas propriedades do concreto polímero são:

a- condições de endurecimento: condições nas quais o concreto polímero é colocado para endurecer, que determina o estado de tensão interna inicial no material;

b- mecanismo de interação do material e o meio circundante: o meio ambiente tem uma influência decisiva sobre o concreto de resina e governa o desenvolvimento do estado de tensões internas secundárias no concreto polímero.

OHAMA (1977) relata alguns importantes avanços realizados na última década na área de concretos e argamassas de polímero, que se encontram sumarizados na tabela 2.7.

**Tabela 2.7** Pesquisas e desenvolvimentos mais recentes em concretos e argamassas de polímero (OHAMA, 1997)

Tópicos	Pesquisas e desenvolvimentos
1. Novos tipos de resinas líquidas para PC e PM	1.1 Desenvolvimento de aglomerantes metilmetacrilato de alto peso molecular, monômero acrílico de baixo odor e e uretano metacrilato. 1.2 Desenvolvimento de resina poliéster com baixo teor de estireno e baixa emissão de estireno. O poliéster de baixa emissão tem o estireno substituído completamente ou parcialmente por tolueno ou para-metil estireno. 1.3 Desenvolvimentos de compostos ou resinas líquidas combinadas, formadas por poliéster e monômeros vinílicos.
2. Estudo de dosagens para PM e PC	2.1 Dosagens para argamassas e concretos de resina poliéster. 2.2 Dosagens de concreto e argamassa de polimetilmetacrilato 2.3 Desenvolvimento de mistura pronta de concreto de resina poliéster.
3. Projeto de estruturas de PC e PM	3.1 Tipos de equações recomendadas para explicar o cisalhamento, a resistência à flexão de concreto e argamassa de polímero reforçados. 3.2 Proposta de padronização da performance para PM e PC reforçados. 3.3 Prognóstico de resistência do concreto de resina poliéster envelhecido.
4. PC e PM reforçados	4.1 Fibras de aço ou lã de vidro para reforço de PM e PC. 4.2 Concreto de resina epóxi reforçado com barras de aço. 4.3 Desenvolvimento de concreto de poliéster reforçado ou pré-tensionado com barras tubulares de plástico reforçado com fibra usando fibras de carbono ou de vidro.
5. Baixa temperatura de cura do PC e PM	5.1 Temperatura de cura de 0-25°C de argamassa de polimetilmetacrilato e concretos utilizando metil metacrilato, uretano metilmetacrilato e glicerol metilmetacrilato-estireno.
6. Durabilidade do PC a longo prazo	6.1 Durabilidade das argamassas e concretos de poliéster e polimetilmetacrilato. 6.2 Experiência de 30 anos com concreto de resina epóxi em estruturas hidráulicas.
7. Sistemas de aplicações automatizadas do PC e PM	7.1 Sistemas automatizados para o lançamento das argamassas e concretos de polímero. 7.2 Desenvolvimento de misturadores automatizados e pavimentação contínua para revestimentos de concreto polímero.

OHAMA(2001) mostra, em seu trabalho, uma forte tendência das pesquisas direcionadas ao desenvolvimento sustentável dos compostos de concreto polímero. Segundo o autor, nos últimos anos vem aumentando muito a consciência de proteção ambiental e os compostos de concreto polímero sustentáveis tem sido desenvolvidos com grande interesse.

Dentre os compostos apresentados por OHAMA, encontram-se:

O concreto de cimento e resina epóxi sem a utilização de aditivos para auxiliar no endurecimento, como as poliaminas e poliamidas que são tóxicas e podem dificultar a hidratação do cimento. Ao invés destes, são utilizados, para reação de abertura do anel, os álcalis ou íons hidróxidos, que são produzidos na hidratação do cimento. Segundo o autor, um aumento na resistência à tração na flexão e uma grande diminuição na penetração dos íons cloretos e na carbonatação se dá quando a relação polímero/cimento é superior a 20%. Além deste, o autor cita o concreto modificado por polímero permeável, os materiais de reparo utilizando argamassa modificada por polímero para estruturas de concreto reforçadas, o concreto impregnado por polímero utilizando silanos, os materiais cimentícios com polímeros superabsorventes e os compostos produzidos com gesso e misturas de polímeros altamente resistentes à água.

### **2.10.3 Procedimentos para mistura e adensamento**

Os concretos poliméricos são tipicamente produzidos pela combinação de aglomerantes poliméricos e agregados com granulometrias e empacotamento previamente definidos.

De acordo com REBEIZ et al.(1992), deve-se lembrar que os agregados devem estar secos, ou com teor de umidade não excedendo a 1%, e em alguns casos, como para revestimentos, as especificações são de que o agregado não deve exceder 0,2 % de umidade para ser utilizado na produção do concreto polímero. O sistema de agregados, constituído normalmente por areia de sílica (angulosa-granulada) ou basalto devem ser preparados, e estar livres de sujeiras, argila, asfalto e outros materiais orgânicos. Deve-se selecionar as proporções em que se quer trabalhar, e subseqüentemente proceder-se à mistura deste sistema até que se atinja a homogeneidade do mesmo. No segundo momento prepara-se o sistema de resina, sendo adicionados iniciador e promotor à resina nas devidas proporções, procedendo-se então a mistura juntamente com os materiais agregados (materiais secos).



Segundo TEZUKA (1979) e FOWLER et al. (1978), dois métodos são comumente adotados para mistura dos agregados com a resina. O principal deles se baseia na adição do sistema de resina (resina mais iniciador e promotor) ao sistema de agregados, procedendo-se à homogeneização (mistura) por intermédio de misturador mecânico, até obter-se uniformidade na massa. Esta técnica têm sido utilizada em algumas situações, porém usualmente resulta na formação de bolhas de ar que ficam inclusas no concreto.

O segundo método, conforme relatam os autores, é usado exclusivamente quando se utilizam areias finas como agregados, e consiste em colocar a resina no molde e gradualmente adicionar os agregados. A mistura, que é consolidada por vibração mecânica, produz, normalmente, peças mais uniformes e com um mínimo de ar incorporado.

Para TEZUKA (1979) e FOWLER et al. (1978), as propriedades do concreto polímero são consideravelmente influenciadas pelo método de preparação da mistura. A escolha de um processo de produção deve levar em consideração os aspectos econômicos, com baixo investimento, utilizando a mesma tecnologia do concreto de cimento para proceder a mistura, tendo menor capacidade de produção com mão de obra ou ainda, um alto investimento com misturadores específicos para concreto polímero, obtendo-se maior capacidade de produção com necessidade de menos pessoal e melhor qualidade do produto final.

KREIS(1991), ao pesquisar tipos de misturadores para concreto polímero, observou que as máquinas para mistura devem adaptar-se ao tipo de demanda e discutiu as vantagens e desvantagens dos tipos de misturadores. Deste estudo o autor relatou:

Existem dois métodos de produção para concreto polímero, o processamento em lotes (bateladas) e a produção contínua. Ambos apresentam suas vantagens, e obviamente suas desvantagens. No processo de mistura em bateladas (lotes), as diferentes matérias primas são pesadas e, após colocadas no misturador, para proceder à mistura por alguns minutos, normalmente em pouco tempo se tem uma boa mistura, em torno de três minutos. Neste tipo de processo o erro humano deve ser considerado, como erros de pesagens, bem como, dificuldades na reprodução da qualidade dos produtos. Estes problemas são mais evidenciados à medida que se utilizar coloração para mistura. Um dado importante neste tipo de produção, que deve-se ressaltar, é a necessidade da utilização de solventes para limpeza dos equipamentos, que criam problemas de armazenamento e requerem tempo para sua utilização. Um importante controle

deste processo é o do tempo de cura e a desmoldagem. Isto pode ser conseguido com grandes tempos de gelatinização, obtidos pelo uso adequado dos aditivos adicionados ao aglomerante.

Hoje, com a produção em massa de concreto polímero, existe uma adaptação dos maquinários de acordo com a demanda. No processo contínuo são produzidas misturas de concreto polímero, incluindo cores, mantendo as mesmas características. A operação contínua é adequada à produção em massa. Neste maquinário não somente se substitui a mistura em bateladas, como também, a máquina pesa a matéria prima, mistura, não importando o tipo e as proporções a serem utilizadas na formulação do concreto polímero. O processo contínuo significa um alto investimento e certamente seu uso só é justificado quando se quer produzir um grande número de peças.

A adição de pigmentos pode ser realizada por diferentes métodos, de acordo com as necessidades, na forma de pó(misturado nos agregados) ou em pasta. Cores contraste para obter efeito mármore ou onix são utilizadas na forma líquida ou pastosa e devem ser injetadas na argamassa polimérica já na máquina.

Devido às altas resistências à tração na flexão do concreto polímero, comparativamente ao concreto de cimento Portland, normalmente não são utilizados quaisquer reforços. Porém, se por alguma razão se fizer necessário, este tipo de máquina é equipado com cortadores de fibras de vidro, de aço e outros, o que permite segmentar o reforço.

Os moldes para concreto polímero podem ser produzidos de vários materiais, entre eles, madeira, aço, alumínio, plástico reforçado com vidro, silicone, polietileno e teflon. A escolha é realizada conforme a necessidade de produção. Para peças únicas pode ser utilizada madeira, pelo baixo custo. Para produções de variedade de peças, alumínio ou aço são mais apropriados pela durabilidade que apresentam. Para aplicações mais sofisticadas como as sanitárias, são utilizados os plásticos reforçados com vidro. A superfície do concreto polímero reproduz com exatidão a superfície do molde. Superfícies brilhantes podem ser obtidas utilizando-se moldes com superfícies brilhantes, não necessitando um polimento. Dependendo da produção é necessário uma boa escolha de desmoldante.

O concreto polímero exige uma boa compactação para obter boas qualidades do produto final. Isto pode ser realizado em mesa vibratória, por rotação, e através de vibradores

introduzidos nos moldes, entre outros. A força e a velocidade de vibração devem ser controladas e estão relacionadas com o que se deseja produzir. Em todos os casos, a compactação não deve causar a segregação dos materiais, e portanto os moldes não podem ser vibrados por longo tempo. O adensamento manual também pode ser utilizado, porém este é mais adequado aos trabalhos de laboratório, sendo importante neste caso manter-se a mesma força e velocidade, e para tanto o mesmo operador.

Nos dias de hoje, argamassas poliméricas vem sendo produzidas totalmente livres de vazios. Estes materiais são desenvolvidos para aplicações especiais. A retirada de gases do material deve ser realizada durante a preparação da mistura. Um equipamento degaseificador pode ser acoplado ao misturador produzindo vácuo. De acordo com KREIS (2001), os materiais submetidos a este tipo de produção tem uma superfície sólida, não necessitando de acabamento, como os "*gelcoat*", comumente utilizados. Neste trabalho, no qual foi produzido um concreto polímero com resina poliéster, constatou-se que houve um aumento de densidade de 10% comparado com concreto polímero que não foi degaseificado. Segundo o autor, esta é uma linha crescente nos Estados Unidos, e os produtos vem sendo comercializados para utilização em balcões de lojas e escritórios, em louças sanitárias e para painéis de paredes, entre outros.

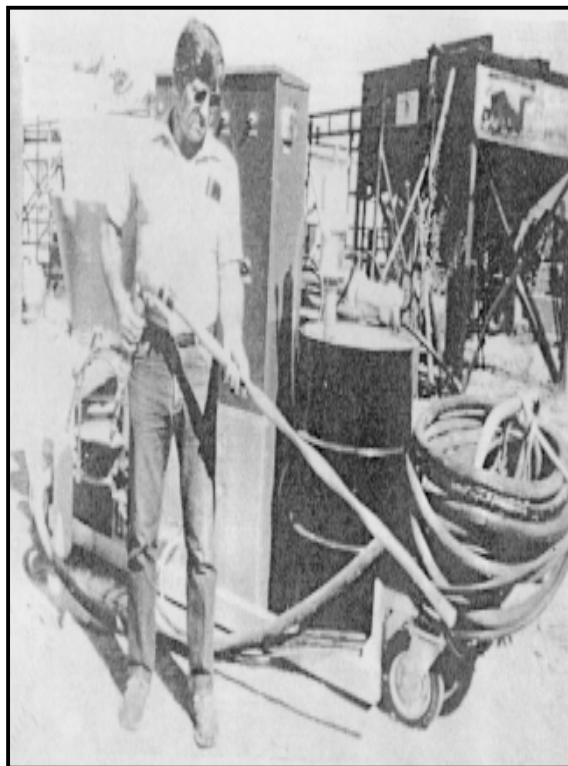
O concreto polímero atualmente é bastante utilizado como material de reparo para estruturas já existentes ou como proteção às novas, especialmente em ambientes agressivos. Em algumas destas aplicações, se faz necessário a aplicação vertical ou em superfícies irregulares. O melhor método é aplicação pulverizada (*spray*). Equipamentos tem sido desenvolvidos pois, nesta situação, os utilizados para os concretos convencionais não são adequados, por não ser possível transportar a argamassa polimérica pré-misturada em longas mangueiras em virtude da cura rápida desenvolvida por estes materiais.

Máquinas para lançamento de argamassas poliméricas tem sido especialmente desenvolvidas para uso de diferentes constituintes (fílers e normalmente para dois tipos de resinas) separados um do outro. A máquina está apta a operar com agregados miúdos e graúdos. A versão normal da máquina é projetada para dois líquidos, por exemplo, resina poliéster pré-acelerada e resina pré-catalisada ou resina poliuretano e epóxi mais endurecedor, entre outros.

As figuras 2.4 e 2.5 mostram dois tipos de misturadores, de concreto e argamassa polimérica.



**Figura 2.4** Misturador contínuo equipado para 02 tipos de fíler, resina, iniciador, acelerador e exaustor (KREIS 1991 )



**Figura 2.5** Misturador para pulverização de argamassa polimérica equipada para 02 tipos de fíler e dois tipos de aglomerante (KREIS 1991)

## 2.11 Aplicações dos compostos de concreto polímero

A seguir encontram-se relacionadas aplicações específicas dos materiais produzidos de concreto polímero. A variedade das aplicações justificam a multifuncionalidade destes compostos e o conseqüente investimento em pesquisas que diversos grupos vem realizando em grandes universidades e em outros centros de diversas partes do mundo.

### ◆ Pré- moldados

Os componentes pré-moldados, segundo FOWLER(1998) e REBEIZ e FOWLER (1991), foram introduzidos nos Estados Unidos em 1958 e continuam sendo utilizados em igrejas,

hospitais, sinagogas, bancos e outras construções. São tipicamente produzidos painéis isoladores de dupla face, numa variação de cores. O concreto polímero, nestas situações, é normalmente reforçado com fibras de vidro.

De acordo com FOWLER (1998) e REBEIZ e FOWLER (1991), os componentes pré-moldados estão se tornando bastante importantes na indústria do PC. O excelente tempo de cura destes materiais tornam rápido e eficiente o uso em blocos e outras facilidades, reunindo as ótimas propriedades de resistência e durabilidade que permitem o uso de seções finas reduzindo o peso próprio nas estruturas e minimizando o custo no transporte e na construção. A facilidade para utilização de cores e a variedade de formas proporcionam ao PC aparência muito atraente. Painéis de construção vem sendo produzidos há mais de trinta anos e utilizados como revestimentos simples, ou na forma de sanduíches. Componentes utilitários como drenos para rejeitos ácidos, depósitos subterrâneos, canos de esgotos e outros, também fazem parte da aplicação dos concretos poliméricos. Em certas aplicações, como postes para linhas de força, a alta resistência à flexão do PC pode eliminar a necessidade do uso de aço para reforço (se necessário o reforço utiliza-se vidro ao invés de aço devido à resistência elétrica). A ausência de água no PC e sua baixa permeabilidade, contribuem para excelentes propriedades dielétricas. Por exemplo, nos isoladores de alta voltagem, o PC vem sendo utilizado em substituição da porcelana com a vantagem das propriedades dielétricas e a capacidade de produzir peças com aparência lisa e lustrosa.

#### ◆ Revestimentos

O concreto polímero, segundo FOWLER (1998) e REBEIZ e FOWLER (1991), é um excelente material para os revestimentos devido a sua ótima ligação ao concreto de cimento Portland, resistência à abrasão e ao intemperismo, cura rápida, impermeabilidade, e baixo peso devido à pequena espessura que pode ser utilizada. Os monômeros e resinas mais utilizados são o sistema poliéster-estireno, epóxi, e os acrílicos.

Os revestimentos, de acordo com FOWLER (1998) e REBEIZ e FOWLER (1991), são utilizados para produzir superfícies (6 mm a 24 mm de espessura) sobre o concreto de cimento Portland. O revestimento fisicamente reforça a estrutura e proporciona muita resistência ao desgaste, baixa permeabilidade e superfície resistente aos ácidos. As fibras de vidro e de aço podem ser utilizadas para melhorar as propriedades. Nas pontes e pavimentações, o revestimento

proporciona baixa permeabilidade de água e cloretos. Portanto, auxilia na prevenção contra as fissuras e a deterioração do concreto, especialmente onde há períodos de congelamento e descongelamento ou temperaturas cíclicas, como também protege o aço que reforça o concreto contra ação corrosiva do meio.

#### ◆ Reparos

A necessidade de reparos rápidos e duráveis deve crescer futuramente, particularmente para infra-estruturas como auto-estradas, pavimentações, nos componentes para tratamentos de água e esgoto e estruturas hidráulicas.

O PC, sendo utilizado como material de reparo para o concreto, segundo os autores FOWLER (1998), REBEIZ e FOWLER (1991) e WHITE e MONTANI (1997), adquire excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade. Com isto, permitem o uso de menor quantidade de material e, portanto, minimizam o peso próprio. Em virtude de seu pequeno tempo de cura são reduzidos os problemas de desobstrução do trânsito, eliminando a necessidade de reconstruir tabuleiros próximos para as pontes, diminuindo também as atividades de manutenção e reparo. Sua cura rápida permite que se aplique o PC durante a noite e a pavimentação ou ponte possam retornar ao tráfego na manhã seguinte. Estas propriedades resultam em mínima interrupção de trânsito e pouca protelação, eliminando a necessidade de construção de um desvio oneroso. O PC comporta-se também, como um bom isolante acústico e térmico devido a sua baixa condutividade térmica e boas características de amortecimento. Nas estruturas hidráulicas como represas, diques, barragens e portos, o revestimento forma uma superfície altamente resistente à abrasão.

Para FOWLER (1998) e REBEIZ e FOWLER (1991), a utilização do PC em componentes estruturais danificados nas construções, pontes ou estruturas hidráulicas, restaurando a sua integridade estrutural, tem provado ser um grande sucesso. As vantagens são a excelente resistência, durabilidade, boa aderência ao substrato (concreto convencional) e resistência aos ácidos. Nestas aplicações, novamente, o pequeno tempo de cura mostra-se como grande vantagem. A escolha da granulometria do agregado (miúdo ou graúdo) é função do tipo de reparo, no que se refere à espessura do mesmo.

#### ◆ Outros usos

As aplicações do concreto polímero como base de máquinas para usinagem, segundo FOWLER (1998), REBEIZ e FOWLER(1991) e KANE (1991), em tornos, fresadoras, máquinas de retificação e outras, estão ocupando um forte segmento do mercado. Já existem muitos fabricantes nos Estados Unidos. Estes materiais atuam como absorventes de choques, reduzindo o barulho, a vibração dos equipamentos pesados e apresentam boa relação dureza/peso. Pode-se relacionar, como outras aplicações, os blocos resistentes para pisos, especialmente direcionados para aplicações industriais, devido sua alta resistência ao impacto, resistência química, e baixa permeabilidade, proporcionando grande resistência ao tráfego pesado, aos agentes químicos e à água. O PC encontra aplicações como material adesivo de diferentes conjuntos ou diferentes composições. Por exemplo, pode ser utilizado para ligar concretos novos a concretos velhos, ou ligar concretos velhos a lâminas de aço, barras de aço e outros.

### **2.12 Situação atual e perspectivas do concreto polímero**

Em estudo conduzido por FOWLER (1998) sobre a atual situação do concreto polímero nos Estados Unidos, concluiu-se que o concreto polímero vem sendo bastante utilizado em componentes pré-moldados, em revestimentos e como material de reparo. Os reparos continuam sendo utilizados amplamente em pontes, rodovias, pisos industriais, e outros. Porém, neste caso, devem ser consideradas a contração térmica e a retração. Recentes estudos têm sido realizados no sentido de reduzir a retração no concreto polímero de resina poliéster e os resultados têm sido bastante otimistas, sugerindo estes como alternativa para substituição dos metais fundidos, como mostram alguns pesquisadores (MASS,1996; ZALATIMO e FOWLER, 1996).

VIDAURRE et al. (1998) apresentam avanços obtidos no desenvolvimento de concreto polímero, onde se produz um material totalmente livre de poros através de processo de moldagem em sistema fechado e com pressão positiva. Este sistema já foi elaborado e patentado pela *USA and world Patentes pending* e resultados mostraram que com este aparato pode-se obter porosidade mínima, com concentrações iguais ou menores que 1 ppm (uma parte por milhão). Estes materiais, livres de poros, podem ser utilizados como isoladores na indústria de eletricidade em substituição aos materiais cerâmicos, em aplicações com energia entre 5 KV a 123 KV. Alguns protótipos foram exaustivamente testados na América do Norte e obtiveram sucesso. Os

pesquisadores garantem qualidade e uma boa relação entre o custo/benefício do concreto polímero livre de poros, comparando-se com os materiais cerâmicos utilizados convencionalmente como isoladores elétricos.

Nos países desenvolvidos onde o concreto polímero já vem sendo produzido em grande escala são esperadas algumas inovações de modo a ampliar e melhorar as condições de produção do concreto polímero. FOWLER (1999) cita as seguintes:

◆ Quanto aos materiais :

Outros tipos de monômeros e resinas deverão ser disponibilizados para produção de concretos com polímeros.

- Resinas híbridas, nas quais serão incorporadas duas ou mais resinas com objetivo de se introduzir mais vantagens no aglomerante.

- Latex modificado pré-pronto já encontram-se disponíveis, onde apenas se adiciona água. Isto deverá ser aplicado a outros sistemas de polímeros.

- Sistemas de polímeros condutores estão sendo investigados para novas aplicações.

◆ Materiais de reparo:

Os materiais de reparo deverão continuar com importante papel neste século na indústria do concreto polímero (PC) e da argamassa modificada por polímero (PMC). Algumas das situações de aplicação são inovadoras. A seguir encontram-se relacionadas algumas aplicações.

- Sistemas de reparo serão desenvolvidos nos quais serão utilizados equipamentos a partir da vantagem da cura rápida, atenuando os problemas da volatilidade e flamabilidade. Serão desenvolvidos trens mecanizados que preparam a área deteriorada, misturam, aplicam e realizam acabamentos de maneira mais econômica possível. Esta tecnologia deverá ser utilizada especialmente para reparos de pavimentações de concreto, em estradas e em aeroportos.

- Utilização de telas de fibra de vidro sobre estruturas como pontes e pisos danificados e, sobre a tela, é colocado uma argamassa de polímero para realizar o trabalho de acabamento.



- Lâminas flexíveis pré-moldadas permitirão reparos rápidos, proporcionando bom acabamento, resistência ao deslizamento e/ou uniformidade, entre outras propriedades. Estas poderão ser ligadas aos pisos ou pavimentos com uma camada fina de resina ou argamassa de polímero.
- Sistemas de *sprays* serão utilizados em reparos de superfícies e trabalhos de acabamentos. Alguns tipos de argamassas produzidas com látex já vem sendo utilizadas a alguns anos em acabamentos de obras arquitetônicas.
- Mistura de agregados pré-selecionados serão injetados com o monômero ou sistema de resina a fim de eliminar a mistura dos agregados com a resina.
- Componentes de concreto pré-moldados com concreto polímero ou concreto modificado com látex serão utilizados para reparos de pavimentações, pisos, muros e estruturas hidráulicas as quais requerem alta resistência à abrasão, ao congelamento e descongelamento.

#### ◆ Componentes pré-moldados

Os pré-moldados são aplicações do concreto polímero que vem crescendo bastante nos últimos tempos. O concreto polímero, neste caso, é utilizado como substituição do concreto de cimento Portland, metais, madeira e ainda estruturas plásticas.

- Nas obras de arquitetura o concreto polímero será comumente utilizado pela vantagem da facilidade de moldagem, textura e coloração. Como exemplos pode-se citar painéis para fachadas complexos e ornamentados, topos de colunas, abóbadas, estátuas e fontes.
- Painéis unidos por pinos de aço para utilização em paredes de construções vem sendo testados. Isto vem sendo feito tradicionalmente com concreto de cimento reforçado com fibra de vidro.
- Um grande potencial é representado pelos componentes de infra-estrutura para transporte. A alta resistência, durabilidade, resistência ao impacto e amortecimento fazem do concreto polímero um material ideal para moldar dormentes, muros que fazem separação de rodovias, placas de sinalização de ferrovias e painéis para pontes.
- Aplicações em substituição aos metais encontram-se em crescimento na área dos concretos polímeros. A boa relação resistência/peso, a baixa condutividade térmica, o alto amortecimento, a moldabilidade farão do PC um grande competidor para a maioria das aplicações usuais dos

metais. Um bom exemplo são os tornos, onde o concreto polímero tem sido bastante utilizado em substituição ao ferro fundido.

- Componentes estruturais serão mais freqüentemente utilizados. Por exemplo, caixas subterrâneas, tampas de bueiros que suportem tráfego intenso, tabuleiros de pontes pré-moldados e revestimentos para construções podem ser construídos satisfazendo as normas de construção. Normas para desenvolvimento estrutural destes materiais estão sendo desenvolvidas pelo ACI 548.

- Pré-moldados ocos para reparos de bases de equipamentos serão uma opção com um custo efetivamente baixo. Os equipamentos podem ser removidos, a base limpa, o pré-moldado oco colocado sobre a base, e a parte oca pode ser preenchida com uma argamassa bem fluída, resultando em um reparo rápido que minimizará o tempo de máquina parada.

Analizando as colocações acima, observa-se que área de concreto polímero encontra-se em ascensão, visto que existe investimentos em novas tecnologias para produção de sistemas aglomerantes, aumentando a disponibilidade e qualidade dos aglomerantes, bem como sistemas pré-prontos e equipamentos específicos para aplicação do PC que facilitam a utilização destes compostos.

Segundo relatos de FOWLER (1999) pode-se prever que os compostos de concreto polímero irão permanecer como uma boa opção para reparos, pois além das qualidades conhecidas, encontram-se em desenvolvimento sistemas de utilização mais práticos e rápidos, melhorando as condições de uso do PC. Nos últimos anos tem sido mostrado um grande interesse pelo componentes pré-moldados que além das vantagens da cura rápida, facilidade de moldagem, inserção de cores, permite também produzir composições com grande quantidade de material agregado, utilizando-se baixas proporções de resina e obtendo-se boas propriedades mecânicas e de durabilidade.

De acordo com FOWLER (2001), avanços significativos deverão ocorrer em uma ou mais áreas no sentido de ampliar a utilização dos compostos de concreto polímero. Algumas das projeções para o futuro incluem:

Quanto aos materiais:

- Polímeros que resistam a temperaturas mais elevadas;
- Polímeros de maior compatibilidade com a mistura fresca de concreto de cimento, melhorando as propriedades da argamassa modificada por polímero;
- Monômeros, talvez na forma de vapor, que possam facilitar a produção do concreto impregnado por polímeros;
- Produção de resinas que possam ser recicladas;

Quanto ao processamento:

- Melhorias no processamento em bateladas, produzindo polímeros livres de poros. Isto se realiza incorporando gás para substituir o ar durante a moldagem. O gás eventualmente é incorporado, também, dentro polímero. Vários processos já se encontram disponíveis;
- Melhorias nos métodos de proporcionamento que resultem em melhor empacotamento dos agregados com objetivo de reduzir o teor de resina, porém mantendo-se boa trabalhabilidade;
- Processos menos complicados de produção do concreto impregnado. Existe grande necessidade destes materiais, especialmente em estruturas de concreto de cimento que estão sujeitas à reação álcali-sílica, ataque de sulfatos, abrasão e penetração de íons cloretos.

## **3 PESQUISA EXPERIMENTAL**

### **3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

No presente capítulo, primeiramente estão relacionados os materiais constituintes das composições de concreto polímero, seguidos de suas caracterizações. Na seqüência encontram-se discriminadas as dosagens adotadas no programa experimental, e os procedimentos de mistura, moldagem e cura. Finalmente, encontram-se relacionados os tipos de ensaios a que foram submetidos os compostos de concreto polímero em estudo.

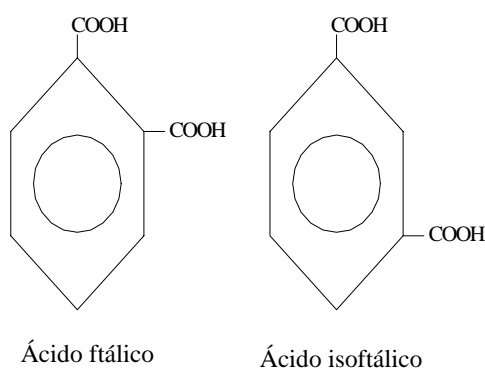
#### **3.1.1 Materiais**

Neste item, são relacionados os materiais componentes das formulações do concreto polímero: a resina, o agregado e o fíler.

##### **3.1.1.1 Resina**

Para a realização do presente trabalho foram adotados como aglomerantes, resinas poliéster insaturadas. De acordo com REBEIZ e FOWLER (1996), a resina poliéster comprovadamente é uma das mais utilizadas nas composições de concreto polímero, pelo seu bom desempenho, prestando-se à produção de materiais para construção civil, com excelentes propriedades mecânicas e químicas. Além disto, tem baixo custo quando comparada com as resinas epóxi, e grande disponibilidade comercial. Foram investigados, neste estudo, concretos polímeros com dois tipos de resinas poliéster, sendo uma a resina poliéster isoftálica e outra a resina poliéster ortoftálica, ambas dissolvidas em estireno, um monômero compatível, que apresenta insaturação etilênica, e através da qual formam-se ligações cruzadas, produzindo um polímero, classificado como termofixo, conforme detalhado no item 2.5.2. Segundo HAWLEY (1971), da reação química deste processo, resulta uma ligação molecular rígida, insolúvel e infusível, tornando assim o processo irreversível. As resinas, após curadas, não amolecem quando expostas ao calor. Ao aumentar a temperatura de uma resina curada termofixa, pode-se chegar a queimá-la, porém não fundi-la ou despolimerizá-la.

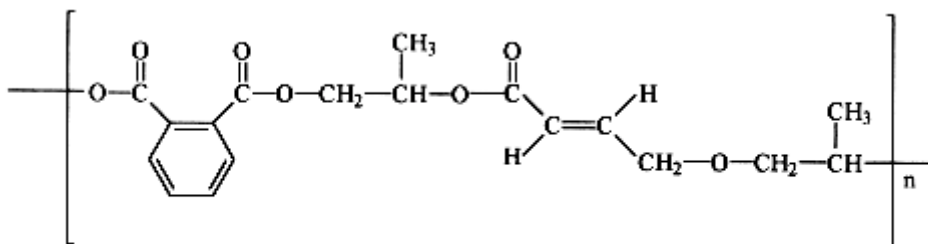
De acordo com MORRISSON e BOYD (1990), estas resinas (isoftálica e ortoftálica) apresentam diferenças básicas em seus reagentes. Conforme já discutido item 2.4.2, os poliésteres são o produto das reações de policondensação de ácidos dicarboxílicos com dihidróxi álcoois. A resina poliéster isoftálica (isopoliéster) origina-se de um diácido (ácido isoftálico), enquanto a resina poliéster ortoftálica, origina-se de um outro diácido (ácido ftálico). O primeiro apresenta o grupo carboxila na posição meta do anel benzênico. Já o ácido ftálico apresenta o grupo carboxila na posição orto do anel benzênico, conforme mostram as fórmulas da figura 3.1.



**Figura 3.1** Ácido ftálico (presente na resina ortoftálica) e ácido isoftálico (presente na resina isoftálica).

As resinas poliéster ortoftálicas, de acordo com BANAS (1989) e REICHHOLD (2002), tem suas propriedades mecânicas e químicas inferiores às resinas isoftálicas, devido à dificuldade de se obter polímeros de altos pesos moleculares. O anidrido ftálico tem forte tendência de se regenerar a partir dos meios ésteres do ácido ftálico (reação reversível), fato que incrementa a presença de espécies de baixo peso molecular, mais suscetíveis ao ataque químico. A maior proximidade dos grupos carboxílicos reativos na posição orto, que interfere na reação de esterificação, de modo a não permitir a síntese de poliéster de cadeias longas, conseqüentemente produz poliéster com maior número de hidroxilas (terminais álcool) e carboxilas (ácido orgânico), que são suscetíveis ao ataque químico.

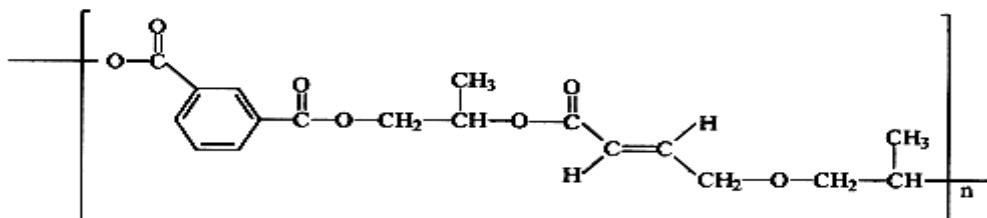
As resinas ortoftálicas são, geralmente, menos viscosas que as isoftálicas, face também ao menor comprimento da cadeia molecular. A figura 3.2 mostra a configuração da resina poliéster ortoftálica.



**Figura 3.2** Configuração da resina poliéster insaturada ortoftálica

Como o ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, nas resinas isoftálicas, não sofre a desvantagem de regeneração, conseqüentemente, podem ser obtidos poliésteres de altos pesos moleculares, ou seja, com cadeias mais longas. Os seus grupos funcionais carboxílicos mais afastados (posição meta) não interferem tão acentuadamente com o crescimento da cadeia molecular do polímero, portanto, torna-se possível a síntese de cadeias longas. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica. Por isso, uma resina poliéster produzida com ácido isoftálico tem maior capacidade de absorver impacto do que aquelas produzidas com ácido ou anidrido ortoftálico. O fato de possuir polímeros com pesos moleculares altos torna-o ainda, pouco sensível à água, além de conferir boas propriedades finais de resistência química.

A figura 3.3 apresenta a configuração da resina poliéster isoftálica.



**Figura 3.3** Configuração da resina poliéster insaturada isoftálica

Para o presente trabalho, inicialmente, foram adotados alguns ensaios preliminares, que visaram a escolha e teores dos materiais. No aglomerante foram realizados os ensaios de tempo de gelatinização, densidade, resistências à compressão e à tração na flexão. Para os ensaios preliminares realizados no concreto polímero, optou-se por um ensaio mecânico (resistência à compressão), o mais utilizado convencionalmente em concretos, e um ensaio relacionado com a durabilidade de mecanismo bastante conhecido (absorção de água). Estes são apresentados no capítulo 4 (resultados para o concreto endurecido).

O tempo de gelatinização varia de acordo com os teores de aditivos, iniciador e promotor, que serão utilizados na resina (GORNINSKI,1996). Portanto, é necessário a utilização de um teor adequado dos aditivos, para se obter a polimerização da resina, mas com um controle de tempo, para que se possa trabalhar, ou aplicar o material, antes que este desenvolva a cura. Já a densidade está relacionada com a molhabilidade, ou capacidade aglomerante, que a resina pode atingir, sendo que para utilização em concreto polímero, costuma-se utilizar resinas com densidades semelhantes à densidade da água, evitando-se, deste modo, um consumo excessivo de resina.

A partir dos ensaios citados, foram mantidas as resinas poliéster insaturadas ortoftálica e isoftálica para o programa experimental desta pesquisa. Cabe salientar que a resina poliéster insaturada isoftálica tem sua eficiência já comprovada em concretos poliméricos, entretanto a ortoftálica, apesar de ter propriedades inferiores comparadas às da isoftálica, mostrou bom desempenho nestes primeiros ensaios realizados e, além disto, possui um custo bastante inferior. Na tabela 3.1 constam algumas propriedades das resinas, que são produzidas pela Reichhold do Brasil S/A.

**Tabela 3.1** Propriedades das resinas poliéster insaturadas dos tipos isoftálica e ortoftálica.

<b>Propriedades</b>	<b>Poliéster insaturada isoftálica(33-411)</b>	<b>Poliéster insaturada ortoftálica (10-228)</b>
Viscosidade Brookfield à 25 <sup>0</sup> C, 60 rpm (cp)	400 - 650	250- 350
Índice de acidez (mg KOH/g)	9- 15	30 máximo
Módulo de elasticidade em tração (MPa)	3200 mínimo	2400 mínimo
Módulo de elasticidade em flexão (MPa)	3500 mínimo	3800 mínimo
Contração linear (%)	2,0	1,0 máximo

◆ As propriedades da tabela 3.1 foram obtidas de boletins técnicos cedidos pelo fornecedor.

A seguir encontram-se relacionados os métodos e os resultados dos ensaios preliminares, densidade e tempo de gelatinização, realizados nos aglomerantes.

- Densidade das resinas

O ensaio de densidade foi realizado em ambiente climatizado mantendo-se a temperatura constante de 22<sup>0</sup>C, especificado na ASTM D 1475 (1996) - *Standart Test Method For Density of Liquid Coatings, Inks, and Related Products*.

O cálculo da densidade foi realizado pela seguinte fórmula:

$$D_m = \frac{(W - w)}{V}$$

Onde:

D<sub>m</sub> = densidade da resina, g/cm<sup>3</sup>

W = peso do picnômetro mais resina, g

w = peso do picnômetro vazio, g

V = volume do picnômetro, cm<sup>3</sup>

Seguem os valores de densidade, obtidos para os dois aglomerantes, resina poliéster insaturada isoftálica e resina poliéster insaturada ortoftálica, respectivamente.

- Resina poliéster isoftálica:

$$D_m = 1,0968 \text{ g/cm}^3$$

- Resina poliéster ortoftálica:

$$D_m = 1,0955 \text{ g/cm}^3$$

A partir dos resultados acima pode-se observar que as densidades das resinas são semelhantes à densidade da água, e que as duas resinas apresentam densidades muito semelhantes. Esta densidade está relacionada diretamente com a quantidade de solvente em que o



poliéster é dissolvido. No presente caso, o solvente é o estireno que ao reagir forma as ligações com o poliéster.

- Tempo de gelatinização das resinas

O ensaio que determina o tempo de gelatinização da resina é descrito na ASTM D2471 (1994) – *Standart Method for Gel Time and Peak Exothermic Temperature of Reacting Thermosetting Resins*.

Para a resina isoftálica, foi fixado inicialmente um teor de promotor de 1% para a avaliação dos teores de iniciador, enquanto que, para resina ortoftálica, foram variados somente os teores de iniciador, pois esta resina já é fornecida com promotor em sua composição (resina pré-acelerada). O ensaio foi realizado em ambiente climatizado, mantendo-se a temperatura de  $25\pm 1^\circ\text{C}$ . Considera-se tempo de gelatinização, o período de tempo entre o início da reação de polimerização, até momento em que ao colocar-se um bastão de vidro no material em reação, e ao deslocar-se o bastão, se polímero se apresentar na forma de um fio e este quebrar-se, então considera-se o fim do tempo de gelatinização.

Imediatamente após finalizada esta primeira parte, foi realizado o mesmo ensaio acima descrito, mantendo-se fixo o teor de iniciador (peróxido de metil etil cetona) em 1,5% e modificando-se os teores de promotor, naftenato de cobalto.

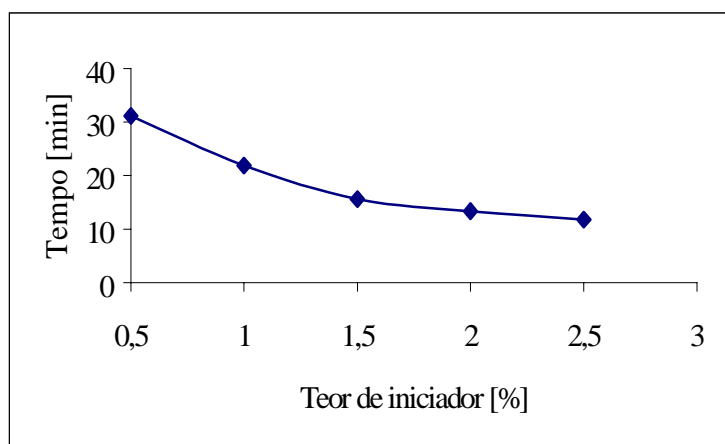
Cabe ressaltar que os aditivos utilizados para a cura dos aglomerantes foram indicados pelo fabricante das resinas.

As tabelas 3.2 e 3.3 ilustram os efeitos do teor de iniciador sobre o tempo de gelatinização, e a temperatura máxima atingida na reação, sem a presença dos agregados.

**Tabela 3.2** Tempo de gelatinização e temperatura máxima da resina poliéster isoftálica em função do teor de iniciador, e com teor de promotor fixado em 1%.

<b>Amostra</b>	<b>Teor de iniciador [%]</b>	<b>Tempo de gel [min]</b>	<b>Pico exotérmico [°C]</b>
01	2,5	11,75	160
02	2,0	13,33	160
03	1,5	15,58	154
04	1,0	21,88	143
05	0,5	31,15	120

A figura 3.4 mostra os dados da tabela 3.2 sob a forma gráfica.

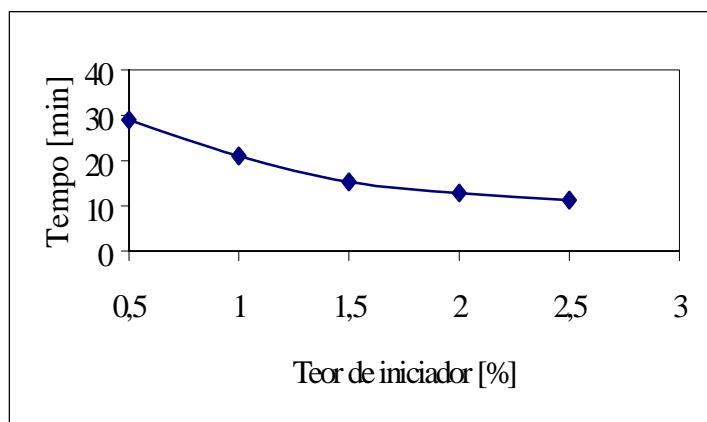


**Figura 3.4** Variação do tempo de gelatinização em função do teor de iniciador para resina poliéster isoftálica.

**Tabela 3.3** Tempo de gelatinização e temperatura máxima da resina poliéster ortoftálica pré-acelerada em função do teor de iniciador.

Amostra	Teor de iniciador [%]	Tempo de gel [min]	Pico exotérmico [°C]
01	2,5	11,25	161
02	2,0	12,83	163
03	1,5	15,25	140
04	1,0	21,00	138
05	0,5	29,00	125

A figura 3.5 apresenta o tempo de gelatinização em função do teor de iniciador para resina poliéster ortoftálica.



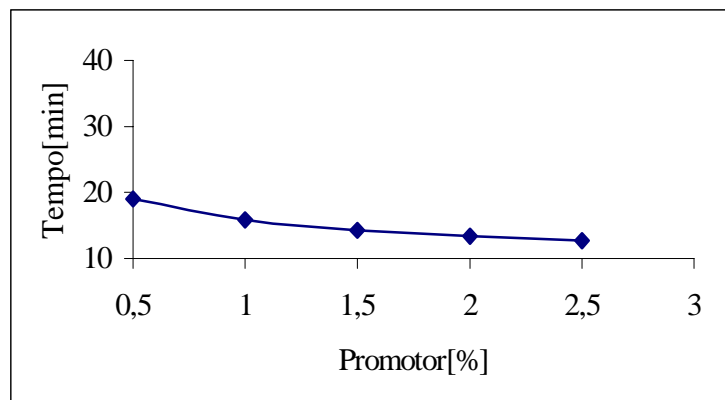
**Figura 3.5** Variação do tempo de gelatinização em função do teor de iniciador para resina poliéster ortoftálica.

A tabela 3.4 ilustra os efeitos do teor de promotor sobre o tempo de gelatinização e temperatura máxima atingida pela resina poliéster isoftálica, mantendo fixo o teor de iniciador em 1,5% (sem os agregados).

**Tabela 3.4** Variação do tempo de gelatinização e temperatura máxima atingida em função do teor de promotor para resina isoftálica

Amostra	Teor de promotor [%]	Tempo de gel [min]	Pico exotérmico [°C]
01	2,5	12,75	145
02	2,0	13,33	152
03	1,5	14,25	153
04	1,0	15,92	154
05	0,5	19,00	165

A figura 3.6 ilustra o efeito do teor de promotor sobre o tempo de gelatinização para resina poliéster isoftálica.



**Figura 3.6** Efeito do teor de promotor sobre o tempo de gelatinização para resina poliéster isoftálica.

Os valores apresentados nos ensaios referentes ao tempo de gelatinização demonstram que ao se diminuir o teor de iniciador, em ambas resinas utilizadas nestes ensaios, houve um aumento no tempo de gelatinização. A partir destes dados pode-se concluir que o teor de iniciador influencia diretamente no tempo de cura, ou no processo de polimerização das resinas. A figura 3.6 mostra que à medida que se aumenta o teor de promotor ocorre uma diminuição no tempo de gelatinização, porém esta redução é menos acentuada comparado com o efeito causado pelo iniciador. A influência causada pelo promotor no tempo de gelatinização ocorre em virtude destes

compostos promoverem a ruptura na molécula do iniciador, fazendo surgir portanto um número maior de radicais livres capazes de iniciar o processo de polimerização.

As resinas poliéster isoftálica e ortoftálica foram também submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial e tração na flexão. Para o rompimento das amostras foram utilizadas as seguintes prensas: Prensa automática da marca Controls com capacidade para 2000 kN e prensa Wolpert com capacidade 100 kN, para medir a resistência à compressão e tração na flexão, respectivamente.

Os resultados foram obtidos a partir da média de três amostras individuais que foram rompidas utilizando-se os mesmos procedimentos que submeteram-se as amostra de concreto polímero, nos ensaios posteriores.

A tabela 3.5 mostra os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão axial para os aglomerantes (resinas poliéster isoftálica e ortoftálica).

**Tabela 3.5** Resistência à compressão axial das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica.

<b>Corpo-de-prova</b>	<b>Resistência à compressão axial [Mpa]</b>		<b>S [Mpa]</b>	<b>CV [%]</b>
<b>Resina - amostra</b>	<b>Individuais</b>	<b>Média</b>		
I-1	112,86	117,31	3,89	3,32
I-2	119,07			
I-3	119,99			
O-1	88,01	91,44	6,75	7,38
O-2	99,21			
O-3	87,09			

I = Resina poliéster insaturada isoftálica;

O = Resina poliéster insaturada ortoftálica.

A tabela 3.6 mostra os valores obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão para os aglomerantes (resinas poliéster isoftálica e ortoftálica).

**Tabela 3.6** Resistência à tração na flexão das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica.

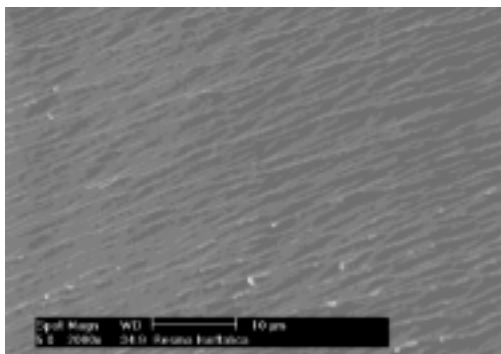
<b>Corpo-de-prova</b>	<b>Resistência à tração na flexão [Mpa]</b>		<b>S [Mpa]</b>	<b>CV [%]</b>
<b>Resina - amostra</b>	<b>Individuais</b>	<b>Média</b>		
I-1	26,29	24,95	1,28	5,13
I-2	23,73			
I-3	24,83			
O-1	17,01	17,23	0,63	3,65
O-2	16,73			
O-3	17,94			

De acordo com os dados das tabelas 3.5 e 3.6 observa-se que ambas resinas em estudo apresentaram altos valores de resistência à compressão e à tração na flexão. Entretanto, os resultados obtidos pela resina poliéster isoftálica são superiores aos da resina ortoftálica. Estes resultados são compatíveis com as propriedades esperadas para estas resinas, pois sabe-se que a ortoftálica, em virtude de sua estrutura química, conforme já discutido no item 3.1.1.1, geralmente possui propriedades mecânicas inferiores.

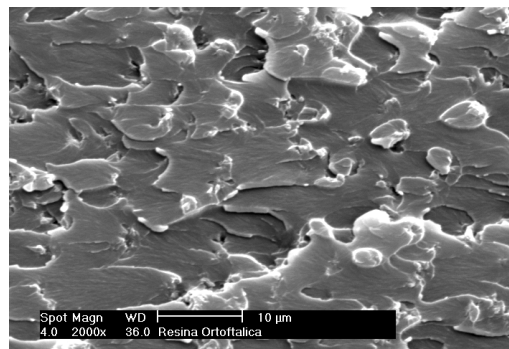
### **3.1.1.2 Adição**

Antes de se adotar a cinza volante como fíler, foi realizado um estudo de interfaces entre as resinas e os fílers, comumente mais utilizados: cinza volante, calcário, sílica ativa e cinza de casca de arroz, com o objetivo de verificar a presença ou não de reação entre o fíler e os aglomerantes, as resinas poliéster insaturadas dos tipos isoftálica e ortoftálica. Para estes ensaios adotou-se o teor de 14% em massa de fíler em relação ao aglomerante. Este teor foi adotado em virtude de normalmente ser utilizado entre 10 e 15% de fíler quando se trabalha com areias de granulometria média. Portanto, neste ensaio, foram analisadas misturas contendo, somente, aglomerante e fíler.

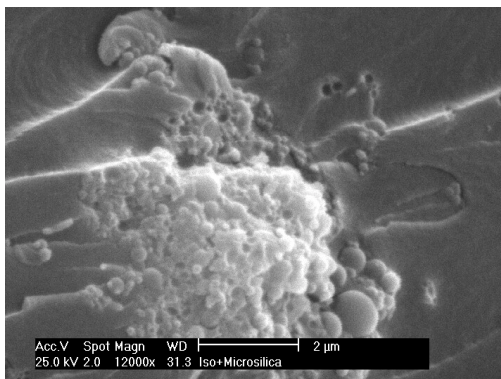
As figuras 3.7 e 3.8 mostram as imagens obtidas MEV das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica, respectivamente. Como não foram observadas interações entre fíler e aglomerante, foram escolhidas apenas algumas imagens que são apresentadas nas figuras de números 3.9 a 3.13 compostas pela mistura de resina com os fílers analisados.



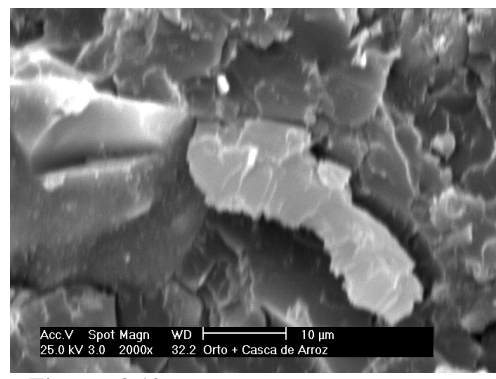
**Figura 3.7** Resina isoftálica com aumento de 2000 vezes.



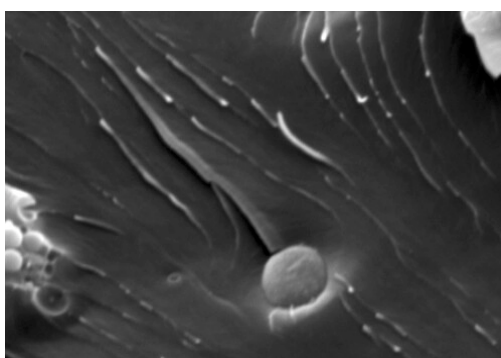
**Figura 3.8** Resina ortoftálica com aumento de 2000 vezes.



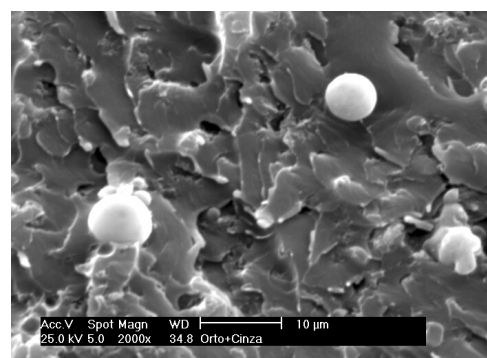
**Figura 3.9** Resina isoftálica + microsilíca com aumento de 1200 vezes.



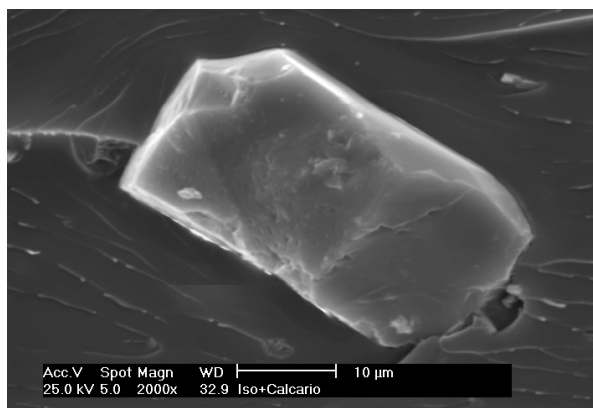
**Figura 3.10** Resina ortoftálica+ cinza de casca de arroz com aumento de 2000 vezes.



**Figura 3.11** Resina isoftálica + cinza volante com aumento de 2000 vezes.



**Figura 3.12** Resina ortoftálica + cinza volante com aumento de 2000 vezes.



**Figura 3.13** Resina isoftálica + calcário com aumento de 2000 vezes.

A partir deste ensaio, realizado através de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, pôde-se perceber que em todas as misturas analisadas não foram observadas alterações nas partículas dos filers. Isto é um indicativo de que, provavelmente, não tenham ocorrido interações químicas entre filer e aglomerante. Portanto a melhoria das qualidades esperadas para o concreto polímero devem estar relacionadas com aspectos físicos. Optou-se pela cinza volante como filer, em virtude da grande disponibilidade deste resíduo no estado do Rio Grande do Sul, originadas da queima do carvão nas usinas geradoras de energia.

Existem outros motivos para se optar pela utilização da cinza volante como filer, dentre estes, a sua comprovada eficiência nos concretos poliméricos. VARUGUESE e CHATURVEDI (1996) utilizaram a cinza volante como agregado miúdo e constaram que houve acréscimo nas propriedades mecânicas e redução na absorção de água. Concluíram também que existe uma boa compatibilidade entre areia e cinza. Segundo GORNINSKI (1996), a cinza volante melhora a trabalhabilidade da mistura fresca do concreto polímero e a resistência do material endurecido e produz concretos com superfícies de ótima textura. Porém o efeito da cinza volante nas propriedades mecânicas e químicas não tem sido estudado em detalhes.

Para ATZENI et al. (1990), outro fator a ser considerado é que, embora a cinza volante não apresente toxicidade, a grande quantidade originada a partir da queima do carvão nas usinas geradoras de energia elétrica pode gerar problemas relacionados ao seu destino e beneficiamento como matéria-prima nos processos industriais.

A composição química e as propriedades físicas da cinza variam de acordo com o tipo de carvão que lhe deu origem, granulometria e processo de filtragem. Entretanto, para sua utilização, o importante é que a qualidade da cinza volante seja razoavelmente constante e que não apresente elevado teor de umidade.

- Características da cinza volante

A massa específica da cinza volante é de  $2,16 \text{ g/cm}^3$  e foi determinada conforme NBR 6474 (ABNT,1984).

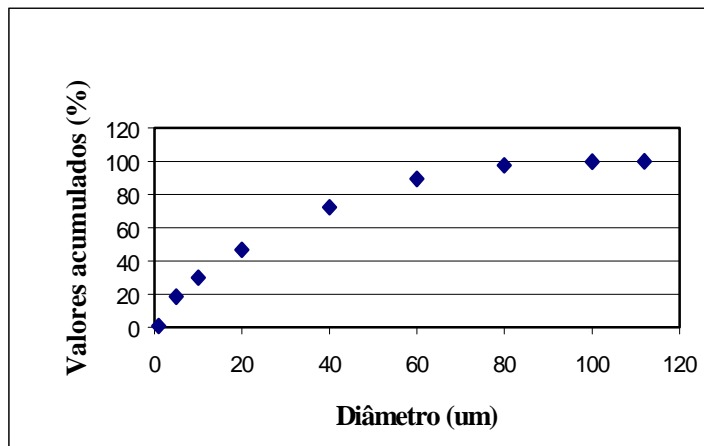
A distribuição granulométrica da cinza volante foi realizada por difração a laser (*CILAS 1064 Liquid*). Range  $0,04 \text{ um} - 500,00 \text{ um} / 100 \text{ Classes}$  e os resultados deste ensaio estão apresentados na tabela 3.7.



**Tabela 3.7** Composição granulométrica da Cinza Volante

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	% passante de cinza
112	100,00
100	99,75
80	97,38
60	89,38
40	72,21
20	46,65
10	29,87
5	18,47
1	0,88

A figura 3.14 ilustra a curva granulométrica da cinza volante obtida por difração a laser

**Figura 3.14** Curva granulométrica da cinza volante

### 3.1.1.3 Agregado

A partir de uma análise granulométrica de cinco diferentes amostras de agregados selecionados, da região de Porto Alegre, foi adotada para este trabalho, uma areia de rio que apresenta distribuição granulométrica contínua e que se enquadra dentro da granulometria média, com massa específica de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , determinada segundo a NBR 9776.

A tabela 3.8 apresenta a composição granulométrica da areia obtida a partir da média de duas amostras de areia. O ensaio foi realizado conforme NBR 7217.

**Tabela 3.8** Resultados do ensaio de granulometria da areia

Abertura da malha [mm]	Massa retida (g)	Porcentagem	
		Retida	Acumulada
4,8	8,50	2	2
2,4	30,48	6	8
1,2	76,02	15	23
06	156,20	31	54
0,3	164,16	33	87
0,15	61,92	12	99
<0,15	2,72	1	100
Total	500	100	100

◆ Módulo de finura: 3,73

◆ Diâmetro máximo: 4,8mm

### 3.1.2 Mistura cinza volante e agregado miúdo

Esta mistura foi realizada em diversas proporções, com o objetivo de auxiliar na escolha dos teores de cinza a serem utilizados na produção do concreto polímero, propiciando a investigação antes e depois da compactação máxima.

O ensaio de massa unitária compactada foi realizado de acordo com NBR 7810 (ABNT, 1983) para a mistura cinza e areia. A tabela 3.9 apresenta os valores encontrados no ensaio de massa unitária desta mistura.

**Tabela 3.9** Variação da massa unitária da mistura cinza e areia em função do teor de cinza volante

% de cinza em relação à massa do agregado	Massa unitária [g/cm <sup>3</sup> ]
0	1,66
2	1,76
4	1,78
6	1,80
8	1,82
10	1,83
12	1,84
14	1,83
16	1,82

Analisando os valores da tabela 3.9 observa-se que ao se adicionar 12% de cinza volante na areia obteve-se a maior massa unitária, de onde pode-se concluir que esta é a mistura de maior compactidade. Pode-se presumir, também, que a porção de cinza que ultrapassar os 12% da mistura não irá colaborar para o preenchimento dos vazios entre os grãos do agregado, passando a promover um afastamento dos grãos, deste modo, atuando como material agregado, também contribuindo, em virtude do pequeno tamanho dos grãos da cinza, para um aumento da superfície específica do conjunto de agregados.

### 3.1.3 Sumário dos componentes da formulação

- Aglomerante
  - Resina poliéster insaturada isoftálica dissolvida em estireno
  - Resina poliéster insaturada ortoftálica dissolvida em estireno (pré-acelerada)
  
- Material agregado
  - Cinza volante
  - Areia de rio de granulometria média
  
- Aditivos
  - Catalisador: peróxido de Metil Etil Cetona (PMEK)
  - Promotor (acelerador): Naftenato de cobalto

### 3.1.4 Dosagens utilizadas no concreto polímero

Para iniciar os estudos de dosagem foram escolhidos os ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água como parâmetros de desempenho das misturas. A partir destes ensaios, pode-se avaliar uma propriedade mecânica, sendo a mais tradicionalmente utilizada e uma propriedade relacionada com a durabilidade de mecanismo bastante conhecido, absorção de água. O ensaio de absorção foi realizado também, com o objetivo de fazer um comparativo entre os dois aglomerantes, já que de acordo com a literatura a resina poliéster ortoftálica é bem mais sensível a água que a resina poliéster isoftálica. Foram estudados diferentes teores de resina na composição do material a fim de determinar-se um teor de aglomerante que satisfizesse uma boa relação custo/benefício, nesta situação um balanço entre as propriedades e o custo (desempenho/custo). De acordo com FOWLER(2001), o polímero é o principal responsável pelo custo do concreto polímero, sendo praticamente irrelevante o custo dos materiais inertes comparado ao custo da resina. Para estes ensaios foram utilizados os percentuais de 10, 13, 15 e 18% em massa, das resinas poliéster isoftálica e poliéster ortoftálica, em relação aos materiais agregados, mantendo-se constante o percentual de cinza volante em 12%, pois neste teor obteve-se a compacidade máxima da mistura areia + cinza volante (item 5.1.4). A escolha destes teores de resina deu-se em função de que a maioria dos autores de trabalhos em concreto polímero obtiveram bons resultados utilizando entre 10 e 20% de resina poliéster. Dentre estes, OSHIMA ET AL.

(2001), RAMÍREZ e SÃO JOSÉ (2001), EL-HAWARY E ABDEL-FATTAH (1999) e VIPULANANDAN e MEBARKIA (1996). Obtidos os valores das resistências à compressão axial e absorção de água, foi realizado o levantamento do custo de cada uma das composições acima citadas.

Por intermédio do ensaio de absorção de água pode-se observar que em todos os teores de resina estudados, a absorção de água foi insignificante, o que levou a utilização dos resultados da resistência à compressão como parâmetro de escolha dos teores de resina.

A partir da relação custo/resistência (anexo B), da análise dos resultados do ensaio de absorção (item 4.1) e do aspecto da mistura fresca (trabalhabilidade) pôde-se chegar à seleção dos teores a serem utilizados nas composições do concreto polímero na fase seguinte deste trabalho. Foram adotados os teores de 12 e 13% em massa, em relação ao agregado, para as resinas poliéster isoftálica e poliéster ortoftálica, respectivamente.

Para que ocorra o processo de polimerização (endurecimento da resina) é necessário adicionar-se ao aglomerante aditivos (catalisador e promotor). Os teores dos mesmos foram selecionados a partir dos ensaios de tempo de gelatinização (item 3.1.1.1), e foram fixados em 1% de catalisador e 1% de promotor, pois os tempos obtidos com estes teores estão adequados para este trabalho, conseguindo-se proceder a mistura e a moldagem, sem que inicie o endurecimento do concreto polímero.

Na parte seguinte do presente trabalho, e após estarem fixados os teores de aglomerantes, e seus respectivos aditivos, passou-se então para etapa que tem como principal objetivo averiguar a influência da concentração do fíler no concreto polímero. Para tal, e tomando-se como referência o teor de 12% da compacidade máxima, procurou-se então trabalhar com porcentagens que representem um estudo do comportamento do fíler, antes da compacidade máxima, e outros percentuais após a compacidade máxima. Foram realizadas sucessivas moldagens com a cinza volante em diversos teores. Nesta etapa foi considerado o aspecto da mistura fresca, como a trabalhabilidade e a textura da mistura. Após a cura do concreto polímero, pôde-se observar que as amostras com teores mais elevados de cinza apresentavam uma boa aparência, com cores mais claras e superfícies mais lisas. Assim, foram adotados os teores de 8, 12, 16 e 20% em massa de cinza em relação à areia. Com estas composições foram moldados corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, ataque químico, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão.

As composições utilizadas no concreto polímero do presente estudo estão sumarizadas na tabelas 3.9 e 3.10.

**Tabela 3.10** Composição do concreto polímero utilizada na primeira parte do presente estudo

Constituintes da matriz polimérica	Composição	Porcentagem em massa
<b>(a) Poliéster</b>		
Resina 1	Poliéster insaturada isoftálica 33411(Reichhold)	(10, 13, 15 e 18) <sup>a</sup>
Resina 2	Poliéster insaturada ortoftálica 10228 (Reichhold)	(10, 13, 15 e 18) <sup>a</sup>
Promotor	Naftenato de cobalto 3%	1,0 <sup>b</sup>
Catalisador	Peróxido de Metil Etil Cetona (PMEK)	1,0 <sup>b</sup>
<b>(b) Agregados</b>		
Areia	Areia de rio (granulometria média)	(81,17 – 75,67) <sup>d</sup>
Fíler	Cinza volante	12 <sup>c</sup> (9,74 – 9,08) <sup>d</sup>

<sup>a, a'</sup> porcentagens em relação à massa (cinza+areia)

<sup>b, b'</sup> porcentagens em relação à massa do aglomerante

<sup>c</sup> porcentagens em relação à massa da areia

<sup>d</sup> Intervalo, em gramas, para cada 100g de concreto polímero

**Tabela 3.11** Composições do concreto polímero utilizadas na segunda parte do presente estudo.

Constituintes da matriz polimérica	Composição	Porcentagem em massa
<b>(a) Poliéster</b>		
Resina 1	Poliéster insaturada isoftálica 33411(Reichhold)	12 <sup>a</sup>
Resina 2	Poliéster insaturada ortoftálica 10228 (Reichhold)	13 <sup>a'</sup>
Promotor	Naftenato de cobalto 3%	1,0 <sup>b</sup>
Catalisador	Peróxido de Metil Etil Cetona (PMEK)	1,0 <sup>b'</sup>
<b>(b) Agregados</b>		
Areia	Areia de rio de granulometria média	(82,67 – 74,40) <sup>d</sup> para 12% resina (81,97 – 73,75) <sup>d</sup> para 13% resina
Fíler	Cinza volante	(8, 12, 16 e 20) <sup>c</sup> (6,61 – 14,88) <sup>d</sup> para 12% de resina (6,56 – 14,75) <sup>d</sup> para 13% de resina

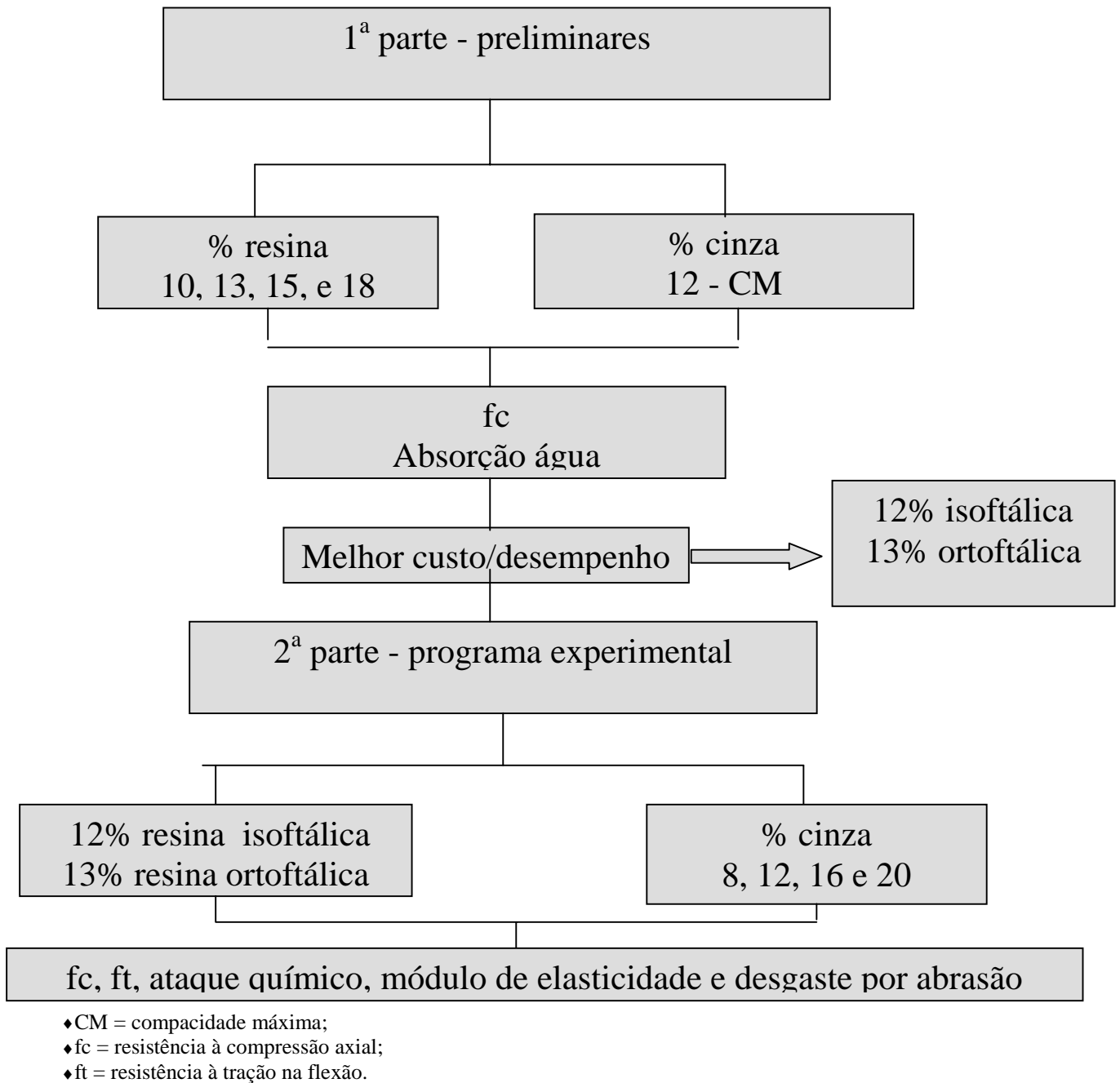
<sup>a, a'</sup> porcentagens em relação à massa (cinza+areia).

<sup>b, b'</sup> porcentagens em relação à massa do aglomerante.

<sup>c</sup> porcentagens em relação à massa da areia

<sup>d</sup> Intervalo, em gramas, para cada 100g de concreto polímero.

Na figura 3.15 mostra-se, de forma esquemática, o procedimento adotado para as dosagens e os ensaios realizados no programa experimental.



**Figura 3.15** Fluxograma das dosagens e ensaios do concreto polímero.

### 3.1.5 Mistura, moldagem e cura

Para realizar a mistura dos materiais foi utilizada argamassadeira de eixo vertical, marca Emic, com capacidade para cinco litros. Foram misturados inicialmente os materiais secos (cinza e areia), adicionando-se imediatamente a esta mistura, a resina previamente catalisada e acelerada, procedendo-se à mistura por mais três minutos.

Foram utilizados moldes cilíndricos (5x10cm) e prismáticos (4x4x16cm), confeccionados com aço. Os moldes foram tratados com cera de carnaúba e uma camada de álcool polivinílico (PVA), a fim de facilitar a desmoldagem. A compactação foi realizada através de adensamento manual, utilizando-se uma barra de aço cilíndrica de 17 cm de comprimento, com extremidade de 2,5 cm de diâmetro. Os corpos-de-prova cilíndricos foram adensados em quatro camadas iguais, cada uma submetida a 30 golpes, e os prismáticos em duas camadas iguais, cada uma recebendo 25 golpes. Após o adensamento, a superfície do concreto polímero foi nivelada com auxílio de uma colher de pedreiro.

A moldagem dos corpos-de-prova foi executada de forma aleatória a fim de eliminar variáveis adicionais que pudessem influenciar nos resultados.

As moldagens foram realizadas conforme a NBR 5738 (ABNT, 1994). Foram produzidos três corpos-de-prova para cada traço. As moldagens realizaram-se à temperatura ambiente, e o processo de cura deu-se com controle de temperatura, a fim de padronizar a cura para todos os ensaios. Os corpos-de-prova, após a moldagem, foram imediatamente levados para uma estufa mantida à temperatura de  $(30 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Os corpos-de-prova foram retirados da estufa e desmoldados depois de três horas contadas a partir do momento em que foram confeccionados. Após a desmoldagem, os mesmos retornaram à estufa. Os tempos de cura para os ensaios de resistência à compressão axial e absorção, onde foram variados os teores de resina, foram de 14 dias. Já os corpos-de-prova onde foram variados os teores de cinza volante e que foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, ataque químico, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão foram mantidos em estufa por 21 dias, apesar de saber que já tinham curado aos 14 dias. GORNINSKI (1996) realizou experimentos em diferentes idades e observou que, a partir dos 14 dias de cura, em temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$ , o aumento da resistência é mínimo. Salientou, também, que determinada composição, com 24% de cinza volante, em apenas 1 dia de cura apresentava uma resistência à compressão de 76,5 MPa, sendo que isto é equivalente a 74,3% da sua resistência aos 14 dias. A opção por 21 dias de cura, na segunda parte dos ensaios, deu-



se em virtude da necessidade de se utilizar duas estufas devido ao grande volume de corpos-de-prova e, numa destas, observa-se pequenas oscilações de temperatura. Portanto, com o objetivo de evitar a possibilidade de não se obter a cura completa do concreto polímero, procedeu-se o aumento do tempo de cura.

## **3.2 Metodologia dos ensaios para o concreto endurecido**

### **3.2.1 Resistência à compressão axial**

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado seguindo-se a norma técnica NBR 5739 (ABNT,1980). Os corpos-de-prova cilíndricos foram ensaiados em prensa automática da marca Controls com capacidade para 2000 kN. Os corpos-de-prova submetidos a este ensaio foram capeados com uma mistura de enxofre, caulim e negro de fumo. Os resultados foram gerados a partir de três amostras para cada traço.

### **3.2.2 Resistência à tração na flexão**

Os ensaios de resistência à tração na flexão seguiram a NBR 12142 (ABNT,1991). Para o rompimento das amostras de concreto foi utilizada uma prensa da Wolpert com capacidade de 100 kN. Foram ensaiadas três amostras para cada traço.

### **3.2.3 Absorção de água**

O experimento foi realizado a partir do método desenvolvido por KELHAM (1998) e detalhado por MOURA (2000), MASUERO (2001) e SILVA FILHO (2001).

Os resultados foram obtidos a partir da média das medidas realizadas em três amostras. Neste ensaio foram utilizadas amostras retiradas (cortadas) do meio de corpos-de-prova de 5cm de diâmetro por 10 cm de altura, tendo as mesmas 2,5cm de altura. As superfícies cilíndricas destas amostras foram impermeabilizadas com três camadas de resina poliéster. O topo da amostra recebeu uma cobertura de um disco de poliestireno. Neste disco foi introduzido um capilar de material termoplástico medindo 6 cm de altura. As amostras, previamente pesadas, foram então colocadas em água, mantendo-se 1cm do capilar fora da água e 5 cm na água. As medidas de massas foram obtidas nos tempos de 4, 24, 48, 96 horas e, finalmente, aos sete dias (168 h).

### **3.2.4 Ataque químico**

O método de ensaio para ataque químico segue o procedimento apresentado por CAMPS et al.(1990). Foram utilizados corpos-de-prova primáticos de 4x4x16 cm para realização do experimento. Após a cura, iniciaram-se os ciclos de agressão de 14 dias.

Os ciclos de agressão consistiram em períodos de sete dias de imersão e sete dias de secagem. Ao iniciar os ciclos de ataque químico os corpos-de-prova foram previamente pesados. Após o período de imersão os corpos-de-prova foram lavados com jato de água com o objetivo de simular a ação mecânica de desgaste, bem como para remover os produtos de corrosão da superfície do corpo-de-prova e, logo após, foram colocados para secar durante 7 dias em ambiente de laboratório. Ao final do período de secagem, os corpos-de-prova foram pesados, completando o ciclo de 14 dias. A cada novo ciclo a solução de agente agressivo foi renovada, medindo-se o pH da solução antes de imergir os corpos-de-prova e após retirá-los da solução. A medida foi realizada através de pontenciômetro.

Foram previstos cinco ciclos de agressão. O volume das soluções agressivas correspondeu a 4 vezes o volume total dos corpos-de-prova. Os corpos-de-prova, após o ciclo final de agressão, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão, segundo a NBR 12142 (ABNT,1991).

Para este ensaio foram selecionados os meios agressores que costumeiramente tem acarretado grandes problemas de corrosão nas indústrias do Estado do Rio Grande do Sul. São estes, os ácidos acético, cítrico, fórmico, láctico e sulfúrico, o refrigerante a base de cola e a água destilada. As soluções foram diluídas em 5% para o ataque químico do concreto polímero.

### **3.2.5 Módulo de elasticidade**

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade estática foi realizado seguindo-se a NBR 8522-84. O experimento foi executado na prensa de marca Shimadzu UH - 2000 kNA, com escala de 400 kN, velocidade 40 kN/min e foram registrados dados (deformações e carga) a cada segundo até o rompimento da amostra. Determinou-se o módulo secante de elasticidade.

### **3.2.6 Desgaste por abrasão**

O ensaio foi realizado segundo o "método CIENTEC de desgaste por abrasão", que simula um percurso de 500m percorridos pelo corpo-de-prova submetido a pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo de carborundo. Para cada traço foram testadas duas amostras com dimensões aproximadas de 40x40x25 mm. Estas amostras foram obtidas a partir de corpos-de-provas de 4x4x16 cm.

## 4 Resultados obtidos para o concreto endurecido

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, absorção de água, ataque químico, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão.

Para apresentação destes resultados adotaram-se as seguintes **siglas**:

**I** = Para amostras produzidas com resina poliéster insaturada **isoftálica**

**O** = Para amostras produzidas com resina poliéster insaturada **ortoftálica**

Números (**10, 13, 15, 18**) = **Percentual de resina** utilizado, em relação à massa dos materiais agregados (areia + cinza volante).

Números (**8, 12, 16, 20**) = **Percentual de cinza volante** utilizado, em relação à massa de areia.

Além da nomenclatura acima, para o ensaio de ataque químico foram adotadas as seguintes **siglas**:

**A** = ácido acético

**C** = ácido cítrico

**F** = ácido fórmico

**L** = ácido láctico

**S** = ácido sulfúrico

**R** = refrigerante à base de cola

**H** = água destilada

### 4.1 Resistência à compressão axial e absorção de água do concreto polímero, em função da variação dos teores de resina

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os resultados individuais e a média obtida de três amostras para o ensaio de resistência à compressão axial e absorção de água do concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica, onde foram utilizados os teores de 10,13,15 e 18% de resina (resinas poliéster isoftálica e ortoftálica).

**Tabela 4.1** Resistência à compressão axial do concreto polímero de resinas isoftálica e ortoftálica em função dos teores de resina.

Corpo-de-prova	Resistência à compressão axial [MPa]				S [MPa]	CV[%]
	1	2	3	Média		
I-10	72,70	71,90	69,50	71,40	1,67	2,33
I-13	87,11	85,07	87,00	86,39	1,15	1,33
I-15	93,22	93,73	92,80	93,25	0,47	0,50
I-18	94,24	95,77	93,70	94,57	1,07	1,14
O-10	65,00	66,00	67,00	66,00	1,00	1,52
O-13	88,63	91,18	86,90	88,90	2,15	2,42
O-15	91,44	91,18	91,00	91,21	0,22	0,24
O-18	95,77	101,12	88,00	94,96	6,60	6,95

♦ S = Desvio padrão

♦ CV = Coeficiente de variação

Na tabela 4.2 estão apresentados os resultados parciais e médios, que foram obtidos a partir de três amostras antes do ensaio e após 168h de imersão e o ganho de massa de absorção de água obtido pela diferença entre a massa do corpo-de-prova imediatamente antes de ser colocado na água e após os sete dias de imersão.

**Tabela 4.2** Absorção de água para o concreto polímero produzido com as resinas poliéster isoftálica (I) e ortoftálica (O).

Amostra	Massa inicial(g)				Massa final(g)				$\Delta$ (g)	g[%]
	1	2	3	média	1	2	3	média		
I-10	110,00	112,64	112,30	111,65	110,25	112,85	112,71	111,93	0,28	0,25
I-13	113,66	112,90	108,60	111,72	113,77	113,25	108,70	111,91	0,19	0,17
I-15	-	107,29	110,58	108,94	-	107,63	110,65	109,14	0,2	0,18
I-18	109,26	109,25	104,50	107,76	109,36	109,37	104,60	107,78	0,11	0,10
O-10	110,75	110,45	113,71	111,64	111,30	111,00	114,00	112,1	0,46	0,41
O-13	-	114,66	114,08	114,37	-	114,99	114,28	114,63	0,27	0,24
O-15	110,71	112,48	109,95	111,05	110,98	112,58	110,26	111,27	0,22	0,20
O-18	106,44	106,58	108,95	107,32	106,70	106,71	109,02	107,48	0,15	0,14

## 4.2 Propriedades mecânicas e químicas em função da variação dos teores de cinza volante

Nas tabelas 4.3 a 4.38 que seguem estão apresentados os resultados das resistências à compressão axial e tração na flexão, ataque químico, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão do concreto polímero de resina poliéster insaturada isoftálica e ortoftálica, em função da variação dos teores de cinza volante (8, 12, 16 e 20%).

#### 4.2.1 Ensaio de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e ataque químico.

Nas tabelas 4.3 e 4.4 estão apresentados os valores de cada amostra individual e a média obtida a partir dos valores individuais para os ensaios de resistência à compressão axial e tração na flexão, variando-se os teores de cinza volante nas composições do concreto polímero.

**Tabela 4.3** Resistência à compressão axial do concreto polímero de resinas poliéster, isoftálica e ortoftática, em função dos teores de cinza volante

Corpo-de-prova	Resistência à compressão axial [MPa]				S [MPa]	CV[%]
	1	2	3	Média		
I-8	81,76	80,44	79,06	80,42	1,35	1,68
I-12	90,67	90,42	90,45	90,51	0,14	0,15
I-16	86,60	89,15	88,13	87,96	1,28	1,46
I-20	98,32	96,86	95,31	96,83	1,51	1,56
O-8	73,10	71,83	72,49	72,47	0,64	0,88
O-12	78,96	81,25	80,08	80,10	1,15	1,44
O-16	85,45	85,64	86,60	85,70	0,62	0,72
O-20	86,86	86,86	86,60	86,77	0,15	0,17

**Tabela 4.4** Resistência à tração na flexão do concreto polímero de resinas poliéster, isoftálica e ortoftática, em função dos teores de cinza volante

Corpo-de-prova	Resistência à tração na flexão [MPa]				S [MPa]	CV[%]
	1	2	3	Média		
I-8	17,88	18,17	17,64	17,90	0,27	1,51
I-12	19,05	21,46	20,80	20,44	1,25	6,12
I-16	20,77	22,13	23,80	22,23	1,52	6,84
I-20	23,58	21,91	22,84	22,78	0,84	3,69
O-8	17,92	17,77	18,24	17,98	0,24	1,33
O-12	19,94	19,64	20,41	20,00	0,39	1,95
O-16	19,94	19,40	19,96	19,77	0,32	1,62
O-20	21,21	18,92	21,29	20,47	1,35	6,60

As tabelas seguintes, de 4.5 a 4.11, apresentam as massas de amostras de concreto polímero, antes de entrar na solução e após o quinto ciclo, e as diferenças entre as massas, inicial e final, em percentual, referentes ao ensaio de ataque químico frente a sete soluções: ácido acético (A), ácido cítrico (C), ácido fórmico (F), ácido láctico (L), ácido sulfúrico (S), refrigerante a base de cola (R) e água destilada (H).

**Tabela 4.5** Efeito da solução de ácido acético 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.

Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)	Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)
A-I8/1	538,2	538,3	+0,02	A-O8/1	519,4	519,6	+0,04
A-I8/2	527,9	528,0	+0,02	A-O8/2	530,6	530,9	+0,06
A-I8/3	540,7	540,9	+0,04	A-O8/3	526,4	526,6	+0,04
A-I12/1	557,9	558,1	+0,04	A-O12/1	538,6	539,0	+0,07
A-I12/2	551,7	551,9	+0,04	A-O12/2	539,2	539,7	+0,09
A-I12/3	575,7	575,7	0,00	A-O12/3	541,0	541,4	+0,07
A-I16/1	543,3	543,3	0,00	A-O16/1	550,2	550,4	+0,04
A-I16/2	549,8	549,7	-0,02	A-O16/2	549,2	549,6	+0,07
A-I16/3	546,0	546,0	0,00	A-O16/3	545,1	545,3	+0,04
A-I20/1	557,0	557,0	0,00	A-O20/1	549,4	549,6	+0,04
A-I20/2	555,9	556,0	+0,02	A-O20/2	547,2	547,5	+0,05
A-I20/3	550,7	550,9	+0,04	A-O20/3	544,1	544,4	+0,06

♦ Sinal (+) ganho de massa em % e (-) perda de massa em %

**Tabela 4.6** Efeito da solução de ácido cítrico 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.

Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)	Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)
C-I8/1	536,5	536,4	-0,02	C-O8/1	554,1	554,3	+0,04
C-I8/2	543,5	543,6	+0,02	C-O8/2	547,6	547,7	+0,02
C-I8/3	529,9	530,0	+0,02	C-O8/3	553,0	553,1	+0,02
C-I12/1	537,3	537,4	+0,02	C-O12/1	547,1	547,3	+0,04
C-I12/2	527,5	527,6	+0,02	C-O12/2	539,4	539,6	+0,04
C-I12/3	540,4	540,4	0,00	C-O12/3	540,7	540,8	+0,02
C-I16/1	546,8	546,8	0,00	C-O16/1	545,8	545,9	+0,02
C-I16/2	551,0	550,9	-0,02	C-O16/2	543,2	543,3	+0,02
C-I16/3	556,1	556,2	+0,02	C-O16/3	541,7	541,7	0,00
C-I20/1	557,0	556,9	-0,02	C-O20/1	542,2	542,3	+0,02
C-I20/2	554,1	554,1	0,00	C-O20/2	544,3	544,5	+0,04
C-I20/3	543,5	543,2	-0,06	C-O20/3	544,5	544,5	0,00

**Tabela 4.7** Efeito da solução de ácido fórmico 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.

Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)	Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)
F-I8/1	536,4	536,7	+0,06	F-O8/1	534,9	535,2	+0,06
F-I8/2	531,4	531,4	0,00	F-O8/2	533,3	533,6	+0,06
F-I8/3	521,7	521,4	-0,06	F-O8/3	529,4	529,8	+0,08
F-I12/1	555,4	555,8	+0,07	F-O12/1	549,5	549,6	+0,02
F-I12/2	562,6	562,9	+0,05	F-O12/2	549,3	549,5	+0,04
F-I12/3	555,8	555,8	0,00	F-O12/3	543,6	543,7	+0,02
F-I16/1	546,7	546,8	+0,02	F-O16/1	541,8	542,0	+0,04
F-I16/2	555,3	555,5	+0,04	F-O16/2	542,2	542,4	+0,04
F-I16/3	553,1	553,1	0,00	F-O16/3	-	-	-
F-I20/1	549,1	549,3	+0,04	F-O20/1	541,5	541,7	+0,04
F-I20/2	543,3	543,4	+0,02	F-O20/2	538,6	538,7	+0,02
F-I20/3	547,4	547,4	0,00	F-O20/3	547,0	547,2	+0,04

**Tabela 4.8** Efeito da solução ácido láctico sobre a perda de massa do concreto polímero.

Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)	Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)
L-I8/1	540,8	540,9	+0,02	L-O8/1	524,6	525,0	+0,08
L-I8/2	555,3	555,6	+0,05	L-O8/2	532,5	532,8	+0,06
L-I8/3	538,3	538,4	+0,02	L-O8/3	536,7	536,9	+0,04
L-I12/1	547,8	548,1	+0,05	L-O12/1	549,6	549,8	+0,04
L-I12/2	534,6	534,8	+0,04	L-O12/2	542,3	542,5	+0,04
L-I12/3	549,8	550,1	+0,05	L-O12/3	547,3	547,4	+0,02
L-I16/1	542,6	542,8	+0,04	L-O16/1	544,8	545,0	+0,04
L-I16/2	537,7	537,9	+0,04	L-O16/2	547,5	547,7	+0,04
L-I16/3	548,0	548,1	+0,02	L-O16/3	542,3	542,5	+0,04
L-I20/1	545,8	545,8	0,00	L-O20/1	542,3	542,5	+0,04
L-I20/2	547,7	547,8	+0,02	L-O20/2	541,1	541,3	+0,06
L-I20/3	537,0	537,0	0,00	L-O20/3	550,3	550,5	+0,04



**Tabela 4.9** Efeito da solução de ácido sulfúrico 5% sobre a perda de massa do concreto polímero.

Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)	Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)
S-I8/1	536,8	536,8	0,00	S-O8/1	529,3	529,1	-0,04
S-I8/2	525,7	525,5	-0,04	S-O8/2	533,3	533,4	+0,02
S-I8/3	536,6	536,5	-0,02	S-O8/3	535,9	535,9	0,00
S-I12/1	545,2	545,3	+0,02	S-O12/1	547,6	547,7	+0,02
S-I12/2	546,8	546,8	0,00	S-O12/2	539,9	540,0	+0,02
S-I12/3	547,9	547,9	0,00	S-O12/3	543,3	543,3	0,00
S-I16/1	542,4	542,5	+0,02	S-O16/1	542,4	542,6	+0,04
S-I16/2	543,5	543,5	0,00	S-O16/2	547,6	547,7	+0,02
S-I16/3	545,3	545,4	+0,02	S-O16/3	540,1	540,2	+0,02
S-I20/1	551,6	551,6	0,00	S-O20/1	542,7	542,8	+0,02
S-I20/2	548,0	547,9	-0,02	S-O20/2	548,1	548,1	0,00
S-I20/3	555,2	555,2	0,00	S-O20/3	550,8	550,9	+0,02

**Tabela 4.10** Efeito da solução de refrigerante a base de cola sobre a perda de massa do concreto polímero.

Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)	Identificação Solução; resina; %cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)
R-I8/1	533,2	533,6	+0,08	R-O8/1	551,1	552,0	+0,16
R-I8/2	544,7	545,2	+0,09	R-O8/2	543,2	543,4	+0,04
R-I8/3	531,2	532,6	+0,26	R-O8/3	546,0	546,2	+0,04
R-I12/1	544,2	544,3	+0,02	R-O12/1	542,3	542,4	+0,02
R-I12/2	544,1	544,4	+0,06	R-O12/2	548,5	548,8	+0,05
R-I12/3	538,6	538,9	+0,06	R-O12/3	545,9	546,1	+0,04
R-I16/1	548,6	548,6	0,00	R-O16/1	545,9	546,0	+0,02
R-I16/2	554,7	554,9	+0,04	R-O16/2	541,9	542,0	+0,02
R-I16/3	544,9	545,3	+0,07	R-O16/3	542,2	542,4	+0,04
R-I20/1	546,2	546,4	+0,04	R-O20/1	543,0	543,1	+0,02
R-I20/2	553,8	554,1	+0,05	R-O20/2	546,6	546,7	+0,02
R-I20/3	552,6	552,8	+0,04	R-O20/3	547,1	547,2	+0,02

**Tabela 4.11** Efeito da água destilada sobre a perda de massa do concreto polímero.

Identificação Solução; resina; % cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)	Identificação Solução; resina; % cinza; amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$\Delta$ Massa (%)
H-I8/1	520,4	520,9	+0,10	H-O8/1	542,0	542,1	+0,02
H-I8/2	530,6	531,1	+0,09	H-O8/2	535,1	535,4	+0,06
H-I8/3	531,0	531,5	+0,09	H-O8/3	538,6	538,9	+0,06
H-I12/1	541,5	541,9	+0,07	H-O12/1	538,2	538,5	+0,06
H-I12/2	537,3	537,7	+0,06	H-O12/2	539,7	539,9	+0,04
H-I12/3	533,6	533,9	+0,06	H-O12/3	540,3	540,6	+0,06
H-I16/1	541,3	541,7	+0,06	H-O16/1	546,0	546,2	+0,04
H-I16/2	541,5	542,0	+0,09	H-O16/2	548,5	548,7	+0,04
H-I16/3	543,1	543,6	+0,09	H-O16/3	543,3	543,5	+0,04
H-I20/1	553,5	553,8	+0,05	H-O20/1	555,4	555,5	+0,02
H-I20/2	552,7	553,0	+0,05	H-O20/2	556,6	556,8	+0,04
H-I20/3	541,1	541,3	+0,04	H-O20/3	549,1	550,0	+0,16

Na tabela 4.12 estão relacionados os valores de pH medidos para as soluções no início e ao término de cada ciclo. Os valores de pH foram obtidos através de pontenciômetro.

**Tabela 4.12** Potencial hidrogeniônico (pH) das soluções utilizadas no ataque químico

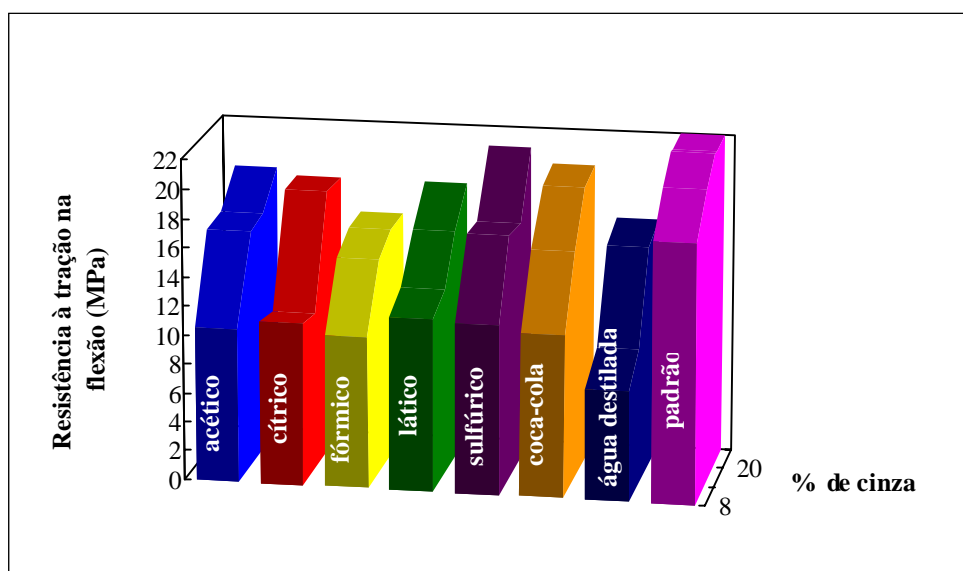
Soluções	1 ciclo		2 ciclo		3 ciclo		4 ciclo		5 ciclo	
	Início	término	início	término	início	término	início	término	início	término
Acético	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Cítrico	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Fórmico	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Lático	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Sulfúrico	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Coca-cola	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
H <sub>2</sub> O dest.	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

A tabela 4.13 apresenta os resultados médios obtidos a partir de três resultados individuais para o ensaio de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova submetidos à agressão química, e também, das amostras de comparação que não sofreram agressão química (amostra padrão), identificadas pela letra "P". Os resultados individuais da resistência à tração na flexão foram submetidos à análise de "espúrios". Portanto foram considerados para a análise estatística, bem como para gerar a tabela 4.13, somente aqueles que não superaram ou ficaram abaixo de 10% da média dos resultados individuais.

**Tabela 4.13** Resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova submetidos à agressão química.

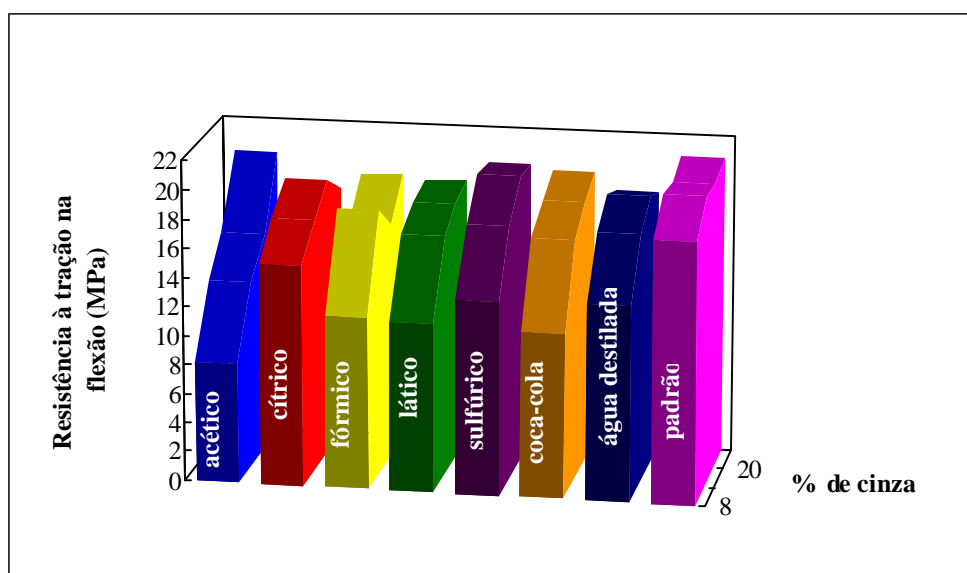
Identificação Solução; resina; % cinza; amostra	Média (MPa)	Identificação Solução; resina; % cinza; amostra	Média (MPa)	Identificação Solução; resina; % cinza; amostra	Média (MPa)	Identificação Solução; resina; % cinza; amostra	Média (MPa)
A-O08	8,28	F-O08	11,83	R-O08	11,32	L-O08	11,66
A-O12	12,76	F-O12	18,08	R-O12	16,64	L-O12	16,52
A-O16	14,99	F-O16	16,01	R-O16	18,11	L-O16	17,60
A-O20	19,63	F-O20	18,40	R-O20	19,20	L-O20	18,16
A-I08	10,58	F-I08	10,41	R-I08	11,18	L-I08	11,82
A-I12	16,16	F-I12	14,61	R-I12	15,75	L-I12	12,81
A-I16	16,30	F-I16	15,61	R-I16	19,17	L-I16	15,63
A-I20	18,52	F-I20	15,65	R-I20	19,64	L-I20	17,92
C-O08	15,16	S-O08	13,33	H-O08	13,51	P-O08	18,00
C-O12	17,25	S-O12	17,35	H-O12	17,22	P-O12	20,03
C-O16	18,87	S-O16	19,79	H-O16	18,74	P-O16	19,77
C-O20	17,35	S-O20	19,48	H-O20	17,98	P-O20	20,47
C-I08	11,20	S-I08	11,74	H-I08	7,55	P-I08	17,90
C-I12	10,73	S-I12	16,71	H-I12	9,26	P-I12	20,44
C-I16	18,03	S-I16	16,49	H-I16	15,13	P-I16	22,23
C-I20	17,97	S-I20	20,61	H-I20	16,03	P-I20	22,75

A figura 4.1 mostra a resistência à tração na flexão do concreto de resina poliéster isoftálica frente às soluções agressivas, em função do teor de cinza volante utilizado em cada composição.



**Figura 4.1** Resistência à tração na flexão após agressão química do concreto polímero de resina poliéster isoftálica.

A figura 4.2 mostra a resistência à tração na flexão do concreto de resina poliéster ortoftálica frente às soluções agressivas, em função do teor de cinza volante utilizado em cada composição.



**Figura 4.2** Resistência à tração na flexão após agressão química do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade

As tabelas 4.14 a 4.36 e as figuras 4.3 a 4.10 apresentam as deformações longitudinais para o ensaio de módulo de elasticidade realizados em três corpos-de-prova, designados como A, B e C, para cada traço de concreto polímero investigado.

Com objetivo de reduzir o número de dados, as tabelas foram produzidas utilizando-se somente os dados referentes às tensões obtidas a cada 10 MPa. As figuras foram produzidas com as deformações obtidas a cada segundo.

**Tabela 4.14** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-8A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,9	388,0	10,1
39,3	784,5	20,0
59,1	1217,0	30,1
78,8	1695,0	40,1
98,4	2270,0	50,1
118,0	3045,0	60,1
138,0	4525,0	70,3
142,0	ruptura	72,3

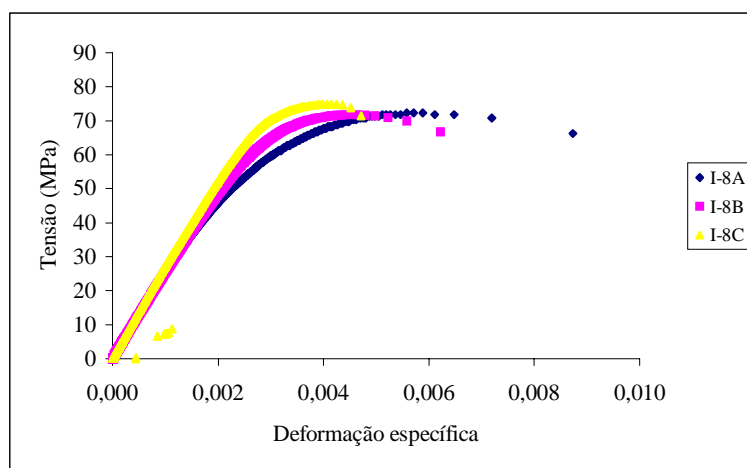
**Tabela 4.15** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-8B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,8	384,2	10,1
39,3	779,5	20,0
59,0	1189,1	30,0
78,7	1616,8	40,1
98,4	2075,7	50,1
118,0	2630,1	60,1
138,0	3693,4	70,1
141,0	ruptura	71,7

**Tabela 4.16** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-8C

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,9	377,0	10,1
39,5	773,2	20,1
59,0	1194,5	30,0
78,6	1654,8	40,0
98,4	2203,6	50,1
118,0	2952,6	60,1
137,0	ruptura	70,0

A figura 4.3 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster isoftálica com 8% de cinza volante.

**Figura 4.3** Diagrama tensão-deformação referente aos corpos-de-prova I-8 (A,B e C)

**Tabela 4.17** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-12A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,8	371,6	10,1
39,4	738,0	20,1
59,2	1123,4	30,2
78,6	1518,6	10,0
98,2	1968,3	50,0
118,0	2542,1	60,2
138,0	3372,4	70,1
156,0	ruptura	79,7

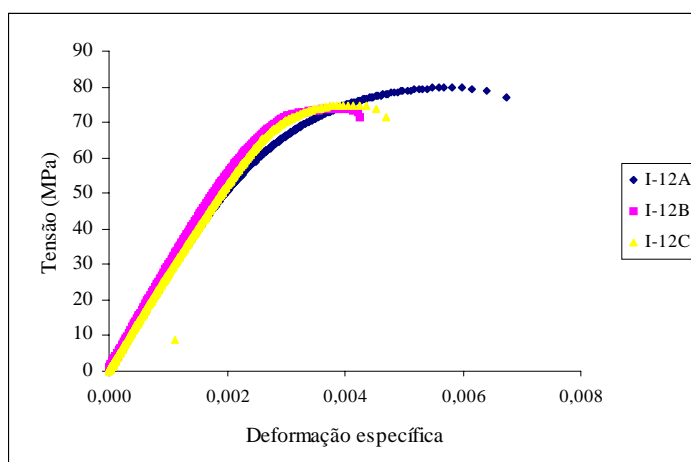
**Tabela 4.18** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-12B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,9	323,8	10,1
39,5	666,1	20,1
59,1	1021,5	30,1
78,5	1382,4	40,0
98,2	1773,9	50,0
118,0	2226,7	60,1
138,0	2862,4	70,1
145,0	ruptura	73,8

**Tabela 4.19** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-12C

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,9	362,2	10,1
39,4	726,1	20,1
59,2	1112,8	30,2
78,5	1501,9	40,0
98,2	1907,7	50,0
118,0	2352,1	60,1
138,0	2972,6	70,1
147,0	ruptura	74,9

A figura 4.4 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster isoftálica com 12% de cinza volante.

**Figura 4.4** Diagrama tensão-deformação referente aos corpos-de-prova I-12 (A, B e C)

**Tabela 4.20** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-16A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,6	315,3	10,0
39,5	674,4	20,1
59,1	1008,7	30,1
78,8	1337,8	40,1
98,5	1736,9	50,1
118,0	2291,1	60,1
138,0	3566,0	70,1
142,0	ruptura	72,2

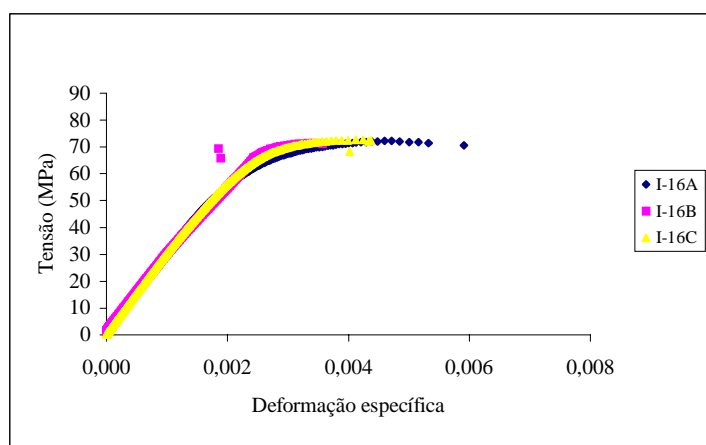
**Tabela 4.21** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-16B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,8	293,9	10,1
39,3	634,8	20,0
58,9	987,1	30,0
78,6	1381,1	40,1
98,3	1794,1	50,1
118,0	2213,5	60,1
138,0	2844,4	70,0
140,0	ruptura	71,5

**Tabela 4.22** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-16C

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,7	319,5	10,1
39,5	652,2	20,1
59,1	988,6	30,1
78,7	1349,6	40,1
98,3	1736,1	50,1
118,0	2187,9	60,1
138,0	3043,1	70,1
143,0	ruptura	72,6

A figura 4.5 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster isoftálica com 16% de cinza volante.

**Figura 4.5** Diagrama tensão-deformação referente aos corpos-de-prova I-16 (A, B e C)

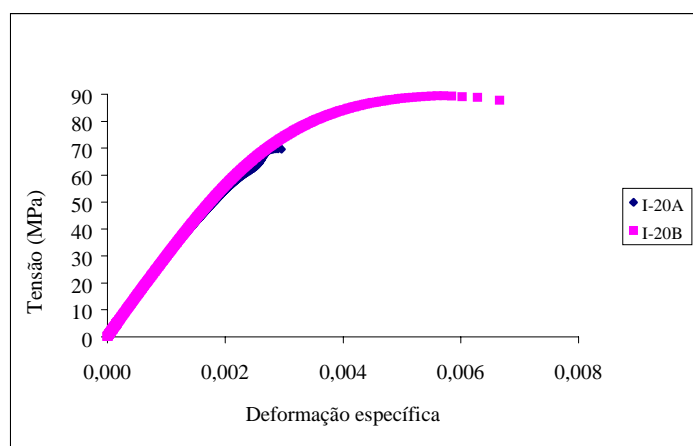
**Tabela 4.23** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-20A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,7	327,4	10,0
39,6	672,2	20,2
59,0	1021,8	30,0
78,7	1405,6	40,1
98,3	1816,1	50,1
118,0	2304,9	60,0
137,0	ruptura	69,8

**Tabela 4.24** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova I-20B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,6	317,5	10,0
39,5	656,3	20,1
58,9	997,8	30,0
78,6	1357,3	40,1
98,3	1740,0	50,1
118,0	2173,4	60,1
138,0	2709,8	70,0
157,0	3497,4	80,1
176,0	ruptura	89,4

A figura 4.6 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster isoftálica com 20% de cinza volante.

**Figura 4.6** Diagrama tensão-deformação referente aos corpos-de-prova I-20 (A e B)

♦ Para o corpo-de-prova I-20C não foi gerada tabela em virtude do pequeno número de dados. Houve problemas na execução do ensaio desta amostra.



**Tabela 4.25** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-8A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,8	420,3	10,1
39,5	847,8	20,1
58,9	1290,5	30,0
78,9	1780,6	40,2
98,3	2329,1	50,1
118,0	3080,0	60,1
137,0	ruptura	69,9

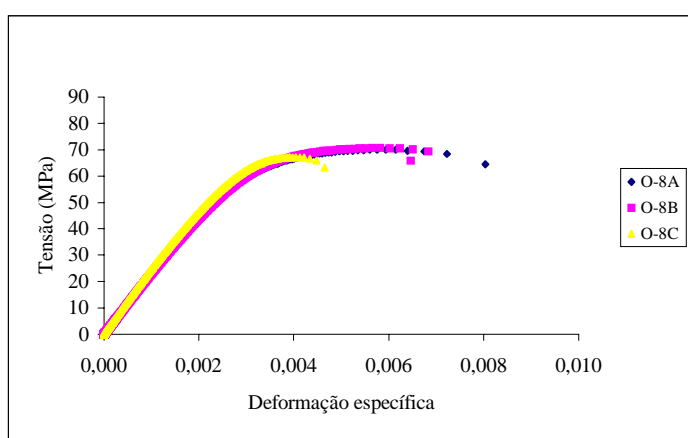
**Tabela 4.26** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-8B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,7	431,3	10,0
39,5	869,6	20,1
59,2	1323,2	30,1
78,6	1801,6	40,1
98,4	2342,0	50,1
118,0	3038,4	60,2
138,0	4977,8	70,1
139,0	ruptura	70,2

**Tabela 4.27** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-8C

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,7	394,2	10,0
39,3	803,1	20,0
59,2	1233,1	30,1
78,9	1691,8	40,2
98,4	2197,0	50,1
118,0	2832,9	60,2
132,0	ruptura	67,1

A figura 4.7 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster ortoftálica com 8% de cinza volante.

**Figura 4.7** Diagrama tensão-deformação referente aos corpos-de-prova O-8 (A,B e C)

**Tabela 4.28** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-12A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,9	381,8	10,1
39,4	767,7	20,1
58,9	1161,6	30,0
78,6	1592,4	40,0
98,5	2091,0	50,2
118,0	2695,8	60,1
134,0	ruptura	68,2

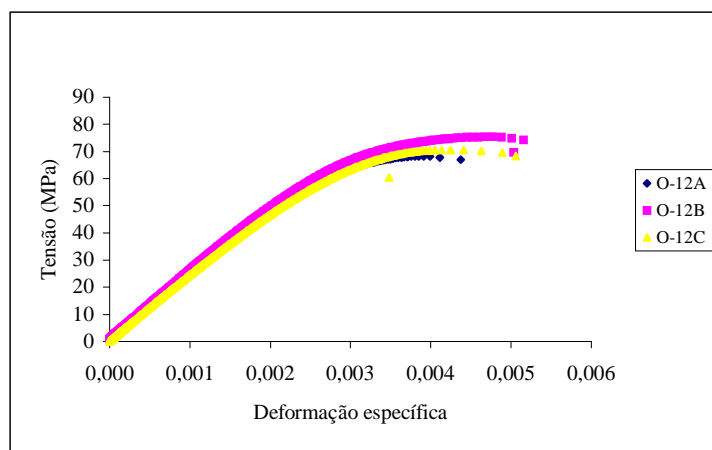
**Tabela 4.29** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-12B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,9	362,1	10,1
39,4	757,3	20,1
59,1	1153,3	30,1
78,5	1570,4	40,0
98,2	2029,3	50,0
118,0	2562,6	60,1
137,0	3322,6	70,0
148,0	ruptura	75,5

**Tabela 4.30** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-12C

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,6	393,6	10,0
39,6	810,5	20,2
59,1	1233,0	30,1
78,9	1682,7	40,2
98,2	2163,9	50,0
118,0	2756,8	60,1
137,0	3819,8	70,0
139,0	ruptura	70,6

A figura 4.8 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster ortoftálica com 12% de cinza volante.

**Figura 4.8** Diagrama tensão-deformação referente ao corpos-de-prova O-12 (A, B e C)

**Tabela 4.31** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-16A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,7	449,0	10,0
39,5	730,6	20,1
59,1	1026,3	30,1
78,7	1376,3	40,1
98,4	1746,7	50,1
118,0	2146,2	60,0
138,0	2612,7	70,1
146,2	ruptura	74,6

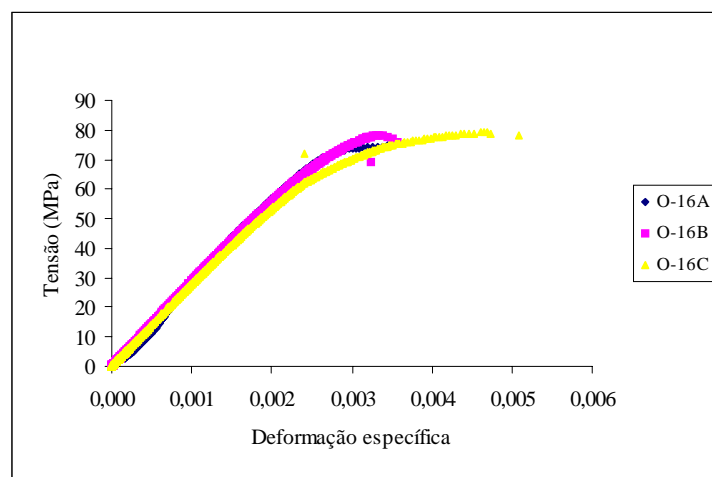
**Tabela 4.32** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-16B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
20,0	350,3	10,2
39,4	692,8	20,1
59,1	1042,3	30,1
78,9	1403,8	40,2
98,4	1781,6	50,1
118,0	2177,2	60,0
138,0	2656,0	70,0
153,0	ruptura	78,1

**Tabela 4.33** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-16C

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,7	355,1	10,0
39,4	714,4	20,1
59,0	1080,9	30,1
78,8	1461,4	40,2
98,2	1858,7	50,0
118,0	2301,3	60,0
138,0	3010,4	70,1
156,0	ruptura	79,2

A figura 4.9 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster ortoftálica com 16% de cinza volante.

**Figura 4.9** Diagrama tensão-deformação referente aos corpos-de-prova O-16 (A, B e C)

**Tabela 4.34** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-20A

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,8	333,3	10,1
39,5	679,3	20,1
58,9	1047,4	30,0
78,7	1425,4	40,1
98,4	1812,2	50,1
118,0	2227,0	60,1
138,0	2700,0	70,1
154,0	ruptura	78,3

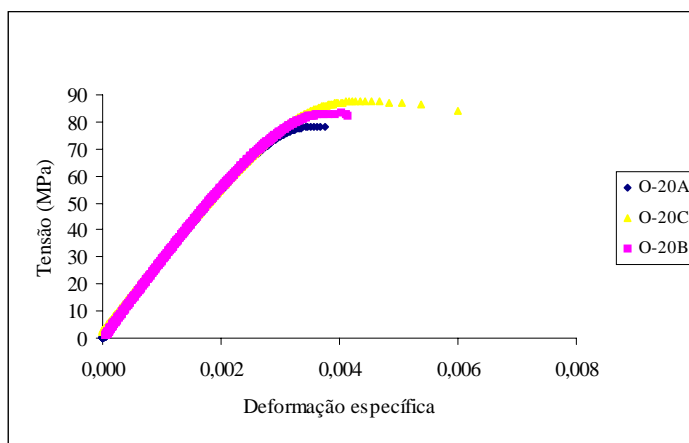
**Tabela 4.35** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-20B

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,8	342,7	10,1
39,5	688,9	20,1
59,0	1037,8	30,0
78,7	1398,3	40,1
98,5	1776,2	50,1
118,0	2176,1	60,0
138,0	2637,4	70,1
157,0	3267,4	80,1
163,0	ruptura	83,2

**Tabela 4.36** Deformações longitudinais para o corpo-de-prova O-20C

Carga (kN)	Deformação ( $\epsilon$ ) ( $10^{-6}$ )	Tensão (MPa)
19,8	275,0	10,1
39,5	639,0	20,1
59,0	1007,8	30,1
78,8	1389,3	40,1
98,2	1778,1	50,0
118,0	2191,8	60,0
138,0	2651,7	70,2
157,0	3198,1	80,1
172,0	ruptura	87,7

A figura 4.10 apresenta o diagrama tensão-deformação para os corpos-de-prova de concreto de resina poliéster ortoftálica com 20% de cinza volante.

**Figura 4.10** Diagrama tensão-deformação referente aos corpos-de-prova O-20 (A, B e C)

Na tabela 4.37 estão relacionados os valores individuais e médios obtidos para o módulo de elasticidade do concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.

**Tabela 4.37** Módulo de elasticidade do concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica com 8, 12, 16 e 20% de cinza volante.

Corpo-de-prova	Módulo de elasticidade (GPa)			S [GPa]	CV[%]	
	valores individuais(A, B e C)					
I-8	23,94	25,00	25,05	24,66	0,62	2,51
I-12	26,42	28,69	26,72	27,28	1,23	4,50
I-16	31,70	29,73	29,69	30,37	1,15	3,78
I-20	28,20	28,59	-	28,40	0,28	0,99
O-8	22,70	22,31	26,13	23,71	2,10	8,86
O-12	25,30	23,59	23,80	24,23	0,93	3,84
O-16	27,16	28,35	26,62	27,38	0,88	3,21
O-20	28,77	28,70	29,38	28,95	0,37	1,25

### 4.2.3 Desgaste por abrasão

O resultado deste ensaio, é expresso em termos de desgaste, que corresponde à média das diferenças entre as alturas iniciais e finais de cinco pontos do corpo-de-prova. A figura 4.11 ilustra uma amostra que foi utilizada neste ensaio sendo medida.



**Figura 4.11** Corpo-de-prova submetido ao desgaste por abrasão.

A tabela 4.38 mostra os resultados parciais e médios obtidos no ensaio de desgaste por abrasão.

**Tabela 4.38** Resultados do ensaio de desgaste por abrasão para o concreto polímero de resinas poliéster insaturadas, isoftálica e ortoftálica, varinado-se o teor de cinza volante

Corpo-de-prova	Índice de desgaste (mm)		
	1	2	média
I-8	4,75	5,05	4,90
I-12	4,14	4,09	4,12
I-16	4,77	4,29	4,53
I-20	5,42	4,89	5,16
O-8	3,93	3,96	3,94
O-12	3,56	3,24	3,40
O-16	3,50	3,69	3,60
O-20	3,34	3,58	3,46

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO CONCRETO POLÍMERO

No presente capítulo são apresentadas a análise e interpretação dos resultados obtidos para o concreto endurecido e que estão relacionados no capítulo 4. Para realização das análises contou-se com o auxílio de pacote estatístico (SPSS), utilizando-se do método Tukey HSD para a realização da análise de variância.

### •Análise de variância:

É utilizada para detectar quais fatores exercem um efeito estatisticamente significativo sobre a resposta. A análise de variância compara estatisticamente a influência de cada fator estudado no experimento, bem como verifica se existe alguma interação entre eles. O uso da análise de variância na comparação de grupos está baseada na relação da variabilidade das médias entre grupos e na distribuição de Fischer (F), com nível de significância  $\alpha$ . Para o presente estudo, toda a análise estatística foi realizada adotando um nível significância de  $\alpha = 0,05$ . Neste trabalho tem-se como respostas dos ensaios mecânicos, as resistências à compressão axial e à tração na flexão, o módulo de elasticidade e desgaste por abrasão e dos ensaios de durabilidade (absorção de água e ataque químico), o ganho de massa e a perda de resistência à tração na flexão, respectivamente.

Em relação aos resultados da primeira parte do trabalho, é realizada análise da resistência à compressão axial e os fatores analisados são o teor de resina e o tipo de resina e a interação entre estes. Na segunda parte são avaliadas as resistências à compressão axial e à tração na flexão, o módulo de elasticidade e o desgaste por abrasão, onde são estudados os fatores teor de cinza, tipo de resina e a interação entre eles. Para o ensaio de ataque químico foram estudados os fatores teor de cinza, tipo de resina, tipo de solução e a interação entre estes fatores.

Em relação ao cabeçalho da tabela de análise de variância (ANOVA), a notação utilizada é a seguinte:

**SQ** = Soma Quadrada

**GDL** = Graus de Liberdade

**MQ** = média Quadrada =  $SQ/GDL$ ;

**F** =  $MQ/MQ_{\text{Erro}}$

**F<sub>AB</sub>** =  $MQ_{AB}/MQ_{\text{Erro}}$  (Efeito de interação entre fatores A e B)

**S** = Significância

Através do valor do parâmetro F calculado, pode se verificar o efeito da variação dos teores de cinza, de resina ou da interação entre estes sobre a resposta (resistência mecânica ou química). Isto é realizado através das médias quadradas. As médias quadradas avaliam a magnitude dos efeitos dos fatores sobre a resposta. A comparação é feita utilizando-se o teste F. Por exemplo, para um fator A genérico,

$$F_{\text{calculado}} = \text{MQA}/\text{MQErro}$$

Através de S pode-se obter a significância dos fatores ou da interação entre os mesmos. Se "S" é menor de 0,05, o fator ou a interação entre os fatores que está sendo avaliado é considerado significativo, ou seja, exerce um efeito sobre a resposta. Informações mais detalhadas sobre a análise de variância podem ser obtidas em RIBEIRO (1995).

## 5.1 Resistência à compressão axial e absorção de água em função do teor de resina

### 5.1.1 Análise estatística para resistência à compressão axial

A partir dos resultados que geraram a tabela 4.1, apresentada no item 4.1, foi realizada a análise de variância, visando-se identificar os efeitos que possam ser significativos (teor de resina, tipo de resina e interação entre estes fatores) sobre a resistência à compressão axial. Os resultados desta análise são apresentados na tabela 5.1. Na tabela 5.2 estão relacionados os subgrupos homogêneos gerados a partir da comparação múltipla das médias.

**Tabela 5.1** Análise de variância da resistência à compressão axial em função do teor de resina

Fonte	SQ	GLD	MQ	F <sub>cal</sub>	S	SIGNIF.
<b>Tipo de resina (A)</b>	7,616	1	7,616	1,115	0,307	NS
<b>Teor de resina (B)</b>	2508,703	3	836,234	122,378	0,000	S
<b>Interação AB</b>	51,530	3	17,177	2,514	0,095	NS
<b>Erro</b>	109,332	16	6,833			
<b>Total</b>	2.677,18	23				

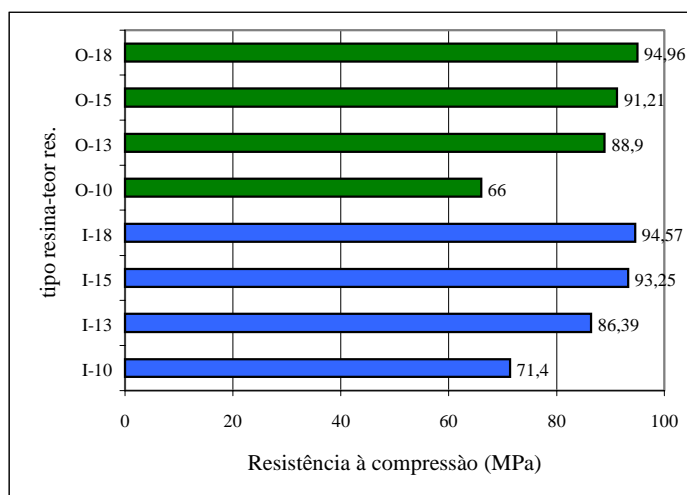
♦NS = Não significativo; S = Significativo



**Tabela 5.2** Subgrupos homogêneos para resistência à compressão axial em função da variação do teor de resina

Teor de resina	Tamanho da amostra	Subgrupos			
		1	2	3	4
10	6	68,6833			
13	6		87,6483		
15	6			92,2283	
18	6			94,7667	
Sig.			1,000	1,000	0,365

A figura 5.1 mostra a resistência à compressão axial do concreto polímero produzido com as resinas poliéster (isoftálica e ortoftálica) nos quatro teores de resina utilizados.



**Figura 5.1** Efeito do tipo e teor de resina sobre a resistência à compressão axial

O modelo de comportamento para resistência à compressão axial em função do teor de resina, para os dois tipos de aglomerantes, concreto polímero de resina poliéster isoftálica e concreto polímero de resina poliéster ortoftálica obtidos por regressão, a partir dos dados deste ensaio, estão descritos a seguir e plotado na figura 5.2.

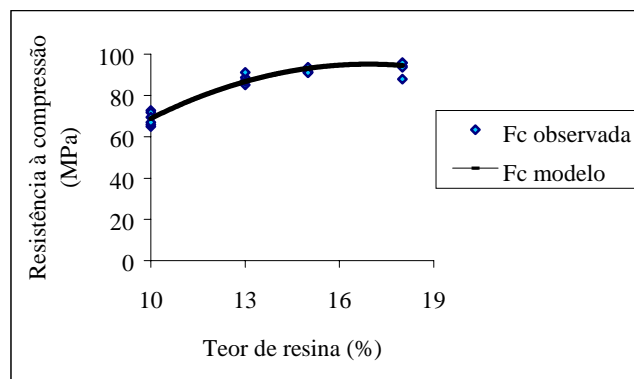
A resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster, dos tipos isoftálica e ortoftálica, em função do teor de resina é representada pela equação 1.

$$f_c = - 61,682 + 18,535 \times R - 0,548 \times R^2 \quad \text{Equação 1}$$

R = Teor de resina

Coeficiente de determinação  $r^2 = 93,3\%$

A figura 5.2 ilustra o comportamento do modelo de regressão e os dados observados no programa experimental



**Figura 5.2** Resistência à compressão axial observada e modelo de regressão para o concreto polímero em função do teor de resina.

O valor do coeficiente de determinação  $r^2$  de 93,3 indica que o modelo explica 93,3 da variabilidade da resistência à compressão. Este valor indica também que somente 6,7% do fenômeno não é explicado pelo modelo proposto, em função de variáveis não controladas no experimento.

### 5.1.2 Discussão dos resultados de resistência à compressão axial

Por intermédio dos resultados apresentados na tabela 4.1 do capítulo 4, pode-se constatar inicialmente que, de modo geral, os concretos produzidos com aglomerantes poliméricos possuem resistência à compressão axial bastante elevadas. Estes resultados apresentam-se em consonância com os resultados observados na literatura. ABDEL-FATTAH e EL-HAWARY (1999) obtiveram 72 MPa em concreto polímero sem adição de fílers e com 12% de resina poliéster, já RAMÍREZ e SÃO JOSÉ (2001) produziram concretos com diferentes misturas de agregados, numa destas utilizaram agregados silicosos e fíler e mediram resistência à compressão de 92 MPa, em outra composição utilizaram agregados de quartzo e fílers e obtiveram 106 MPa, nas duas composições o teor de resina em relação aos agregados foi de 14%.

Os valores de resistência à compressão observados neste estudo, apesar das composições terem baixos teores de resina, são bastante elevados, até mesmo se comparados a concretos de cimento Portland de alta resistência. SENSALÉ (2000), em recente pesquisa, investigou diversas composições de concreto de cimento, onde utilizou teores de até 20% de

cinza de casca de arroz proveniente dos Estados Unidos e obteve como valor máximo 81,76 MPa para resistência à compressão aos 63 dias de cura, para um concreto com relação água/aglomerante de 0,28 e com 15 % de cinza de casca de arroz. ALVES (2000), em estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de alta resistência, com adição de 10% de sílica ativa, observou valores de 80 e 84 MPa utilizando os métodos IPT e Metha, respectivamente. SILVEIRA et al.(1999) conseguiram 90 MPa de resistência utilizando dois tipos de cimentos, uma mistura de cascalho e granito com adição de sílica ativa e relação água/cimento de 0,26.

Os resultados obtidos mostram que os concretos produzidos com os dois tipos de aglomerantes, as resinas poliéster isoftálica e ortoftálica, elevaram a resistência à compressão axial à medida que houve um aumento no teor de resina na composição do concreto polímero (fig. 5.1).

Em ambos os casos, para os dois tipos de composição do concreto (resina isoftálica e ortoftálica), os valores obtidos para o teor de 10% de resina são bastante menores que para os teores de 13, 15 e 18% de resina (fig. 5.1 ). Acredita-se que o fato de o teor de 10% ter mostrado valores inferiores na resistência à compressão axial seja devido ao fato de o aglomerante (resina) não estar em quantidade suficiente para envolver todas as partículas do agregado.

A análise de variância realizada (tabela 5.1) mostra que o efeito tipo de resina não apresenta significância sobre a resistência à compressão axial. Conforme já observado, o concreto produzido com as duas diferentes resinas não mostraram grandes diferenças em suas resistências. Entretanto, o efeito teor de resina mostrou-se significativo, e este fato é facilmente observado pelos resultados que mostram resistências à compressão bastante diferenciadas, ao compararmos os teores de 10, 13, 15 e 18% de resina. Este fato é igualmente evidenciado pela comparação múltipla das médias que gerou a tabela 5.2, onde estão representados os subgrupos homogêneos, onde observa-se que existe diferença entre os teores de 10 e 13% quando comparados aos demais. Sendo que, entre os teores de 15 e 18%, não houve diferença significativa, o que leva a supor que a partir de uma determinada quantidade de resina, no caso a partir de 15%, os valores não apresentam diferenças de resistência significativas. A figura 5.2 ilustra a tendência de estabilização da resistência à compressão a partir dos 15 % de resina. ABDEL-FATTAH e EL-HAWARY (1999) obtiveram resultados de resistência com 12% de resina superiores que com 15% de resina. Neste caso, não foi adicionado fíler, necessitando menos aglomerante comparado com as composições com fílers.

A análise de variância, através do valor de "S", mostrou que não existe interação significativa entre os fatores tipo de resina e teor de resina.

### 5.1.3 Análise estatística para absorção de água

A presente análise foi gerada a partir dos dados que constam na tabela 4.2 do item 4.1 e tem como objetivo investigar se os fatores teor de resina e tipo de resina são significativos na absorção de água do concreto polímero. Os resultados são mostrados nas tabelas 5.3. Na tabela 5.4 estão relacionados os subgrupos homogêneos gerados a partir da comparação múltipla das médias.

**Tabela 5.3** Análise de variância na absorção de água

Fonte	SQ	GLD	MQ	F <sub>cal</sub>	S	SIGNIF.
<b>Tipo de resina (A)</b>	3,637E-02	1	3,637E-02	2,639	0,127	NS
<b>Teor de resina (B)</b>	0,189	3	6,314E-02	4,581	0,020	S
<b>Interação AB</b>	1,769E-02	3	5,895E-03	0,428	0,736	NS
<b>Erro</b>	0,193	14	1,378E-02			
<b>Total</b>	0,436	21				

**Tabela 5.4** Subgrupos homogêneos para absorção de água em função da variação do teor de resina

Teor de resina	Tamanho da amostra	Subgrupos	
		1	2
10	6	0,22	
13	5	0,22	0,38
15	5	0,13	0,22
18	6		0,22
Sig.		0,609	0,161

### **5.1.4 Discussão dos resultados do ensaio de absorção de água**

Os resultados relacionados na tabela 4.2 do capítulo 4 demonstram que, para ambos concretos, de resina poliéster isoftálica e resina poliéster ortoftálica, a absorção de água foi mínima. Estes resultados são similares aos encontrados na literatura para os compostos de concreto polímero. De acordo com BHUTTA et al. (2001), a absorção de água para argamassas poliméricas fica em torno 0,20%. Neste trabalho, eles produziram compostos de concreto polímero (contrapeso), com 0,11 e 0,09 % de absorção de água. Cabe ressaltar que o aumento no teor de resina tende a diminuir ainda mais a absorção de água, porém em todos os casos, este efeito apresentou-se praticamente irrelevante. Os resultados obtidos com o concreto polímero são bons, até mesmo comparando com concretos de cimento de alta resistência. SILVEIRA et al.(1999) observaram absorção de aproximadamente 2% e 6% para relação água/cimento de 0,27 e 0,78, respectivamente, em concreto produzido com dois tipos de cimento e adição de sílica ativa.

A tabela 5.3 apresenta a análise de variância e mostra que o efeito teor de resina é significativo sobre absorção de água. Isto fica também evidenciado na comparação múltipla das médias onde se observou que entre os teores de 10 e 18% de resina existe diferenças significativas, entretanto entre os demais teores de resina não houve diferenças significativas na absorção de água, ou seja, com os teores de 10, 13 e 15%, os compostos de concreto polímero não mostraram absorção diferenciadas significativamente, o mesmo ocorrendo ao se utilizar 13, 15 e 18% de resina. Os tipos de resina não se apresentaram significativos sobre a absorção de água, ou seja, dentro dos limites trabalhados, os tipos de resina não modificam significativamente a resposta.

## **5.2 Resistência à compressão axial em função do teor de cinza volante**

### **5.2.1 Análise estatística**

Para a presente análise foram utilizados os valores individuais, que geraram a tabela 4.3, apresentada na seção 4.2.1, com o objetivo de analisar os efeitos tipo de resina, teor de cinza volante e a interação entre estes. Os resultados constam na tabela 5.5. Na tabela 5.6 são apresentados os subgrupos homogêneos gerados a partir da comparação múltipla das médias.

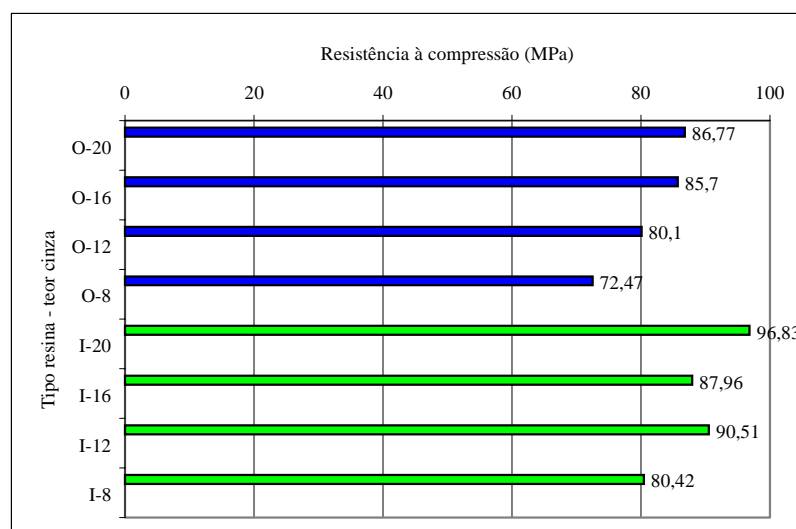
**Tabela 5.5** Análise de variância para resistência à compressão axial em função da variação do teor de cinza volante

Fonte	SQ	GLD	MQ	F <sub>cal</sub>	S	SIGNIF.
<b>Tipo de resina (A)</b>	348,463	1	348,463	354,144	0,000	S
<b>Teor de cinza (B)</b>	739,054	3	246,351	250,368	0,000	S
<b>Interação AB</b>	67,113	3	22,371	22,736	0,000	S
<b>Erro</b>	15,743	16	0,984			
<b>Total</b>	1170,37	23				

**Tabela 5.6** Subgrupos homogêneos para resistência à compressão axial variando o teor de cinza

Teor de cinza	N	Subgrupos			
		1	2	3	4
8,00	6	76,4467			
12,00	6		85,3050		
16,00	6		86,9283		
20,00	6			91,8017	
Sig.		1,000	0,053	1,000	1,000

A figura 5.3 ilustra o efeito tipo de resina e teor de cinza volante sobre a resistência à compressão axial.



**Figura 5.3** Efeito do tipo de resina e teor de cinza volante sobre a resistência à compressão axial.

O modelo de comportamento para resistência à compressão axial em função do teor de cinza volante para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e concreto polímero de resina poliéster ortoftálica obtidos por regressão, a partir dos dados deste ensaio, estão descritos a seguir:

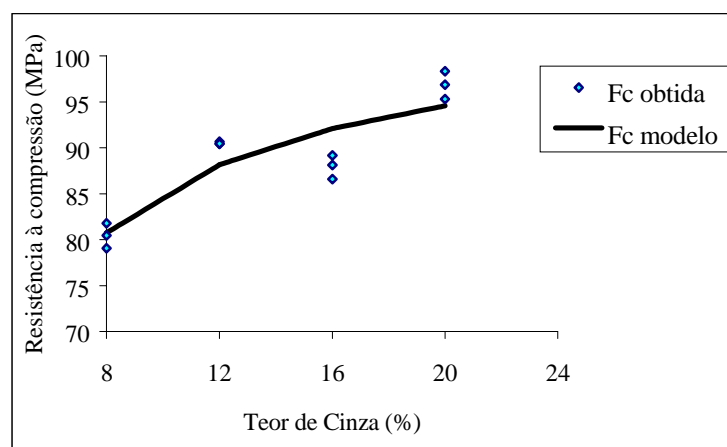
A resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza é representada pela equação 2.

$$f_c = e^{\frac{4,6545 - 2,105}{C}} \quad \text{Equação 2}$$

C = Teor de cinza volante

Coeficiente de determinação  $r^2 = 78,7\%$

Na seguinte figura estão ilustrados, o modelo de regressão e os dados de resistência à compressão axial observados para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.



**Figura 5.4** Resistência à compressão axial observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.

O modelo de regressão acima é o que representou o melhor ajuste dos dados experimentais, ou seja, de maior valor de  $r^2$ . Através desta expressão 78,7% das variabilidades da resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster isoftálica são explicadas. Entretanto 21,3% das variabilidades não podem ser explicadas pelo modelo, em função de variáveis não controladas no processo. Na figura 5.4 pode se observar que os pontos de 12 e 16% de cinza volante não se mostraram bem ajustados ao modelo de regressão, contribuindo para um coeficiente de determinação menor, comparado ao modelo de regressão do concreto de resina ortoftálica.

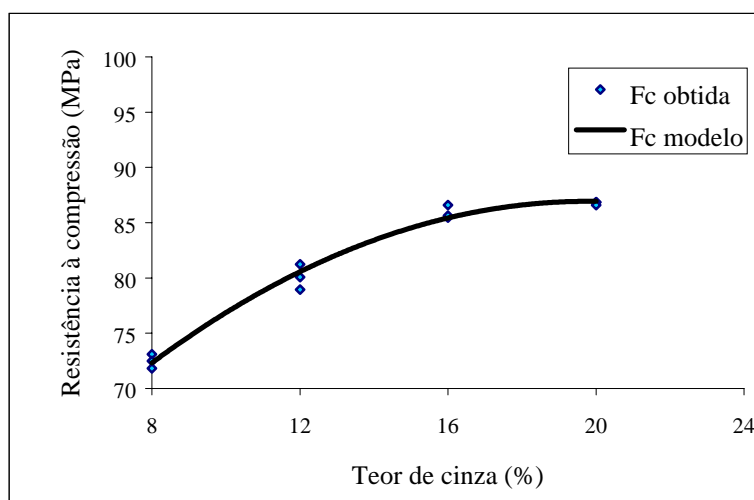
A resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica em função de teor de cinza é representada pela equação 3.

$$f_c = 45,7117 + 4,1692 \times C - 0,1054 \times C^2 \quad \text{Equação 3}$$

C = Teor de cinza volante

Coefficiente de determinação  $r^2 = 98,6\%$

A figura 5.5 ilustra o modelo de regressão e os dados de resistência à compressão axial observados para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.



**Figura 5.5** Resistência à compressão axial observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.

Nota-se, pelo valor do parâmetro  $r^2$ , que a expressão quadrática acima explica 98,6% da variabilidade nos resultados da resistência à compressão. Este valor indica também que apenas 1,4% do fenômeno não é explicado pelo modelo.

### 5.2.2 Discussão dos resultados de resistência compressão axial

Os resultados sumarizados na tabela 4.3 do capítulo 4 mostram altos valores de resistência à compressão conforme mostrado no item 5.1.2. Estes valores estão em consonância com os valores esperados para concretos poliméricos. Os valores, evidentemente, podem variar de acordo com a composição do concreto polímero. ABDEL-AZIM e ATTA (1996) obtiveram concretos com valores de resistência de 92 a 112 MPa utilizando resinas poliéster de alto peso molecular e um teor de 15% de resina em relação ao agregado. Já OSHIMA e KOYANAGI (2001) observaram valores superiores a 120 MPa, utilizando teores



entre 10 e 20% de resina poliéster, agregado graúdo, agregado miúdo e carbonato de cálcio como filler.

Na figura 5.3 observa-se que os teores de cinza volante na composição do concreto polímero modificam a resistência à compressão axial. De modo geral, pode-se perceber que o aumento deste teor eleva a resistência do concreto polímero. Observa-se que a resistência do concreto de resina isoftálica com 20% de cinza é consideravelmente superior que as composições com os demais teores. Neste caso, a cinza por estar em maior quantidade, e em virtude de sua boa esfericidade, pode ter contribuído para um melhor empacotamento da mistura agregado e cinza, favorecendo o aumento da resistência. Este fato não se observa no concreto de resina ortoftálica, em virtude desta resina ter um limite menor de resistência.

Também pode-se constatar que em todas as composições se obteve altos valores para resistência se comparados com valores obtidos no concreto de cimento Portland, mesmo os de alta resistência, com adição de sílica ativa (item 5.1.2) ou cinza de casca de arroz. CASSAL(2000), em seu trabalho com concreto de cimento, do tipo CPV ARI, utilizou teores de cinza de casca de arroz e relação água/aglomerante variados, e obteve como maior valor médio 58,08 MPa para um traço de relação água/aglomerante de 0,4 e 6% de adição.

Outro fato a ser ressaltado é que, para o concreto produzido com a resina poliéster isoftálica, os resultados apresentados foram um pouco superiores aos obtidos para o concreto produzido com a resina poliéster ortoftálica, mantendo-se, deste modo, as características inerentes ao aglomerante. Nos ensaios preliminares constatou-se melhores valores de resistência para a resina poliéster isoftálica. Por intermédio dos modelos de regressão das fig.5.4 e 5.5 observa-se que o concreto de resina isoftálica tende a continuar aumentando a resistência após o teor de 20% de cinza volante, entretanto no concreto com resina ortoftálica, a curva mostra uma tendência à estabilização da resistência. Este fato pode ter relação com o valor da resistência da resina ortoftálica, que é de 91,44 MPa, ou seja, os valores de resistência do concreto polímero de resina ortoftálica, quase atingiram atingiram o limite da resina pura, já a isoftálica tem 117,31 MPa de resistência e concreto polímero de resina isoftálica chegou a 96,83. Isto possivelmente, possa favorecer a obtenção de valores ainda maiores para resistência do concreto polímero de resina poliéster isoftálica.

Através dos resultados obtidos na análise de variância, mostrados na tabela 5.5, percebe-se claramente que os fatores tipo de resina e teor de cinza volante são significativos para a resistência à compressão axial. Do mesmo modo, a interação entre estes fatores

mostrou-se significativa sobre a resistência à compressão axial. Este fato está ilustrado nas figuras 5.3 e 5.4, onde observa-se que o concreto de resina isoftálica com 12% de cinza volante tem resistência à compressão axial superior ao de 16% , enquanto que o de concreto de resina ortoftálica com 12% de cinza volante tem resistência menor que o de 16% de adição. Entretanto, deve ser ressaltado que através da comparação múltipla das médias (tab.5.6), pode-se observar que os teores de 12% e de 16% de cinza volante não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

Os dados da tabela 5.6, gerados da comparação múltipla das médias, deixam evidentes a diferença significativa na resistência à compressão axial entre os teores de cinza estudados, ou seja, existe diferença significativa entre o teor de 8% comparado aos demais e entre o teor de 20% com relação aos outros. Porém, os teores de 12% e 16% não apresentaram diferenças significativas entre si, mas mostram-se significamente diferentes quando comparados aos teores de 8 e 20% de cinza volante.

### **5.3 Resistência à tração na flexão em função do teor de cinza volante**

#### **5.3.1 Análise estatística**

As tabelas 5.7 e 5.8 mostram os resultados obtidos na análise estatística do ensaio de resistência à tração na flexão. Os resultados destas tabelas são originados da análise realizada sobre os resultados individuais que geraram a tabela 4.4 do item 4.2.1. Esta análise tem o objetivo de mostrar a existência ou não de efeitos significativos quanto aos fatores teor de cinza volante, tipo de resina e a interação entre estes fatores e mostrar os subgrupos homogêneos a partir da comparação múltipla das médias.

Os resultados deste ensaio servem como referência para comparação com os resultados que foram gerados no ensaio de ataque químico, já que as amostras moldadas para o presente ensaio e para o ensaio de ataque químico apresentam a mesma composição química e estes não sofreram agressão química.

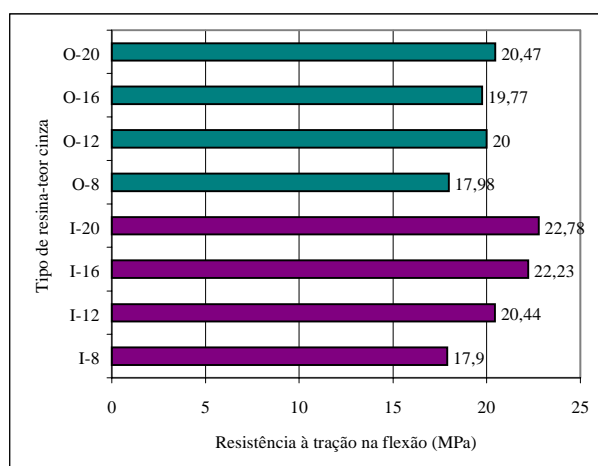
**Tabela 5.7** Análise de variância para resistência à tração na flexão em função da variação do teor de cinza volante

Fonte	SQ	GLD	MQ	F <sub>cal</sub>	S	SIGNIF.
<b>Tipo de resina (A)</b>	9,869	1	9,869	11,704	0,004	S
<b>Teor de cinza (B)</b>	46,761	3	15,587	18,486	0,000	S
<b>Interação AB</b>	7,516	3	2,505	2,971	0,063	NS
<b>Erro</b>	13,491	16	0,843			
<b>Total</b>	77,637	23				

**Tabela 5.8** Subgrupos homogêneos para resistência à tração na flexão variando o teor de cinza

Teor de cinza	Tamanho da amostra	Subgrupos	
		1	2
8,00	6	17,9367	
12,00	6		20,2167
16,00	6		21,0000
20,00	6		21,6250
Sig.		1,000	,074

A figura 5.6 mostra o efeito do tipo de resina e do teor cinza sobre a resistência à tração na flexão.



**Figura 5.6** Efeito do tipo de resina e teor de cinza volante sobre a resistência à tração na flexão.

O modelo de comportamento para resistência à tração na flexão em função do teor de cinza volante para os dois tipos de aglomerantes, concreto polímero de resina poliéster isoftálica e concreto polímero de resina poliéster ortoftálica, obtidos por regressão, estão descritos a seguir:

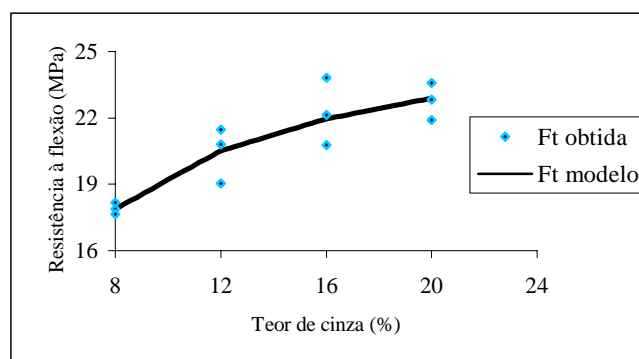
A resistência à tração na flexão do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza é representada pela equação 4.

$$f_t = e^{\frac{3,2956 - 3,2933}{C}} \quad \text{Equação 4}$$

C = Teor de cinza volante

Coefficiente de determinação = 83,7%

A figura 5.7 ilustra o modelo de regressão e os dados de resistência à tração na flexão, observados para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.



**Figura 5.7** Resistência à tração na flexão observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica.

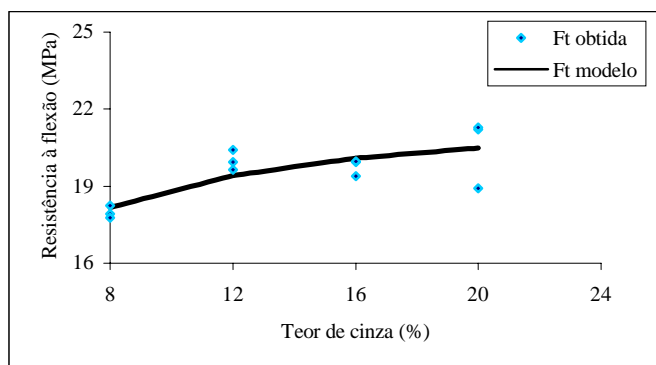
A resistência à tração na flexão do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica em função de teor de cinza é representada pela equação 5.

$$f_t = e^{\frac{3,1010 - 1,6142}{C}} \quad \text{Equação 5}$$

C = Teor de cinza volante

Coefficiente de determinação  $r^2 = 64,0\%$

A figura 5.8 ilustra o modelo de regressão e os dados de resistência à tração na flexão, observados para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.



**Figura 5.8** Resistência à tração na flexão observada e modelo de regressão para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica.

Através dos valores de  $r^2$  obtidos para o ensaio de resistência à tração na flexão, pode-se dizer que 83,7 e 64% das variabilidades do ensaio podem ser explicadas pelos modelos gerados para o concreto de resina poliéster isoftálica e ortoftálica, respectivamente. Por intermédio da figura 5.8 observa-se que os valores observados no programa experimental estão mais dispersos do modelo de regressão gerado em relação a figura 5.7, justificando a diferença nos coeficientes de correlação.

### 5.3.2 Discussão dos resultados de resistência à tração na flexão

Os valores obtidos para o presente experimento, que constam na tabela 4.4 do capítulo 4, mostram que os concretos poliméricos atingem excelentes resistências à tração na flexão e são semelhantes aos relatados na literatura. FATTAH e HAWARY (1999) desenvolveram contrapesos de concreto polímero produzidos com resina poliéster, adicionados de resíduos de ferro e carbonato de cálcio como fíler e obtiveram 21,5 e 28,7 MPa, em duas diferentes composições. Os valores observados no presente estudo são bastante altos se comparados com concretos produzidos com cimento Portland, até mesmo, com os de alta resistência. SENSALÉ (2000), em seu trabalho com concreto de cimento, obteve com adição de 20% de cinza de casca de arroz originada dos Estados Unidos e com relação água/aglomerante de 0,25 o valor médio de 7,60 MPa. Já SILVEIRA et al.(1999) conseguiram 90 MPa de resistência à compressão, entretanto nesta mesma composição a resistência à tração na flexão foi de 4,06 MPa. No estudo deste autor, o maior valor de resistência à tração na flexão foi 5,51 e nesta composição a resistência à compressão foi de 53,7 MPa. Foram utilizados, nestas composições, dois tipos de cimentos, uma mistura de cascalho e granito com adição de sílica ativa e relação água/cimento de 0,26 e 0,49, respectivamente. Outro fator diferenciado em relação ao concreto de cimento, é a relação da resistência à tração na flexão com a resistência à compressão. Para o concreto de cimento Portland, geralmente, a resistência à tração na flexão, fica em torno de 10% da resistência à compressão, no caso do concreto polímero, neste trabalho, o percentual foi de 22, 2 a 25% da resistência à compressão.

Pode-se observar, também, que os concretos produzidos com ambas resinas mostraram uma tendência de crescimento da resistência à tração na flexão à medida que se eleva o percentual de cinza volante na composição do concreto polímero.

Por intermédio da figura 5.6, observa-se que a resistência à tração na flexão para o concreto de resina poliéster isoftálica, de modo geral, mostrou-se superior, mantendo a mesma

tendência da resistência à compressão. Também fica evidente que o concreto polímero com teor de 8% de cinza volante apresenta resistência significativamente inferior às das demais composições, comprovado estatisticamente na tabela 5.8.

Através da análise estatística sumarizada na tabela 5.7 evidencia-se a influência do tipo de resina sobre a propriedade em estudo. Ainda superior, é a significância do teor de cinza volante.

Os subgrupos homogêneos representados na tabela 5.8 mostram que a diferença significativa para esta propriedade se evidencia no teor de 8% de cinza volante comparado aos demais. Entre os teores de 12, 16 e 20% de cinza volante, as diferenças não são significativas para resistência à tração na flexão, entretanto um comportamento bastante diferente é observado na análise precedente, a qual mostra que, para a resistência à compressão axial, obteve-se diferenças significativas entre todos os percentuais de cinza volante. A partir dos dados acima, pode-se concluir que a variação do efeito do teor de cinza contribui fortemente para o aumento da resistência à compressão, o mesmo não ocorrendo na resistência à tração na flexão, que apresenta diferença significativa somente no teor de 8% comparado aos demais. Possivelmente a modificação no teor de resina mostrasse grande influência sobre esta última propriedade, já que a resina pode influenciar mais na flexão. OSHIMA e KOYANAGI (2001) obtiveram valores entre 20 e 30 MPa, utilizando 10 e 13% de resina e, entre 30 até um pouco mais de 40 MPa com 20% de resina. A composição, além do aglomerante e agregados graúdo e miúdo, tinha como fíler o carbonato de cálcio. O fato de se observar diferenças significativas somente entre 8% de cinza em relação aos demais teores, pode também estar relacionado com o conteúdo de aglomerante. Sabe-se que a introdução de fílers e fibras pode aumentar a resistência à tração na flexão, mas é necessário que se tenha um conteúdo suficiente para aglomerar bem as partículas. MEBARKIA e VIPULANANDAN (1996) observaram que a introdução de fibras em teor até 6% produziu aumento na resistência à tração na flexão, de dois tipos de composições de concreto polímero de resina poliéster, 14 e 18% de resina, entretanto ao utilizarem 10% de resina, a partir de 3% passou a decrescer a resistência. No presente estudo, o fato das resistências nos teores de em 12, 16 e 20% não apresentarem diferenças significativas, indica que possivelmente, com um teor de resina maior, se obteria maior resistência, pois o fíler, em virtude de sua boa esfericidade, consome mais aglomerante.

## 5.4 Ataque químico

### 5.4.1 Análise estatística

O ensaio de ataque químico tem como resposta a perda de massa e a medida de resistência à tração na flexão. Para a análise estatística foi adotado o ensaio de resistência à tração na flexão, pelo fato de ter apresentado uma variação considerável, comparado ao teste de referência (valores da resistência à tração na flexão do concreto polímero que não foi submetido ao ataque químico). De maneira análoga aos ensaios anteriores, neste ensaio foram utilizados, para a análise estatística, os valores individuais que geraram a tabela 4.13, que apresenta as resistências à tração na flexão para os corpos-de-prova que foram submetidos ao ataque químico em sete diferentes soluções. A análise tem como objetivo averiguar isoladamente a influência do teor de cinza volante, do tipo de resina e do tipo de solução, bem como a interação entre os fatores, tipo de resina e solução, solução e teor de cinza e tipo de resina e teor de cinza e, finalmente, a interação entre os três fatores: tipo de resina, tipo de solução e teor de cinza. Os resultados desta análise encontram-se sumarizados na tabela 5.9. Nas tabelas 5.10 e 5.11 estão apresentados os subgrupos homogêneos provenientes da comparação múltipla das médias em função do tipo de solução agressora e do teor de cinza volante na composição do concreto polímero.

**Tabela 5.9** Análise de variância para o ensaio de ataque químico

Fonte	SQ	GLD	MQ	F <sub>cal</sub>	S	SIGNIF.
<b>Tipo de resina (A)</b>	78,677	1	78,677	113,634	0,000	S
<b>Solução (B)</b>	458,224	7	65,461	94,546	0,000	S
<b>Teor de cinza (C)</b>	819,032	3	273,011	394,314	0,000	S
<b>Interação AB</b>	110,959	7	15,851	22,894	0,000	S
<b>Interação AC</b>	15,971	3	5,324	7,689	0,000	S
<b>Interação BC</b>	119,256	21	5,679	8,202	0,000	S
<b>Interação ABC</b>	94,753	21	4,512	6,517	0,000	S
<b>Erro</b>	65,775	95	0,692			
<b>Total</b>	1762,647	158				

**Tabela 5.10** Subgrupos homogêneos da resistência à tração na flexão medida para amostras que sofreram ataque químico nas diferentes soluções

Soluções	N	Subgrupos			
		1	2	3	4
ácido acético	22	14,3591			
água destilada	17		15,2941		
ácido fórmico	20		15,3975		
ácido láctico	17		15,7035		
ácido cítrico	20		15,7080		
coca cola	20			16,7790	
ácido sulfúrico	23			17,1635	
referência	20				20,3045
Sig.		1,000	0,772	0,832	1,000

**Tabela 5.11** Subgrupos homogêneos em função do teor de cinza para o ensaio de ataque químico

Teor de cinza [%]	N	Subgrupos			
		1	2	3	4
8	35	12,2951			
12	41		15,9746		
16	42			17,7850	
20	41				18,7595
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

#### 5.4.2 Discussão dos resultados do ensaio de ataque químico

Inicialmente, é importante ressaltar que os corpos-de-prova que foram submetidos ao ataque das sete soluções utilizadas para este estudo, após realizada a última medida de massa, que ocorreu ao término do quinto ciclo de ataque, não sofreram perda de massa. Isto pode ser observado nas tabelas de números 4.5 a 4.11. Salienta-se que os concretos de cimento Portland, quando submetidos a estas condições, comumente tem grande perda de massa (MEBARKIA e VIPULANANDAN, 1995). Em pesquisa realizada por KULAKOWSKI et al.(1997), investigando a resistência química de concretos de cimento do tipo CPV ARI, com adição de 9% sílica ativa e relação água/aglomerante de 0,59, foram observadas as perdas de massa que constam na tabela 5.12.



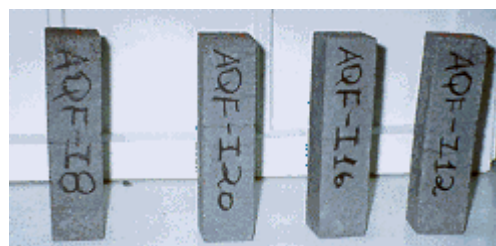
**Tabela 5.12** Perda de massa, em porcentagem, do concreto de cimento com adição de 9% de sílica ativa (KULAKOWSKI et al.,1997)

Tipo de solução	Perda de massa (%)
Ácido acético	13,6
Ácido fórmico	20,0
Ácido láctico	17,0
Ácido sulfúrico	32,3
Água destilada	0,9
Refrigerante a base de cola	2,5

Cabe salientar que as amostras de concreto polímero que sofreram agressão química, em todas as soluções utilizadas no presente estudo, também não mostraram modificações nas suas superfícies. As figuras 5.9 e 5.10 mostram o aspecto dos corpos-de-prova durante e após o ataque químico.



**Figura 5.9** Corpos-de-prova durante o ataque químico.



**Figura 5.10** Corpos-de-prova de PC de resina isoftálica submetidos ao ataque de ácido fórmico, após rompimento.

Analisando-se os valores de resistência à tração na flexão da tabela 4.13, tanto para os corpos-de-prova de concreto de resina isoftálica, como para os de concreto de resina ortoftálica, que foram submetidas à agressão de soluções corrosivas, percebe-se que, de modo geral, houve alguma perda de resistência, sendo que isto se tornou mais pronunciado nas amostras de concreto polímero onde o teor de cinza volante na composição era menor. Este fato pode ser melhor visualizado por intermédio das figuras 4.1 e 4.2 onde se observa que tanto no concreto de resina poliéster isoftálica, como no concreto de resina ortoftálica, em todos os sete meios agressivos estudados, houve uma tendência de decréscimo da perda de resistência com aumento do teor de cinza volante na composição do concreto.

Na tabela 5.13 estão relacionadas as perdas de resistência, em percentual, para as composições com 8% e 20% de cinza volante. Os dados da tabela mostram que em todas as composições, tanto para o concreto de resina poliéster isoftálica, como para concreto de resina ortoftálica, a cinza volante em maior quantidade proporcionou um aumento na resistência química.

**Tabela 5.13** Resistência à tração na flexão do concreto polímero de resina isoftálica e ortoftálica com 8 e 20% de cinza volante, após agressão química.

PC resina isoftálica	ft média após agressão (MPa)	% perda ft*	PC resina ortoftálica	ft média após agressão (MPa)	% perda ft*
A-I08	10,58	40,9	A-O08	8,28	54,0
A-I20	18,52	18,6	A-O20	19,63	4,1
C-I08	11,20	37,4	C-O08	15,16	15,8
C-I20	17,97	21,0	C-O20	17,35	15,2
F-I08	10,41	41,8	F-O08	11,83	34,3
F-I20	15,65	31,2	F-O20	18,40	10,1
S-I08	11,74	34,4	S-O08	13,33	25,9
S-I20	20,61	9,4	S-O20	19,48	4,8
R-I08	11,18	37,5	R-O08	11,32	37,1
R-I20	19,64	13,7	R-O20	19,20	6,2
H-I08	7,55	57,8	H-O08	13,51	25,0
H-I20	16,03	29,5	H-O20	17,98	12,2
L-I08	11,82	34,0	L-O08	11,66	35,2
L-I20	17,92	21,2	L-O20	18,16	11,3

\*I08 = 17,90 Mpa  
I20 = 22,75 Mpa

\*O08 = 18,00 MPa  
O20 = 20,47 MPa

\*A porcentagem foi calculada em relação à resistência à tração na flexão referência, ou seja, comparando-se com o concreto que não foi submetido ao ataque químico

Ao compararmos as perdas de resistência do concreto polímero com as obtidas no concreto de cimento, pode-se perceber que no concreto de cimento grandes percentuais de perda fazem com que a resistência remanescente tenha valores muito baixos, como por exemplo, nos ácidos acético e fórmico, conforme pode-se observar na tabela 5.14, que mostra os dados obtidos em pesquisa realizada por KULAKOWSKI et al. (1997), para um concreto de cimento com adição de 9% de sílica ativa e relação água/aglomerante de 0,59. Entretanto, no concreto com aglomerante polimérico, mesmo nos meios onde sofreu mais agressão, como por exemplo, o concreto de resina isoftálica com 8% de cinza volante em água, e o concreto de resina ortoftálica em ácido acético, restaram, após ataque químico, valores de resistência comumente não atingidos pelo concreto de cimento, mesmo sem ataque químico.

**Tabela 5.14** Resistência à tração na flexão do concreto de cimento após agressão química (KULAKOWSKI et al.,1997)

<b>Tipo de solução</b>	<b>ft média após agressão (MPa)</b>	<b>% perda ft*</b>
Ácido acético	1,09	72,3
Ácido fórmico	0,90	77,2
Ácido láctico	3,86	2,4
Ácido sulfúrico	2,8	29,2
Água destilada	5,56	29,0 (aumento ft)
Refrigerante	5,27	25,0 (aumento ft)

\*A porcentagem foi calculada em relação à resistência à tração na flexão referência (3,95 MPa), ou seja, comparando-se com o concreto que não foi submetido ao ataque químico.

CASSAL(2000), em seu trabalho com concreto de cimento, do tipo CPV ARI, utilizando 9% de cinza de casca de arroz e relação água/aglomerante de 0,4, obteve perda de resistência à tração na flexão de 69,1 e 63,3%, respectivamente, para os corpos-de-prova submetidos aos ácidos acético e sulfúrico. A resistência remanescente para estes dois traços ficou em torno de 3,0 MPa.

A perda de resistência no concreto polímero provavelmente está relacionada com a degradação de parte da interface polímero-areia. MEBARKIA E VIPULANANDAN (1995) publicaram os resultados de trabalhos realizados com concreto polímero em alguns ambientes agressivos e comprovaram que, em água, os concretos poliméricos em que se utilizou um agente de acoplamento para aumentar a resistência da ligação agregado-resina houve um decréscimo na perda de resistência do concreto polímero. Os autores observaram uma perda de resistência à tração na flexão de 17% nas amostras de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetidas ao ácido sulfúrico 5%, e de 20% para as amostra colocadas em água, por um período de um mês. Após o ensaio foi medido o carbono orgânico total na água, onde o concreto foi imerso, e obteve-se um valor de 50 ppm, de onde concluíram que o polímero não reagiu ou dissolveu-se na água em quantidades significativas.

No presente trabalho o fato de os concretos poliméricos com maior teor de cinza volante terem apresentado resistência química superior aos que apresentam teor menor de adição, possivelmente esteja relacionado com o efeito fíler, ou seja, à medida que a mistura apresenta menos vazios, ocorre uma diminuição na difusão das soluções agressoras. NORWOOD(1980), em sua pesquisa sobre as resinas poliéster em meios corrosivos, relata a importância do efeito da composição química das resinas poliéster. De acordo com o autor as resinas menos resistentes quimicamente são as ortoftálicas, as de resistência química intermediária são as isoftálicas, sendo a isoftálica com neopentilglicol de resistência superior

às isoftálicas produzidas com outros glicóis, e as mais resistentes são as bisfenólicas. Segundo NORWOOD (1980), a inserção de fílers nas resinas poliéster tem a vantagem de reduzir a retração e aumentar o módulo de elasticidade, porém diminui a resistência química e a flexibilidade. A diminuição na resistência química está relacionada com o fato de aumentar a porosidade e, portanto, a difusão dos agentes agressores. Segundo o autor, quando se introduz fílers, mesmo sendo completamente inertes, se observa uma redução na adesão entre o fíler e a matriz polimérica, resultando em perda de resistência.

NORWOOD (1980) compara o comportamento de resinas puras com resinas adicionadas de fílers. No caso do concreto polímero, não se trata da comparação entre resina pura e resina com fíler, mas de resina com agregados e fíler. No concreto polímero, a introdução de fíler produz compostos com menos vazios. Portanto, acredita-se que o fato de que o concreto polímero com os teores maiores de cinza volante, como 20%, terem se mostrado mais resistentes ao ataque químico seja em virtude destas misturas serem mais compactas, comparadas com as composições que tem menos fíler. Através da análise realizada em MEV se observa que a cinza é formada por partículas bem pequenas e de boa esfericidade. Com isto, proporciona um melhor empacotamento da mistura, e conseqüentemente, a redução dos poros, e uma diminuição na difusão das soluções.

De acordo com NIESSE (1982), a variação na resistência química da resina poliéster insaturada bisfenólica reforçada com fibra de vidro está relacionada com a ligação entre a fibra e a matriz polimérica, e a força desta ligação varia de acordo com a temperatura, e a concentração dos meios agressores. O autor submeteu amostras de poliéster reforçado com fibra de vidro a soluções de ácido clorídrico (HCl), com concentrações de 10 e 35%. Os resultados mostraram que na concentração de 10% as amostras não perderam resistência em temperatura de 65<sup>0</sup>C, imersas por 14 meses. Já com a concentração de 50% houve perdas em torno de 50% da resistência à tração na flexão.

NORWOOD(1980), analisou o comportamento da resina poliéster isoftálica com neopentil glicol, imersa em meios ácidos, por três meses. Neste trabalho constatou que a concentração das soluções agressoras, bem como a temperatura, influenciam na retenção da resistência, ou seja, à medida que se aumenta a concentração da solução ou temperatura, aumenta a tendência de diminuir a resistência química. De acordo com os resultados deste trabalho, em ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) 50%, na temperatura de 20<sup>0</sup>C, a resina conservou 100% de sua resistência à tração na flexão. As amostras colocadas em ácido clorídrico (HCl)

a 30%, na temperatura de 50<sup>0</sup>C, conservaram 99% da resistência, e em ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), na temperatura de 10<sup>0</sup>C, o poliéster manteve 94% da resistência.

No presente estudo todas as soluções foram diluídas para concentração de 5%. Portanto, de acordo com os resultados das pesquisas de NIESSE (1980) e NORWOOD (1980) citadas anteriormente, acredita-se que as resinas poliéster utilizadas na produção do concreto polímero não tenham sofrido perda de resistência significativa e que, portanto, as perdas de resistências estejam mais relacionadas com a porosidade provocada pela introdução dos materiais inertes das amostras de concreto polímero e conseqüente difusão capilar das soluções, enfraquecendo as ligações entre o agregado e a matriz polimérica.

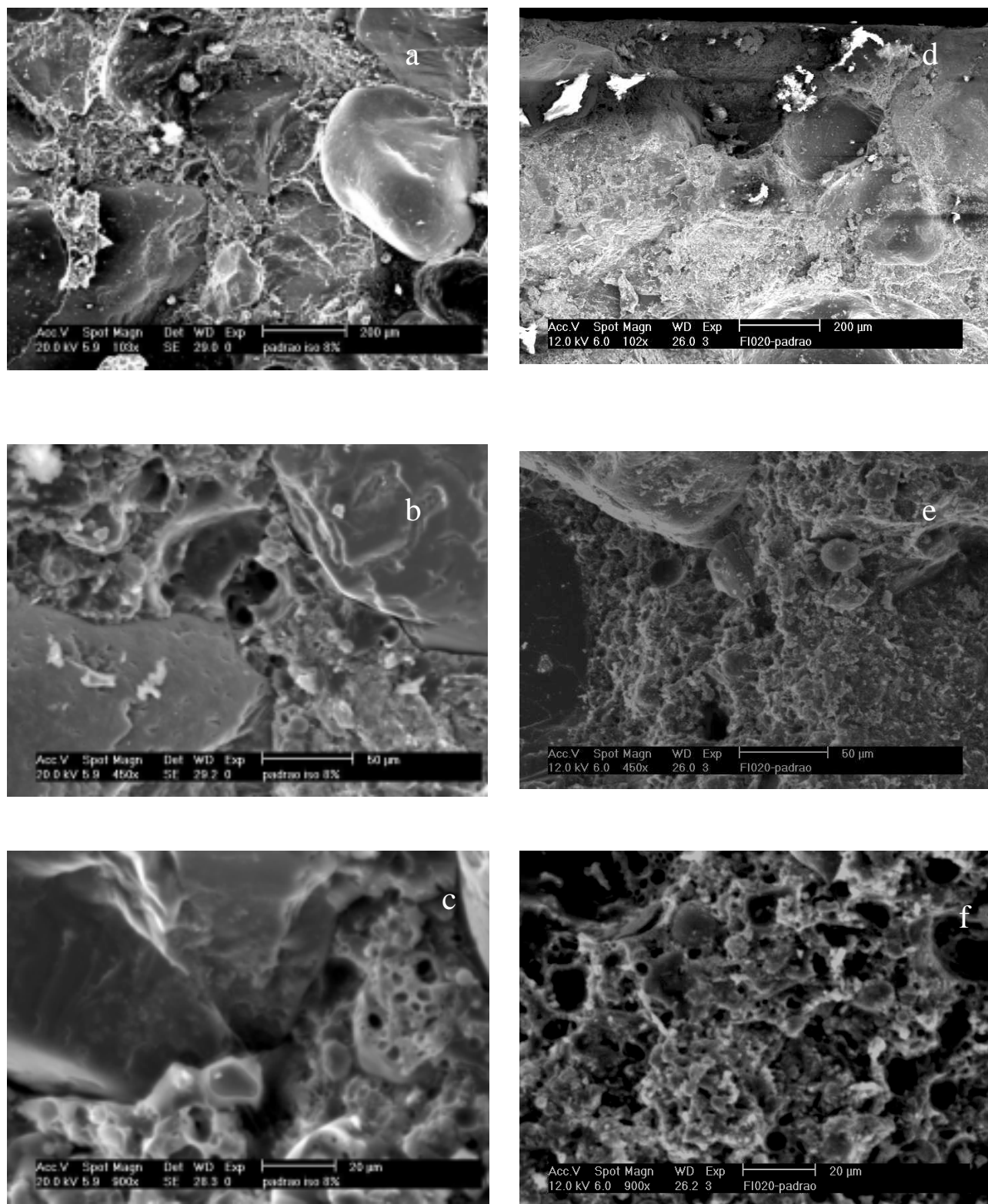
A partir destes dados pode-se inferir que um bom empacotamento dos materiais agregados, o método de mistura que pode levar à incorporação de ar e até mesmo o adensamento devem ser considerados na perda de resistência química do concreto polímero, pois estes fatores podem influenciar na obtenção de um material menos poroso.

Visando fazer comparações com os resultados deste ensaio, foram medidas as resistências à tração na flexão das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica na ausência do agregado e do fíler sem serem submetidas ao ataque químico (referência ou padrão). Também foi realizado todo procedimento do ensaio de ataque químico realizado no concreto polímero, em amostras de resina poliéster isoftálica e ortoftálica puras, ou seja, sem agregado e fíler. As amostras foram submetidas ao ataque dos ácidos acético e sulfúrico, bem como do refrigerante à base de cola e água. Os resultados relacionados na tabela 5.15 mostram que em todas as soluções houve uma pequena perda de resistência. Entretanto, neste caso, pode estar relacionada com a dissolução de pequenas moléculas das resinas, ou até mesmo pequenas variações decorrentes do procedimento experimental. Portanto, a partir destes dados e dos resultados obtidos pelos autores referenciados, pode-se novamente presumir que a perda de resistência do concreto polímero esteja associada ao ataque interfacial que constitui-se numa das formas principais de deterioração das propriedades mecânicas dos compostos de resinas poliéster com adições de fibras em contato com o ambientes agressivos (REICHHOLD, 2002).

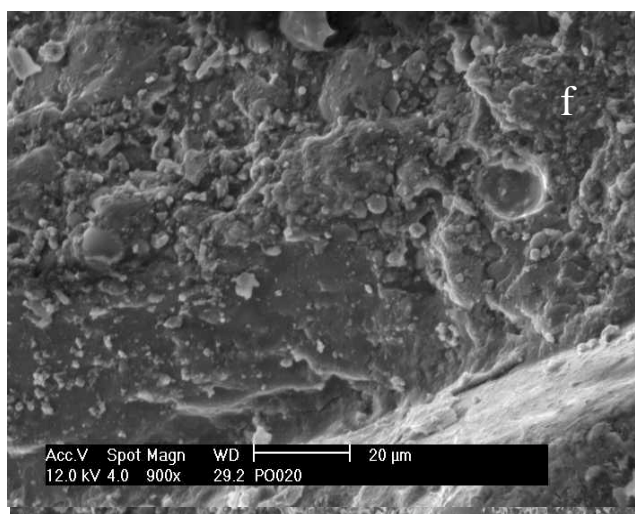
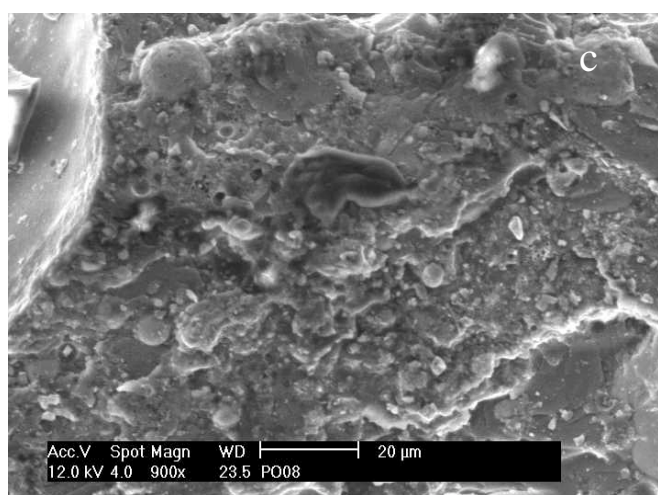
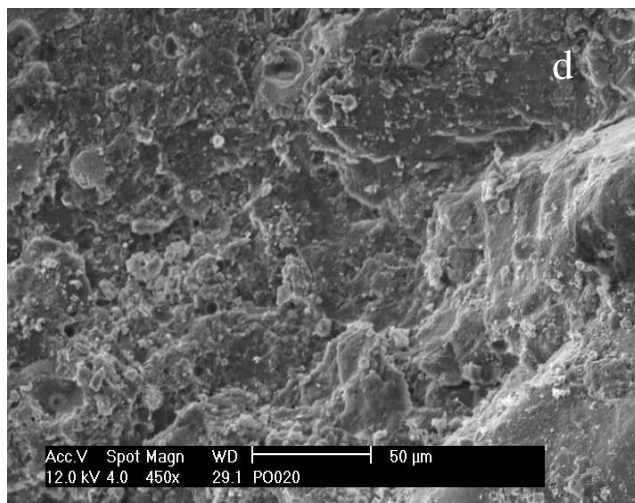
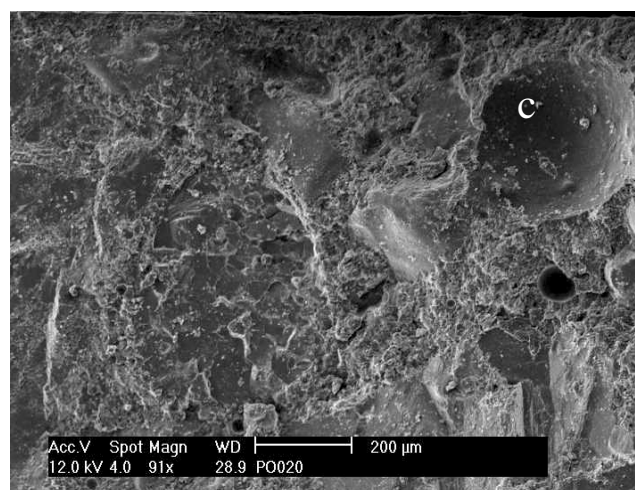
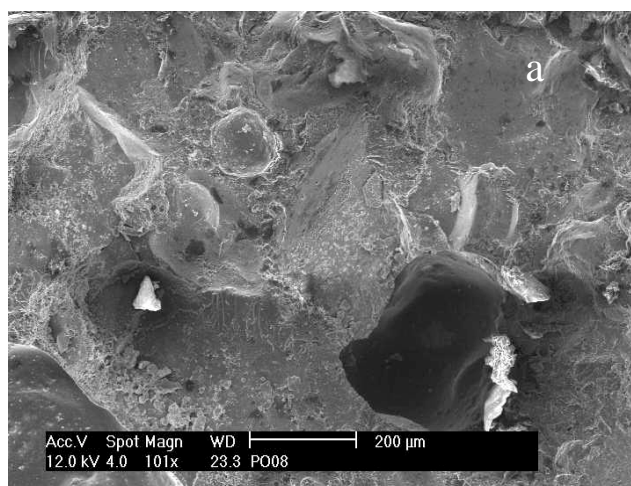
**Tabela 5.15** Resistência à tração na flexão das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica submetidas ao ataque químico.

Resina - Solução	Resistência à tração na flexão (MPa)			Média	% perda ft
Iso – referência	26,29	23,73	24,83	<u>24,95</u>	-
Orto – referência	17,01	16,73	17,94	<u>17,23</u>	-
Iso – acético	25,37	24,02	23,32	24,24	2,9
orto – acético	17,56	15,06	16,63	16,41	4,7
Iso – sulfúrico	24,26	23,06	25,44	24,25	2,8
Orto – sulfúrico	17,16	15,17	16,05	16,13	6,4
Iso – refrigerante	23,09	24,53	22,97	23,89	4,2
orto – refrigerante	16,27	17,99	16,10	16,79	2,6
iso – água dest.	26,01	23,05	22,09	23,71	4,9
orto – água dest.	16,74	17,28	16,02	16,68	3,2

Na análise da microestrutura através de microscopia eletrônica de varredura, observa-se que as misturas com 8% de cinza volante mostram mais vazios e um enfraquecimento da ligação resina-agregado comparadas com aquelas que apresentam na sua composição 20% de cinza volante. Este fato pode ser observado nas figuras 5.13 a 5.20, respectivamente com 8 e 20% de cinza volante, expostas ao ataque dos ácidos acético e sulfúrico, refrigerante à base de cola e água. Em algumas figuras de concreto polímero de resina isoftálica, com 8% de cinza volante, que sofreram agressão do ácido acético, da água e do refrigerante e do concreto de resina ortoftálica, também com 8% de cinza, no ácido acético e sulfúrico, percebe-se com mais clareza um certo desligamento da matriz polimérica em relação ao agregado. Este ataque na interface matriz polimérica-agregado está destacado, através de flechas, nas figuras onde este fato pode ser melhor observado.

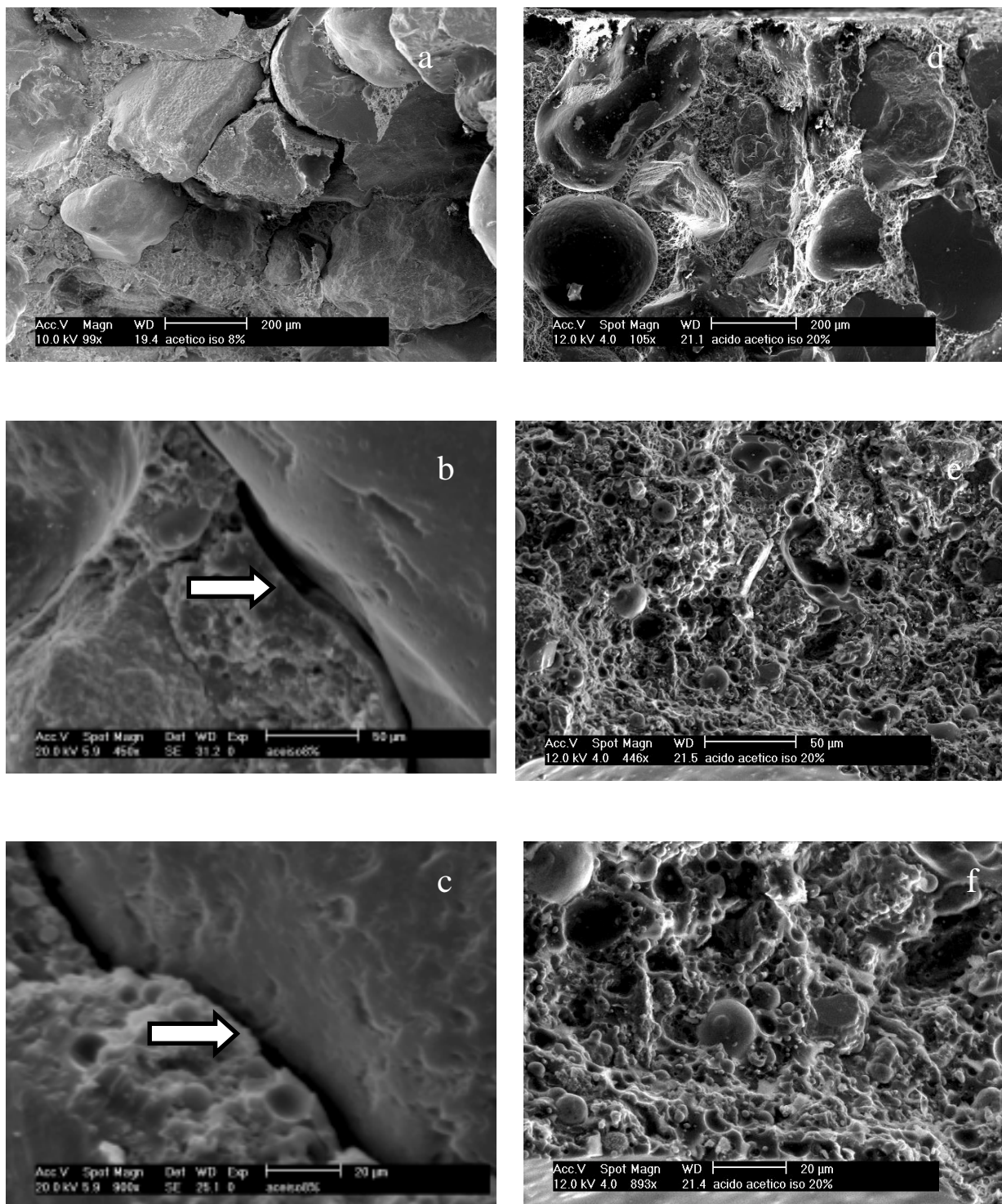


**Figura 5.11 a, b, c, d, e, f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica que não submeteram-se à ataque químico (padrão). Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza (5.11 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.11 d,e,f) com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.

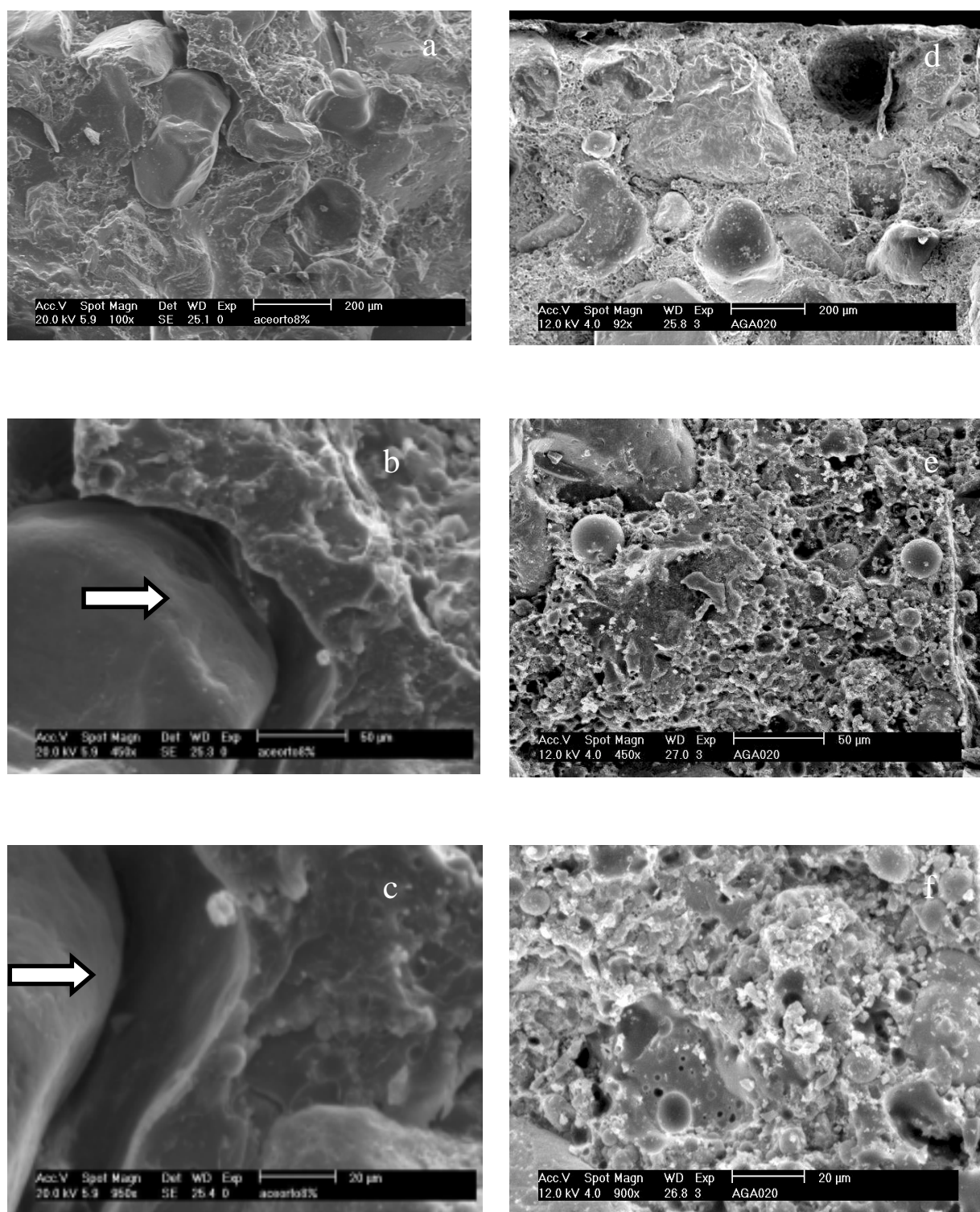


**Figuras 5.12 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica que não submeteram-se à ataque químico (padrão). Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza (5.12 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.12 d,e,f) com magnitude, de cima para baixo de 100 450 e 900

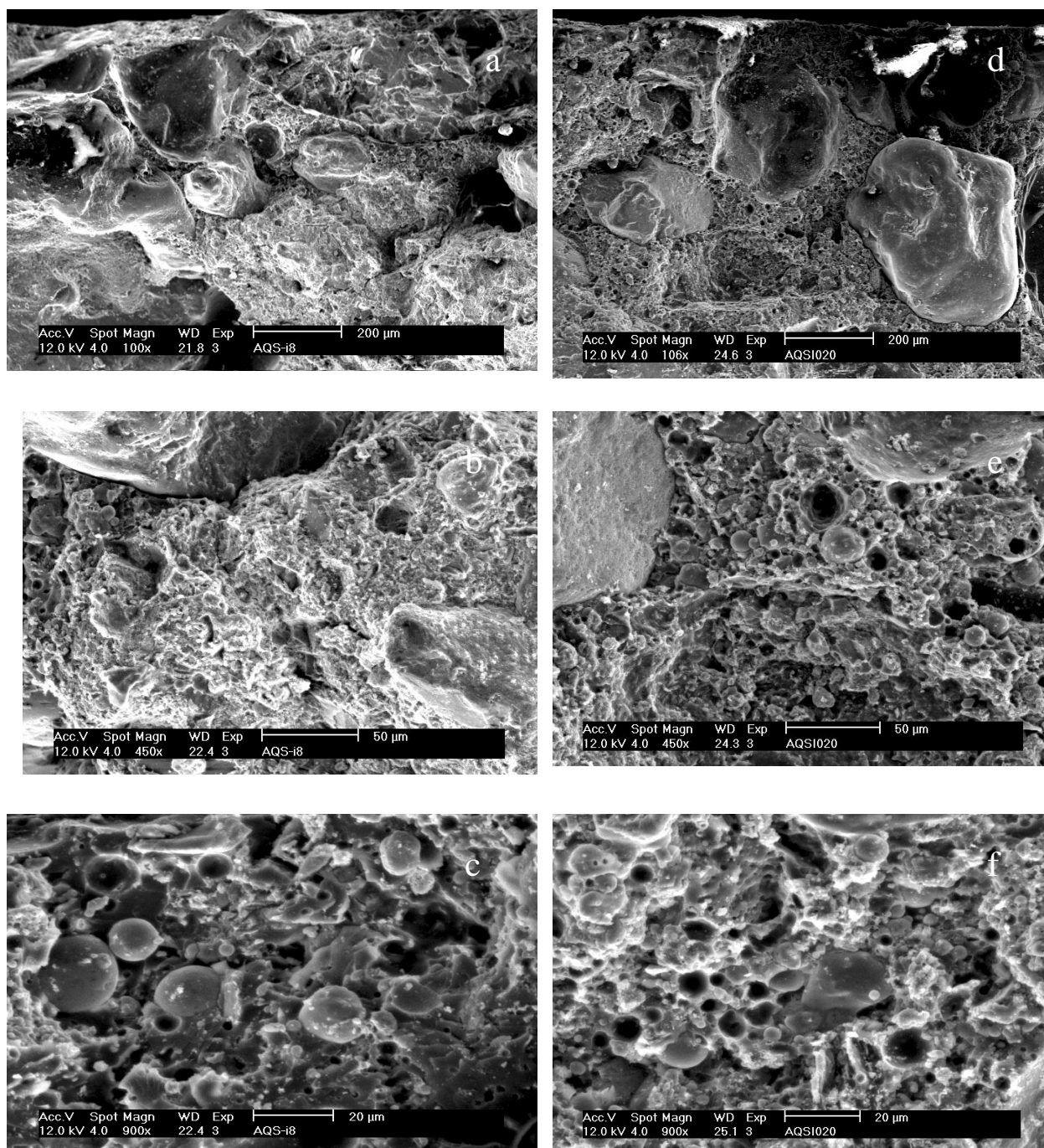




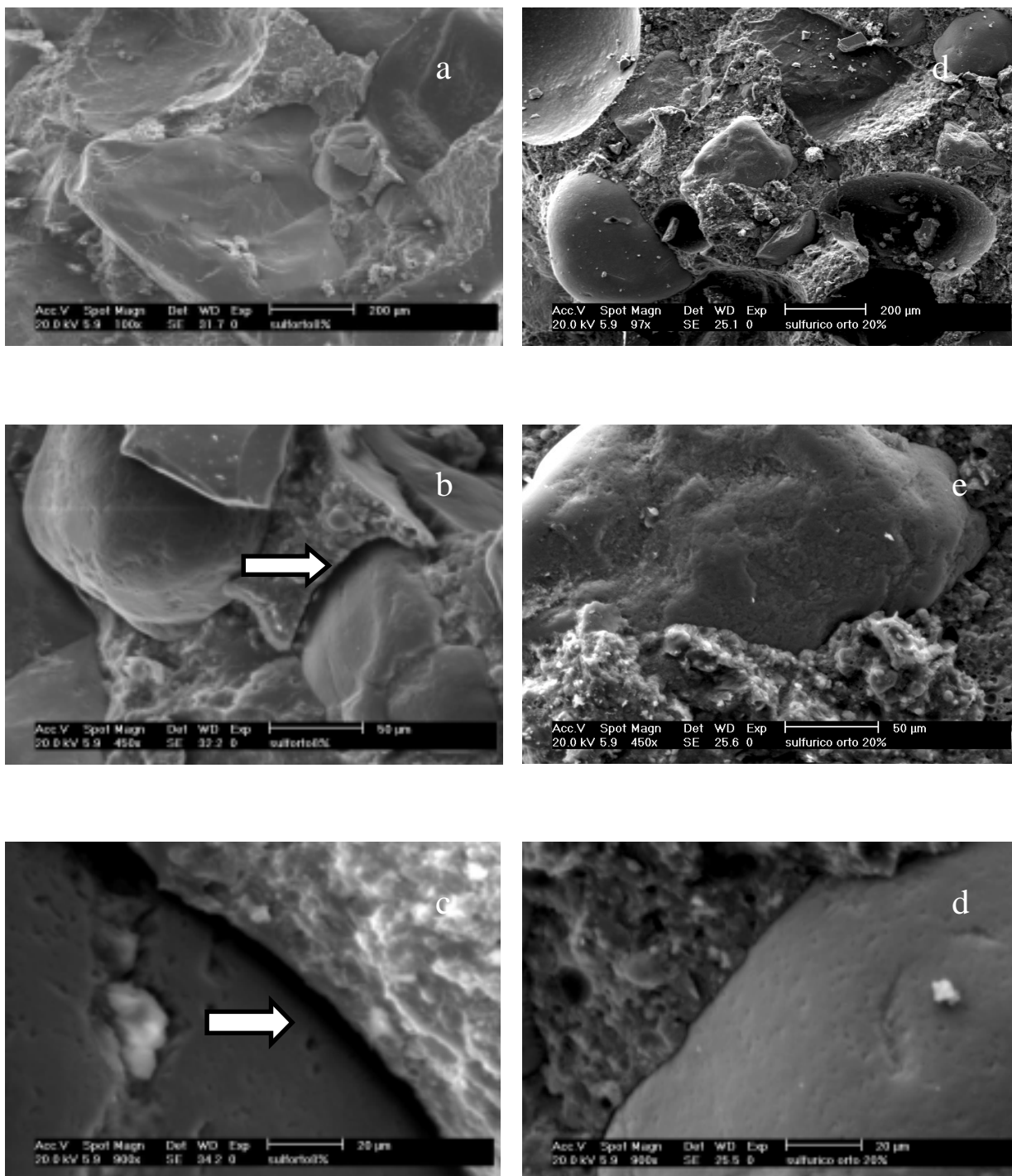
**Figuras 5.13 a,b,c,d,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de ácido acético. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza (5.13 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.13 d,e,f), com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



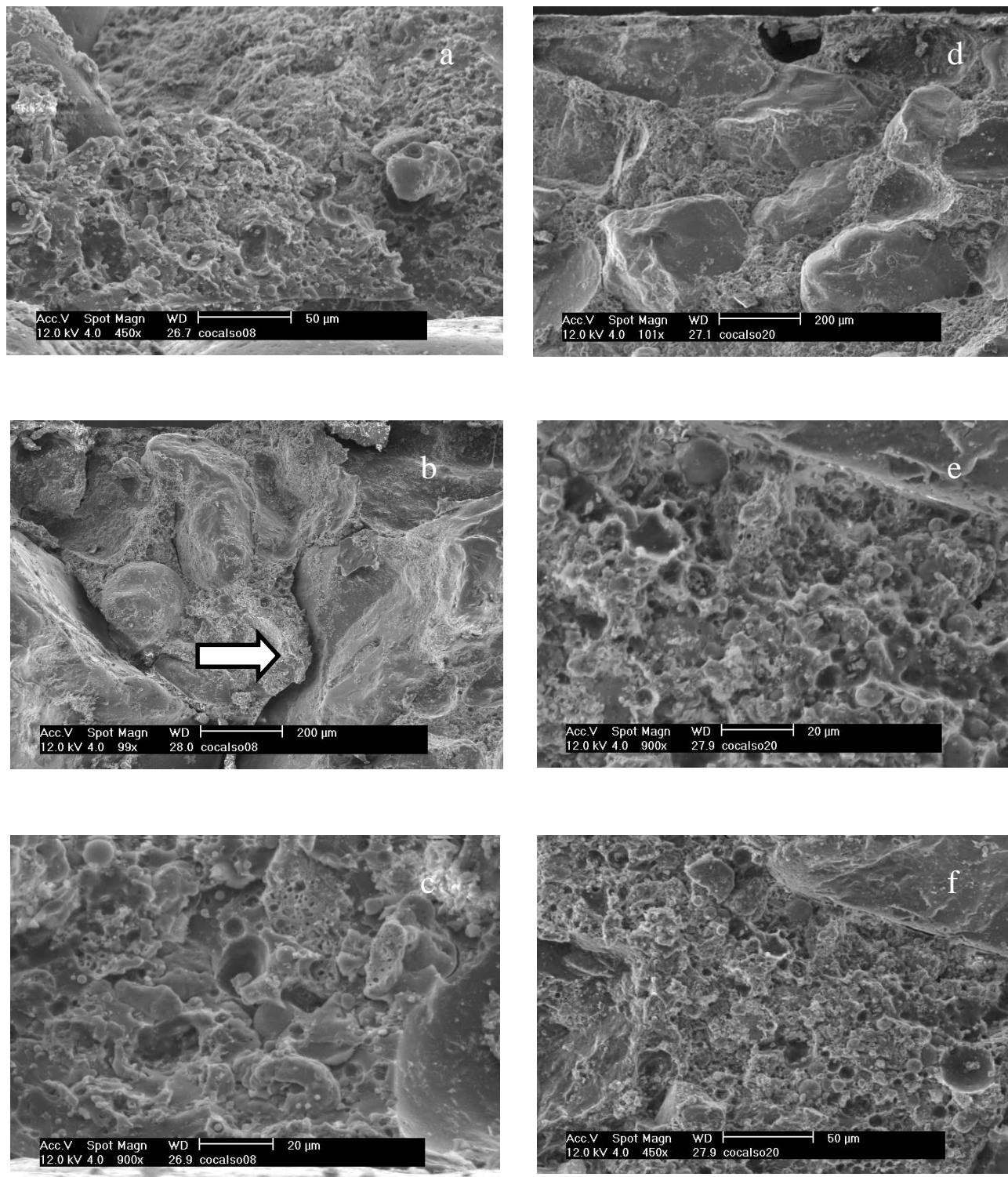
**Figura 5.14 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de ácido acético. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza(5.14 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.14 d,e,f) com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



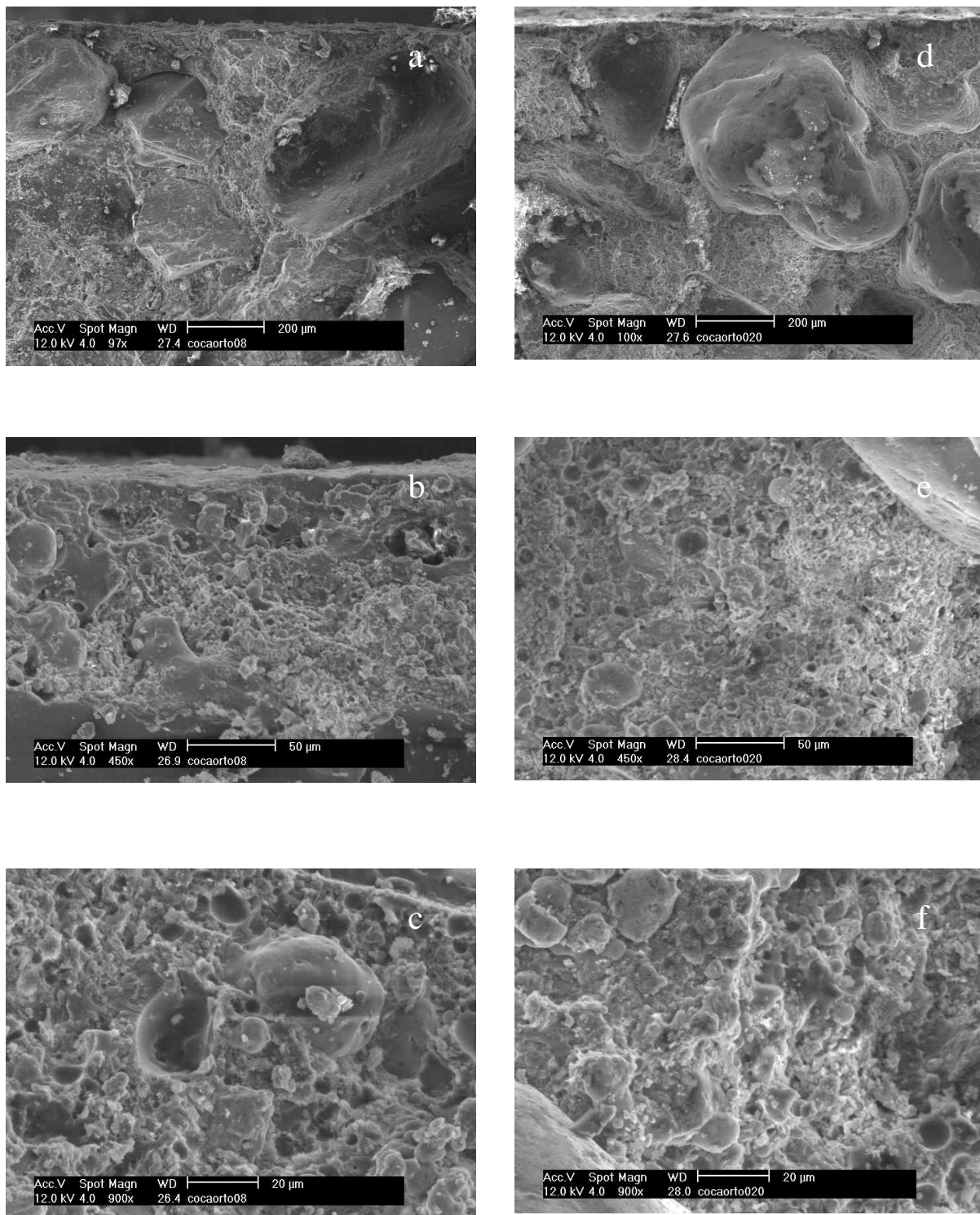
**Figuras 5.15 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de ácido sulfúrico. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza (5.15 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.15 d,e,f), com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



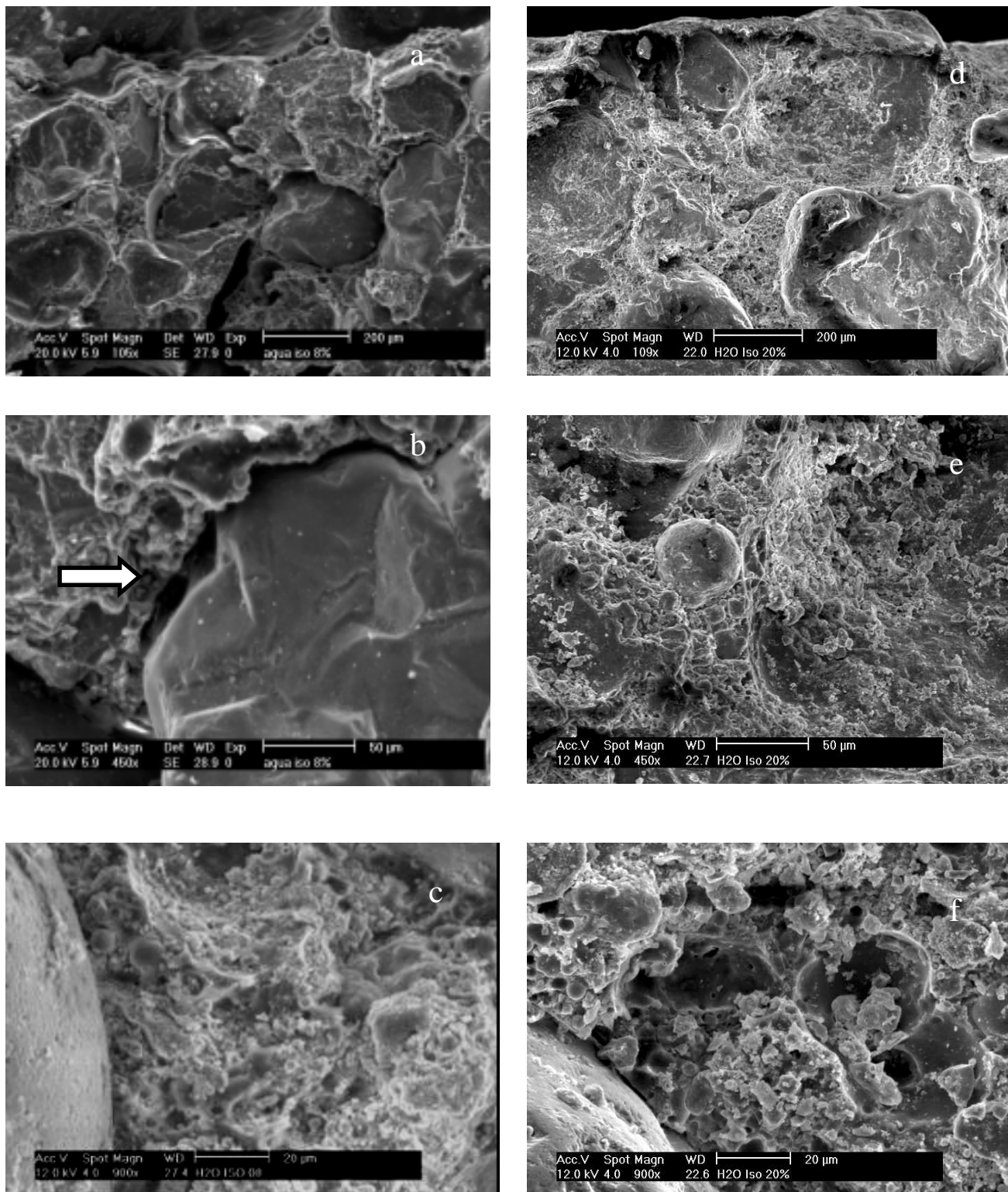
**Figuras 5.16 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque de ácido sulfúrico. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza (5.16 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.16 d,e,f), com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



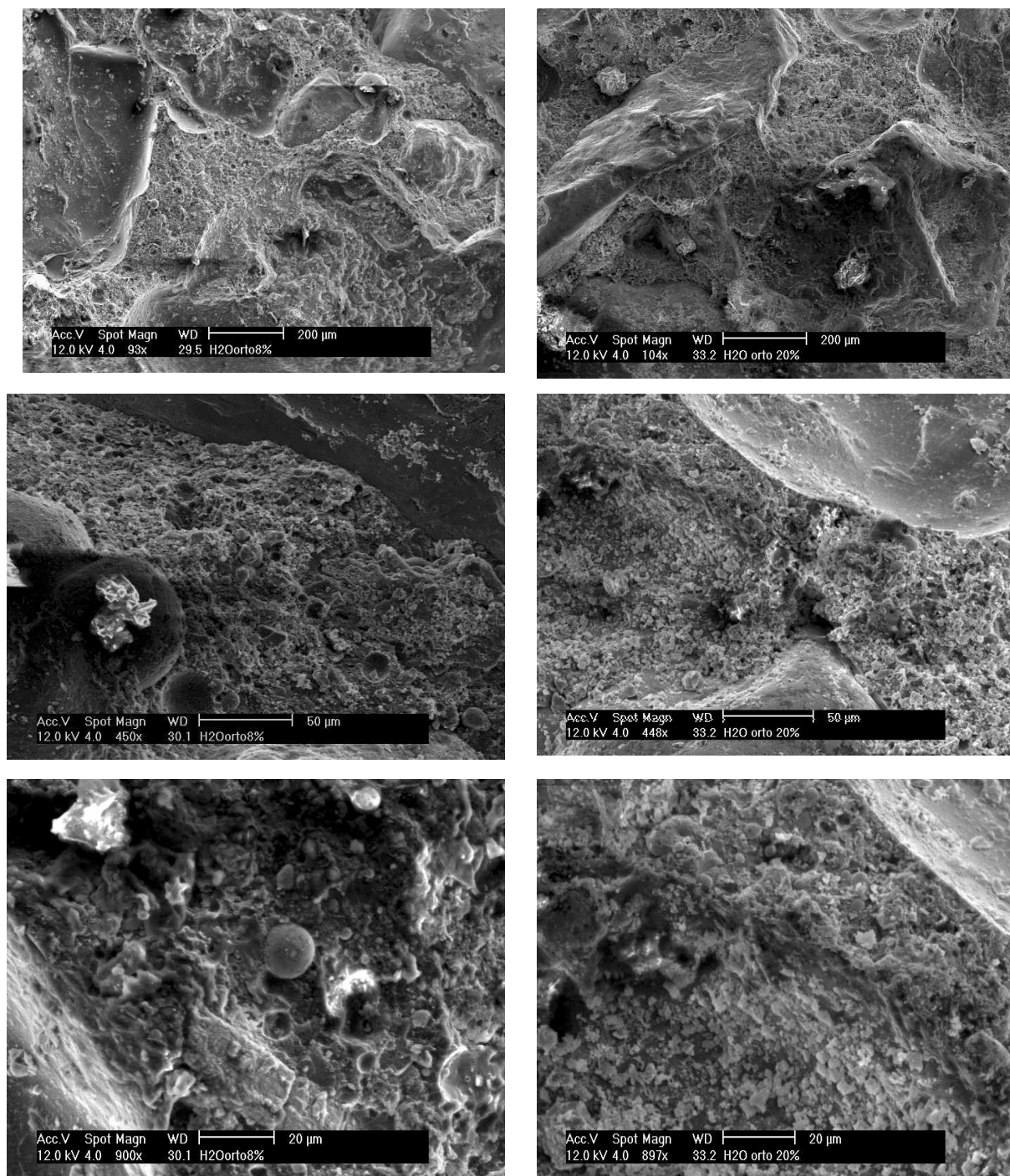
**Figuras 5.17 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque químico com refrigerante a base de cola. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza (5.17 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.17 d,e,f), com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



**Figura 5.18 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque químico com refrigerante a base de cola. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza (5.18 a,b,c) e à direita 20% de cinza(5.18 d,e,f), com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



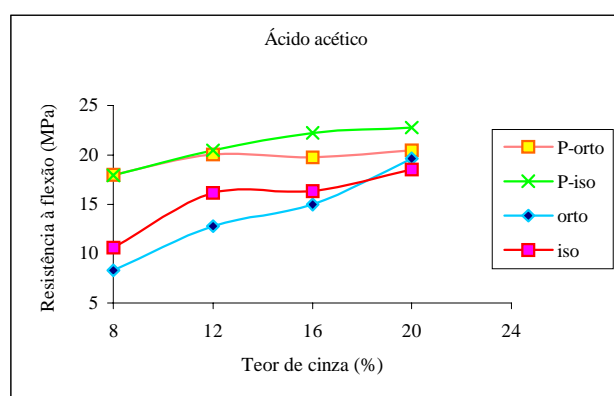
**Figura 5.19 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster isoftálica submetido ao ataque de água destilada. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza(5.19 a,b,c), com magnitude de 450 e 900 e à direita 20% de cinza (5.19 d,e,f), com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



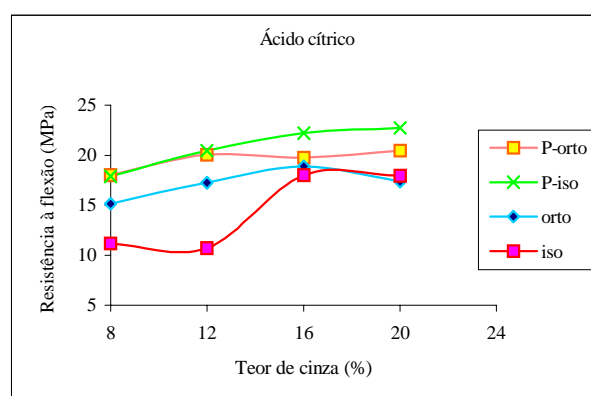
**Figuras 5.20 a,b,c,d,e,f** Imagens obtidas por MEV de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica submetido ao ataque com água destilada. Na coluna da esquerda o concreto tem 8% de cinza(5.20 a,b,c) e à direita 20% de cinza (5.20 d,e,f), com magnitude, de cima para baixo, de 100, 450 e 900.



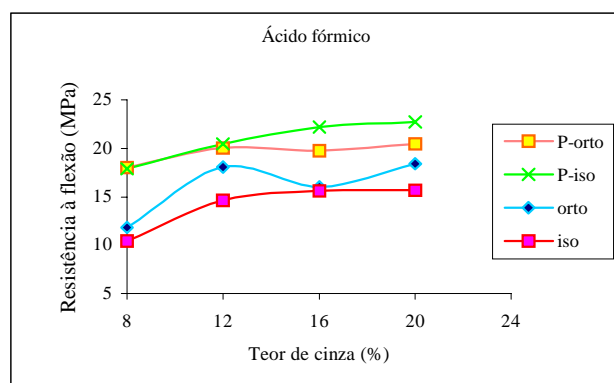
Nas figuras 5.21 a 5.27 estão ilustrados os dados do ensaio de ataque químico, para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica em cada meio agressor, comparados com os corpos-de-prova de concreto polímero de resina isoftálica (p-iso) e ortoftálica (p-orto) que não sofreram agressão química.



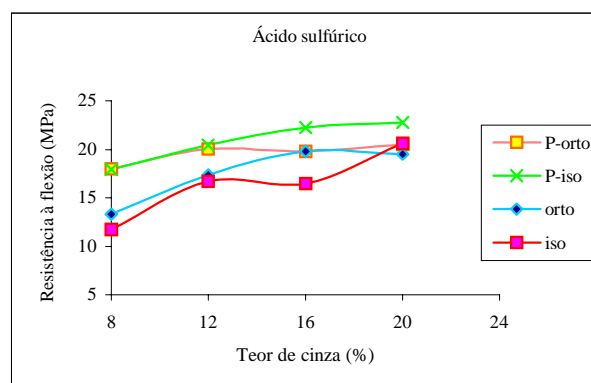
**Figura 5.21** Resistência à flexão após ataque químico em ácido acético para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica.



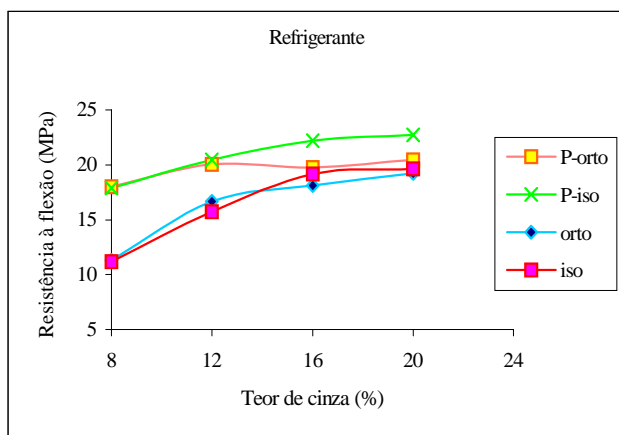
**Figura 5.22** Resistência à flexão após ataque químico em ácido cítrico para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica



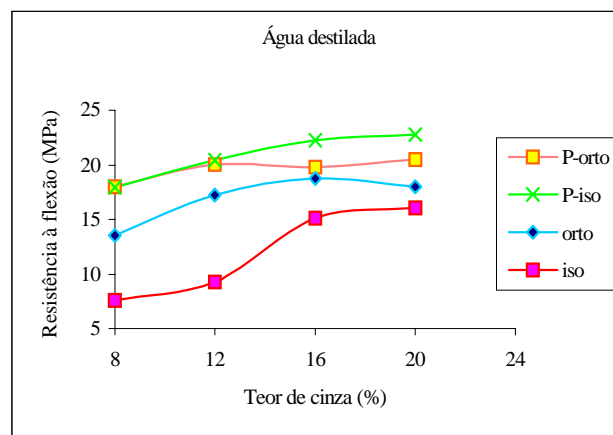
**Figura 5.23** Resistência à flexão após ataque químico em ácido fórmico para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica.



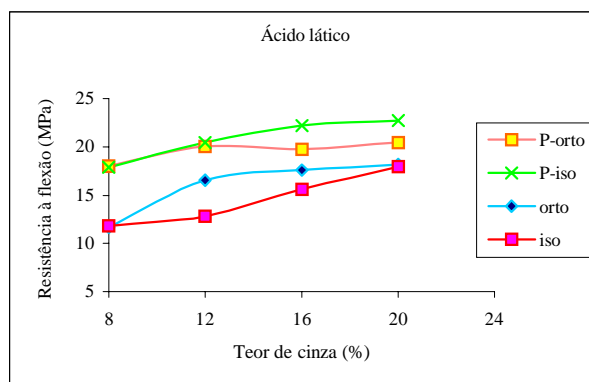
**Figura 5.24** Resistência à flexão após ataque químico em ácido sulfúrico para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica.



**Figura 5.25** Resistência à flexão após ataque químico em refrigerante à base de cola para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica.



**Figura 5.26** Resistência à flexão após ataque químico em água destilada para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica.



**Figura 5.27** Resistência à flexão após ataque químico em ácido láctico para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica.

O tratamento estatístico mostrado na tabela 5.9 (ANOVA) deixa claro que os efeitos tipo de resina, tipo de solução, percentual de cinza volante na composição do concreto, isoladamente, apresentam um efeito significativo sobre a resistência à tração na flexão do concreto polímero que sofreu ataque químico. Através das figuras 5.21 a 5.27 se observa que, de modo geral, o concreto de resina poliéster ortoftálica manteve maior resistência após ataque químico em quase todos os meios agressores, exceto em ácido acético. Entretanto, isto se constata, especialmente, com teores de cinza menores. Nas composições com teor de 20% de cinza, as resistências dos concretos de resina isoftálica e ortoftálica mantiveram-se semelhantes, como também, próximas da resistência padrão.

Por intermédio da figura 5.26 constata-se que o concreto de resina ortoftálica manteve maior resistência após ao ataque químico de água destilada comparado ao concreto de resina

isoftálica. Este resultado mostra mais uma evidência de que a perda de resistência frente às soluções utilizadas, nestas concentrações, está relacionada com o número de vazios do material, permitindo a penetração das soluções, e o ataque da interface resina agregado, pois conforme observado na literatura a resina ortoftálica tem menor resistência química que a resina poliéster isoftálica.

Ainda, por intermédio dos dados gerados na tabela 5.9, observa-se que os fatores tipo de resina e tipo de solução, os fatores tipo de resina e teor de cinza volante e os fatores tipo de solução e teor de cinza, conjuntamente, tem significância sobre a resposta (resistência à tração na flexão) dos corpos-de-prova que sofreram ataque químico. Na figura 5.25 observa-se que nos teores menores de cinza o concreto de resina ortoftálica manteve a resistência um pouco superior, entretanto com teores mais elevados de cinza o concreto de resina isoftálica manteve maior resistência ao ataque químico do refrigerante à base de cola, mostrando interação entre teor de cinza e tipo de solução. Nas figuras 5.21 e 5.22 observa-se interação entre tipo de resina e tipo de solução. Em ácido acético o concreto de resina isoftálica manteve maior resistência até próximo aos 20% de cinza volante, entretanto, em ácido cítrico o concreto de resina ortoftálica mantém maior resistência até em torno dos 16% de cinza volante.

A análise estatística gerou também as tabelas 5.10 e 5.11 a partir da comparação múltipla das médias. Da tabela 5.10 constata-se que a resistência à tração na flexão gerada pelas amostras que sofreram ataque químico de ácido acético diluído mostram-se significativamente diferente de todas outras resistências geradas. Entretanto não se apresentaram significativamente diferentes as resistências produzidas pelas amostras que foram atacadas pela água destilada e pelos ácidos, fórmico, láctico e cítrico. Estas mostraram diferenças significativas de resistência comparadas às demais. As amostras que foram submetidas ao ataque de refrigerante a base de cola e ácido sulfúrico não mostraram suas respostas significativamente diferenciadas entre si, porém revelaram-se significativamente diferenciadas das demais amostras que sofreram ataque químico com as outras cinco soluções. Em todos os casos, para todas soluções utilizadas, houve diferença significativa em relação às amostras de referência, ou seja, que não sofreram agressão química.

A tabela 5.11 mostra que existe diferença significativa na resistência à tração na flexão para os corpos-de-prova que foram submetidos ao ataque químico entre todos os teores de cinza volante utilizados. Pode-se observar que em nenhuma outra propriedade tratada neste trabalho, houve diferença significativa entre todos os teores de cinza, fato que comprova que o percentual de cinza interfere na resistência química do concreto polímero.

## 5.5 Módulo de elasticidade

### 5.5.1 Análise estatística

O ensaio de módulo de elasticidade tem como resposta as medidas de tensão e deformação que geraram o módulo de elasticidade. Para análise estatística foram utilizados os valores individuais que originaram a tabela 4.37, na qual consta o módulo de elasticidade (GPa), para o PC com os quatro teores de cinza volante estudados e com os dois tipos de aglomerantes (resinas poliéster isoftática e ortoftálica). A análise tem como objetivo verificar se existe influência significativa dos teores de cinza volante, do tipo de resina e ainda analisar a interação entre os fatores. Os resultados desta análise encontram-se na tabela 5.16. Na tabela 5.17 estão sumarizados os subgrupos homogêneos provenientes da comparação múltipla das médias em função do teor de cinza volante.

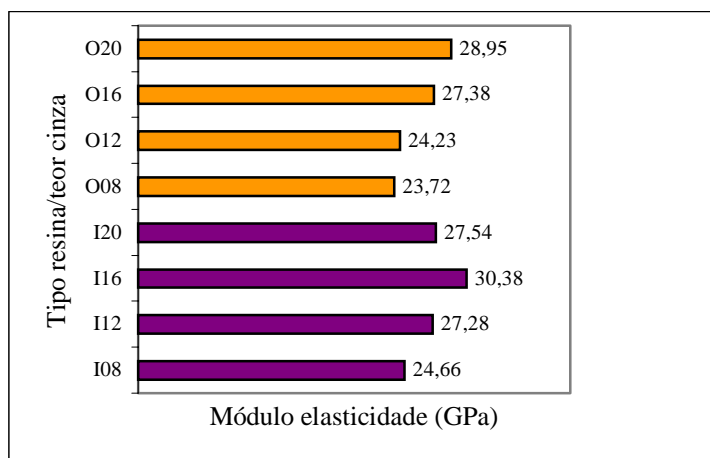
**Tabela 5.16** Análise de variância para o ensaio do módulo de elasticidade

Fonte	SQ(10 <sup>4</sup> )	GLD	MQ(10 <sup>4</sup> )	F <sub>cal</sub>	S	SIGNIF.
<b>Tipo de resina (A)</b>	1169,47	1	1.694,77	8,015	0,012	S
<b>Teor de cinza(B)</b>	8582,68	3	2860,89	19,607	0,000	S
<b>Interação AB</b>	2006,55	3	688,51	19,607	0,017	S
<b>Erro</b>	2334,63	16	145,91			
<b>Total</b>	14.093,34	23				

**Tabela 5.17** Subgrupos homogêneos do módulo de elasticidade para o concreto polímero com 8, 12 16 e 20% de cinza volante.

Teor de cinza	N	Subgrupos – Módulo(GPa)	
		1	2
8,00	6	24,2	
12,00	6	25,8	
16,00	6		28,9
20,00	6		28,7
Sig.		0,154	0,804

A figura 5.28 ilustra o módulo de elasticidade nos concretos polímero de resina poliéster, isoftálica e ortoftálica com 8, 12, 16 e 20% de cinza volante.



**Figura 5.28** Módulo de elasticidade para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e ortoftálica.

O modelo de regressão para o módulo de elasticidade do concreto polímero em função da variação do teor de cinza volante para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica e concreto polímero de resina poliéster ortoftálica estão descritos a seguir:

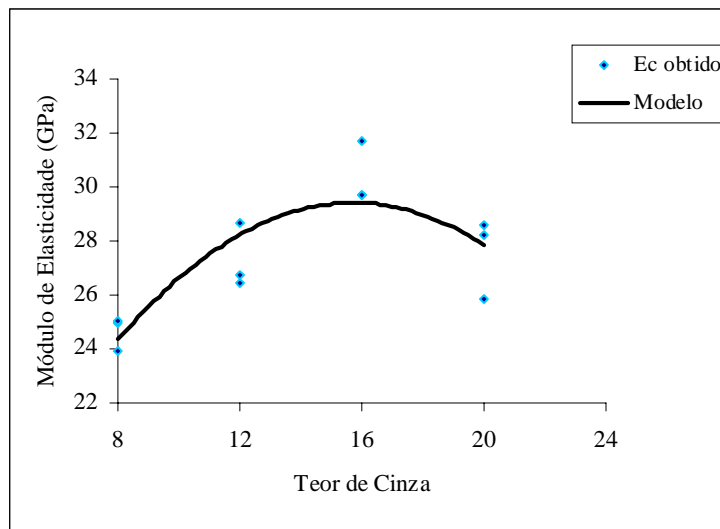
O módulo de elasticidade do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza é representado pela equação 6.

$$E_c = 8372,90 + 2677,29 \times C - 85,139 \times C^2 \quad \text{Equação 6}$$

C = Teor de cinza volante

Coefficiente de determinação  $r^2 = 71,6\%$

A figura 5.29 mostra o modelo de regressão, e os dados observados para o módulo de elasticidade do concreto polímero de resina isoftálica.



**Figura 5.29** Módulo de elasticidade observado e modelo de regressão para o concreto polímero de resina isoftálica.

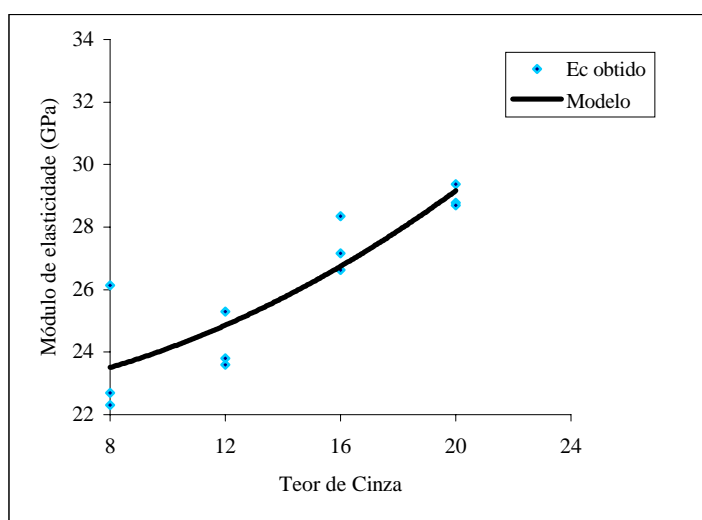
O módulo de elasticidade do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica em função de teor de cinza é representado pela equação 7.

$$E_c = 22396,5 + 5,9052 \times C + 16,6186 \times C^2 \quad \text{Equação 7}$$

C = Teor de cinza volante

Coefficiente de determinação  $r^2 = 78,2\%$

A figura 5.30 mostra o modelo de regressão, e os dados observados para o módulo de elasticidade do concreto polímero de resina ortoftálica.



**Figura 5.30** Módulo de elasticidade e modelo de regressão para o concreto polímero de resina ortoftálica.

Os valores do parâmetro  $r^2$  para os concretos polímeros, de resinas poliéster dos tipos isoftálica e ortoftálica, sugerem que 71,6 e 78,2%, respectivamente, da variabilidade dos resultados podem ser explicados pelos modelos propostos.

### 5.5.2 Discussão dos resultados do módulo de elasticidade

Analisando os valores de módulo relacionados na tabela 4.37 e na figura 5.28, constata-se que o concreto polímero exibe altos valores de módulo de elasticidade, podendo ser comparados aos valores obtidos pelos concretos de cimento de alta resistência. SENSALÉ (2000), em sua pesquisa, obteve aos 91 dias de cura, valores médios de 27,09 GPa e 32,37 GPa, para um concreto com 10% de adição de cinza de casca de arroz proveniente dos Estados Unidos e relação água/aglomerante de 0,5 e 0,32, respectivamente. SILVEIRA et al.(1999), também produziram concretos de cimento de alto desempenho ao utilizarem sílica ativa e relação água/aglomerante de 0,27. Neste trabalho, observaram valores de módulo superiores a 30 GPa.

Os resultados de módulo observados estão em consonância com valores observados na literatura de concreto polímero. OSHIMA e KOYANAGI (2001), utilizando resinas poliéster, obtiveram valores de módulo de elasticidade de aproximadamente 20 GPa com 20% de resina em relação aos agregados na composição, mais de 25 GPa para 13% de resina e com 10% de resina chegaram aos 30 GPa. Com uma resina poliéster de baixa retração obtiveram aproximadamente 35 GPa. BHUTTA et al.(2001) produziram compostos de concreto polímero de resina poliéster, para serem utilizados como contrapesos, e observaram valores de 23,7 e 25,1 GPa de módulo de elasticidade.

De forma semelhante aos demais ensaios, o módulo de elasticidade tende a crescer com o aumento do teor de cinza volante (fig.4.11). Isto provavelmente tenha relação com o aumento da rigidez do concreto polímero ao se aumentar o teor de fíler.

A análise estatística apresentada na tabela 5.16 (ANOVA) mostra que os fatores tipo de resina e percentual de cinza volante, isoladamente, apresentam um efeito significativo sobre os valores do módulo de elasticidade. Ainda, nesta tabela, percebe-se que existe interação entre estes fatores, ou seja, eles conjuntamente exercem efeito significativo sobre a propriedade em estudo. Através da figura 5.28 pode-se perceber que o teor de cinza atuou de forma diferente nos tipos de resinas. Isto fica claro ao se observar que no teor de 16% de cinza volante, para o concreto de resina isoftálica, se obteve o maior valor de módulo, sendo que no

concreto de resina ortoftálica, o maior valor de módulo foi obtido com 20% de cinza volante na composição.

Os valores da tabela 5.17, gerados pela comparação múltipla das médias, mostram que não existe diferença significativa entre os teores de 8 e 12% de cinza de volante, porém estes são significativamente diferentes comparados com os teores de 16 e 20% de fíler. Através da figura 5.29 percebe-se que o concreto produzido com a resina poliéster isoftálica, com 16% de cinza volante, tem módulo superior ao concreto que tem 20% de adição. No entanto, pela comparação múltipla das médias, constata-se que entre os teores de 16 e 20% de cinza as diferenças não são estatisticamente significativas.

## 5.6 Desgaste por abrasão

### 5.6.1 Análise estatística

Esta análise foi realizada a partir dos resultados individuais que estão apresentados na tabela 4.38 do item 4.4, e tem por objetivo identificar os efeitos que possam ser significativos (teor de cinza, tipo de resina ou a interação entre estes fatores) sobre o desgaste do concreto polímero. Os resultados desta análise estão relacionados na tabela 5.18. Na tabela 5.19 são apresentados os subgrupos homogêneos gerados a partir da comparação múltipla das médias.

**Tabela 5.18** Análise de variância do ensaio de desgaste por abrasão do concreto polímero.

Fonte	SQ	GLD	MQ	F <sub>cal</sub>	S	SIGNIF.
<b>Tipo de resina (A)</b>	4,622	1	4,622	92,358	0,000	S
<b>Teor de cinza (B)</b>	1,041	3	0,347	6,930	0,013	S
<b>Interação AB</b>	0,548	3	0,183	3,650	0,064	NS
<b>Erro</b>	0,400	8	5,005E-02			
<b>Total</b>	6,611	15				



**Tabela 5.19** Subgrupos homogêneos para o ensaio de desgaste por abrasão

Teor de cinza	Tamanho da amostra	Subgrupos	
		1	2
12,00	4	3,7575	
16,00	4	4,0625	4,0625
20,00	4		4,3100
8,00	4		4,4225
Sig.			0,183

Para o ensaio de desgaste por abrasão não foi possível gerar um modelo de regressão com um coeficiente de correlação satisfatório.

### 5.6.2 Discussão dos resultados do ensaio do ensaio de desgaste por abrasão

Através dos resultados obtidos no ensaio de desgaste por abrasão para o concreto polímero tanto de resina poliéster isoftálica, como para o concreto de resina ortoftálica, constatou-se que houve pouco desgaste das amostras se comparados com resultados obtidos para o concreto de cimento.

KULAKOWSKI et al. (1977) obtiveram os seguintes valores médios de desgaste em concreto de cimento, do tipo CPV ARI.

**Tabela 5.20** Desgaste por abrasão em concreto de cimento, do tipo CPV ARI.

Relação água/aglomerante	% Sílica ativa	Desgaste (mm)
0,37	0	6,54
0,37	18	7,31
0,59	0	7,30
0,59	9	7,52

A partir destes resultados pode-se constatar que o concreto polímero, em todas as composições, sofreu menos desgaste que as composições de concreto de cimento apresentadas na tabela 5.20. Entretanto, os dados contidos na tabela 4.38 mostram que o concreto polímero de resina ortoftálica, em todas as composições, sofreu menos desgaste.

É importante ressaltar que o concreto polímero de resina ortoftálica também foi mais resistente aos meios agressivos (tab. 5.12) comparado com concreto de resina poliéster isoftálica. Entretanto, somente nestes dois ensaios (ataque químico e desgaste por abrasão) o concreto de resina poliéster ortoftálica apresentou melhores resultados. Um fato importante, e

que talvez de respaldo teórico para o ocorrido, é que a viscosidade da resina isoftálica é maior que da ortoftálica (dados do fabricante, item 3.1.1.1). Isto indica que provavelmente os materiais inertes não tenham sido completamente envolvidos pela resina isoftálica, já que se utilizou um teor otimizado, a fim de reduzir o consumo do aglomerante. Para estas duas propriedades a ligação matriz polimérica/agregado é de fundamental importância, ou seja, a medida que aumenta a força desta ligação melhora a resistência ao desgaste, dificultando o deslocamento do agregado, e melhora também a resistência química por se tornar mais difícil o rompimento da ligação agregado/resina.

Outro fato interessante a ser ressaltado é que neste ensaio, de forma diferente dos demais, não houve uma melhora da resistência ao desgaste à medida que se aumentou o teor de cinza volante. Analisando a tabela 4.38 se observa que o concreto com teor de 8% de cinza volante, tanto o de resina isoftálica como o concreto de resina ortoftálica, obtiveram o maior desgaste. O menor desgaste foi constatado no teor de 12% de fíler, tanto para o concreto de resina isoftálica, como para o concreto de resina ortoftálica. Possivelmente estes dados estejam relacionados com a compacidade máxima da mistura, cinza e areia que se dá neste teor de cinza volante. A partir da compacidade máxima a cinza participa já como agregado, e não contribui para um incremento nesta propriedade com os teores de resina utilizados, e com 8% de cinza a composição está abaixo da compacidade máxima, o que não favorece um desgaste menor que o obtido pelas amostras mais densas.

A análise estatística apresentada na tabela 5.18 mostra que os fatores tipo de resina e teor de cinza, isoladamente, exercem um efeito significativo sobre o desgaste por abrasão. Entretanto, a interação destes fatores não influenciam de maneira significativa na resposta.

Por intermédio da tabela 5.19, originada da comparação múltipla das médias pode-se constatar que o teor de 12% difere significativamente em relação aos teores de 20 e 8% de cinza volante. Entretanto, os teores de 8 e 20% não mostraram valores de desgaste por abrasão significativamente diferenciados. Os resultados obtidos com o teor de 16% não apresentaram diferenças significativas em relação aos demais teores de cinza em estudo.

## **5.7 Relação entre as propriedades mecânicas e a resistência à compressão**

A relação entre estas propriedades já foram estabelecidas para o concreto de cimento, entretanto, podem ser estimadas a partir dos valores obtidos para a resistência à compressão, proporcionando, em muitos casos, uma redução na gama de ensaios necessários para se caracterizar o material. No entanto, para o concreto polímero, não foram estabelecidas

correlações entre propriedades. Neste ítem apresentam-se modelos de regressão que relacionam a resistência à tração na flexão e o módulo elasticidade com a resistência à compressão axial.

### 5.7.1 Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão

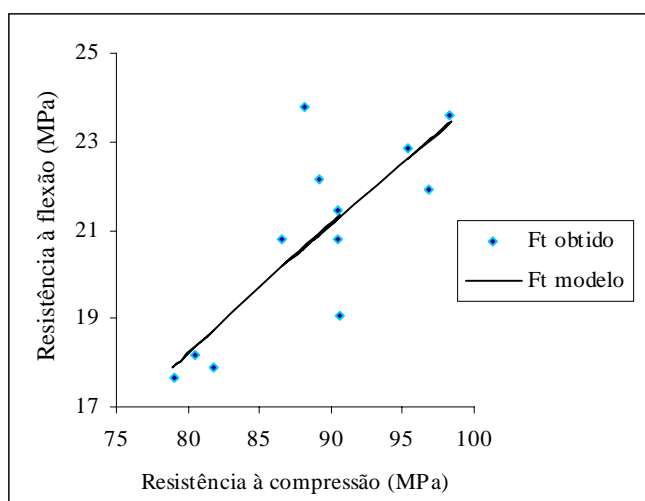
Por intermédio dos resultados obtidos constata-se que a resistência à tração na flexão dos concretos com polímero atingem altos valores. Outro fato a ser observado é que, no concreto polímero, a resistência à tração na flexão assume valores, em relação à compressão, bastante superiores aos que são obtidos pelo concreto de cimento.

♦ A relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina poliéster isoftálica é representada pela equação 8.

$$f_t = e^{4,2507 - \frac{107,93}{f_c}} \quad \text{Equação 8}$$

Coeficiente de determinação  $r^2 = 65,7\%$

Na figura 5.31 encontram-se ilustrados os valores de resistência à tração na flexão em relação à resistência à compressão e o modelo de regressão que relaciona as duas propriedades.



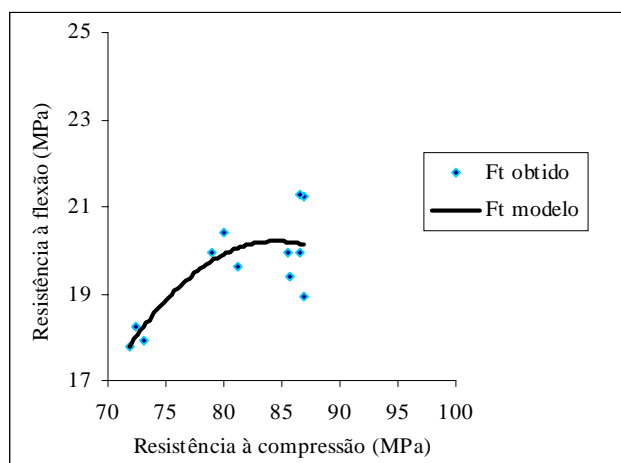
**Figura 5.31** Relação da resistência à tração na flexão com a resistência à compressão para o concreto polímero de resina isoftálica

♦ A relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina poliéster ortoftálica é representada pela equação 9.

$$f_t = - 87,333 + 2,5451.f_c - 0,0151.f_c^2 \quad \text{Equação 9}$$

Coefficiente de determinação  $r^2 = 64,8\%$

Na figura 5.32 encontram-se ilustrados os valores de resistência à tração na flexão em relação à resistência à compressão e o modelo de regressão que relaciona as duas propriedades.



**Figura 5.32** Relação da resistência à tração na flexão em relação à resistência à compressão para o concreto polímero de resina ortoftálica.

Os valores de  $r^2$  65,7 e 64,8% indicam que pode-se fazer uma relação entre estas propriedades. Porém o fato destes parâmetros não terem apresentado valores altos, sugere que estas propriedades podem ser influenciadas de formas diferentes pelos materiais, neste caso pela cinza volante e resina, tanto que na resistência à compressão houve interação entre estes fatores, já na resistência à tração na flexão não mostraram interação, ou ainda, que talvez estas propriedades possam não ter grandes relações nos compostos de concreto polímero.

### 5.7.2 Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão

A determinação do módulo de elasticidade se dá através de um ensaio de difícil e minuciosa execução. Por isto, a maioria das normas técnicas existentes para o concreto de cimento apresenta formulações que relacionam o módulo de elasticidade com a resistência à compressão. Entretanto, para o concreto polímero, ainda não se conhece relações entre estas propriedades. Na tentativa de verificar a existência de relação entre as principais propriedades

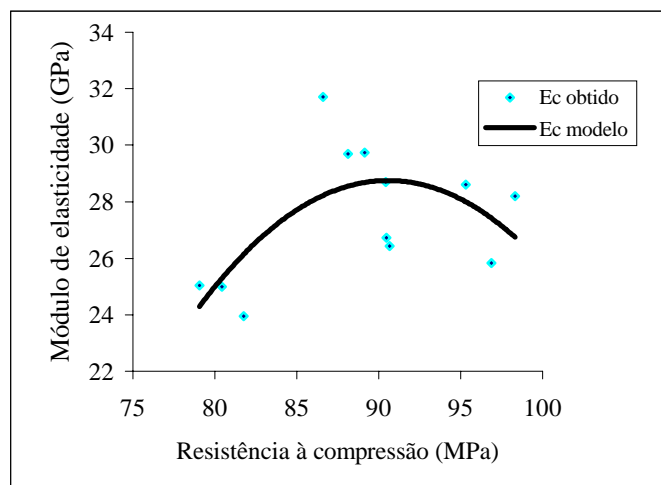
mecânicas foram definidos modelos de regressão, relacionando o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

♦ A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster isoftálica em função de teor de cinza é representada pela equação 10.

$$E_c = -246,64 + 6,0810 \cdot f_c - 0,0336 \cdot f_c^2 \quad \text{Equação 10}$$

Coefficiente de determinação  $r^2 = 42,4\%$

Na figura 5.33 encontram-se ilustrados os valores de módulo de elasticidade em relação a resistência à compressão para o concreto de resina isoftálica e o modelo de regressão que relaciona as duas propriedades.



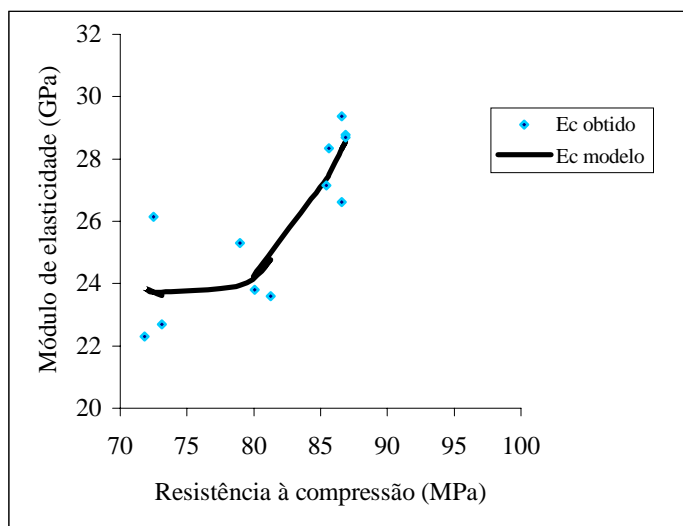
**Figura 5.33** Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina isoftálica.

♦ A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto polímero de resina poliéster ortoftálica em função de teor de cinza é representada pela equação 11.

$$E_c = 88,3725 + 0,0344 \cdot f_c^2 - 0,0003 \cdot f_c^3 \quad \text{Equação 11}$$

Coefficiente de determinação  $r^2 = 74,9\%$

Na figura 5.34 encontram-se ilustrados os valores de módulo de elasticidade em relação à resistência à compressão para o concreto de resina ortoftálica e o modelo de regressão que relaciona as duas propriedades.



**Figura 5.34** Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão para o concreto polímero de resina ortoftálica.

Pode-se perceber que os modelos de regressão para cada propriedade, isoladamente, obtiveram os coeficientes de correlação maiores comparados com os modelos gerados para comparar as propriedades. As expressões geradas da relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão mostram que os valores de  $r^2$  não são altos. Isto possivelmente possa ser explicado em virtude destas propriedades dependerem de fatores diferentes. Por exemplo, para o módulo o mais importante é o empacotamento da mistura, ou seja, no caso das composições de concreto polímero deste estudo, possivelmente sejam mais influenciadas pelo empacotamento da mistura agregado e cinza do que pela resina. Entretanto, para a resistência à compressão, observou-se neste trabalho, que a medida que se aumenta o teor de resina houve acréscimo na resistência.



## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho, inicialmente, teve como objetivo estudar a influência do teor de resina e do tipo de resina através dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Na segunda parte do programa experimental, foram observadas a influência do tipo de resina, e do teor de cinza volante, por intermédio das propriedades de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, ataque químico, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão.

As conclusões apresentadas a seguir, não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem somente aos dados obtidos de concretos que utilizaram tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. Sua representatividade deve ser firmada através de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar os obtidos neste estudo.

### **6.1 Resistência à compressão axial e absorção de água do concreto polímero em função do teor de resina**

Para estes ensaios, foram consideradas variáveis o tipo de resina, poliéster isoftálica e ortoftálica, e o teor de resina 10, 13, 15 e 18 % em relação à mistura de agregado e cinza volante.

#### **6.1.1 Em relação à resistência à compressão axial**

◆ Os concretos produzidos exibiram altos valores de resistência à compressão, aproximando-se dos 100 MPa. Os valores obtidos podem ser comparados com os melhores resultados observados nos concretos de cimento Portland de alta resistência.

◆ Foram considerados como fatores: o tipo de resina e o teor de resina. Os resultados da análise estatística mostraram que somente o teor de resina foi significativo. O teor de 10% de resina gerou resistências bem inferiores às demais, tanto para o concreto de resina poliéster isoftálica como para o concreto de resina ortoftálica. Os resultados observados para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica foram semelhantes.

◆ O modelo de regressão gerado para resistência à compressão, em função do teor de resina, obteve um bom coeficiente de determinação,  $r^2 = 93,36$  podendo ser utilizado, dentro dos limites de resina trabalhados, entre 10 e 18%.



### **6.1.2 Em relação à absorção de água**

- ◆ Os concretos das resinas poliéster dos tipos, isoftálica e ortoftálica, mostraram baixa absorção de água, sendo que os valores observados ficaram entre 0,1 e 0,41 %.
- ◆ Os resultados observados foram muito semelhantes para o concreto de resina isoftálica e ortoftálica, tanto que a análise estatística mostrou que o tipo de resina não foi significativo. O teor de resina mostrou-se estatisticamente significativo.
- ◆ Os resultados deste trabalho estão de acordo com o que se esperava para estes materiais e os níveis de absorção foram inferiores aos que comumente se observa nos concretos de cimento Portland, mesmo comparando-se aos de alta de resistência.

## **6.2 Resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, ataque químico, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão em função do teor de cinza volante**

Para a análise destas propriedades, foram considerados como variáveis o tipo de resina, poliéster isoftálica e ortoftálica, e o teor de cinza de 8, 12, 16 e 20 % em relação ao agregado. Para o ataque químico também foram considerados variáveis o tipo de solução agressora.

### **6.2.1 Em relação à resistência à compressão axial**

- ◆ Houve um aumento na resistência à compressão axial com o aumento do teor de cinza volante. Porém, em todas as composições obteve-se concretos de altos valores de resistência.
- ◆ As composições de concreto de resina isoftálica exibiram valores de resistência à compressão de 80 a 97 MPa, e as de concreto de resina ortoftálica que ficaram entre 72 e 87 MPa.
- ◆ As duas variáveis consideradas: tipo de resina e teor de cinza e a interação entre os fatores, mostraram-se estatisticamente significativas.
- ◆ Foram gerados modelos de regressão relacionando a resistência à compressão dos concretos de resinas poliéster, isoftálica e ortoftálica, em função do teor de cinza volante. O modelo obtido para o concreto de resina poliéster ortoftálica, representou um melhor ajuste dos dados

experimentais obtendo  $r^2 = 98,6\%$  comparado com  $r^2 = 78,7\%$  obtido para o concreto de resina poliéster ortoftálica.

### **6.2.2 Em relação à resistência à tração na flexão**

◆ Os valores de resistência à tração na flexão, tanto para o concreto de resina isoftálica (18 a 23 MPa) como para o concreto de resina ortoftálica (18 a 20 MPa) foram bastante altos, comparados com valores obtidos para concretos de cimento Portland de alta de resistência, que ficam em torno dos 5 MPa. Acompanhando a mesma tendência da resistência à compressão, o concreto de resina isoftálica mostrou resistência à tração na flexão um pouco superior ao concreto de resina ortoftálica.

◆ Também seguindo a mesma tendência da resistência à compressão, houve aumento da resistência à tração na flexão com o teor de cinza volante. Os valores observados para o teor de 8% cinza volante foram bastante inferiores aos demais.

◆ Os dois fatores em estudo: teor de cinza e tipo de resina mostraram-se estatisticamente significativos.

◆ O modelo de regressão para o concreto de resina poliéster isoftálica teve coeficiente de determinação maior, 83,7 %, que do concreto de resina ortoftálica, 64%.

### **6.2.3 Em relação ao ataque químico**

◆ Diferente dos compostos de cimento Portland, no concreto polímero não houve perda de massa e nem alterações visíveis nas superfícies após ataque químico.

◆ Foram constatadas perdas de resistência à tração na flexão do concreto polímero sujeito ao ataque das soluções agressoras. As composições de concreto polímero de resina poliéster ortoftálica com os menores teores cinza volante, de modo geral, mostraram-se mais resistentes aos agentes agressivos. Nas composições com teores mais elevados de cinza volante, as perdas de resistência foram menores, tanto para o concreto de resina isoftálica como para o concreto de resina ortoftálica.

- ◆ Constatou-se que os diferentes níveis de perda de resistência, possivelmente, estão relacionados com o número de poros dos compostos de concreto polímero. Através da análise da microestrutura por microscópio eletrônico de varredura, ao se comparar às composições de 8 e 20% de cinza volante, observou-se que as composições com 8% de cinza, mostraram o aglomerante menos aderido ao agregado comparado com as composições de 20% de cinza volante.
- ◆ O tratamento estatístico mostrou que os fatores tipo de resina, teor de cinza, tipo de solução e a interação entre os fatores, foram significativos para a resistência à tração na flexão, das amostras que foram submetidas ao ataque químico.

#### **6.2.4 Em relação ao módulo de elasticidade**

- ◆ Foram obtidos altos valores para o módulo de elasticidade, chegando aos 29 GPa. Estes podem ser comparados aos valores observados em concreto de cimento Portland de alta resistência.
- ◆ De modo geral constatou-se aumento no módulo de elasticidade com o teor de cinza volante, no concreto de resina poliéster isoftálica de 25 a 28 GPa e no concreto de resina ortoftálica de 24 a 29 GPa.
- ◆ O tratamento estatístico mostrou que os fatores considerados, tipo de resina, teor de cinza e a interação entre estes, foram significativos.
- ◆ Foram obtidas expressões quadráticas para os modelos de regressão. Os coeficientes de determinação foram semelhantes, para o concreto de resina isoftálica (71,6%) e ortoftálica (78,2%), entretanto, não foram altos.

#### **6.2.5 Em relação ao desgaste por abrasão**

- ◆ Os corpos-de-prova de concreto de resina isoftálica e ortoftálica exibiram baixos valores de desgaste, comparados àqueles comumente observados nos concretos de cimento Portland. Os valores observados neste ensaio ficaram entre 3,40 e 5,16 mm de desgaste. O concreto polímero de resina poliéster ortoftálica sofreu menos desgaste comparado ao concreto polímero de resina poliéster isoftálica.

- ♦ De maneira diferente aos demais ensaios, onde houve incremento nas propriedades à medida que se elevou o teor de cinza volante na composição, neste ensaio, na compacidade máxima, 12% de cinza volante, se observou o menor desgaste.
- ♦ Conforme ocorrido nos outros ensaios, o teor de cinza e o tipo de resina foram estatisticamente significativos.

### **6.3 Relação entre as propriedades**

- ♦ Os valores dos coeficientes de determinação obtidos das relações entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão e, entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, do concreto polímero, indicam que não se observam grandes relações entre estas propriedades, como comumente se observa nos compostos de concreto de cimento Portland.

### **6.4 Conclusão geral**

- ♦ Apesar de a resina poliéster ortoftálica ter propriedades mecânicas e químicas inferiores às da resina isoftálica, pode-se constatar que quando utilizada como aglomerante no concreto polímero exibiu comportamento semelhante ao da resina poliéster isoftálica. De modo geral, nos ensaios mecânicos, o concreto de resina poliéster isoftálica mostrou resultados com maiores valores, entretanto, no ataque químico e desgaste por abrasão o concreto de resina ortoftálica obteve resultados um pouco superiores. O aumento no teor de cinza volante nas composições de concreto polímero, produziu aumento nas propriedades mecânicas, exceto no ensaio de desgaste por abrasão, onde na compacidade máxima entre areia e cinza volante observou-se o menor desgaste. Constatou-se também, que a utilização da cinza volante em teores acima da compacidade máxima entre areia e fíler, contribui grandemente para um aumento da resistência química frente aos ácidos.

### **6.5 Sugestões para trabalhos posteriores**

Os resultados observados para as propriedades dos compostos em estudo e a pequena quantidade de trabalhos sobre concreto polímero realizados no Brasil, motivam a continuidade das pesquisas nesta área. Desta forma, alguns aspectos não investigados neste trabalho, podem ser sugeridos para futuras pesquisas:

- ◆ Estudo da redução da flamabilidade a partir da utilização de compostos como o trióxido de antimônio, alumina trihidratada e compostos halogenados;
- ◆ Estudo da retração dos compostos de concreto polímero;
- ◆ Estudos de metodologias para adição de pigmentos;
- ◆ Melhorias no método de mistura, moldagem e adensamento, adaptando-as a cada tipo de concreto polímero, deste modo, reduzindo número de poros e a retração e aumentando a resistência;
- ◆ Estudo da viabilidade de utilização dos agregados úmidos utilizando monômeros metálicos;
- ◆ Estudos da aderência dos compostos de concreto polímero;
- ◆ Desenvolvimento de argamassas pré-prontas;
- ◆ Estudo e desenvolvimento de métodos de produção e aplicação facilitadas dos compostos de concreto polímero.
- ◆ Estudo comparativo de custos entre as composições de concreto polímero de resina poliéster insaturada isoftálica e ortoftálica, em relação ao concreto convencional e em relação ao concreto de cimento Portland de alta resistência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standart test method for density of liquid coatings, Inks, and related products: D 1475. Local, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standart method for gel time and peak exothermic temperature of reacting thermosetting resins: D2471. Local, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Test for lenght change of hydraulic-cement motars exposed to sulfate solution: C1012. Local, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - determinação da composição granulométrica: NBR 7217. Rio de Janeiro,1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó-determinação da massa específica: NBR 6474. Rio de Janeiro,1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado em estado compactado - Determinação da massa unitária: NBR 7810. Local, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman: NBR 9776. Local, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos: NBR 12142. Rio de Janeiro, 1991. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação: NBR 8522. Rio de Janeiro,1984.

ABDEL-FATTAH, H.; EL-HAWARY, M. Flexural behavior of polymer concrete. **Constructions and Building Materials**, v.13, p. 253-262, 1999.

ABDEL-AZIM, A. A.; ATTA, A. M. Recycled flexible resins in concrete. **Polymer Journal**, v.29, p.21-24, 1997.

AHN, N.; FOWLER. D. W. The effects of metallic monomers on the mechanical properties of polymer concrete made with wet aggregates. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPC/ICRI

INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings**...Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.

ALVES, M. F. Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência. Porto Alegre, 2000. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ATZENI, C.; MASSIDA, L.; SANNA, U. Mechanical properties of epoxy mortars with fly ash as filler. **Cement and Concrete Composites**, v.12, p.3-8, 1990.

BACCINO DE SENSALE G. R. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**. Porto Alegre, 2000. 182p. Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BANAS, F., Guia do Plástico reforçado. São Paulo:Ed. Banas Ltda, 1989. p.172.

BHUTTA et al. Durability of polymer mortar counterweights. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPIC/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings**...Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.

CARVALHO FILHO, A.. Dimensionamento estrutural de laminados em fiberglass. Boletim da Fiberglass Fibras. São Paulo, 1986.

CARVALHO FILHO, A. A Química do Poliéster II. **Plástico em revista**, ano XIII, n. 155. São Paulo, 1975.

CASSAL, S. B. Influência da adição de cinza de casca de arroz na resistência de concreto a ácidos. Porto Alegre, 2000. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CZARNECKI L. Polymers in concrete on the edge of the millennium. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPIC/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings**...Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.

DIKEON, J. T.; KAEDING, A. O. U.S. and other specifications and standards for polymer concretes. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 7., 1992, Moscow: **Proceedings**... Moscow: V.V. Patureov and R. L. Serykh, 1992. 769p. p.9-25.

- FAITELSON, V. A.; TABACHNIK, L.B. Thermoplastic - Binder polymer concretes: performance and applications. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 7.,1992, Moscow. **Proceedings...** Moscow: V. V. Paturoev and R. L. Serykh, 1992. 769p. p.586-600.
- FOWLER D. W. Polymers in concrete: Where have we been and where are we going? In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPIC/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings...**Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.
- FOWLER, D. W. Current Status of Polymer Concrete in the United States. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 9., 1998, Italy. **Proceedings...** Bologna: Università degli Studi di Bologna,1998. p.37-44.
- FOWLER, D. W. Polymers in concrete: a vision for the 21<sup>st</sup> century. **Cement & Concrete Composites**. V.21, p. 449-452, 1999.
- FOWLER, D.W. et. al. Safety aspects of concrete-polymer materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POLYMERS IN CONCRETE,2.,1976, México. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1978. p.123-137, (ACI.SP,58).
- GORNINSKI, J. P. **Investigação do comportamento mecânico do concreto polímero de resina poliéster**. Porto Alegre, 1996. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Minas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HAWLEY, G.G. **Condensed Chemical Dictionary**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1971, 8<sup>a</sup> ed. 971p. Moscow. **Proceedings...** Moscow: V. V. Paturoev and R. L. Serykh, 1992. 769p. p.100-108.
- KAEDING, A.O.; PRUSINSKI, R. Curtain wall panels. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPIC/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings...**Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.
- KAEDING, A. O. Precast Products Utility Components. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 1991, San Francisco. **Proceedings...**ICPIC Working paper,1991.
- KANE, J. F. Polymer Concrete Machine Tool Components. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 1991, San Francisco. **Proceedings...**ICPIC Working paper,1991.



- KELHAM, S. A Water absorption test for concrete. Magazine of Concrete Research, v.40, n.143, p.106-110, June 1988.
- KUKACKA, L. E.; ROMANO, A. J. Process techniques for producing polymer impregnated concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POLYMERS IN CONCRETE, 1.,1973, Atlantic City. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1973. p.15-31 (ACI.SP,40).
- KULAKOWSKI, M.P.; VIEIRA, F. P.; DAL MOLIN, D. C. **Relatório Convênio Camargo Corrêa Industrial - NORIE/CPGEC/UFRGS**, Porto Alegre, 1977.
- KREIS, R. Vacuum casting of thermoset parts. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPI/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings...**Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.
- KREIS, R. Mass Production of Polymer Concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 1991, San Francisco. **Proceedings...**ICPIC Working paper,1991.
- MAASS, J. E. I-80-It's Almost A Decade. In: PERFORMANCE OF POLYMER CONCRETE OVERLAYS, 1997. **Proceedings...** Michigan: American Concrete Institute, 1997, p.172-179 (SP-169).
- MAASS, J. E. Polyester-Based Low-Shrinkage Polymer Concrete. FONTANA JACK J., KAEDING, Al O., KRAUSS, Paul D. (Ed.) **Properties and uses of Polymers in Concrete**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1996. p.190-209.
- MANO, E. B. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Edgard Blucher, 1985. 111p.
- MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 197p.
- MASUERO, A. **Estabilização das escórias de aciária com vistas a sua utilização como substituição do cimento**. Porto Alegre, 2001. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MATTHEWS, D. R. Precast polymer concrete in the construction industry. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 7.,1992, Moscow. **Proceedings...** Moscow V. V. Paturoev e R. L. Serykh, 1992. 769p. p.43-57.
- MEBARKIA, S.; VIPULANANDAN, C.: Mechanical properties and water diffusion in polyester polymer concrete. Journal of Engineering Mechanics, v. 121, p.1359-1365, 1995.
- MILES, D. C. **Tecnologia dos polímeros**. São Paulo: Polígono, 1975.

- OSHIMA, M.; KOYANAGI, W. Thermal properties and temperature dependency of mechanical properties of resin concretes for structural use. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPIC/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings**...Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.
- MORRISSON, R. T.; BOYD, R. N. **Química Orgânica**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1990, 4<sup>a</sup> ed. 1639p.
- MOURA, W. A. **Utilização de escórias de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000. 207p. Tese(Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NIESSE J. E. Fiber Reinforced Plastic in hydrochloric acid service. **Materials Performance**, St. Louis, v.21, n.1, p 25-32, Jan. 1982.
- NORWOOD, L. S. Polyester resins in corrosive environments. In: PIPECON INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE DIAMETER GLASS REINFORCED PLASTIC PIPES, London, 1980. **Proceedings**...London: 1980. p.4.1-4.10.
- ODIAN, G. **Principles of polymerization**. New York: Wiley-Interscience, 1981. 731p.
- OHAMA Y. Recent research and development of sustainable concrete-polymer composites in Japan. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPIC/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings**...Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.
- OHAMA, Y. Determination methods for working life of polyester resin concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POLYMERS IN CONCRETE, 2., 1976, Mexico. **Proceedings**... Detroit: American Concrete Institute, 1973. p.31-40 (ACI.SP,58).
- OHAMA, Y. Mix proportions and properties of polyester resin concretes. In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON POLYMERS IN CONCRETE, 1., 1973, Atlantic City. **Proceedings**... Detroit: American Concrete Institute, 1973. p.283-294 (ACI.SP,40).
- OHAMA, Y. Recent status of concrete polymer in Japan. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 7., 1992, Moscow. **Proceedings**... Moscow: V. V. Paturoev and R. L. Serykh, 1992. 769p. p.26-42.

- OHAMA, Y. Recent Progress in Concrete-Polymer Composites. **Advn Cem Bas Mat**, New York, V.5, p. 31-40,1997.
- POPOVICS, S. Polymer for modification of P.C. concrete in USA. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 7.,1992, , Moscow. **Proceedings...** Moscow: V. V. Paturoev and R. L. Serykh, 1992. 769p. p.100-108.
- PRUSINSKI, R. C. Study of Commercial Development in Precast Polymer Concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POLYMERS IN CONCRETE, 2.,1976, Mexico. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1978. p.76-101 (SP,58).
- RAMÍREZ, J. L.; SAN JOSÉ, J. T. Predictability of structural calculation values in a 100 MPa polymer concrete. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPI/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings...**Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.
- REBEIZ, K. S.; FOWLER, D. W.; PAUL, D. R. Polymer concrete and polymer mortar using resins based on recycled poly(ethylene terephthalate). **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v.44, p.1649-1655,1992.
- REBEIZ K. S.; FOWLER, D. W. Flexure for reinforced polymer concrete using recycled PET. In: TENTH INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE AND ICPI/ICRI INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR WORKSHOP, Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings...**Austin: International Center Aggregate Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2001.
- REBEIZ K. S.; FOWLER, D. W. Recycling Plastics in Polymer Concrete Systems for Engineering Applications. **Polymer-Plastic Technology Engineering**, v.8, n.30, p.809-825, 1991.
- REBEIZ K. S.; FOWLER, D. W. Shear and Flexure Behavior of Reinforced Polymer Concrete Made With Recycled Plastic Wastes. FONTANA JACK J., KAEDING, Al O., KRAUSS, Paul D. (Ed.) **Properties and uses of Polymers in Concrete**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1996. p.62-77.
- REBEIZ K. S.; FOWLER, D. W. Strength Properties of Polymer Concrete Made With Resins Based on Recycled Plastic Waste. FONTANA JACK J., KAEDING, Al O., KRAUSS, Paul D. (Ed.) **Properties and uses of Polymers in Concrete**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1996. p.80-91.
- RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos**. Porto Alegre, 1995. Programa de pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- SILVA FILHO, A. F. **Contribuição ao estudo do desempenho de concreto produzido com agregado graúdo de escória de ferro-cromo**. Porto Alegre, 2001. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVEIRA, R. L. et al. Mechanical properties and durability of high-performance concrete. In: HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, Gramado, Brazil, 1999. **Proceedings...** Gramado: Second CANMET/ACI International conference, Brazil, 1999. p. 655-670.
- SPRINKEL, M. I-80. Nineteen Year Performance of Polymer Concrete Bridge. STELLA MARUSIN L. (Ed.) **In-Place Performance of Polymer Concrete Overlays**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1997. p.43-73.
- STEINBERG, M. et al. **Concrete polymer materials**: first topical report. Upton: Brookhaven National Laboratory, 1968. (BNL,50234).
- STEINBERG, M. Concrete polymer materials and its worldwide development. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POLYMERS IN CONCRETE, 1., 1973, Atlantic City. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1973. p.123-137, (ACI.SP,40).
- TEZUKA, Y. **Trabalhabilidade de concreto de resina poliéster**. São Paulo, 1977. 235p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- TEZUKA, Y. **Concretos polímeros**. São Paulo: IPT, 1979. 29p.
- TEZUKA, Y. **Concreto de cimento e polímero**. São Paulo: ABCP, 1988. 26p.
- VARUGHESE, K.T.; CHATURVEDI B. K. Fly Ash as Fine Aggregate in Polyester Based Polymer Concrete. *Cement and Concrete Composites*, v.18, p. 105-108, 1996.
- VIPULANANDAN, C. Characterization of polyester polymer and polymer concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Houston, v.5, n.1, p.62-68, feb.1993.
- VIPULANANDAN, et al. Performance of Steel-Polymer Concrete Composite Structural Elements. FONTANA JACK J., KAEDING, Al O., KRAUSS, Paul D. (Ed.). **Properties and uses of Polymers in Concrete**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1996. p.17 -35.
- VIPULANANDAN, C.; MEBARKIA, S. Flexural and Fracture Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Polymer Concrete. FONTANA JACK J., KAEDING, Al O., KRAUSS, Paul D. (Ed.). **Properties and uses of Polymers in Concrete**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1996. p.1-16.

VIPULANANDAN, N.C.; DHARMARAJAN, N. Flexural behavior of polyester concrete. **Cement and Concrete Research**, Houston, v.17, n.2, p.219-230, Mar.1987.

ZALATIMO, J-A. H.; FOWLER, D. W. Measurement of Shrinkage-Induced Stress in Polymer Concrete Overlays. FONTANA JACK J., KAEDING, Al O., KRAUSS, Paul D. (Ed.) **Properties and uses of Polymers in Concrete**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1996. p.38-59.

WHITE D.; MONTANI, R. I-80. Thin-Bonded Polymer Concrete Overlays for Exposed Concrete Bridge Deck Protection and Maintenance. STELLA MARUSIN L. (Ed.) **In-Place Performance of Polymer Concrete Overlays**. Farmington Hills, American Concrete Institute, 1997. p.99-105.

## **ANEXOS**

A = Resultados obtidos no ensaio de ataque químico

B = Relação custo/benefício

## ANEXOS A

Resultados parciais obtidos no ensaio de ataque químico, massa e resistência à tração na flexão.

Massas medidas para os corpos-de-prova submetidos ao ataque químico em ácido acético.

CP	seco	1 ciclo	2 ciclo	3 ciclo	4 ciclo	5 ciclo
AQA-O8/1	519,4	519,6	519,6	519,6	519,6	519,6
AQA-O8/2	530,6	530,8	530,8	530,8	530,8	530,9
AQA-O8/3	526,4	526,6	526,7	526,7	526,7	526,6
AQA-O12/1	538,6	538,8	538,9	538,9	539,0	539,0
AQA-O12/2	539,2	539,4	539,5	539,5	539,6	539,7
AQA-O12/3	541,0	541,2	541,2	541,2	541,3	541,4
AQA-O16/1	550,2	550,4	550,4	550,4	550,5	550,4
AQA-O16/2	549,2	549,4	549,4	549,4	549,4	549,6
AQA-O16/3	545,1	545,2	545,2	545,2	545,3	545,3
AQA-O20/1	549,4	549,5	549,5	549,5	549,6	549,6
AQA-O20/2	547,2	547,4	547,4	547,4	547,5	547,5
AQA-O20/3	544,1	544,3	544,3	544,3	544,4	544,4
AQA-I8/1	538,2	538,3	538,3	538,3	538,3	538,3
AQA-I8/2	527,9	528,0	528,0	528,0	528,0	528,0
AQA-I8/3	540,7	540,8	540,8	540,8	540,9	540,9
AQA-I12/1	557,9	558,0	558,0	558,0	558,1	558,1
AQA-I12/2	551,7	551,8	551,8	551,8	551,9	551,9
AQA-I12/3	575,7	575,8	575,7	575,7	575,7	575,8
AQA-I16/1	543,3	543,2	543,2	543,2	543,3	543,2
AQA-I16/2	549,8	549,6	549,6	549,6	549,7	549,6
AQA-I16/3	546,0	545,9	545,9	545,9	546,0	545,9
AQA-I20/1	557,0	557,0	556,9	556,9	557,0	557,0
AQA-I20/2	555,9	556,0	555,9	555,9	556,0	556,0
AQA-I20/3	550,7	550,8	550,8	550,8	550,9	550,8

Massas medidas para os corpos-de-prova submetidos ao ataque químico em ácido cítrico.

CP	Seco	1 ciclo	2 ciclo	3 ciclo	4 ciclo	5 ciclo
AQC-O8/1	554,1	554,2	554,3	554,3	554,3	554,4
AQC-O8/2	547,6	547,7	547,7	547,7	547,7	547,8
AQC-O8/3	553,0	553,1	553,1	553,1	553,1	553,2
AQC-O12/1	547,1	547,2	547,2	547,2	547,3	547,3
AQC-O12/2	539,4	539,5	539,5	539,5	539,6	539,6
AQC-O12/3	540,7	540,8	540,8	540,8	540,8	540,9
AQC-O16/1	545,8	545,9	545,9	545,9	545,9	546,0
AQC-O16/2	543,2	543,3	543,3	543,3	543,3	543,3
AQC-O16/3	541,7	541,8	541,7	541,7	541,7	541,8
AQC-O20/1	542,2	542,3	542,2	542,2	542,3	542,4
AQC-O20/2	544,3	544,4	544,4	544,4	544,5	544,5
AQC-O20/3	544,5	544,5	544,5	544,5	544,5	544,6

AQC-I8/1	536,5	536,5	536,5	536,4	536,4	536,4
AQC-I8/2	543,5	543,5	543,5	543,5	543,6	543,5
AQC-I8/3	529,9	530,0	529,9	529,9	530,0	529,7
AQC-I12/1	537,3	537,3	537,3	537,3	537,4	537,4
AQC-I12/2	527,5	527,5	527,5	527,5	527,6	527,5
AQC-I12/3	540,4	540,5	540,4	540,4	540,4	540,4
AQC-I16/1	546,8	546,8	546,8	546,8	546,8	546,8
AQC-I16/2	551,0	550,9	550,9	550,9	550,9	551,0
AQC-I16/3	556,1	556,2	556,1	556,1	556,2	556,2
AQC-I20/1	557,0	556,9	556,9	556,9	556,9	556,9
AQC-I20/2	554,1	554,1	554,1	554,1	554,1	554,1
AQC-I20/3	543,5	543,4	543,2	543,2	543,2	543,0

Massas medidas para os corpos-de-prova submetidos ao ataque químico em ácido fórmico.

CP	Seco	1 ciclo	2 ciclo	3 ciclo	4 ciclo	5 ciclo
AQF-O8/1	534,9	535,0	535,1	535,1	535,2	535,2
AQF-O8/2	533,3	533,5	533,4	533,4	533,5	533,6
AQF-O8/3	529,4	529,6	529,6	529,6	529,6	529,8
AQF-O12/1	549,5	549,5	549,5	549,5	549,6	549,6
AQF-O12/2	549,3	549,4	549,3	549,3	549,4	549,5
AQF-O12/3	543,6	543,7	543,5	543,5	543,6	543,7
AQF-O16/1	541,8	541,9	541,9	541,9	542,0	542,0
AQF-O16/2	542,2	542,3	542,2	542,2	542,3	542,4
AQF-O16/3	-	-	-	-	-	-
AQF-O20/1	541,5	541,7	541,5	541,5	541,7	541,7
AQF-O20/2	538,6	538,6	538,5	538,5	538,6	538,7
AQF-O20/3	547,0	547,1	547,1	547,1	547,2	547,2
AQF-I8/1	536,4	536,6	536,5	536,6	536,8	536,7
AQF-I8/2	531,4	531,6	531,4	531,4	531,5	531,4
AQF-I8/3	521,7	522,0	522,0	522,0	522,1	521,4
AQF-I12/1	555,4	555,6	555,5	555,5	555,8	555,8
AQF-I12/2	562,6	562,7	562,6	562,6	562,7	562,9
AQF-I12/3	555,8	555,7	555,6	555,6	555,7	555,8
AQF-I16/1	546,7	546,7	546,6	546,6	546,8	546,8
AQF-I16/2	555,3	555,3	555,3	555,3	555,5	555,5
AQF-I16/3	553,1	553,1	553,0	553,0	553,2	553,1
AQF-I20/1	549,1	549,2	549,2	549,2	549,4	549,3
AQF-I20/2	543,3	543,3	543,3	543,3	543,5	543,4
AQF-I20/3	547,4	547,3	547,3	547,3	547,4	547,4



Massas medidas para os corpos-de-prova submetidos ao ataque químico em ácido láctico.

CP	Seco	1 ciclo	2 ciclo	3 ciclo	4 ciclo	5 ciclo
AQL-O8/1	524,6	524,8	524,8	524,8	524,8	525,0
AQL-O8/2	532,5	532,9	532,6	532,7	532,7	532,8
AQL-O8/3	536,7	536,9	536,9	536,9	536,8	536,9
AQL-O12/1	549,6	549,7	549,7	549,7	549,7	549,8
AQL-O12/2	542,3	542,5	542,4	542,4	542,4	542,5
AQL-O12/3	547,3	547,4	547,3	547,3	547,3	547,4
AQL-O16/1	544,8	545,0	544,9	545,0	545,0	545,0
AQL-O16/2	547,5	547,6	547,6	547,6	547,7	547,7
AQL-O16/3	542,3	542,4	542,4	542,4	542,4	542,5
AQL-O20/1	542,3	542,4	542,5	542,4	542,4	542,5
AQL-O20/2	541,1	541,3	541,2	541,2	541,2	541,3
AQL-O20/3	550,3	550,4	550,5	550,4	550,5	550,5
AQL-I8/1	540,8	541,0	541,0	540,8	540,8	540,9
AQL-I8/2	555,3	555,5	555,6	555,6	555,5	555,6
AQL-I8/3	538,3	538,4	538,4	538,2	538,3	538,4
AQL-I12/1	547,8	548,0	548,1	548,1	548,0	548,1
AQL-I12/2	534,6	534,8	534,8	534,7	534,7	534,8
AQL-I12/3	549,8	550,0	550,1	549,9	550,0	550,1
AQL-I16/1	542,6	542,7	542,8	542,7	542,7	542,8
AQL-I16/2	537,7	537,8	537,9	537,7	537,8	537,9
AQL-I16/3	548,0	548,1	548,2	548,0	548,1	548,1
AQL-I20/1	545,8	545,8	545,9	545,8	545,7	545,8
AQL-I20/2	547,7	547,8	547,9	547,8	547,7	547,8
AQL-I20/3	537,0	537,0	537,1	537,0	537,0	537,0

Massas medidas para os corpos-de-prova submetidos ao ataque químico em ácido sulfúrico.

CP	seco	1 ciclo	2 ciclo	3 ciclo	4 ciclo	5 ciclo
AQS-O8/1	529,3	529,1	529,1	529,1	529,1	529,1
AQS-O8/2	533,3	533,3	533,4	533,4	533,4	533,4
AQS-O8/3	535,9	535,8	535,9	535,9	535,9	535,9
AQS-O12/1	547,6	547,6	547,7	547,7	547,8	547,7
AQS-O12/2	539,9	539,9	539,9	539,9	540,0	540,0
AQS-O12/3	543,3	543,3	543,3	543,3	543,3	543,3
AQS-O16/1	542,4	542,5	542,5	542,5	542,6	542,6
AQS-O16/2	547,6	547,6	547,6	547,6	547,7	547,7
AQS-O16/3	540,1	540,1	540,2	540,2	540,3	540,2
AQS-O20/1	542,7	542,7	542,8	542,8	542,9	542,8
AQS-O20/2	548,1	548,0	548,0	548,0	548,1	548,1
AQS-O20/3	550,8	550,8	550,8	550,8	550,9	550,9
AQS-I8/1	536,8	536,8	536,9	536,9	536,9	536,8
AQS-I8/2	525,7	525,8	525,9	525,9	525,9	525,5
AQS-I8/3	536,6	536,6	536,6	536,6	536,7	536,5
AQS-I12/1	545,2	545,2	545,2	545,2	545,4	545,3
AQS-I12/2	546,8	546,9	546,8	546,8	547,0	546,8
AQS-I12/3	547,9	548,0	547,9	547,9	548,0	547,9

AQS-I16/1	542,4	542,6	542,5	542,5	542,7	542,5
AQS-I16/2	543,5	543,6	543,5	543,5	543,7	543,5
AQS-I16/3	545,3	545,4	545,3	545,3	545,4	545,4
AQS-I20/1	551,6	551,6	551,6	551,6	551,7	551,6
AQS-I20/2	548,0	547,9	547,8	547,8	547,9	547,9
AQS-I20/3	555,2	555,2	555,2	555,2	555,3	555,2

Massas medidas para os corpos-de-prova submetidos ao ataque químico em refrigerante à base de cola.

CP	Seco	1 ciclo	2 ciclo	3 ciclo	4 ciclo	5 ciclo
AQR-O8/1	551,1	551,9	551,9	551,9	552,0	552,0
AQR-O8/2	543,2	543,4	543,4	543,4	543,5	543,4
AQR-O8/3	546,0	546,0	546,1	546,1	546,2	546,2
AQR-O12/1	542,3	542,3	542,3	542,3	542,4	542,4
AQR-O12/2	548,5	548,7	548,7	548,7	548,8	548,8
AQR-O12/3	545,9	545,9	545,9	545,9	546,0	546,1
AQR-O16/1	545,9	545,9	545,9	545,9	546,0	546,0
AQR-O16/2	541,9	541,9	541,9	541,9	542,0	542,0
AQR-O16/3	542,2	542,3	542,2	542,2	542,3	542,4
AQR-O20/1	543,0	543,0	543,1	543,1	543,1	543,1
AQR-O20/2	546,6	546,6	546,6	546,6	546,6	546,7
AQR-O20/3	547,1	547,1	547,1	547,1	547,2	547,2
AQR-I8/1	533,2	533,5	533,5	533,4	553,6	533,6
AQR-I8/2	544,7	545,1	545,1	545,1	545,2	545,2
AQR-I8/3	531,2	533,2	533,3	533,3	533,5	532,6
AQR-I12/1	544,2	544,1	544,1	544,1	544,3	544,3
AQR-I12/2	544,1	544,2	544,2	544,2	544,4	544,4
AQR-I12/3	538,6	538,9	538,9	538,9	539,1	538,9
AQR-I16/1	548,6	548,6	548,7	548,7	548,7	548,6
AQR-I16/2	554,7	554,7	554,7	554,7	554,7	554,9
AQR-I16/3	544,9	545,1	545,0	545,0	545,1	545,3
AQR-I20/1	546,2	546,2	546,2	546,2	546,4	546,4
AQR-I20/2	553,8	554,0	554,0	554,0	554,1	554,1
AQR-I20/3	552,6	552,6	552,6	552,6	552,7	552,8

Massas medidas para os corpos-de-prova submetidos ao ataque químico em água destilada.

CP	Seco	1 ciclo	2 ciclo	3 ciclo	4 ciclo	5 ciclo
AQH <sub>2</sub> O-O8/1	542,0	542,0	542,1	542,1	542,3	542,1
AQH <sub>2</sub> O-O8/2	535,1	535,1	535,2	535,2	535,4	535,4
AQH <sub>2</sub> O-O8/3	538,6	538,6	538,7	538,7	538,8	538,9
AQH <sub>2</sub> O-O12/1	538,2	538,2	538,2	538,2	538,5	538,5
AQH <sub>2</sub> O-O12/2	539,7	539,6	539,6	539,6	539,9	539,9
AQH <sub>2</sub> O-O12/3	540,3	540,3	540,3	540,3	540,6	540,6
AQH <sub>2</sub> O-O16/1	546,0	545,9	546,0	546,0	546,2	546,2
AQH <sub>2</sub> O-O16/2	548,5	548,5	548,6	548,6	548,7	548,7
AQH <sub>2</sub> O-O16/3	543,3	543,3	543,3	543,3	543,5	543,5
AQH <sub>2</sub> O-O20/1	555,4	555,3	555,3	555,3	555,5	555,5
AQH <sub>2</sub> O-O20/2	556,6	556,6	556,6	556,6	556,8	556,8
AQH <sub>2</sub> O-O20/3	549,1	549,8	549,8	549,8	550,0	550,0
AQH <sub>2</sub> O-I8/1	520,4	520,7	520,5	520,9	520,9	520,9
AQH <sub>2</sub> O-I8/2	530,6	530,2	530,8	530,9	531,0	531,1
AQH <sub>2</sub> O-I8/3	531,0	531,2	531,2	531,3	531,4	531,5
AQH <sub>2</sub> O-I12/1	541,5	541,5	541,6	541,7	541,9	541,9
AQH <sub>2</sub> O-I12/2	537,3	537,2	537,3	537,4	537,6	537,7
AQH <sub>2</sub> O-I12/3	533,6	533,5	533,5	533,7	533,8	533,9
AQH <sub>2</sub> O-I16/1	541,3	541,4	541,5	541,7	541,7	541,7
AQH <sub>2</sub> O-I16/2	541,5	541,3	541,7	541,8	541,9	542,0
AQH <sub>2</sub> O-I16/3	543,1	543,2	543,3	543,4	543,6	543,6
AQH <sub>2</sub> O-I20/1	553,5	553,6	553,6	553,6	553,8	553,8
AQH <sub>2</sub> O-I20/2	552,7	552,7	552,8	552,9	553,0	553,0
AQH <sub>2</sub> O-I20/3	541,1	541,1	541,1	541,3	541,3	541,3

Na seguinte tabela estão relacionados os resultados parciais e médios para as amostras de concreto polímero submetidas ao ataque químico das sete soluções.

**Ensaio de resistência à tração na flexão após ataque químico**

Amostras	Carga aplicada (kgf)				Resistência à flexão (Mpa)			
	1	2	3	média	1	2	3	média
AQA-O08	438	547	489	491,33	7,38	9,21	8,24	8,28
AQA-O12	741	778	754	757,67	12,48	13,10	12,70	12,76
AQA-O16	890	888	892	890,00	14,99	14,96	15,02	14,99
AQA-O20	1152	1179	987	1106,00	19,40	19,86	16,62	18,63
AQA-I08	634	608	643	628,33	10,68	10,24	10,83	10,58
AQA-I12	1198	924	995	1039,00	20,18	15,56	16,76	17,50
AQA-I16	999	985	920	968,00	16,83	16,59	15,50	16,30
AQA-I20	1096	1097	1106	1099,67	18,46	18,48	18,63	18,52
AQC-O08	949	861	891	900,33	15,98	14,50	15,01	15,16
AQC-O12	1028	982	1063	1024,33	17,32	16,54	17,90	17,25
AQC-O16	1158	953	1083	1064,67	19,51	16,05	18,24	17,93
AQC-O20	1024	985	1082	1030,33	17,25	16,59	18,22	17,35
AQC-I08	682	697	615	664,67	11,49	11,74	10,36	11,20
AQC-I12	743	607	667	672,33	12,51	10,22	11,23	11,32
AQC-I16	1003	1050	1158	1070,33	16,89	17,69	19,51	18,03
AQC-I20	1153	1067	918	1046,00	19,42	17,97	15,46	17,62

AQF-O08	675	730	391	598,67	11,37	12,30	6,59	10,08
AQF-O12	1084	1043	1094	1073,67	18,26	17,57	18,43	18,08
AQF-O16	925	976		633,67	15,58	16,44	0,00	16,01
AQF-O20	1163	1019	1095	1092,33	19,59	17,16	18,44	18,40
AQF-I08	625	611	367	534,33	10,53	10,29	6,18	9,00
AQF-I12	892	892	818	867,33	15,02	15,02	13,78	14,61
AQF-I16	891	1138	962	997,00	15,01	19,17	16,20	16,79
AQF-I20	963	869	956	929,33	16,22	14,64	16,10	15,65
AQL-O08	478	773	692	647,67	8,05	13,02	11,66	10,91
AQL-O12	974	930	1039	981,00	16,41	15,66	17,50	16,52
AQL-O16	1034	1097	1003	1044,67	17,42	18,48	16,89	17,60
AQL-O20	988	1096	1151	1078,33	16,64	18,46	19,39	18,16
AQL-I08	704	843	700	749,00	11,86	14,20	11,79	12,62
AQL-I12	771	750	912	811,00	12,99	12,63	15,36	13,66
AQL-I16	1086	921	935	980,67	18,29	15,51	15,75	16,52
AQL-I20	1064	1141	892	1032,33	17,92	19,22	15,02	17,39
AQS-O08	734	815	825	791,33	12,36	13,73	13,90	13,33
AQS-O12	1032	1079	979	1030,00	17,38	18,17	16,49	17,35
AQS-O16	1170	1133	1221	1174,67	19,71	19,08	20,57	19,79
AQS-O20	1053	1229	1188	1156,67	17,74	20,70	20,01	19,48
AQS-I08	675	482	719	625,33	11,37	8,12	12,11	10,53
AQS-I12	941	982	1054	992,33	15,85	16,54	17,75	16,71
AQS-I16	952	1023	962	979,00	16,04	17,23	16,20	16,49
AQS-I20	1270	1163	1238	1223,67	21,39	19,59	20,85	20,61
AQR-O08	450	662	682	598,00	7,58	11,15	11,49	10,07
AQR-O12	997	982	984	987,67	16,79	16,54	16,57	16,64
AQR-O16	1095	1130	1001	1075,33	18,44	19,03	16,86	18,11
AQR-O20	1107	1195	1117	1139,67	18,65	20,13	18,81	19,20
AQR-I08	617	711	507	611,67	10,39	11,98	8,54	10,30
AQR-I12	921	949	779	883,00	15,51	15,98	13,12	14,87
AQR-I16	1141	1135	890	1055,33	19,22	19,12	14,99	17,78
AQR-I20	1168	1179	1151	1166,00	19,67	19,86	19,39	19,64
AQH2O-O08	822	782	452	685,33	13,85	13,17	7,61	11,54
AQH2O-O12	1039	861	1006	968,67	17,50	14,50	16,94	16,32
AQH2O-O16	1077	1144	1116	1112,33	18,14	19,27	18,80	18,74
AQH2O-O20	1154	996	1053	1067,67	19,44	16,78	17,74	17,98
AQH2O-I08	361	448	518	442,33	6,08	7,55	8,73	7,45
AQH2O-I12	560	539	430	509,67	9,43	9,08	7,24	8,58
AQH2O-I16	728	908	888	841,33	12,26	15,29	14,96	14,17
AQH2O-I20	1131	990	913	1011,33	19,05	16,68	15,38	17,03

## ANEXO B

### Cálculo da relação entre custo e benefício do concreto polímero

Para o cálculo dessa relação foram levados em consideração os custos da areia e da resina, sem levar em conta o custo da cinza volante, uma vez que, para o presente trabalho não acarretou custos.

Estes cálculos foram realizados em setembro de 1999, quando na ocasião o custo da resina isoftálica era de 5,94 reais por litro e a resina ortoftálica 3,36 reais por litro, compradas em galões de 20 litros.

Analisando os índices obtidos vê-se que o melhor índice na resina orto é aos 13% de resina, e, sendo este um percentual com boa trabalhabilidade do material, será este a ser fixado para os demais ensaios.

Já para a resina isoftálica, o melhor índice ocorre aos 10%, talvez seria até menos. Porém, a variação entre 10% e 12% é muito insignificante. Como 10% não apresenta boa trabalhabilidade e 12% já tem boa trabalhabilidade, o percentual a ser adotado é de 12%.

Visto que estava sendo definido o teor de resina que seria adotado para cada tipo de resina, todos os concretos possuem 12% de cinza volante (compacidade máxima).

Sendo que a massa específica de cada traço de concreto é desconhecida, calculou-se o custo para produzir um quilo de concreto polímero para cada traço específico. Como a quantidade de resina é calculada em função dos materiais secos, para cada teor de resina, ter-se-á um valor diferente para o concreto.

O cálculo é feito da seguinte maneira:

1. Somam-se as quantidades de materiais secos, em massa.
2. Aos materiais secos, é somada a quantidade de resina, em massa.

3. Dividi-se 1 (correspondente a um quilo de concreto, ou 1000 correspondente a 1000 gramas de concreto, dependendo da unidade utilizada), pelo total obtido anteriormente. Dessa divisão obtém-se um fator.
4. Multiplicando esse fator pela quantidade individual de cada material, ter-se-á a quantidade desse material para fazer um quilo de concreto daquele respectivo traço.
5. Multiplicando essa quantidade pelo seu respectivo custo e somando as parciais de cada material, tem-se o custo do concreto polímero daquele traço.
6. Dividindo a resistência do concreto polímero pelo seu custo, tem-se um fator que indica a relação custo/benefício. Quanto maior este fator, maior será a relação custo/benefício.

Ou seja:

Areia + cinza = materiais secos

Materiais secos + resina = total

Proporção para 1 kg de concreto polímero:

$$\frac{1000}{total} = \text{fator}$$

areia x fator = \_\_\_\_\_ x \$ = \_\_\_\_\_

cinza x fator = \_\_\_\_\_ x \$ = \_\_\_\_\_

resina x fator = \_\_\_\_\_ x \$ = \_\_\_\_\_

$\frac{\quad}{\text{soma} = 1\text{kg}} \quad \frac{\quad}{\$ \text{ de } 1\text{kg}}$

Por exemplo, para um traço com 12% de cinza volante e 10% de resina, tem-se:

- Quantidade de areia = 1220g
- Quantidade de cinza volante = 146,4g

**Materiais secos = 1366,4g**

- Quantidade de resina para 1366,4g de materiais secos = 136,64g

**Total de materiais = 1503,04g**

$$\frac{1000}{1503,04} = 0,665$$

Como os materiais estão em gramas, dividir-se-á 1000 pelo total obtido, ou seja:

**O fator obtido é 0,665. Então:**

Areia:  $1220 \times 0,665 = 811,3g$ .

Serão necessárias 811,3g para fazer 1000g de concreto com 12% de cinza volante e 10% de resina. Sendo o custo da areia, cerca de R\$20,00/m<sup>3</sup>, cada quilo de areia custa cerca de R\$0,00764. Assim,  $811,3 \times 0,00764 = R\$0,0062$ .

Idem para a resina (considerando a resina ortoftálica):

Resina:  $136,64 \times 0,665 = 90,87g$ .

Serão necessárias 90,87g para fazer 1000g de concreto com 12% de cinza volante e 10% de resina. Sendo o custo da resina de R\$3,36/kg, tem-se,  $0,09087 \times 3,36 = R\$0,31$ .

Assim, o custo de um quilo de concreto polímero com 12% de cinza volante e 10% de resina ortoftálica é de:  $0,0062 + 0,31 = R\$0,3162$ .

A tabela abaixo mostra o custo, a resistência e o fator obtido para a relação custo/benefício de cada traço de concreto polímero.

<b>Identificação [Res - %]</b>	<b>Custo</b>	<b>Resistência</b>	<b>Fator</b>
I10	0,546	71,40	130,76
I11	0,596	77,50	130,03
I12	0,646	82,50	127,71
I13	0,686	86,39	125,93
I14	0,736	91,00	123,64

I15	0,786	93,25	118,63
I16	0,826	94,00	113,80
I17	0,866	96,00	110,85
I18	0,916	94,57	103,24
O10	0,316	66,00	208,86
O11	0,339	74,00	218,29
O12	0,366	78,50	214,48
O13	0,396	89,90	227,02
O14	0,419	87,50	208,83
O15	0,446	91,21	204,50
O16	0,470	94,50	201,06
O17	0,494	98,00	198,38
O18	0,516	94,96	184,03



