

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MATERIAIS DE REPARO
INDUSTRIALIZADOS PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO
FRENTE AO ATAQUE ÁCIDO**

Claudia Veppo Gaier

Porto Alegre
dezembro 2005

CLAUDIA VEPPPO GAIER

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MATERIAIS DE REPARO
INDUSTRIALIZADOS PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO
FRENTE AO ATAQUE ÁCIDO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Mestrado
Profissionalizante em Engenharia da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na
modalidade Profissionalizante

Porto Alegre
dezembro 2005

G137a Gaier, Claudia Veppo
Análise do desempenho de materiais de reparo industrializados para estruturas de concreto frente ao ataque ácido / Claudia Veppo Gaier.
-- 2005.

Trabalho de conclusão (mestrado profissional) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Porto Alegre, BR-RS, 2006.

Orientação : Prof^a Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

1. Estruturas de concreto. 2. Argamassa de reparo. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Título.

CDU-691.53(043)

CLAUDIA VEPPA GAIER

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MATERIAIS DE REPARO
INDUSTRIALIZADOS PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO
FRENTE AO ATAQUE ÁCIDO**

Este Trabalho de Conclusão foi julgado adequado para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, março de 2006

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Eng. Civil, M.Sc., Dr.^a (EPUSP)
Orientador

Prof. Carin Maria Schmitt
Coordenadora do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jane Proszek Gorninski (UNISINOS)
Dr.^a pela Universidade Feral do Rio Grande do Sul

Prof. Ângela Borges Masuero (UFRGS)
Dr.^a pela Universidade Feral do Rio Grande do Sul

Prof. Jairo José de Oliveira Andrade (PUCRS E ULBRA)
Dr.^a pela Universidade Feral do Rio Grande do Sul

*À Deus
À minha mãe Marina Veppo
Aos meus sobrinhos Deodato e Giulia Marina*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e entidades que de alguma forma colaboraram para a elaboração deste trabalho, em especial:

À Deus pela força e coragem que me fortalece a cada dia.

À minha orientadora, Prof^ª Denise Dal Molin, por seus sábios ensinamentos, sua competência e pelo enorme incentivo demonstrado durante a realização deste trabalho.

Às empresas que gentilmente doaram os materiais necessários para a realização da pesquisa.

À empresa EPT ENGENHARIA E PESQUISAS TECNOLÓGICAS S/A e toda equipe de laboratório pelo precioso auxílio no desenvolvimento do trabalho experimental, também a todos colegas que torceram por mim.

Aos professores do NORIE e do LEME pelas valiosas experiências compartilhadas durante todo curso, em especial a Prof^ª Ângela Masuero, ao Prof^º Ruy Cremonini, ao Prof^º João Luiz Campagnolo, ao Prof^º Ronaldo Bastos Duarte, Prof^º Luiz Carlos da Silva Pinto.

Aos servidores do NORIE e da BIBLIOTECA, em especial ao Éderson, Airton e Luiz Rangel pela atenção e solicitude.

À amiga Natália Posser pelo incentivo em toda minha vida acadêmica, aos colegas de curso Graziella, Andréia e Gustavo pela amizade e companheirismo que foram fundamentais ao longo de toda jornada e em especial à minha amiga e colega Adriana de Andrade Vieira, pelo seu otimismo e perseverança que nos momentos de desespero fizeram-me acreditar que tudo daria certo.

Aos meus irmãos Fátima, Márcia, Valéria e Eduardo, pela compreensão, carinho e paciência durante todo o período do mestrado.

À minha querida e amada mãe pelo seu exemplo de vida e pelo incansável apoio.

A persistência é o caminho do êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

GAIER, C.V. **Estudo do Ataque Ácido em Materiais de Reparo Industrializados para Estruturas de Concreto**. 2005. 150 f. Trabalho de Diplomação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

Desde os primórdios da civilização o homem tem utilizado materiais naturais, e mais recentemente materiais industrializados, para construção de estruturas portantes. Esse intenso processo de alteração e aprimoramento dos materiais e métodos construtivos proporcionou um acúmulo de conhecimentos que possibilitou, dentro de certos limites, construir estruturas adaptadas às suas necessidades. As estruturas de concreto estão cada vez mais presentes em ambientes agressivos, como industriais e marinhos, necessitando então de cuidados especiais. O número de obras que necessitam de intervenções cresce a cada dia, o que faz com que a demanda por técnicas e materiais de reparo também cresça. O número de estruturas de concreto que necessitam recuperações aumenta com a idade das obras brasileiras, em decorrência da sua degradação normal ou prematura, quando estas estão expostas a ambientes agressivos e não foram projetadas para tal. A construção civil tem como tendência utilizar cada vez mais sistemas que garantam a proteção às estruturas de concreto, o que tem contribuído para o incremento do surgimento de novos produtos e métodos de execução. Neste trabalho, foi avaliado o comportamento de argamassas industrializadas, de diferentes composições, disponíveis no mercado brasileiro, frente ao ataque por três soluções ácidas (acético, láctico e sulfúrico) devido à suscetibilidade dos compostos cimentícios do concreto frente ao ataque ácido que dissolvem a capa carbonatada do concreto, iniciando o processo de deterioração das estruturas. O trabalho incluiu ensaios de perda de massa, resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples e investigou o efeito das variáveis citadas, no desempenho das argamassas industrializadas submetidas ao ataque químico. Os resultados mostram que as variáveis investigadas interferem no desempenho dos materiais frente à ação de soluções ácidas, porém de forma e intensidade diferentes para cada composição química das argamassas e para cada um dos ácidos estudados. Os materiais de base orgânica (epóxi) foram os que tiveram melhor desempenho para proteção das estruturas de concreto submetidas ao ataque ácido.

Palavras-chave: argamassas de reparo; materiais de proteção; recuperação de estruturas de concreto.

ABSTRACT

GAIER, C.V. **Estudo do Ataque Ácido em Materiais de Reparo Industrializados para Estruturas de Concreto**. 2005. 150 f. Trabalho de Diplomação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

Since the beginning of civilization, man has been using natural materials, and more recently, industrialized materials, for the construction of self-supporting structures. This intense process of alteration and improvement of materials and constructive methods has provided an accumulation of knowledge that has allowed, within certain limits, to build structures adapted to man's needs. The concrete structures are increasingly present in aggressive environments, such as industrial and marine environments, and do therefore need special care. The number of buildings that need intervention grows every day, which causes the demand for repair techniques and materials to grow as well. The number of concrete structures that need recovery increases with the age of Brazilian buildings, as a result of their normal or premature degradation, when exposed to aggressive environments, and because they were not designed for these environments. Civil construction has a tendency to increasingly use systems that ensure protection to concrete structures, which has contributed to an increment in the emergence of new products and methods of execution. In this paper, an evaluation was made of the behavior of industrialized mortars of different compositions, available on the Brazilian market, in the face of the attack by three acid solutions (acetic, lactic and sulphuric) due to the susceptibility of cementitious composites of concrete to acid attack that dissolves the carbonated coat of concrete, thus starting the deterioration process of the structures. The paper includes mass loss, tensile strength at flexure, and resistance to simple compression testing, and has investigated the effect of the mentioned variables on the performance of industrialized mortars exposed to chemical attack. The results show that the investigated variables interfere in the performance of the materials in the face of the action of acid solutions, but in a different form and intensity for each chemical composition of the mortars and for each one of the studied acids. The organic base materials (epoxy) showed better performance for the protection of concrete structures attacked by acids.

Keywords: repair mortar; protection materials; recovery of concrete structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: fenômenos de transporte no concreto.....	24
Figura 2: efeitos do ataque ácido ao concreto.....	31
Figura 3: tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto.....	34
Figura 4: classificação dos materiais para reparo quanto à família química	43
Figura 5: esquema dos ciclos de agressão ácida.....	54
Figura 6: perda de massa da agressão do ácido acético nos materiais de reparo, separados pela composição dos materiais.....	70
Figura 7: aspecto dos cp's do material "1 – P", base mista, fabricante A, ataque pela solução de ácido acético.....	71
Figura 8: aspecto dos cp's do material "2 – M", base inorgânica, fabricante A, ataque pela solução de ácido acético.....	71
Figura 9: aspecto dos cp's do material "3 – M", base mista, fabricante B, ataque pela solução de ácido acético.....	72
Figura 10: aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, ataque pela solução de ácido acético.....	72
Figura 11: aspecto dos cp's do material "5 – E", base orgânica, fabricante B, ataque pela solução de ácido acético.....	73
Figura 12: aspecto dos cp's do material "6 – M", base inorgânica, fabricante C, ataque pela solução de ácido acético.....	73
Figura 13: aspecto dos cp's do material "7 – P", base mista, fabricante C, ataque pela solução de ácido acético.....	74
Figura 14: aspecto dos cp's do material "8 – M", base inorgânica, fabricante C, ataque pela solução de ácido acético.....	74
Figura 15: aspecto dos cp's do material "9 – M", base mista, fabricante D, ataque pela solução de ácido acético.....	75
Figura 16: aspecto dos cp's do material "10 – E", base orgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido acético.....	75
Figura 17: aspecto dos cp's do material "11 – P", base mista, fabricante D, ataque pela solução de ácido acético.....	76
Figura 18: aspecto dos cp's do material "12 – M", base inorgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido acético.....	76
Figura 19: aspecto dos cp's do material "13 – M", base inorgânica, fabricante E, ataque pela solução de ácido acético.....	77
Figura 20: aspecto dos cp's do material "14 – P", base mista, fabricante E, ataque pela solução de ácido acético.....	77
Figura 21: aspecto dos cp's do material "15 – E", base orgânica, fabricante E, ataque pela solução de ácido acético.....	78

Figura 22: perda de massa da agressão do ácido láctico nos materiais de reparo, separados pela composição dos materiais.....	82
Figura 23: aspecto dos cp's do material "1 – P", base mista, fabricante A, ataque pela solução de ácido láctico.....	83
Figura 24: aspecto dos cp's do material "2 – M", base inorgânica, fabricante A, ataque pela solução de ácido láctico.....	83
Figura 25: aspecto dos cp's do material "3 – M", base inorgânica, fabricante B, ataque pela solução de ácido láctico.....	84
Figura 26: aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, ataque pela solução de ácido láctico.....	84
Figura 27: aspecto dos cp's do material "5 – E", base orgânica, fabricante B, ataque pela solução de ácido láctico.....	85
Figura 28: aspecto dos cp's do material "6 – M", base inorgânica, fabricante C, ataque pela solução de ácido láctico.....	85
Figura 29: aspecto dos cp's do material "7 – P", base mista, fabricante C, ataque pela solução de ácido láctico.....	86
Figura 30: aspecto dos cp's do material "8 – M", base inorgânica, fabricante C, ataque pela solução de ácido láctico.....	86
Figura 31: aspecto dos cp's do material "9 – M", base inorgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido láctico.....	87
Figura 32: aspecto dos cp's do material "10 – E", base orgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido láctico.....	87
Figura 33: aspecto dos cp's do material "11 – P", base mista, fabricante D, ataque pela solução de ácido láctico.....	88
Figura 34: aspecto dos cp's do material "12 – M", base inorgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido láctico.....	88
Figura 35: aspecto dos cp's do material "13 – M", base inorgânica, fabricante E, ataque pela solução de ácido láctico.....	89
Figura 36: aspecto dos cp's do material "14 – P", base mista, fabricante E, ataque pela solução de ácido láctico.....	89
Figura 37: aspecto dos cp's do material "15 – E", base orgânica, fabricante E, ataque pela solução de ácido láctico.....	90
Figura 38: perda de massa da agressão do ácido sulfúrico nos materiais de reparo, separados pela composição dos materiais.....	94
Figura 39: aspecto dos cp's do material "1 – P", base mista, fabricante A, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	95
Figura 40: aspecto dos cp's do material "2 – M", base inorgânica, fabricante A, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	96
Figura 41: aspecto dos cp's do material "3 – M", base inorgânica, fabricante B, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	96

Figura 42: aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	97
Figura 43: aspecto dos cp's do material "5 – E", base orgânica, fabricante B, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	97
Figura 44: aspecto dos cp's do material "6 – M", base inorgânica, fabricante C, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	98
Figura 45: aspecto dos cp's do material "7 – P", base mista, fabricante C, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	98
Figura 46: aspecto dos cp's do material "8 – M", base inorgânica, fabricante C, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	99
Figura 47: aspecto dos cp's do material "9 – M", base inorgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	99
Figura 48: aspecto dos cp's do material "10 – E", base orgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	100
Figura 49: aspecto dos cp's do material "11 – P", base mista, fabricante D, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	100
Figura 50: aspecto dos cp's do material "12 – M", base inorgânica, fabricante D, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	101
Figura 51: aspecto dos cp's do material "13 – M", base inorgânica, fabricante E, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	101
Figura 52: aspecto dos cp's do material "14 – P", base mista, fabricante E, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	102
Figura 53: aspecto dos cp's do material "15 – E", base orgânica, fabricante E, ataque pela solução de ácido sulfúrico.....	102
Figura 54: efeito isolado do tipo de ácido em relação à perda de massa.....	104
Figura 55: efeito isolado do tipo de material em relação à perda de massa.....	105
Figura 56: efeito da interação do tipo de ácido e do tipo de material em relação à perda de massa.....	106
Figura 57: efeito da interação do fabricante e do tipo de material em relação à perda de massa.....	107
Figura 58: efeito da interação do fabricante, tipo de material e do tipo de agressão ácida, em relação à perda de massa.....	108
Figura 59: aspecto dos cp's do material "1 – P", base mista, fabricante A, para as três soluções ácidas.....	109
Figura 60: aspecto dos cp's do material "2 – M", base inorgânica, fabricante A, para as três soluções ácidas.....	109
Figura 61: aspecto dos cp's do material "3 – M", base inorgânica, fabricante B, para as três soluções ácidas.....	110
Figura 62: aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, para as três soluções ácidas.....	110

Figura 63: aspecto dos cp's do material "5 – E", base orgânica, fabricante B, para as três soluções ácidas.....	111
Figura 64: aspecto dos cp's do material "6 – M", base inorgânica, fabricante C, para as três soluções ácidas.....	111
Figura 65: aspecto dos cp's do material "7 – P", base mista, fabricante C, para as três soluções ácidas.....	112
Figura 66: aspecto dos cp's do material "8 – M", base inorgânica, fabricante C, para as três soluções ácidas.....	112
Figura 67: aspecto dos cp's do material "9 – M", base inorgânica, fabricante D, para as três soluções ácidas.....	113
Figura 68: aspecto dos cp's do material "10 – E", base orgânica, fabricante D, para as três soluções ácidas.....	113
Figura 69: aspecto dos cp's do material "11 – P", base mista, fabricante D, para as três soluções ácidas.....	114
Figura 70: aspecto dos cp's do material "12 – M", base inorgânica, fabricante D, para as três soluções ácidas.....	114
Figura 71: aspecto dos cp's do material "13 – M", base inorgânica, fabricante E, para as três soluções ácidas.....	115
Figura 72: aspecto dos cp's do material "14 – P", base mista, fabricante E, para as três soluções ácidas.....	115
Figura 73: aspecto dos cp's do material "15 – E", base orgânica, fabricante E, para as três soluções ácidas.....	116
Figura 74: resistência à tração na flexão dos cp's de referência.....	119
Figura 75: resistência à tração na flexão dos cp's agredidos pelo ácido acético.....	121
Figura 76: resistência à tração na flexão dos cp's agredidos pelo ácido láctico.....	124
Figura 77: resistência à tração na flexão dos cp's agredidos pelo ácido sulfúrico.....	127
Figura 78: efeito isolado do tipo de ácido em relação à resistência à tração na flexão.....	129
Figura 79: efeito isolado do tipo de material em relação à resistência à tração na flexão	129
Figura 80: resultados obtidos da interação dos fatores material x ácido em relação à tração na flexão.....	130
Figura 81: resultados obtidos da interação dos fatores material x fabricante em relação à tração na flexão.....	131
Figura 82: resultados obtidos da interação dos fatores fabricante x ácido x material em relação à tração na flexão.....	131
Figura 83: comparação dos resultados de resistência à tração na flexão – valores indicados pelo fabricante e dos ensaios realizados.....	132
Figura 84: ilustração gráfica dos resultados de resistência à compressão simples.....	135
Figura 85: isolado do material de reparo em relação à resistência à compressão simples.	136
Figura 86: interação do material de reparo com o fabricante em relação à resistência a compressão simples.....	137

Figura 87: comparação dos resultados de resistência à compressão simples – valores indicados pelo fabricante e dos ensaios realizados.....	138
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: principais propriedades dos materiais de reparo segundo a família química....	44
Tabela 2: composição dos materiais utilizados.....	52
Tabela 3: identificação dos corpos-de-prova	53
Tabela 4: composições, características e usos recomendados dos materiais utilizados....	56
Tabela 5: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa (g) - ácido acético.....	67
Tabela 6: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa - ácido acético - parâmetros estatísticos.....	68
Tabela 7: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa – ácido acético – composições químicas dos materiais de reparo.....	68
Tabela 8: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa (g) – ácido láctico.....	79
Tabela 9: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa - ácido láctico - parâmetros estatísticos.....	80
Tabela 10: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa – ácido láctico – composições químicas dos materiais de reparo.....	81
Tabela 11: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa (g) – ácido sulfúrico.....	91
Tabela 12: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa - ácido sulfúrico - parâmetros estatísticos.....	92
Tabela 13: resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa – ácido sulfúrico – composições químicas dos materiais de reparo.....	93
Tabela 14: análise de variância para perda de massa, em função do ácido, material e fabricante.....	104
Tabela 15: resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão – cp’s de referência (MPa)	117
Tabela 16: resistência à tração na flexão - Parâmetros estatísticos.....	118
Tabela 17: resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão – cp’s referência – composições químicas dos materiais de reparo.....	118
Tabela 18: resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão - ácido acético (MPa)	120
Tabela 19: resultado dos ensaios de tração na flexão - ácido acético – parâmetros estatísticos.....	120
Tabela 20: resultado dos ensaios de tração na flexão – ácido acético – composições químicas dos materiais de reparo.....	121
Tabela 21: resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão – ácido láctico.....	122
Tabela 22: resultado dos ensaios de tração na flexão - ácido láctico – parâmetros estatísticos.....	123

Tabela 23: resultado dos ensaios de tração na flexão – ácido láctico – composições químicas dos materiais de reparo.....	123
Tabela 24: resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão – ácido sulfúrico.....	125
Tabela 25: resultado dos ensaios de tração na flexão - ácido sulfúrico – parâmetros estatísticos.....	126
Tabela 26: resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão – ácido sulfúrico – composições químicas dos materiais de reparo.....	126
Tabela 27: análise de variância para resistência à tração na flexão em função do ácido, material e fabricante.	128
Tabela 28: resultado dos ensaios de resistência à compressão simples.....	133
Tabela 29: resistência à compressão simples - Parâmetros estatísticos.....	134
Tabela 30: resistência à compressão simples – comparação dos materiais de diferentes composições químicas.....	134
Tabela 31: análise de variância para resistência à compressão simples.....	136
Tabela 32: resultados obtidos nos ensaios de agressão do ácido acético, resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples.....	139
Tabela 33: resultados obtidos nos ensaios de agressão do ácido láctico, resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples.....	140
Tabela 34: resultados obtidos nos ensaios de agressão do ácido sulfúrico, resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples.....	141

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS.....	19
1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	19
1.3 ETAPAS DA PESQUISAS.....	20
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	20
2 DURABILIDADE DO CONCRETO FRENTE AO ATAQUE POR ÁCIDOS.....	22
2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE, DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO.....	22
2.2 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS AGENTES QUÍMICOS AGRESSIVOS AO CONCRETO.....	26
2.2.1 Ambientes suscetíveis ao ataque ácido.....	27
2.2.2 Reações do ataque químico por ácidos no concreto.....	30
2.3 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO RELACIONADOS AO ATAQUE POR ÁCIDOS.....	33
2.3.1 Lixiviação.....	34
2.3.2 Expansão.....	35
2.3.3 Troca Iônica.....	37
3 MATERIAIS DE REPARO PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	39
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO.....	41
3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO.....	45
3.2.1 Argamassas.....	45
3.2.1.1 Argamassas inorgânicas a base cimento Portland.....	45
3.2.1.2 Argamassas orgânicas à base epóxi.....	46
3.2.1.3 Argamassas mistas modificadas com polímeros.....	47
3.2.2 Grautes.....	48
3.2.2.1 Graute inorgânico.....	48
3.2.2.2 Graute orgânico.....	49
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	50
4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	50
4.1.1 Variáveis estudadas.....	51
4.1.1.1 Variáveis de resposta.....	51
4.1.1.2 Variáveis investigadas.....	51
4.1.2 Programa de ensaios.....	53
4.2 ENSAIOS REALIZADOS.....	53

4.2.1 Agressão química.....	54
4.2.2 Resistência à tração na flexão.....	55
4.2.3 Resistência à compressão simples.....	55
4.3 MATERIAIS UTILIZADOS.....	55
4.4 DOSAGEM E MISTURA.....	61
4.5 MOLDAGEM.....	64
4.6 CURA.....	64
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	66
5.1 PERDA DE MASSA.....	66
5.1.1 Ácido acético.....	67
5.1.2 Ácido láctico.....	79
5.1.3 Ácido sulfúrico.....	91
5.1.4 Análise estatística dos resultados.....	103
5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	117
5.2.1 Corpos de prova de referência.....	117
5.2.2 Ácido acético.....	120
5.2.3 Ácido láctico.....	122
5.2.4 Ácido sulfúrico.....	125
5.2.5 Análise estatística dos resultados.....	128
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	133
5.4 COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES ANALISADAS.....	139
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	143
6.1 CONCLUSÕES.....	143
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	144
REFERÊNCIAS.....	146

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material de grande utilização na Construção Civil, devido às suas características de versatilidade, resistência e durabilidade (KAZMIERCZAK, 1991).

Embora o concreto possa ser considerado um material perene, desde que receba manutenção sistemática e programada, há construções que apresentam manifestações patológicas em intensidade e incidências significativas, elevando os custos para sua correção. Sempre há comprometimento dos aspectos estéticos e, na maioria das vezes, redução da capacidade resistente, podendo chegar, em certas situações, ao colapso parcial ou total da estrutura (HELENE, 2001). Esses problemas não se restringem às estruturas consideradas “velhas”, sendo comum encontrar-se estruturas com poucos anos de uso apresentando problemas de degradação (CARMO, 2000).

No Brasil diversos estudos foram realizados sobre manifestações patológicas em estruturas de concreto e deterioração prematura das edificações, citando como exemplo os levantamentos realizados por Dal Molin (1988), Aranha (1994), Nince (1996) e Andrade (1997). Tal interesse é devido à grande quantidade de danos que estão ocorrendo nas estruturas de concreto, principalmente através do efeito combinado da agressividade ambiental com os problemas de ordem estrutural que interagem nas mesmas, juntamente com o emprego de práticas executivas inadequadas durante diversas etapas do processo construtivo.

Os problemas mais comuns de durabilidade de estruturas de concreto estão diretamente ligados à porosidade e aos mecanismos de penetração de agentes agressivos. Em geral, quanto maiores forem os fatores que facilitem o ingresso de agentes agressivos no concreto, maior será a deterioração do material. Assim, a porosidade (tamanho e distribuição dos poros) é um fator que muito influi na capacidade do concreto em suportar o efeito destrutivo de agentes agressivos (água, oxigênio, dióxido de carbono, cloretos e soluções ácidas) (VIEIRA et al., 1997).

As estruturas de concreto devem ser objeto de inspeções periódicas para que as anomalias que possam apresentar sejam diagnosticadas e corrigidas a tempo, mediante um tratamento apropriado. Isso é especialmente importante em complexos industriais, estruturas portuárias,

centrais térmicas e nucleares, construções marítimas, represas, usinas siderúrgicas e em todas as obras nas quais o meio possa atuar desfavoravelmente, provocando a corrosão do concreto. (CÁNOVAS, 1988, p.54).

Perry e Slater (1981) indicam o dióxido de enxofre como um dos poluentes mais comuns na atmosfera, apontando como suas fontes mais prováveis: as combustões domésticas, as emissões das usinas termoelétricas, das refinarias de petróleo, das olarias e das usinas de aço e ferro, na qual esses poluentes reagem com o vapor de água presente na atmosfera e pode se precipitar sob a forma de chuva ácida, que se acumula sob as construções e, ao evaporar, permite a deposição dos sais nela contidos. Esse fenômeno vai progressivamente aumentando a concentração de íons agressivos na superfície e no interior dos materiais constituintes das edificações, como no caso do sulfato que penetra no concreto e provoca sua desagregação.

Segundo Helene (1986, p.17), “as atmosferas industriais podem acelerar de 60 a 80 vezes mais o processo de corrosão, quando comparadas a situações equivalentes em atmosferas rurais”. Isto ocorre devido à ação de gases ácidos que reduzem a alcalinidade do concreto ou mesmo corroendo a camada de cobrimento, facilitando a penetração e a ação dos agentes agressivos.

A presença destes agentes pode favorecer e acelerar os processos de deterioração do concreto, sendo necessária à adoção de procedimentos que garantam ao mesmo a manutenção, ao longo de sua vida útil, de sua integridade e funcionalidade, atribuindo grande durabilidade.

A construção civil tem como tendência utilizar cada vez mais sistemas que garantam proteção às estruturas de concreto, o que tem contribuído para o surgimento de novos produtos e técnicas de execução. Quando o objetivo que se pretende é o aumento da vida útil da estrutura, várias alternativas são viáveis, umas com maior ou menor eficácia técnica ou na questão da relação custo/benefício (STORTE, 2005).

Hoje em dia há uma elevada gama de técnicas de reparo e produtos desenvolvidos especificamente para estas situações, desde que corretamente utilizados. Entre as soluções mais adotadas para recuperar os problemas patológicos, as que utilizam sistema à base epóxi e argamassas industrializadas ou concretos com adições minerais possuem destaque.

Assim, para a realização de uma obra de reparo deve-se contar com especialistas em estruturas e materiais ou com a assistência técnica de fabricantes para que seja feito um

diagnóstico correto, pela devida identificação das manifestações patológicas existentes, e a especificação correta dos materiais e técnicas a serem utilizados. Isto é tanto mais indispensável quanto mais avançado for o estágio de deterioração da obra e quanto mais agressivo for o ambiente onde está inserida a estrutura (BERTOLO; SELMO, 2005).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o desempenho de materiais de reparo industrializados para estruturas de concreto submetidos ao ataque dos ácidos acético, láctico e sulfúrico através da análise da perda de massa e da resistência à tração na flexão.

1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

São objetivos secundários desta pesquisa:

- a) verificar a variação da perda de massa dos materiais de reparo de diferentes bases e fabricantes quando submetidos ao ataque ácido;
- b) verificar a variação da resistência à tração na flexão dos materiais de reparo de diferentes bases e fabricantes quando submetidos ao ataque ácido;
- c) determinar a resistência à compressão simples dos materiais de reparo analisados;
- d) verificar a agressividade dos ácidos acético, láctico e sulfúrico em função do tipo de base dos materiais de reparo;
- e) identificar qual a base dos produtos de melhor desempenho.

1.3 ETAPAS DA PESQUISA

A presente pesquisa pode ser dividida em 3 etapas, de acordo com a natureza das atividades desenvolvidas: (a) Revisão bibliográfica; (b) Programa Experimental; (c) Análise e discussão dos resultados.

Na primeira etapa foi realizada uma revisão da literatura existente, dando suporte para todo o trabalho e enfocando tópicos de interesse da pesquisa: durabilidade de concreto, mecanismos de deterioração do concreto frente aos agentes químicos, características e propriedades de materiais de reparo.

Na segunda etapa foi planejado e executado o programa experimental que consta das seguintes fases: dosagem de materiais, preparo dos corpos-de-prova e ensaios para determinação da resistência a ácidos de materiais de reparo previamente selecionados, através da determinação da perda de massa, da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão.

Na terceira etapa foi realizada a análise e discussão dos dados obtidos no programa experimental visando avaliar o desempenho de cada material para cada tipo de ácido utilizado no ataque químico.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação foi estruturada em 6 capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma introdução, onde são definidos os problemas de pesquisa, os objetivos e o método de desenvolvimento da pesquisa.

Nos capítulos 2 e 3 constam a revisão bibliográfica dividida nos seguintes tópicos: identificação dos principais agentes químicos agressivos ao concreto, durabilidade do concreto frente ao ataque por ácidos, identificação dos principais mecanismos de deterioração do concreto relacionados ao ataque por ácidos e materiais de reparo para estruturas atacadas por ácidos.

O capítulo 4 mostra o programa experimental, compreendendo seu planejamento, metodologia, materiais empregados e ensaios realizados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos durante o programa experimental, juntamente com a análise e discussão dos dados.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

2 DURABILIDADE DO CONCRETO FRENTE AO ATAQUE POR ÁCIDOS

A perda do desempenho de uma edificação está associada ao aparecimento de manifestações patológicas. Todo trabalho de reparo de obras em concreto exige um diagnóstico prévio das manifestações patológicas que deram origem ao problema. O conhecimento das causas da deterioração, da sua extensão e da sua atividade é imprescindível para a identificação do tipo de intervenção e correção mais adequada para o caso (FIGUEIREDO, 1989).

Uma vez identificado o problema que atinge a estrutura e ainda conhecendo-se todos os fatores que envolvem a situação, pode-se, seguindo certa metodologia, intervir a fim de extinguir ou amenizar o problema patológico existente. Quanto mais cedo forem executadas as correções, mais duráveis, fáceis e muito mais baratas elas serão (FIGUEIREDO, 1989, p.15).

Atualmente, está ao nosso alcance uma quantidade muito grande de materiais de reparo utilizados para obras de concreto, o que justifica a importância da avaliação do desempenho de cada material nas intervenções realizadas.

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE, DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

A durabilidade dos materiais está ligada à sua capacidade de se manter em determinado estado, com a mesma qualidade ao longo de um determinado tempo. De outra forma, é a resistência de um material à deterioração ou degradação (CARMO, 2000). Este conceito está intimamente ligado com o de desempenho que, segundo o COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON – CEB, (1992) é o comportamento de um produto em serviço (em utilização), sob condições de real funcionamento ou uso, com total atendimento às exigências do usuário.

Para Neville (2001), durabilidade de uma dada estrutura de concreto significa que ela terá desempenho contínuo satisfatório, para as finalidades para a qual foi projetada, isto é, que manterá sua resistência e condições normais de serviço durante a vida útil especificada ou

esperada. Esta definição implica no conhecimento dos processos de deterioração a qual o concreto estará exposto, nas condições ambientais reais da estrutura, durante o seu tempo de duração.

No caso específico do concreto armado, a durabilidade pode ser definida como a capacidade deste material de resistir às ações ambientais, ataques químicos, efeitos físicos ou quaisquer outros processos de deterioração, mantendo as suas características dentro de certos limites, qualidade e capacidade de utilização dentro dos níveis exigidos (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI, 1992).

Para que se desenvolva um processo de deterioração do concreto é necessário que haja uma interação entre a estrutura interna e os agentes degradantes, provenientes do ambiente ou incorporados involuntariamente ao concreto durante a sua produção (CEB,1992). Essa interação depende basicamente do tipo e intensidade dos agentes agressivos, bem como das características do concreto, especialmente da sua estrutura de poros, que governam os mecanismos de entrada de fluidos (CARMO, 2000).

O concreto convencional é normalmente um material poroso e permeável aos fluidos. A porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupada pelos poros, comumente expressa em porcentagem. Se a porosidade for grande e os poros estiverem interligados, eles permitem o deslocamento de fluidos através do concreto, de forma que a permeabilidade se eleva. Por outro lado, se os poros forem descontínuos ou excessivamente estreitos ou tortuosos para permitir o deslocamento de fluidos, a permeabilidade do concreto baixa, mesmo com a porosidade alta (CARMO, 2000).

Mangat et al. (1992) consideram a permeabilidade, em seu sentido mais amplo, como sendo a propriedade mais importante com relação à durabilidade do concreto.

A durabilidade do concreto depende, portanto, da facilidade com que estes fluidos, líquidos e gases, ingressam no concreto e se deslocam no seu interior. Além do tamanho e do formato dos poros, as características de ingresso de fluidos no concreto são influenciadas pela existência de microfissuras na matriz da pasta de cimento, em especial na interface pasta-agregado. No caso do concreto, o deslocamento de diversos fluidos se realiza não somente por decorrência do meio poroso, mas também por difusão e absorção. Na difusão o fluido se

desloca por efeito de uma diferença de concentração, enquanto na absorção o deslocamento está relacionado ao fenômeno de capilaridade (CARMO, 2000).

A figura 1 mostra um esquema simplificado dos fenômenos de transporte no concreto, segundo CEB (1992).

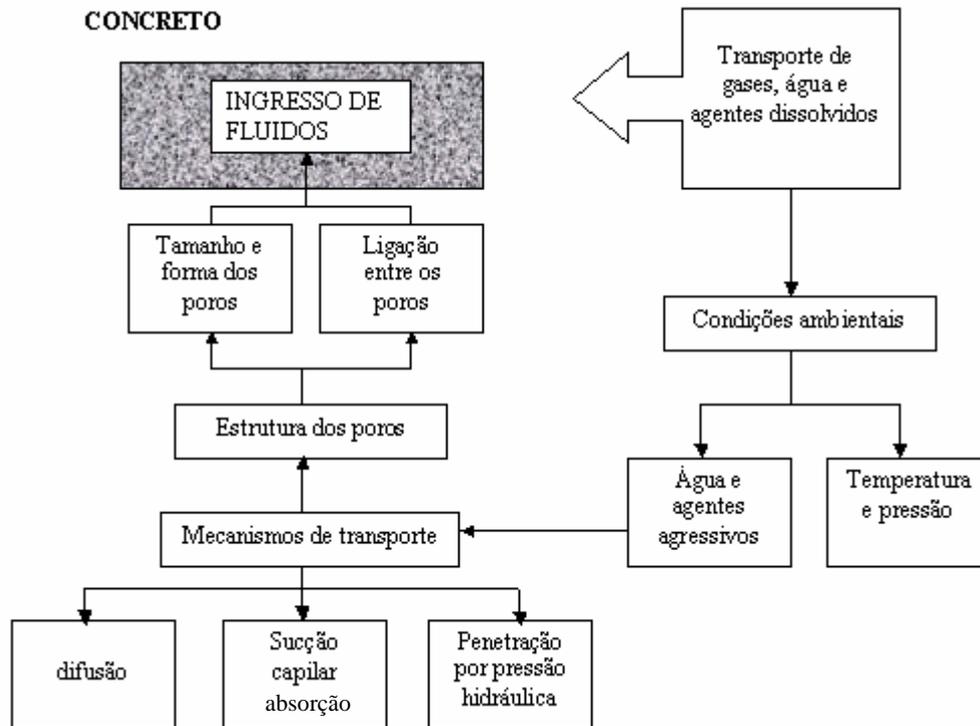


Figura 1: Fenômenos de transporte no concreto
(fonte: CEB, 1992)

Quando o concreto é submetido a um ataque químico externo, a forma mais eficiente para amenizar a intensidade dessa agressão: é reduzir a porosidade e a permeabilidade do concreto para diminuir a velocidade, tanto quanto possível, da penetração de agentes agressivos (AÏTCIN, 2000).

Segundo Mehta (1993), a maioria dos problemas de durabilidade freqüente nas estruturas atuais não produziria conseqüências nocivas sobre o concreto que tivesse baixíssima permeabilidade quando exposto a um ambiente agressivo e que mantivesse esta baixa permeabilidade ao longo de sua vida útil.

Os tempos modernos ditaram a certeza de que o concreto, como material de construção, é instável ao longo do tempo, alterando suas propriedades físicas e químicas em função das

características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente. Às conseqüências destes processos de alteração que venham a afetar o desempenho de uma estrutura, ou material, costuma-se chamar deterioração. Os elementos agressores, em si, são designados agentes de deterioração. Cada material ou componente reage de uma forma particular aos agentes de deterioração a que é submetido, sendo a forma de deterioração e sua velocidade função da natureza do material ou componente e das condições de exposição aos agentes de deterioração (SOUZA, 1998).

Deve-se entender que a concepção de uma construção durável deve-se tomar uma série de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que a compõe um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção (SOUZA, 1998).

A manutenção de estruturas de concreto pode ser entendida como o conjunto de ações que tem como objetivo antecipar ou identificar o surgimento de danos (manutenção preventiva) e, quando a estrutura apresentar perda significativa, como forma de se evitar o comprometimento da segurança da estrutura (manutenção corretiva) (ARANHA, 1994).

Há um consenso geral entre os pesquisadores que trabalham com a durabilidade das estruturas: os dois fatores que influenciam de uma maneira bastante acentuada em tal característica são a própria estrutura, cujo nível de durabilidade depende profundamente das medidas que são tomadas durante as etapas do seu processo de produção, e o meio ambiente, que determina as condições de exposição onde à mesma estará inserida (ANDRADE, 1997).

Hoje em dia, ao projetarem-se estruturas, as características de durabilidade dos materiais em questão devem ser consideradas com o mesmo cuidado que outros aspectos, tais como propriedades mecânicas e custo inicial. Os custos de intervenções em estruturas devidos às falhas nos materiais empregados tem se tornado parte principal do orçamento total das construções. Por exemplo, em países desenvolvidos estima-se que acima de 40% do total dos recursos da indústria de construção sejam aplicados no reparo e manutenção das estruturas, e menos de 60% em novas instalações (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.2 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS AGENTES QUÍMICOS AGRESSIVOS AO CONCRETO

A vulnerabilidade dos concretos frente aos agentes agressivos, principalmente os de origem química, presentes em diversos ambientes, tem aumentado o interesse em encontrar-se materiais e técnicas de reparo mais eficientes, tornando-os mais resistentes aos agentes agressivos e conseqüentemente aumentando sua vida útil (CASSAL, 2000).

Os principais agentes químicos ambientais responsáveis pela deterioração do concreto armado são o CO₂, que origina a carbonatação, águas, ácidos, cloretos e sulfatos.

A ação do hidrogênio pode colaborar para deterioração dos concretos. A origem mais comum para o hidrogênio são os ácidos, cujo grau de reação com o concreto é determinado, primordialmente, pela sua concentração e pela solubilidade de cálcio resultante (SOUZA, 1998).

Os componentes mais ricos em cal, tal como o silicato tricálcico, resistem menos aos ácidos inclusive os fracos, que começam atacando o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento. Em presença de soluções salinas, eles substituem suas bases por cal, formando sais de cálcio menos solúveis que, às vezes, originam novos compostos de natureza danosa, notadamente em presença de águas sulfatadas e águas do mar (CÁNOVAS, 1988).

Os problemas de corrosão por ambiente marinho despertaram ainda mais o interesse dos pesquisadores devido a grande quantidade de estruturas “*off-shore*” que em função das explorações de petróleo foram construídas (CÁNOVAS, 1988).

Os ácidos são substâncias que se dissociam em solução aquosa, podendo agir como doadora de próton e que em presença de uma base, reagem formando um sal, podendo, eventualmente, formar cristais de gesso compostos com o alumínio, o que leva a um aumento de volume, provocando a fissuração do concreto.

Pavlik¹ (1994 apud CASSAL, 2000) afirma que todos os compostos cimentícios do concreto são suscetíveis ao ataque ácido. Os produtos hidratados do cimento somente são estáveis em

¹ PAVLIK, V. Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids – Part I: Calculation of corrosion depth. Cement and Concrete Research, v.24, n.3, p.551-562, 1994.

soluções com níveis bem definidos de concentração de Ca_2^+ , OH^- . Quando o pH da solução se reduz, os constituintes da pasta endurecida de cimento são alterados pela descalcificação.

Prudêncio Jr. (1993) salienta que para especificação de concretos destinados à utilização em ambientes agressivos é analisar individualmente cada caso, adequando-se à composição do material, ao tipo de agressividade específico a que a estrutura estará sujeita e à vida útil esperada.

2.2.1 Ambientes suscetíveis ao ataque ácido

A alta agressividade ambiental está presente em vários tipos de atmosferas, como a urbana, a marinha, a industrial e a viciada, conforme descreve Wexler (1976, p.17):

“As **atmosferas urbanas** são as regiões ao ar livre, dentro de centros populacionais maiores”. Essas atmosferas de cidade contêm, normalmente, impurezas em forma de óxidos de enxofre (SO_2), fuligem ácida (pH ~ 5) e outros agentes agressivos, tais como CO_2 , NO_x , H_2S , SO_4^{2-} . Os teores de SO_2 em grandes centros urbanos são originados pela queima de combustíveis contendo enxofre como, por exemplo, o óleo combustível. O gás sulfídrico (H_2S) é originado da ação bacteriológica de rios e represas, sendo mais concentrados nesses locais. O SO_4^{2-} é resultante basicamente da oxidação do SO_2 . Principalmente na presença de amônia NH_3 (gás), forma-se um sal (sulfato de amônio – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), que é um sólido em suspensão, que pode se depositar por impactação nas superfícies das estruturas. Este sal pode dar origem ao H_2SO_4 (ácido sulfúrico), atacando as estruturas de concreto. Segundo ASLAM (1987) os componentes sulfurosos são os mais maléficos para o concreto, especialmente sob condições de umidade.

As **atmosferas marinhas** podem conter sulfatos, cujos teores médios estão em torno de 2.800 mg/l. Esses elementos são muito agressivos e contribuem para a aceleração do processo de deterioração do concreto. O efeito da água do mar sobre o concreto merece atenção especial, pois as estruturas expostas a estes ambientes sofrem efeitos combinados da ação química dos constituintes da água do mar sobre produtos de hidratação do cimento, da pressão de cristalização dos sais, se a face do concreto está sujeita a ciclos de molhagem e secagem, da ação do congelamento em climas frios, da corrosão da armadura e da erosão física devida à

variação da maré. Portanto, quando uma estrutura de concreto encontra-se exposta à água do mar, uma série de causas inter-relacionadas estão agindo. O ataque devido a qualquer uma dessas causas tende a aumentar a permeabilidade, tornando o material progressivamente mais suscetível a ações adicionais e a outros tipos de ataque. (SILVEIRA, 1996)

O processo industrial gera uma atmosfera agressiva causando uma série de anomalias as estruturas de concreto (CORBO et al., 1989). Nas **atmosferas industriais** em que há emissões de óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), estes podem penetrar no concreto e reagir com a água, formando ácido sulfúrico. Este ácido reage com o aluminato tricálcico do cimento, formando o sulfo-aluminato de cálcio hidratado. Esta última reação se dá com aumento de volume, o produto da reação é cerca de 2,7 vezes maior que os constituintes iniciais criando grandes tensões internas que podem desagregar o concreto (TEXSA, 2004).

Em metalúrgicas de laminação de aço, os vapores liberados durante o processo de decapagem dos laminados são ricos em ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), e quando entram em contato com as estruturas de concreto aceleram a deterioração das mesmas (HELENE, 2001).

Em fábricas que tenham como atividade principal a produção de ácidos acético, ácido anídrico-acético, acetol, ácido sulfúrico ou que utilizam estes compostos como matéria prima para produção de derivados, as estruturas de concreto são visivelmente atacadas (HELENE, 2001).

Repetto e Helene (1998) alegam que em indústrias de celulose e papel, a utilização de revestimentos de proteção é fundamental para garantir a vida útil das estruturas, especialmente se determinada na fase de projeto destas. Na prática, apesar do excelente desempenho destes produtos eventualmente podem ocorrer falhas na camada protetora, obrigando o concreto a resistir às ações agressivas, até que seja possível restituir esta camada. Isto ocorre principalmente, nas áreas de produção das indústrias, onde os processos de fabricação não podem ser imediatamente interrompidos para a realização de manutenção.

Os ácidos minerais, como o ácido sulfúrico, ácido clorídrico e ácido nítrico, são extremamente agressivos ao concreto porque formam sais de cálcio solúveis, que são então lixiviados. Isso aumenta a porosidade e a perda da resistência do material. Ácidos orgânicos, de grande massa molecular, não são tão agressivos ao concreto como os ácidos minerais.

Entretanto, o ácido acético e o ácido láctico, presentes em inúmeros produtos alimentícios, são muito agressivos ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O ácido acético (CH_3COOH) é um ácido orgânico e tem seu pH em torno de 4,0, que é muito mais baixo que o do concreto, que varia entre 12,5 e 13,5, sendo um material básico. Este ácido está presente principalmente em indústrias de alimentos e conservas por conter em sua composição bactérias acéticas- acetobacter - muito utilizadas comercialmente na produção do vinagre. Este ácido também é encontrado em fábricas de celulose e acetato de vinila, na indústria farmacêutica, na produção de pigmentos e de tinturas reagentes em análises laboratoriais (LIVROONLINE.COM, 2003).

O ácido láctico também é utilizado há muito tempo, em indústrias de alimentos, em fermentações. Na alimentação é usado como acidulante em produtos de confeitaria, na fabricação de extratos, essências, sucos de frutas e refrigerantes. É empregado ainda na conservação de carnes, de vegetais e de pescado, cerveja e vinho. Este ácido também é encontrado em produtos farmacêuticos, cosméticos e na indústria química. Na indústria têxtil é usado como reagente para fixar os corantes das fibras para estampar a lã, bem como no preparo de couros e pele. Emprega-se ainda na fabricação de plásticos (BIOLOGIA VIVA, 2005).

Já o ácido sulfúrico (H_2SO_4) é o que tem o menor pH dos três, em torno de 1,0. Sendo um ácido forte e o mais importante na indústria e no laboratório. O maior consumo de ácido sulfúrico é na fabricação de fertilizantes, como os superfosfatos e o sulfato de amônio. É o ácido dos acumuladores de chumbo (baterias) usados nos automóveis. É consumido em enormes quantidades em inúmeros processos industriais, como processos da indústria petroquímica, refinamento de óleos minerais, produção do álcool etílico, tratamento de minérios e metais, na indústria metalúrgica e galvanoplastia, na indústria cosmética, fabricação de corantes, fabricação de papel e fabricação de detergentes (LIVROONLINE.COM, 2003).

Os agentes químicos atuam com maior intensidade nas áreas das indústrias onde são fabricados e estocados ou ainda nas áreas onde fazem parte do processo. No entanto, quando liberados na atmosfera ou levados por resíduo líquido, atingem as demais áreas e passam a fazer parte do diagnóstico das manifestações patológicas ali instaladas (FIGUEIREDO, 1991).

Na **atmosfera viciada**, que são locais fechados com baixa taxa de renovação de ar, as estruturas de concreto também sofrem deterioração. O exemplo mais expressivo é a ação do ácido sulfúrico, gerado em coletores de esgoto, a partir da presença de sulfatos (SO_4^{2-}). À medida que o esgoto flui pela rede coletora, a concentração de oxigênio dissolvido gradativamente diminui, devido a uma demanda que é maior que o fornecimento. Em algum ponto do sistema, o oxigênio é esgotado e os sulfetos aparecem (WEXLER, 1976).

Segundo Ludwig e Almeida (1979), o teor de sulfetos no esgoto pode ter origem em duas causas: produtos resultantes de ação bacteriológica e descarga direta de esgotos industriais nos coletores. A água potável contém certo teor de sulfatos que é incrementado após seu uso. As bactérias precisam de oxigênio para consumir matéria orgânica e quando o oxigênio livre não é disponível, certas espécies obtêm o mesmo íon sulfato (SO_4^{2-}), deixando livre o íon sulfeto (S^{2-}). A reação do sulfeto com a água resulta no íon HS^- e gás sulfídrico (H_2S). Esse gás liberado é absorvido pelas partes superiores do coletor, sendo novamente oxidado por ação de bactérias aeróbias e transformado em ácido sulfúrico (HELENE, 1986).

O ácido sulfúrico (H_2SO_4), assim formado ataca a matriz (pasta de cimento) do concreto e desenvolve um rápido processo de corrosão (BATISTA, 2002).

Pelo exposto observa-se a necessidade de executar obras duráveis, projetadas para resistir ao meio ambiente circundante e às ações associadas as suas funções, através do desenvolvimento de técnicas e utilização de materiais que viabilizem a obtenção de tal objetivo.

2.2.2 Reações do ataque químico por ácidos no concreto

O concreto, em estado de equilíbrio, é um material básico, com alto valor de pH, variando de 12,5 a 13,5. Em uma pasta de cimento Portland bem hidratada, a fase sólida, que é composta principalmente de hidratos de cálcio, relativamente insolúveis (tais como C-S-H e C-A-S-H), encontra-se em um estado de equilíbrio estável quando em contato com o fluido dos poros, com alto pH. Grandes concentrações de íons Na^+ , K^+ e OH^- são responsáveis pelo alto valor do pH (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Em relação à durabilidade, qualquer meio com pH menor que 12,5 torna-se nocivo e agressivo ao concreto. Isto porque a diminuição da alcalinidade leva a uma desestabilização

dos produtos cimentícios de hidratação. O ataque químico conseqüentemente é função do pH do agente agressivo e da permeabilidade do concreto, isto é, a capacidade de íons serem transportados (SILVEIRA, 1996).

Os ácidos dissolvem inicialmente a capa carbonatada superficial do concreto, que evita a carbonatação posterior, facilitando assim a lixiviação das partes internas do concreto. Os ácidos, depois de removerem a capa carbonatada, reagem com o Ca(OH)_2 do concreto, formando sais solúveis que são carregados pela água. O efeito final da ação dos ácidos é o gel de ácido silício e os sais de cálcio e de alumínio dos ácidos agressores. Em relação aos ácidos fracos, em vez de um sal de alumínio forma-se um gel de hidróxido de alumínio (BICZOK, 1972).

A conseqüência do ataque de ácidos é a desintegração da pasta de cimento, deixando os agregados expostos. Se estes forem calcários, também poderão ser atacados. De acordo com o tipo de ácido que se trata, a situação será mais ou menos agressiva. Ao ingressar, alguns ácidos no interior da massa do concreto, podem formar sais insolúveis e expansivos, causando fissuração e posterior deterioração do concreto. Se ao contrário, os produtos resultantes forem solúveis, há o incremento da porosidade e se acelera o processo de perda de massa e deterioração (HUSNI, 2003). A figura 2 mostra o efeito do ataque ácido ao concreto.

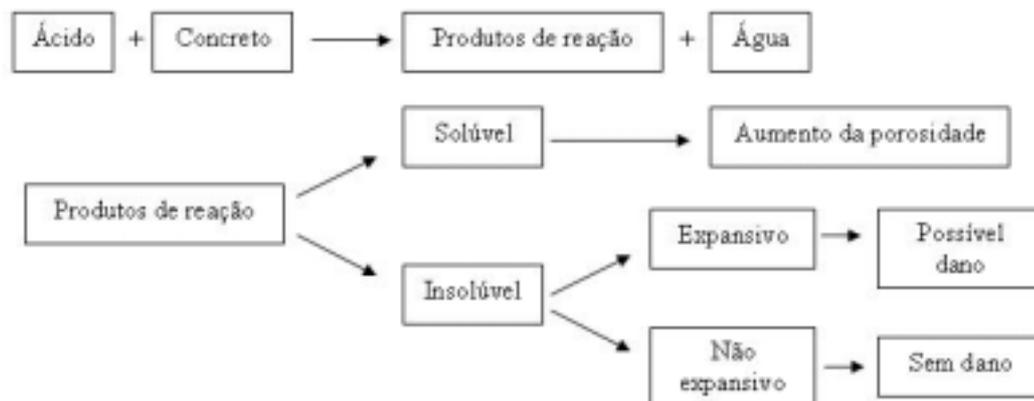


Figura 2: efeitos do ataque ácido ao concreto (fonte: HUSNI, 2003).

A reação por troca de cátions entre as soluções ácidas e os constituintes da pasta de cimento Portland gera sais **solúveis** de cálcio, tais como cloreto de cálcio, acetato de cálcio e bicarbonato de cálcio, que são removidas por lixiviação. Através da reação por troca de

cátions, as soluções de cloreto de amônia e sulfato de amônia, que são freqüentemente encontradas na indústria agrícola e de fertilizantes, são capazes de transformar os componentes da pasta de cimento em produtos altamente solúveis (MEHTA; MONTEIRO, 1994), por exemplo:



Certos ânions, quando presentes em água agressiva, podem reagir com a pasta de cimento para formar sais **insolúveis** de cálcio, a sua formação pode não causar dano ao concreto a não ser que o produto da reação seja expansivo, ou removido por erosão devido ao fluxo de soluções ou infiltrações. Os produtos da reação entre hidróxido de cálcio e ácidos oxálicos, tartárico, tânico e húmico, hidrofluórico ou fosfórico pertencem a categoria de sais de cálcio insolúveis e não expansivos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Reações químicas que envolvem a formação de produtos expansivos no concreto endurecido podem levar a efeitos deletérios. No início a expansão pode acontecer sem qualquer dano ao concreto, mas o surgimento crescente de tensões internas ao final se manifestam pela oclusão de juntas de expansão, deformação e deslocamentos em diferentes partes da estrutura, fissuração, lascamento e pipocamento. Os fenômenos associados com reações químicas expansivas são: ataque por sulfatos, ataque álcali-agregado, hidratação retardada de CaO e MgO livres e corrosão da armadura. A maior parte dos processos de deterioração causados por formação de sais são devidos a ação agressiva dos sulfatos. O ataque por sulfatos pode apresentar a forma de uma perda progressiva de resistência e perda de massa devidas à deterioração na coesão dos produtos de hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Durning e Hicks² (1991), citado por Cassal (2000), analisando a deterioração do concreto por ataque ácido, mencionam que os fatores que mais influem na velocidade de deterioração são a porosidade capilar do concreto, a quantidade de material agressivo e a solubilidade dos produtos resultantes da reação. Segundo os autores, em muitos tipos de ataque, a permeabilidade se modifica durante o ataque: a remoção dos compostos solúveis que vão se formando aumenta a permeabilidade e, em consequência, a velocidade do ataque.

Alguns trabalhos já foram realizados sobre o ataque ácido em estruturas de concreto, dentre eles pode-se citar os de Marsh (1986), Kulakowski et al. (1997), De Belie (1997), Cassal (2000) e Gorninski (2002).

2.3 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO RELACIONADO AO ATAQUE POR ÁCIDOS

Ao se analisar uma estrutura de concreto “doente” é absolutamente necessário entender-se o porquê da origem e do desenvolvimento da “doença”, procurando elucidar as causas, antes da especificação e aplicação do “remédio” necessário. O conhecimento das causas e origens da deterioração é imprescindível, não apenas para que se possa proceder aos reparos exigidos, mas também para se garantir que, depois de reparada, a estrutura não volte a se deteriorar (HELENE, 2001). Na figura 3 é possível observar os tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto.

Na prática, a deterioração do concreto dificilmente é devida a uma causa única. Normalmente, verifica-se a ocorrência de um processo gradual e sinérgico que tende a se intensificar com o passar do tempo, permitindo o aparecimento de outros mecanismos de degradação (CARMO, 2000).

Os processos de deterioração do concreto podem ter causas de origem física e de origem química. Neste trabalho serão abordados somente os processos de origem química.

Os processos químicos podem ser divididos em 3 grupos: (a) reações envolvendo hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta endurecida; (b) reações envolvendo formação de produtos expansivos; e (c) reação de troca entre um fluido agressivo e componentes da pasta endurecida (BICZOK, 1972; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As reações químicas se manifestam, de maneira geral, através de efeitos físicos tais como aumento da permeabilidade, porosidade e aumento de tensões internas que provocam uma série de conseqüências prejudiciais, como perda da rigidez, perda da resistência, fissuração, deformação e, que, por conseguinte, aumento da taxa de deterioração (SILVEIRA, 1996).

² DURNING, T.A; HICKS, M.C. Using microsilica to increase concret´s resistance to aggressive chemicals. Concrete International, v.13, p.42-48, mar 1991.

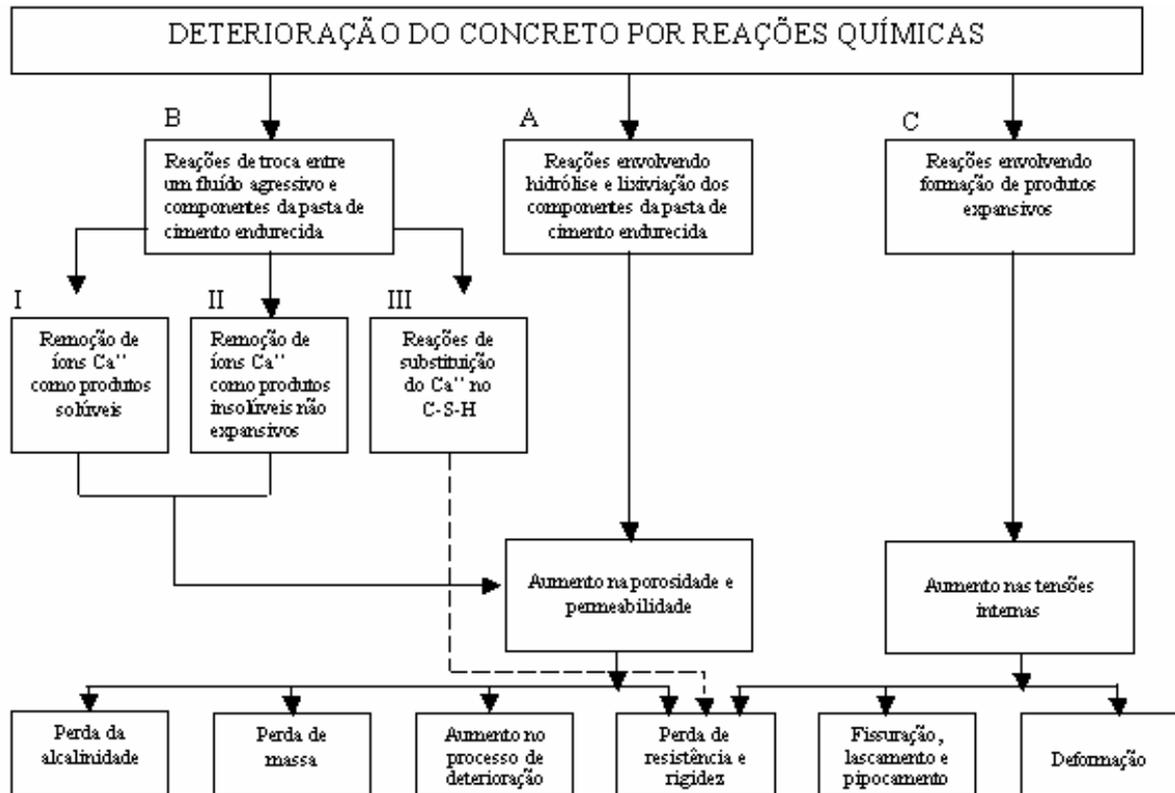


Figura 3: Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto. **A**, ataque da água mole no hidróxido de cálcio e C-S-H presentes nos cimentos Portland hidratados; **B** (I), solução ácida formando componentes solúveis de cálcio; B (II), soluções de ácido oxálico e seus sais; B (III), ataque de longa duração da água do mar enfraquecendo o C-S-H pela substituição do Mg^{2+} por Ca^{2+} ; **C**, ataque por sulfatos formando etringita e gipsita (fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994)

2.3.1 Lixiviação

Ocorre por ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas que, em contato com a pasta de cimento Portland endurecida, elas tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio (HELENE, 1997). Quando a solução de contato atinge equilíbrio químico, a hidrólise adicional da pasta de cimento pára. Entretanto, no caso de água corrente ou infiltração sob pressão, irá ocorrer à diluição da solução de contato, proporcionando, portanto, a condição para continuação da hidrólise. Teoricamente, a hidrólise da pasta de cimento continua até que a maior parte do hidróxido de cálcio tenha sido retirada por lixiviação; isto expõe os outros constituintes cimentícios à decomposição química. O resultado do processo pode originar géis

de sílica e alumina com pouca ou nenhuma resistência. Além da perda da resistência, a lixiviação do hidróxido de cálcio do concreto pode ser considerada indesejável por motivos estéticos. Normalmente o produto lixiviado interage com o CO_2 presente no ar e resulta no fenômeno chamado eflorescência que é a precipitação de crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As águas ácidas podem ser decorrentes de compostos poluentes (enxofre, ácido sulfídrico, dióxido de enxofre) de centros urbanos e industriais, ou podem existir em lençóis freáticos ricos em ácidos húmicos, esgoto doméstico e industrial, entre outros (CARMO, 2000).

A lixiviação pode ocorrer, de forma intensa, em concretos porosos, ao passo que em concretos compactos, especialmente quando utilizados cimentos com adições (pozolânico e de alto forno), é pouco notada (BICZOK, 1972).

A sintomatologia básica é uma superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial, com eflorescências de carbonato, com elevada retenção de fuligem e com risco de desenvolvimento de fungos e bactérias. Como resultado observa-se também uma diminuição do pH do extrato aquoso dos poros superficiais do concreto do componente estrutural, com elevado risco de despassivação da armadura (HELENE, 1997).

2.3.2 Expansão

É devida, geralmente, à formação de novos compostos estáveis no interior da pasta de cimento endurecida provocada pelo ataque de alguns sais. No início desse processo a resistência do concreto aumenta (e a porosidade diminui) devido à formação de novos cristais que preenchem seus poros, aumentando sua compacidade. Entretanto, com a continuidade da formação e desenvolvimento destes cristais, podem surgir tensões internas que acabam fissurando o concreto, levando o mesmo à destruição (BICZOK, 1972).

Uma das reações expansivas mais comuns e violentas que ocorre em estruturas de concreto é a resultante do ataque de íons sulfato (SO_4^{2-}). Os íons sulfato se originam da dissolução em meio aquoso de sais presentes no solo ou na água, marinha ou subterrânea. Os solos e águas que contêm estes sulfatos são comumente chamados de alcalinos ou seletos. Em alguns solos argilosos, os teores de sulfatos de cálcio, de magnésio e sódio são muito elevados, e a

água subterrânea nestas regiões se constitui numa verdadeira solução de sulfatos. (SILVA FILHO,1993).

A degradação do concreto como decorrência da reação entre compostos de cimento hidratado existentes no concreto e os íons sulfatos provenientes de uma fonte externa e carregados pela água pode assumir duas manifestações distintas: (a) expansão do concreto; (b) perda progressiva de resistência, rigidez e massa. As duas manifestações podem ocorrer simultaneamente, sendo que a predominância de uma delas é função da concentração e da origem dos íons sulfato, assim como do consumo e constituição química do cimento constituinte do concreto (SILVA FILHO, 1993).

A justificativa para a deterioração do concreto provocada pelos sulfatos era fundamentada na possibilidade de ocorrência de uma reação entre os íons sulfatos externos e os compostos de cimento, produzindo etringita (trisulfoaluminato hidratado de cálcio). Esta reação ocasionaria um acréscimo de volume que provocaria o tensionamento da matriz e originaria a expansão do elemento de concreto (SILVA FILHO, 1993).

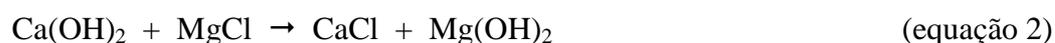
Segundo Calleja (1983), embora todo o conhecimento acumulado no assunto ter sido especialmente focado na reação entre o alumínio tricálcico resultante das reações de hidratação e os sulfatos externos, não é apenas a interrelação entre o C_3A e os íons sulfato que causa a deterioração, pois também ocorre interação entre os íons sulfato e outros compostos hidratados da matriz. Lawrence (1990) relata a existência de 4 reações identificadas entre íons sulfato e os vários compostos hidratados.

- a) reação de íons sulfato com o alumínio tricálcio (C_3A) ou com o monosulfoaluminato hidratado de cálcio, gerando etringita;
- b) reação de íons sulfato com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) cristalino, formando gesso;
- c) reação entre soluções de sulfato contendo magnésio como cátion com o silicato hidratado de cálcio (C-S-H), liberando o cálcio por um mecanismo de substituição catiônica, que origina o aparecimento de silicatos hidratados de magnésio de baixa resistência. O cálcio liberado é consumido na geração de gesso; e
- d) formação de taumasita, pela ruptura dos sistemas de silicato. Este fenômeno foi reportado apenas em baixas temperaturas.

A sintomatologia básica é uma superfície com fissuras aleatórias, esfoliação e redução significativa da dureza e resistência superficial do concreto, com diminuição do pH do extrato aquoso dos poros superficiais, colocando em risco a despassivação das armaduras (HELENE, 1997).

2.3.3 Troca Iônica

Consiste em uma reação de troca de íons entre componentes da pasta endurecida do concreto e as substâncias existentes na solução agressiva, podendo originar diversos tipos de reações deletérias. Soluções ácidas contendo ânions que formam sais solúveis de cálcio são encontradas freqüentemente na prática industrial. Por exemplo, ácido hipoclorídico, sulfúrico ou nítrico podem estar presentes em efluentes da indústria química. O ácido acético, fórmico ou láctico são encontrados em muitos produtos alimentícios. Ácido carbônico, H_2CO_3 , está presente em refrigerantes, sendo que altas concentrações de CO_2 também são encontrados em águas naturais. A reação por troca de cátions entre as soluções ácidas e os constituintes da pasta de cimento Portland resulta em sais solúveis como cloreto de cálcio, que são removidos por lixiviação ou permanecem no lugar de sua formação, sem capacidade aglomerante. Uma corrosão desse tipo é, por exemplo, a causada por sais de magnésio ao formar um novo sal de cálcio e hidróxido de magnésio, $Mg(OH)_2$, de pouca solubilidade, segundo a reação indicada na equação 2 (MEHTA; MONTEIRO, 1994).



Também pode ocorrer a reação de um precipitado amorfo ou de tipo gel, que permanece nos poros (BICZOK, 1972).

Devido à formação de novas combinações, causadas pela ação do meio agressivo, o aglomerante perde sua resistência mecânica. A ação debilitadora das resistências mecânicas pode ser representada, por exemplo, pela ação do $MgSO_4$, conforme equação 3:



O hidróxido de magnésio é uma solução coloidal que se une em forma coloidal ao gel de ácido silícico previamente existente, permitindo à formação do silicato de magnésio hidratado, que não exerce nenhuma ação aglomerante e necessita de resistência mecânica (BICZOK, 1972).

Através da reação por troca de cátions as soluções de cloreto de amônio e sulfato de amônio, que são freqüentemente encontradas na indústria agrícola e de fertilizantes, são capazes de transformar os componentes da pasta de cimento em produtos altamente solúveis (MEHTA; MONTEIRO, 1994), como mostra a equação 4:



Quando os produtos da reação são solúveis, os resultados do ataque são mais severos que, por exemplo, uma solução de MgCl_2 que formaria CaCl_2 e $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Já que o último não é solúvel, a sua formação não aumenta a porosidade e a permeabilidade do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Qualquer processo de corrosão deve ser imediatamente interrompido ainda no seu início, pois sua continuidade, além de enfraquecer a estrutura, dará origem à fissuração, à corrosão das armaduras e à desagregação do concreto e, em estágio mais evoluído, torna economicamente impraticável a recuperação da estrutura (SOUZA, 1998).

3 MATERIAIS DE REPARO PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO

A escolha dos materiais e da técnica de correção a ser empregada depende do diagnóstico do problema, das características da região a ser corrigida, tipo de exposição da estrutura e das exigências de funcionamento do elemento que vai ser objeto da correção. Por exemplo: nos casos de elementos estruturais que necessitam ser colocados em carga após algumas horas da execução da intervenção, pode ser necessário e adequado utilizar sistemas de base epóxi ou poliéster. Nos casos de prazos maiores, pode ser conveniente utilizar argamassas e “grautes” de base mineral e nas condições normais de solicitação (após vinte e oito dias) os materiais utilizados podem ser argamassas e concretos adequadamente dosados (HELENE, 1992).

O reparo de uma estrutura de concreto consiste em restabelecer as condições originais de segurança ou funcionalidade da estrutura, restaurando as características previstas no projeto e corrigindo possíveis erros de construção, como também conferir atributos de durabilidade compatível com a importância da estrutura, do meio ao qual está exposta e com sua vida útil (QUESADA, 2003).

As ações para reparo implicam na existência prévia de algum tipo de dano. Argamassas de reparo são geralmente usadas na recomposição de peças danificadas, onde além da função de recompor estruturalmente as mesmas, servirão de proteção a estrutura que estava corroída (LIMA, 2000).

Segundo Souza (1990) para garantir-se a eficiência dos trabalhos de reparo, os materiais devem possuir características especiais de modo a promover a monoliticidade da estrutura.

Os sistemas de reparo das estruturas são sempre técnicas especiais e os resultados das intervenções depende essencialmente da qualidade do projeto de recuperação. Cánovas (1991) e Jimenez (1992) apontam alguns princípios básicos que devem ser seguidos antes, durante e após as intervenções nas estruturas como forma de se garantir a eficácia das operações, as quais consistem em observar:

- a) nível de “agressão” à estrutura o menor possível, devendo-se realizar estudo quanto aos efeitos secundários que as intervenções podem produzir;

- b) a qualidade dos materiais e das técnicas de aplicação garantidas através de controle rigoroso ao longo de todas as fases e
- c) a comprovação da eficácia dos serviços de reparo constatada através das inspeções periódicas.

Os materiais de reparo pré-fabricados para estruturas de concreto podem ser uma alternativa viável para tais intervenções, porque normalmente possuem propriedades que conferem elevado desempenho, desde que sejam especificados e utilizados corretamente.

Outra característica importante destes materiais é a estabilidade volumétrica, durante a cura. Qualquer material à base de cimento irá sofrer uma contração, principalmente nas primeiras horas após sua aplicação, devido à retração hidráulica, por evaporação da água livre ou capilar e/ou por efeito térmico. É importante ainda observar que cada material tem suas limitações de uso, que devem ser avaliadas quando da escolha dos mesmos. Muitas vezes, para o mesmo problema, pode haver várias alternativas para solução. Quando isto ocorrer, a melhor opção é considerar todos os aspectos técnicos e econômicos envolvidos na questão. Além disso, os reparos localizados exigem compatibilidade entre o substrato a ser reparado e a argamassa de reparo, sendo recomendável o conhecimento prévio do comportamento estrutural do elemento em recuperação, para que se possa definir o tipo de reparo mais adequado (OLIVEIRA, 1991).

Segundo Emmons et al. (2000) é indispensável compatibilizar as propriedades físicas, químicas dos materiais de reparo com as do substrato onde serão aplicados, ao que se pode chamar genericamente de compatibilidade, isto é, reparos localizados devem resistir às tensões induzidas por cargas, mudanças de volume, reações químicas na interface com as armaduras e com o ambiente por certo período de tempo.

Especialistas como Cusson e Mailvaganam (1996) salientam a falta de informação sobre o desempenho de produtos de reparo e consideram isto uma das causas de insucesso nos reparos das estruturas de concreto nos EUA. Também Mangat e O'Flaherty (2000) acentuam a importância de uma avaliação crítica das recomendações de reparo e da escolha de materiais, enfatizando as limitações e contradições existentes.

Apesar de já existirem inúmeras estruturas de concreto reparadas, ainda não se dispõe de regulamentação específica ou métodos normalizados para reparos, e como as incertezas quanto ao desenvolvimento da degradação por agentes agressivos é fato ainda presente, a

responsabilidade de trabalhos de reparo de estruturas fica condicionada à experiência dos técnicos quer em nível de projeto, quer em nível de execução (ARANHA, 1994).

No entanto, no Brasil, nem fabricantes, nem especialistas conseguiram ainda reunir a sua experiência nesta área e elaborar uma normalização básica referente à especificação de argamassas de reparo e os procedimentos recomendáveis para execução de reparos localizados em estruturas de concreto, e isto afeta tanto a indústria, que tem dificuldades em padronizar propriedades e níveis de desempenho a serem atingidos pelos seus produtos, quanto a profissionais, que podem praticar especificações inadequadas, devido à variedade de técnicas e produtos existentes (BERTOLO; SELMO, 2005).

No Brasil, entidades do setor da construção civil tem investido juntamente com o setor para inovação em tecnologia de revestimento de argamassas, com o objetivo de desenvolverem novas tecnologias de revestimentos de argamassas industrializadas, com vistas a um produto mais confiável, durável e competitivo (ABCP, 2004).

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO

Os materiais para reparo de estruturas de concreto podem ser divididos em dois grandes grupos: os pré-fabricados e os produzidos em obra.

O concreto de cimento Portland é um material tradicionalmente utilizado em reparos e reforços, sendo indicado para o restabelecimento das seções dos elementos estruturais e da alcalinidade do concreto (HELENE, 1992).

A grande maioria dos casos requer uma dosagem que melhore algumas de suas características naturais. Pode ser necessário obter-se elevadas resistências iniciais, eliminar a retração por secagem, controlar expansões, elevada aderência ao substrato, baixa permeabilidade e outras propriedades, normalmente obtidas com o uso de aditivos e adições minerais, tais como plastificantes, redutores de água, impermeabilizantes, escória de alto-forno, cinzas volantes, sílica ativa e redução da relação água/cimento (RINCÓN; HELENE, 2003).

Essas exigências para a obtenção do elevado desempenho restringem na prática a viabilidade do emprego direto do concreto feito na obra para uso em reparos, salvo em lugares onde se

necessite grandes volumes e exista assistência técnica e orientação permanente de um profissional especializado em tecnologia do concreto (RINCÓN; HELENE, 2003).

Existem no mercado microconcretos e argamassas industrializadas, que de acordo com a Norma 13.529 (ABNT, 1995), de revestimento de argamassas inorgânicas, as argamassas industrializadas são aquelas provenientes de dosagem controlada, em instalações próprias (indústrias), de aglomerantes, agregados e, eventualmente, aditivos, em estado seco e homogêneo, compondo uma mistura seca à qual o usuário somente adiciona a quantidade de água requerida para proceder à mistura. Chegando à obra prontos para serem aplicados em reparos segundo o tipo de incidência patológica que se apresente, conforme as características do local a ser reparado, por exemplo, vertical ou horizontal, e a resistência da agressividade do meio ambiente.

Os materiais avançados, formulados a base de resinas e combinações com outros materiais como fibras, fíler, entre outros, se mostraram como resposta técnico-científica moderna para as exigências de desempenho e durabilidade em sucessiva evolução em todo o mundo, sobretudo nas situações em que o concreto necessita ser modificado ou que seu uso seja inadequado (HELENE, 1992).

Em trabalhos de reparo de estruturas em que o volume de material a utilizar for pequeno, muitas vezes é conveniente utilizar argamassas e grautes pré-misturados, que são fabricados por empresas especializadas em aditivos para concreto. Existe uma grande variedade desses produtos em comercialização ou em processo de pesquisa, podendo citar o trabalho realizado por Figueiredo (1989); Teixeira [199_?]; Lima (2000); Moreno Jr (2002); Gorninski (2002); entre outros.

Os materiais de reparo devem possuir certas propriedades afins ao reparado, frente às condições de exposição da estrutura e em relação ao substrato, principalmente devido aos possíveis problemas de aderência e de compatibilidade entre o concreto da estrutura e o novo concreto ou argamassa de reparo (ARANHA, 1994).

A classificação mais conhecida é a que leva em consideração a família química dos produtos. Segundo Andrade e Selinger (1992), podem-se agrupar os produtos em família com base inorgânica, orgânica e mista. A figura 4 mostra a classificação dos materiais de reparo quanto à família química.

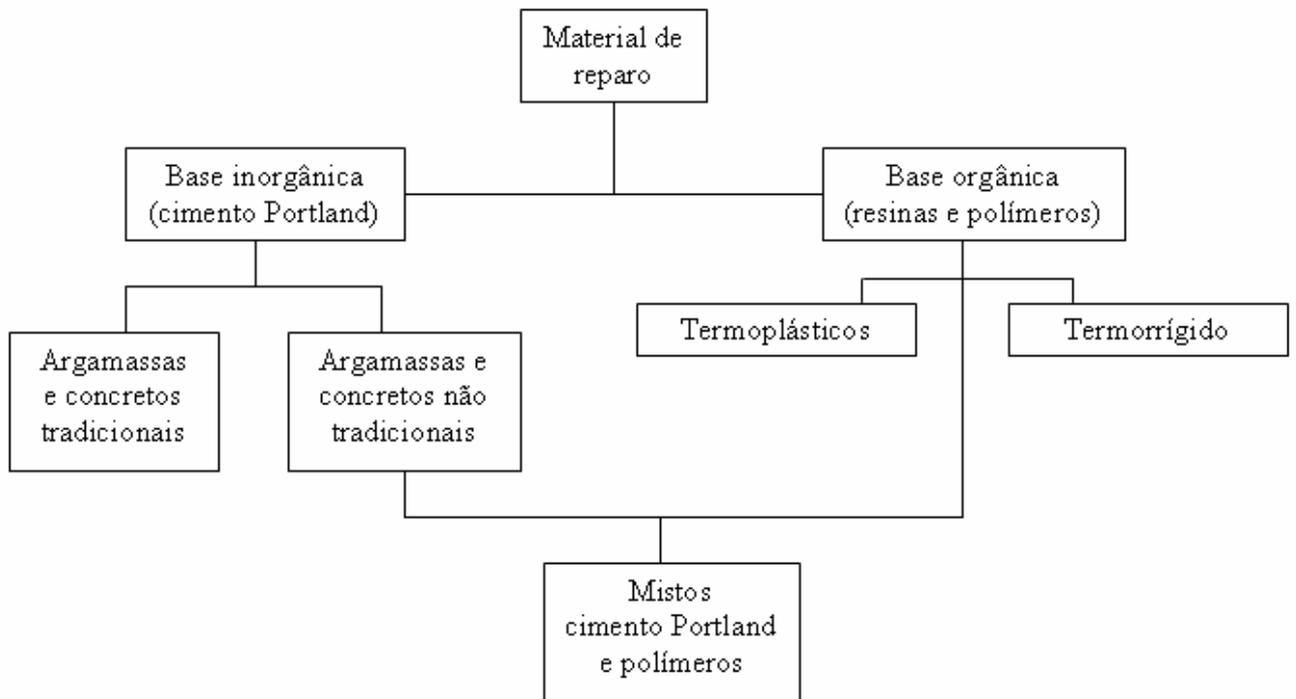


Figura 4: Classificação dos materiais para reparo quanto à família química (fonte: ANDRADE; SELINGER, 1992).

Na tabela 1 apresentam-se as principais propriedades dos materiais de reparo quanto à família química. Segundo Andrade (1992), a escolha do produto deve ser feita em função das propriedades requeridas do material, como forma de garantir, dentre outros, a compatibilidade química entre o concreto da estrutura e o produto de reparo.

Tabela 1: Principais propriedades dos materiais de reparo segundo a família química

Família Química	Classe	Tipo	Propriedades	Função
Base Inorgânica	Tradicional (cimento Portland)	- caldas; - argamassas; - concreto.	- alta aderência; - retração; - qualidade.	- Restaurar o meio alcalino que permita a passivação da armadura.
Base Inorgânica	Não tradicionais	- cimento Portland com adição de agente expensor; - cimento aluminoso; - cimento de etringita (expandido com alto teor de C ₃ A).	- retração compensada; - tempo de pega curto; - altas resistências mecânicas a curto prazo.	- Restaurar o meio alcalino que permita a passivação da armadura.
Base Orgânica	Ligantes base resinas e polímeros	- Termoplásticos: * acrílicos; * acrilamidas; * estirenos; * acetato polivinílico; * estireno butadieno. Termorrígidos: * resinas epóxi; * poliuretano e * resina poliéster.	- boa aderência; - baixa permeabilidade	- Atuar como barreiras à penetração de oxigênio (O ₂), umidade e gás carbônico (CO ₂)
Mistas	Ligantes hidráulicos com polímeros	- Mistura base cimento com base orgânica	- alta resistência à compressão e à flexão - baixa permeabilidade - alta aderência	- Atuar como barreira e na passivação das armaduras

(fonte: ANDRADE, 1992).

De todos esses tipos de resinas, as mais empregadas nos reparos são as resinas epóxi, devido as vantagens que apresentam sobre as outras, pois possuem retração química praticamente desprezível, retração térmica muito pequena, reatividade podendo ser regulada dentro de amplas margens; são compatíveis com a umidade; apresentam aderência excelente frente ao concreto e ao aço; possuem excelentes resistências mecânicas. Todas estas qualidades as tornam ideais para realizar reparos de estruturas danificadas, ou para proteger aquelas que possam ser atacadas por agentes agressivos de tipo químico, físico ou biológico (CÁNOVAS, 1988).

Este trabalho limita-se na avaliação das argamassas e grautes de base inorgânica, de base orgânica (epóxi) de base mista, mistura base cimento Portland com adição de polímeros.

3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO

A seguir serão descritas as características dos materiais de reparo utilizados nesta pesquisa.

3.2.1 Argamassas

As argamassas têm como finalidade repor a homogeneidade e monolitismo dos elementos estruturais. Podem ser utilizadas as argamassas de base cimento convencionais (inorgânicas) ou modificadas com certos produtos químicos (orgânicas), a fim de melhorar certas características, como a resistência a agentes químicos (RINCÓN; HELENE, 2003).

O tipo de argamassa a ser utilizada em reparos superficiais de concreto deve ser definido basicamente em função da deterioração ocorrida, da qualidade final desejada e do custo.

3.2.1.1 Argamassas inorgânicas à base cimento Portland

As argamassas cimentícias são produtos que apresentam baixa retração, devido a incorporação de aditivos químicos, o que é fundamental para as obras de recuperação de estruturas de concreto e possuem resistência química e tem pH alcalino. São comercializadas sob a forma de monocomponente, sendo necessário somente a adição de água recomendada pelo fabricante, ou bicomponente, onde os componentes devem ser misturados na hora da aplicação, sem adição de água e sempre conforme as instruções do fabricante (SOUZA, 1998).

Existem indústrias que produzem uma linha de argamassas pré-misturadas de cimento e areia com adição de resina acrílica, normalmente apresentadas em duas modalidades:

- a) argamassas autonivelantes, com grande fluidez, recomendadas para aplicações em superfícies horizontais;

- b) argamassas tixotrópicas, que não escorrem, podendo ser aplicadas em superfícies com qualquer inclinação em relação à horizontal. Este produto pode levar ainda um acréscimo de fibras poliamidas (SOUZA, 1998).

Para reparos rasos e semiprofundos, considerado para espessuras variando entre 0,5 a 50,0 mm, poderão ser utilizadas argamassas poliméricas à base de cimento, argamassas e grautes à base epóxi, argamassa à base poliéster, microconcreto dosado experimentalmente, em laboratório e também, concreto projetado (OLIVEIRA, 1991).

3.2.1.2 Argamassas orgânicas à base epóxi

Os tipos mais comuns de argamassas orgânicas são a de base epóxi, geralmente oferecidas em 3 componentes; a resina (epóxi), o endurecedor (amina e/ou poliamidas) e agregados selecionados, uma vez misturados, seu processo de endurecimento é rápido, alcançando em poucas horas, alta resistência mecânica (TEXSA, 2004).

Recomenda-se que as argamassas atendam as seguintes normas americanas “ASTM C395. Standard Specification for Chemical – Resistant Resin Mortars”, “ASTM C399. Standard Practice for Use of Chemical – Resistant Resin Mortars” e “ASTM C658. Standard Specification for Chemical – Resistant Grouts”, e a norma britânica: “BSI CP 3003: Part 5. Epoxide resins” (RINCÓN; HELENE, 2003).

As resinas epóxi são polímeros termorrígidos classificados quanto à fusibilidade termorrígidos. Apresentam ligações cruzadas, que amarram as cadeias, tornando o polímero pouco deformável e infusível (RECUPERAR,2003).

Essas argamassas possuem excelente resistência a ácidos não oxidantes e boa resistência a alguns solventes orgânicos. São atacados por ácidos oxidantes e ambiente muito alcalino. Toleram um pH variando de 2,0 a 10,0 (RINCÓN; HELENE, 2003).

Segundo Tezuka³ (1979) e Popovics⁴ (1992), citado por GORNINSKI (2002), a resina epóxi possui alta resistência química e à corrosão, dureza e flexibilidade, bom comportamento

³ TEZUKA, Y. Concretos Polímeros. São Paulo: IPT, 1979. 29 p.

⁴ POPOVICS, S. Polymer for modification of P.C. Concrete in USA. In INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE, 7. 1992, Moscoew. Proceedings...Moscow: V.V. Paturoev and R.L. Serykh, 1992. 769p. p.100-108.

mecânico e elevada aderência à maioria dos substratos. Na sua utilização uma ampla variedade de produtos pode ser obtidos variando-se as propriedades na cura, na seleção dos monômeros, aditivos e agentes de cura. As principais aplicações do epóxi na construção civil situam-se em duas categorias – revestimentos e estruturais, devido às suas excelentes características técnicas.

3.2.1.3 Argamassas mistas modificadas com polímeros

A argamassa polimérica é produto da associação de um composto inorgânico cimento e um composto orgânico látex polimérico, que usam agregados com granulometria adequada, geralmente contínua atendendo as curvas de Bolomey, e descontínua no caso de alta resistência à abrasão, formuladas especialmente com aditivos e adições que conferem propriedades especiais, e tem estrutura definida que consiste no gel de cimento e as microfibras do polímero (RINCÓN; HELENE, 2003).

São também chamadas de argamassa à base mineral e o processo de endurecimento está baseado na reação dos grãos de cimento com a água de amassamento. Conseqüentemente, as propriedades do cimento e polímero são incrementadas quando se utiliza como parâmetro a argamassa convencional (STORTE, 2005).

As argamassas modificadas com polímeros são as mais utilizadas na área de reparo de estrutura de concreto, pois a colocação de resina sintética polimérica à argamassa de cimento e areia permite reduzir a água de mistura necessária, intensificando certas qualidades devido a diminuição da porosidade do concreto. Estas qualidades são interessantes quando se procura maior durabilidade, além de manter a plasticidade deste material, reduzir a permeabilidade e dar ótimo poder de aderência com o concreto endurecido. Em geral tem retração compensada e são tixotrópicos, permitindo seu uso em superfícies verticais e inclinadas (AGUADO, 2003).

3.2.2 Grautes

O graute é um material fluido e auto-adensável no estado recém misturado, indicado para preencher cavidade e principalmente tornar-se aderente, resistente e sem retração no estado endurecido (RINCÓN; HELENE, 2003).

Para trabalhos de reparo de falhas ou degradação em elementos de concreto podem ser utilizados grautes previamente preparados por empresas especializadas, que têm como principais atrativos a fácil aplicação, a elevada resistência mecânica e a não retratibilidade, podendo ser de base mineral ou de base epóxi (SOUZA, 1998).

Para reparos profundos, espessura maior que 50,0 mm, pode-se utilizar no reparo das peças, grautes à base de cimento com adição de agregados graúdos (até 30% em massa), concreto dosado experimentalmente em laboratório e concreto projetado. (OLIVEIRA, 1991).

3.2.2.1 Graute inorgânico

O graute de base inorgânica é constituído por cimento Portland (comum ou com adições ou de alta resistência inicial), agregados miúdos, aditivos expansores (pó de alumínio) e aditivos superplastificantes (RINCÓN; HELENE, 2003).

É um material fluido e auto-adensável em estado fresco, e devido a presença do aditivo expensor na mistura, há maior garantia de que todos os espaços da região de reparo serão preenchidos (SOUZA, 1998).

Por suas características de alta fluidez, boa aderência e baixa retração e permeabilidade, este tipo de graute é conveniente para reparos em locais de difícil acesso e em seções densamente armadas.

3.2.2.2 Graute orgânico

O graute orgânico de base epóxi é um composto formulado com resinas orgânicas onde a união e a resistência do conjunto é dada pelas reações de polimerização e endurecimento dos componentes das resinas. O cimento Portland pode entrar na composição do produto como um agregado fino também chamado de filer completando a distribuição granulométrica e preenchendo os vazios da areia, atuando como inerte, assim como também as cinzas volante que podem ser consideradas com custo muito mais acessível (RINCÓN; HELENE, 2003).

Normalmente resultam produtos com um excelente equilíbrio de propriedades físico-químico-mecânicas, apropriados para ambientes altamente agressivos e em locais onde são exigidas altas precisões nos reparos. Em geral são para uso em pequenos volumes e espessuras, pois tem elevada aderência ao substrato e baixo módulo de deformação longitudinal, assim como deformação lenta, superior a dos concretos e argamassas de cimento Portland (SOUZA, 1998).

Os grautes de base orgânica podem ser formulados com resina praticamente pura quando se destinam a injeção de fissuras, sendo conhecidos também como grautes para injeção de fissuras, tendo baixa viscosidade (SOUZA, 1998).

Muitas das propriedades e características dos sistemas epóxi vão ao encontro das necessidades da construção civil atual. Entre elas pode-se citar: elevadas resistências à compressão, tração, esforço cortante, choque, abrasão; grande velocidade para adquirir resistências; baixa retração durante a cura, comparada com outras resinas termoestáveis (entre 0,6 e 0,7 %), termoestabilidade a temperaturas entre -20 e 60°C; elevada resistência frente aos agentes químicos; forte adesão ao concreto, aço e outros materiais utilizados na construção civil; grande versatilidade dos sistemas devido a diferentes proporções dos componentes contidos nos produtos epoxídicos de base epóxi; resistência à penetração de umidade com a aplicação de uma fina camada de sistema epóxi apropriado (FIGUEIREDO, 1989).

Existe no mercado uma quantidade muito grande de produtos a base epóxi e procedimentos de reparo que utilizam estes produtos. As empresas que trabalham neste setor se encarregam de lançar, ano após ano, outros novos produtos e procedimentos.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de concreto da empresa EPT ENGENHARIA E PESQUISAS TECNOLÓGICAS S/A, em Porto Alegre/RS. Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME / UFRGS).

A pesquisa foi definida considerando-se os temas abordados até o presente momento, isto é, o desempenho dos materiais de reparo industrializados, disponíveis no mercado nacional, com diferentes composições químicas, frente ao ataque por ácidos. Foram utilizados 15 tipos de materiais de reparo, de 5 empresas fabricantes distintas. Para cada um desses materiais foram moldados corpos-de-prova que foram submetidos a ataque acelerado por soluções de ácido acético, ácido láctico e ácido sulfúrico, com concentração de 5%.

4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O programa experimental procurou seguir a mesma metodologia utilizada em estudos de concretos com adições de sílica ativa, realizados no NORIE/UFRGS (KULAKOWSKI et al., 1997), concretos com adição de cinza de casca de arroz realizado no LRM/UCPel (CASSAL, 2000), e no trabalho do estudo da influência das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica e do teor de cinza volante nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto polímero, realizado no LMC/UNISINOS (GORNINSKI, 2002), que avaliaram o desempenho destes materiais frente ao ataque ácido.

Os ácidos foram escolhidos por serem encontrados em processos industriais de diversos ramos de atividade, visto que o concreto é o material mais utilizado para construção das estruturas dessas indústrias, necessitando de um material de proteção, em nível preventivo, para que as manifestações patológicas não comprometam a estrutura em si, ou em nível corretivo, depois que essas manifestações se tornarem incidentes nas estruturas de concreto e que a manutenção seja indispensável.

4.1.1 Variáveis estudadas

Neste trabalho foram estudadas variáveis dependentes e variáveis independentes, conforme segue.

4.1.1.1 Variáveis dependentes ou de resposta

A avaliação do desempenho dos materiais estudados, frente ao ataque por soluções ácidas, foi feita a partir dos seguintes ensaios, sendo estes divididos em dois grupos. Os ensaios principais foram aqueles que forneceram características do material em relação ao seu desempenho quanto ao ataque ácido, através da perda de massa e da resistência a tração na flexão, após 5 ciclos de imersão em ácidos. O ensaio seguiu o método apresentado por CAMPS et al., (1990), que tem sido utilizado em pesquisas semelhantes (KULAKOWSKI et al., 1997; CASSAL, 2000; GORNINSKI, 2002) e da resistência à tração na flexão após os 5 ciclos de ataque por ácidos. O segundo grupo de ensaios englobou a resistência à compressão, realizados para fins de controle de produção dos materiais de reparo.

4.1.1.2 Variáveis independentes

Esse trabalho limitou-se ao estudo do desempenho de 15 materiais com diferentes composições químicas, fabricados por indústrias de alta tecnologia em materiais de recuperação, reparo e proteção de estruturas de concreto, conforme tabela 2 a seguir:

Tabela 2: composição dos materiais utilizados

Base inorgânica (M)	* argamassa à base de cimento Portland, com agregados graduados e aditivos químicos (“6 – M” e “13 – M”);
	* argamassa à base de cimento Portland, com agregados graduados, aditivos químicos, reforçadas com fibras sintéticas (“12 – M”);
	* graute à base de cimento Portland, com agregados graduados e aditivos expansores e superplastificantes (“2 – M”, “3 – M”, “8 – M” e “9 – M”).
Base orgânica (E)	* graute à base de resina epóxi com cargas minerais (“10 – E” e “15 – E”);
	* graute à base de resina epóxi com adição de polímeros (“5 – E”).
Base mista (P)	* argamassa à base de cimento, com adição de polímeros, agregados graduados e aditivos químicos (“4 – P”, “7 – P” e “11 – P”).
	* argamassa à base de cimento, com adição de polímeros, agregados graduados, aditivos químicos, reforçadas com fibras sintéticas (“1 – P” e “14 – P”).

Estes materiais foram escolhidos por serem os mais utilizados por empresas especializadas, para manutenção preventiva e corretiva em estruturas de concreto. Resultaram em 15 materiais de reparo, dos quais 7 são de base inorgânica, 5 são de base mista (modificados com polímeros) e 3 são de base orgânica (epóxi), sendo 5 empresas fabricantes distintas, que para efeitos desta pesquisa estão nomeadas de “A” à “E”.

Para cada material foram moldados 03 corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm para os ensaios de resistência à compressão simples e 09 corpos-de-prova prismáticos, medindo 4 x 4 x 16 cm, para os ensaios de agressão química, totalizando 45 corpos-de-prova cilíndricos e 135 corpos-de-prova prismáticos.

Cada corpo-de-prova prismático foi identificado pelo tipo de material e tipo de agressão química, numerados de 1 a 3, sendo o nº 1 reservado, para ser o de referência, e o nº 2 e 3, submetidos ao ataque ácido, conforme tabela 3.

Tabela 3: Identificação dos corpos-de-prova

Material	Ácidos / Identificação dos corpos-de-prova		
	acético	lático	sulfúrico
1	1 – A1 (referência) 1 – A2 1 – A3	1 – L1 (referência) 1 – L2 1 – L3	1 – S1 (referência) 1 – S2 1 – S3
· · ·	· · ·	· · ·	· · ·
15	15 – A1 (referência) 15 – A2 15 – A3	15 – L1 (referência) 15 – L2 15 – L3	15 – S1 (referência) 15 – S2 15 – S3

A moldagem dos cp's foi planejada de acordo com o número disponível de formas prismáticas, sendo então necessária a realização em 4 etapas. Na 1ª etapa foram moldados os materiais correspondentes aos nº 01, 02, 03 e 04, na 2ª etapa foram moldados os materiais correspondentes aos nº 05, 06, 07 e 08, na 3ª etapa foram moldados os materiais de nº 09, 10, 11 e 12 e na 4ª e última etapa, os materiais de nº 13, 14 e 15. O tempo de uma etapa para outra foi de 02 dias, período suficiente para desmoldagem dos corpos-de-prova.

4.1.2 Programa de ensaios

Uma vez concluída cada etapa de moldagem e após o período de cura de 28 dias, os corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples e os corpos-de-prova prismáticos foram submetidos aos ensaios de agressão química. Concluídos os ensaios de agressão química, os corpos-de-prova prismáticos foram submetidos a ensaios de perda de massa e de resistência à tração na flexão, tanto os que sofreram o ataque ácido quanto os que serviram como referência.

4.2 ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados os ensaios de agressão química e de resistência mecânica à tração na flexão e à compressão simples.

4.2.1 Agressão química

A metodologia de ensaio para o ataque químico seguiu o procedimento apresentado por CAMPS et al. (1990). Após a moldagem, os corpos-de-prova foram submetidos à cura por 28 dias e, após a cura, iniciaram-se os ciclos de agressão de 14 dias cada um.

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 cada período de imersão os corpos-de-prova foram lavados com jato d'água com o objetivo de simular a ação mecânica de desgaste e remover as partes atacadas da superfície e, logo após, foram colocados para secar durante sete dias em ambiente de laboratório. Ao final de cada período de secagem, foram pesados novamente, completando o ciclo de 14 dias. A cada novo ciclo a solução foi renovada, medindo-se o pH antes da imersão dos corpos-de-prova e após sua retirada. A figura 5 mostra esquematicamente a metodologia de ensaio utilizada.

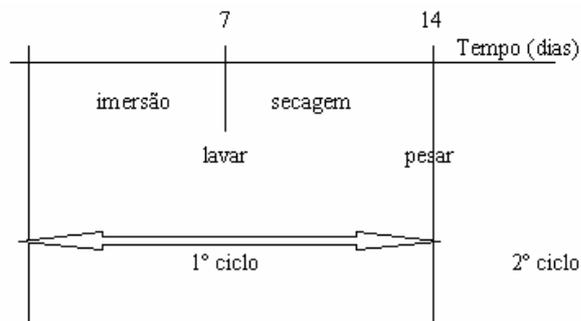


Figura 5: Esquema dos ciclos de agressão ácida (fonte: CAMPS et al.,1990).

Foram previstos cinco ciclos de agressão. O volume das soluções ácidas correspondeu a quatro vezes o volume total dos corpos-de-prova. A concentração utilizada para as soluções foi de 5% e foi escolhida por ter sido utilizada com frequência em estudos semelhantes Kulakowski et al. (1997); Cassal (2000); Gorninski, (2002).

4.2.2 Resistência à tração na flexão

Depois do último ciclo de agressão química todos os corpos-de-prova (cp's), inclusive os de referência, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão, de acordo com as recomendações da norma NBR 12.142 (ABNT, 1991). Para o rompimento dos cp's foi utilizada uma prensa universal da marca Shimadzu, Modelo UH 2000 KNA, com capacidade de 2000 KN. Foram ensaiadas 03 cp's para cada material.

4.2.3 Resistência à compressão simples

Determinou-se a resistência à compressão simples de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 1994), em corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, em uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PCE100/20, com capacidade de 1176 KN.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias, depois de cura em câmara úmida, sendo retirados com quatro horas de antecedência da câmara úmida e capeados conforme as recomendações da norma NBR 5738 (ABNT, 2003). Foram ensaiadas 03 cp's para cada material.

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item estão relacionados os materiais de reparo utilizados para realização dos ensaios, com suas respectivas características e usos mais recomendados em obras, indicadas pelo próprio fabricante, que destaca apenas as vantagens de seus produtos, não havendo diferenciação clara entre as fichas dos produtos semelhantes do mesmo fabricante. Cada material utilizado está identificado com um número e uma letra. O número corresponde à ordem de moldagem dos mesmos e a letra corresponde à sua composição química, sendo “E” – para material de base orgânica (epóxi), “M” – para material de base inorgânica (cimento Portland) e “P” – para material de base mista (cimento Portland modificado com polímeros). Foram ensaiados 03 materiais à base epóxi, 07 materiais à base mineral e 05 materiais modificados com polímeros, totalizando 15 argamassas industrializadas. Uma visualização

resumida destes produtos, citada pelos 5 fabricantes, em catálogos comerciais encontra-se na tabela 4.

Tabela 4: Composições, características e usos recomendados dos materiais utilizados – informações retiradas dos catálogos dos fabricantes

Fabricante	Material	Natureza do material	Principais características	Usos mais recomendados
A	1 – P	Argamassa polimérica, base mineral, com agente adesivo integrado.	<ul style="list-style-type: none"> * Reforçada com fibras; * Não requer ponte de aderência e protetor contra corrosão; * Boas resistências mecânicas: <u>compressão simples:</u> <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 31,5 MPa; - após 28 dias: 37,0 MPa; <u>tração na flexão:</u> <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 4,2 MPa; - após 28 dias: 5,1 MPa. * Grande resistência a carbonatação. 	<ul style="list-style-type: none"> * Reparos estruturais em edificações; * Reparos estruturais em obras de infra-estruturas; * Espessuras entre 6 e 80 mm.
A	2 – M	Graute não retrátil e de alto desempenho	<ul style="list-style-type: none"> * Fluido com baixo teor de água; * Elevadas resistências mecânicas <u>compressão simples:</u> <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 29 MPa; - após 28 dias: 60 MPa; * Excelente aderência; * Baixa permeabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> * Reparos de defeitos em estruturas de concreto e áreas de difícil acesso; * Serviços que exigem elevada precisão e altas resistências.
B	3 – M	Graute de uso geral, constituído por cimento Portland de alta resistência inicial, agregados graduados e aditivos que conferem expansão controlada no estado plástico e ainda reduzem a demanda de água.	<ul style="list-style-type: none"> * Auto nivelamento; * Alta fluidez; * Não retrátil; * Módulo de deformação: 29 GPa; * Elevadas resistências mecânicas: <u>compressão simples:</u> <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 30 MPa; - após 28 dias: 70 MPa; * Baixa porosidade; * Elevada durabilidade, baixa permeabilidade à água, gases e íons contaminantes. 	<ul style="list-style-type: none"> * Preenchimento e reparos em áreas confinadas; * Admite espessura de 20 a 60 mm, para espessuras maiores poderão ser admitidas com a adição de até 30% de brita 1 ou 30% de brita 0.

continua

continuação

Fabricante	Material	Natureza do material	Principais características	Usos mais recomendados
B	4 – P	Argamassa polimérica de alto desempenho à base de cimento, aditivos especiais, polímeros acrílicos e agregados selecionados.	<ul style="list-style-type: none"> * Consistência tixotrópica; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 5 MPa; - após 28 dias: 50 MPa; tração na flexão: <ul style="list-style-type: none"> - após 28 dias: 6 MPa; * Retração compensada, baixa permeabilidade e elevada durabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> * Preenchimento manual de reparos rasos ou semiprofundos para reconstituição de superfícies de concreto em espessuras de 5 a 60 mm em camadas sucessivas, sem a necessidade da utilização de formas, em obras de pequeno a grande porte; * Reforço permanente e reconstituição de componentes estruturais de concreto armado, blocos ou alvenaria, em grandes áreas com espessuras de até 80 mm, aplicado em camadas, por via úmida, quando especificada a inclusão de tela de aço.
B	5 – E	Graute à base de resina epóxi com adição de polímeros.	<ul style="list-style-type: none"> * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 2 horas: 20 MPa; - após 28 dias: 80 MPa; tração na flexão: <ul style="list-style-type: none"> - após 28 dias: 28 MPa; * Baixa fluência e elevada resistência à fadiga; * Módulo de elasticidade: 10 GPa; * Excelente aderência com as bordas e o substrato. 	<ul style="list-style-type: none"> * Preenchimento de bases de equipamentos, trilhos de transportadores pesados, turbinas e centrífugas; * Indicado em situações emergentes de derramamento de produtos químicos comumente em usinas siderúrgicas, de galvanoplastia, refinarias e indústrias químicas; * Resistência de óleos, graxas, gorduras, água doce e do mar e a maioria dos produtos químicos (ácidos e álcalis fracos); * Preenche vazios de 10 a 120mm.
C	6 – M	Argamassa seca, à base de cimento de alta resistência.	<ul style="list-style-type: none"> * Baixa retração; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> após 3 dias: 50 MPa; após 28 dias: 68 MPa; tração na flexão: <ul style="list-style-type: none"> após 28 dias: 7,6 MPa; * Grande aderência. 	<ul style="list-style-type: none"> * Revestimento e reparos em estruturas de concreto; * Reparos de pisos industriais e de pavimento de concreto em rodovias; * Indicada para espessuras entre 3 e 7 cm.

continua

continuação

Fabricante	Material	Natureza do material	Principais características	Usos mais recomendados
C	7 – P	Argamassa, à base de cimento modificada com polímeros acrílicos.	<ul style="list-style-type: none"> * Consistência tixotrópica; * Baixa retração; * Boas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 28 dias: 36,6 MPa; tração na flexão: <ul style="list-style-type: none"> após 28 dias: 8,6 MPa. 	<ul style="list-style-type: none"> * Revestimentos e reparos de pouca espessura, entre 5 a 25 mm, em estruturas de concreto e de alvenaria; * Recuperação estrutural.
C	8 – M	Graute de altas resistências iniciais e finais para grauteamentos.	<ul style="list-style-type: none"> * Grande fluidez; * Alto nivelamento; * Baixa retração; * Resistente a óleos minerais, água, variações de temperatura, vibrações; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> após 28 dias: 70 MPa 	<ul style="list-style-type: none"> * Grauteamento de bases para máquinas e equipamentos; * Instalação de torres, guindastes e pontes rolantes; * Grauteamento de pré-moldados de concreto armado ou protendido; * Reparos em pisos industriais.
D	9 – M	Graute à base de cimento Portland, agregados naturais e aditivos especiais.	<ul style="list-style-type: none"> * Baixa permeabilidade; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 25 MPa; - após 28 dias: 50 MPa * Excelente resistência aos impactos, flexão e torção; * Não apresenta exsudação, segregação ou bolhas de ar; * Grande aderência ao concreto. 	<ul style="list-style-type: none"> * Reparação de defeitos em estruturas de concreto; * Fixação de trilhos monovias, pontes rolantes; * Ancagem de tirantes e chumbadores; * Grauteamento em áreas de difícil acesso.
D	10 – E	Graute à base de resina epóxi e cargas minerais	<ul style="list-style-type: none"> * Elevada fluidez; * Grande estabilidade química frente aos produtos alcalinos, ácidos diluídos, óleos graxos e hidrocarbonetos alifáticos; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 38 MPa; - após 28 dias: 75 MPa * Resistência à aderência: 5 MPa 	<ul style="list-style-type: none"> * Grauteamento de máquinas e equipamentos de elevada precisão; * Reparos estruturais de concreto armado; * Substituição de aparelhos de apoio em pontes e viadutos; * Grauteamento para bases de pilares e equipamentos sujeitos a cargas cíclicas e dinâmicas.

continua

continuação

Fabricante	Material	Natureza do material	Principais características	Usos mais recomendados
D	11 – P	Argamassa polimérica à base de cimento Portland, agregados minerais e aditivos especiais de rápida secagem e modificada com polímeros.	<ul style="list-style-type: none"> * Boas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 4 MPa - após 28 dias: 30 MPa; * Retração compensada; * Baixa permeabilidade; * Boa durabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> * Estucamento de concreto aparente; * Nivelar superfícies rugosas; * Reparos superficiais em peças pré-moldadas; * Melhora a proteção do concreto contra a agressividade da água contendo sulfatos e cloretos.
D	12 – M	Argamassa reoplástica, produto cimentício em pó, modificado com aditivos especiais e fibras sintéticas	<ul style="list-style-type: none"> * Resistente a sulfatos – ASTM 1012 – 28 semanas, menos de 10%; * Consistência tixotrópica; * Retração compensada; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 24 MPa - após 28 dias: 60 MPa; tração na flexão: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 4 MPa - após 28 dias: 8,5 MPa. * Possui inibidor de corrosão integrado na formulação; * Baixa permeabilidade; * Excelente aderência; * Aplicação manual ou por projeção. 	<ul style="list-style-type: none"> * Reparos em elementos estruturais de concreto armado ou protendido, em pilares, vigas, tabuleiros de pontes e viadutos; * Trabalhos de reparos em pontes e obras marítimas; * Trabalhos de reparos em indústrias; * Proteção do concreto contra agressividade da água contendo sulfatos e cloretos; * Reparos de elementos de concreto sujeitos a cargas estáticas ou dinâmicas.
E	13 – M	Argamassa à base cimentícia.	<ul style="list-style-type: none"> * Consistência tixotrópica; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 20 MPa; * Alta aderência ao substrato; * Não retrátil. 	<ul style="list-style-type: none"> * Reparos de estruturas de concreto; * Execução de bases para assentamentos de equipamentos, máquinas e trilhos.

continua

continuação

Fabricante	Material	Natureza do material	Principais características	Usos mais recomendados
E	14 – P	Argamassa polimérica à base de cimento, com fibras sintéticas.	<ul style="list-style-type: none"> * Consistência tixotrópica; * Boas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 12 MPa - após 28 dias: 50 MPa; tração na flexão: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 2,5 MPa - após 28 dias: 12,0 MPa. * Não retrátil; * Apresenta baixo módulo de elasticidade; * Baixa permeabilidade; * Ótima aderência ao substrato. 	<ul style="list-style-type: none"> * Recuperação de estruturas de concreto; * Reparos de arestas, cavidades horizontais e verticais.
E	15 – E	Graute à base de resinas epóxicas modi-ficadas.	<ul style="list-style-type: none"> * Excelente fluidez, inclusive em camadas delgadas; * Endurecimento rápido e sem retração; * Excelente aderência, inclusive superfícies cimentícias úmidas; * Elevadas resistências mecânicas: compressão simples: <ul style="list-style-type: none"> - após 1 dia: 55 MPa; - após 28 dias: 95 Mpa. 	<ul style="list-style-type: none"> * Ancoragens de barras, tirantes, chumbadores; * Enchimento sob placas de assentamento de maquinaria; * Em reparos monolíticos de aberturas mínima de 5 mm.

Após análise das especificações descritas em boletins técnicos comerciais dos 15 materiais de reparo, de 5 grandes fabricantes do mercado nacional, observa-se que os requisitos básicos descritos são meramente qualitativos, pois apresentam alguns ensaios de caracterização e praticamente nenhuma informação quantitativa é dada sobre desempenho. Por não serem citados valores em todas as argamassas, fica difícil fazer uma comparação e diferenciação entre os produtos, induzindo as especificações serem feitas tão somente por preço ou com base em experiências anteriores, em geral, sem desempenho avaliado a médio e longo prazo.

A análise destas informações comerciais mostra a necessidade de uma classificação básica comum das argamassas de reparo industrializadas, e que pode evoluir para uma normalização, conforme os fabricantes assumam novas posturas em seus catálogos comerciais, considerando metodologias comuns em suas análises de rotina e a serem integradas nas fichas e catálogos técnicos dos produtos.

4.4 DOSAGEM E MISTURA

Para realização da mistura dos materiais foi seguida a recomendação da norma NBR 13276 (ABNT, 2002), com fatores relacionados às condições de temperatura e umidade. As misturas foram realizadas por meio de argamassadeira de eixo vertical, de baixa rotação (até 300 rpm), com capacidade para 30 l. Não foi determinado índice de consistência das argamassas, foram seguidas as recomendações dos fabricantes quanto à dosagem dos materiais.

O material identificado como nº 1, fabricante A, é uma argamassa monocomponente, à base de cimento com polímeros, reforçada com fibras e agregados com dimensão máxima de 2 mm, devendo ser misturada com água. O pó foi adicionado à água e misturado, mecanicamente, até a obtenção de uma mistura homogênea. Esse material é fornecido em sacos de 25 kg. A proporção da mistura é de 100 partes, em massa, da argamassa para 16 a 17 partes, em massa, de água. Na mistura realizada no laboratório, para confecção dos corpos-de-prova, utilizou-se 16,2 partes de água, respeitando a recomendação do fabricante.

O material identificado como nº 2, também do mesmo fabricante A, é um material monocomponente, à base de cimento Portland, utilizado para grauteamento de peças, devendo apenas ser misturado com água. A mistura foi realizada por um misturador mecânico, até a homogeneização do material. O fabricante recomenda de 2,5 a 3,0 l de água para cada saco de 25 kg, dependendo da consistência desejada. Utilizou-se 2,6 l de água, obtendo-se uma mistura altamente fluida.

O material identificado como nº 3, do fabricante B, é um graute à base de cimento de alta resistência inicial, agregados graduados e aditivos que conferem uma expansão controlada no estado plástico e apenas requer a adição da quantidade correta de água para a obtenção de uma argamassa fluida. O fabricante recomenda até 3,5 l de água por saco de 25 kg. Na confecção dos corpos-de-prova foram utilizados 3,0 l de água na mistura, sendo suficiente para a obtenção de alta fluidez.

O material nº 4, do fabricante B, é uma argamassa à base de cimento e polímero, bicomponente, parte A e B. A mistura foi realizada com um misturador mecânico de baixa rotação, adicionando o componente B (pó) ao componente A (líquido), até obter-se uma argamassa homogênea.

O material nº 5, do mesmo fabricante do material nº 3 e 4, é um graute de alta fluidez, à base de resina epóxi. É um produto tricomponente, composto por resina base, endurecedor e agregados inertes especialmente graduados. A mistura foi realizada conforme descrito pelo fabricante: primeiramente colocou-se o endurecedor no recipiente com a base, realizando uma mistura prévia, através de um misturador mecânico. Logo foi adicionado, aos poucos, o agregado, misturando-os mecanicamente, até a obtenção de um graute de coloração uniforme. O fabricante recomenda a retirada de até 10 % do agregado para obter-se maior fluidez na mistura. Para a confecção dos cp's utilizou-se todo agregado.

O material nº 6, do fabricante C, é uma argamassa seca à base de cimento e aditivos químicos, fornecida em sacos de 40 kg. A mistura foi realizada manualmente, adicionando somente água à argamassa, de acordo com a consistência pretendida. A recomendação do fabricante é que a relação água/argamassa seja em torno de 0,12. Foi adicionado à mistura 4,8 l de água. A consistência do material ficou bem seca.

O material nº 7, do fabricante C, é uma argamassa de cimento e polímeros, sendo fornecida em dois componentes, o componente A, que é o cimento, e o componente B, que é a emulsão acrílica. A mistura foi realizada por misturador mecânico, admitindo-se ser realizada manualmente, adicionando ao pó do componente A o líquido do componente B, até obter-se uma mistura homogênea e a consistência desejada. Na mistura realizada no laboratório utilizou-se todo o líquido do componente B.

O material nº 8, do fabricante C, é um graute de alta resistência inicial e final para reparos que necessitem de grande fluidez e alto nivelamento, à base de cimento Portland e aditivos químicos. É fornecida pronta para usar, bastando adicionar água. Segundo recomendações do fabricante, para cada saco de 25 kg admite-se de 2,0 a 3,0 l de água. Na mistura realizada no laboratório, utilizou-se 2,83 l de água, adquirindo-se alta fluidez do material.

O material de nº 9, do fabricante D, é um graute à base de cimento Portland, agregados naturais e aditivos químicos, fornecido pronto para o uso. A quantidade de água utilizada para preparação do material varia em função da fluidez desejada, podendo ser adicionado de 3,0 a 5,5 l de água para cada saco de 25 kg, conforme recomendação do fabricante. Na mistura para confecção dos corpos-de-prova, primeiramente adicionou-se $\frac{3}{4}$ da água e progressivamente foi adicionado o material. Quando o graute já estava homogêneo, adicionou-se lentamente o restante da água, até a obtenção de uma argamassa fluida, totalizando 4,0 l de água.

O material nº 10, do fabricante D, é um graute à base de resina epóxi e cargas minerais, possuindo grande estabilidade química frente aos produtos alcalinos, ácidos diluídos, óleos e hidrocarbonetos alifáticos. É fornecido em três componentes: parte A, sendo um líquido viscoso e transparente; parte B, líquido de baixa viscosidade; e parte C, mistura de areias silicosas, de granulometria média. A mistura foi realizada de acordo com as especificações do fabricante, sendo realizada com um misturador de baixa rotação. Primeiramente foi adicionado a parte B na parte A, seguida de mistura até a homogeneização completa. Logo, ainda sob agitação, foi acrescentada a parte C.

O material nº 11, do fabricante D, é uma argamassa de base cimentícia, agregados minerais e aditivos químicos, modificada com polímeros. É fornecida em pó, monocomponente, e apresenta rápida secagem. A recomendação do consumo de água para a mistura é de 4,5 a 5,0 l. A mistura foi realizada numa argamassadeira mecânica, com a adição de 4,5 l de água, obtendo-se uma consistência pastosa e homogênea.

O material nº 12, do fabricante D, é uma argamassa de base cimentícia com aditivos especiais e reforçada com fibras sintéticas resistente a sulfatos. É fornecida em pó, em sacos de 25 kg. A quantidade de água a ser utilizada vai depender da consistência requerida e da forma de aplicação, podendo ser normal ou projetada. O fabricante recomenda, para uso normal, de 10,5 a 14,0 % de água para obter-se uma consistência plástica e de 15 a 19 % de água para uso projetado e consistência plástica. A mistura foi realizada de forma a obter uma consistência plástica, colocando-se parte da água e então o material sob agitação até uma mistura homogênea e sem grumos. Logo adicionou-se o restante da água, totalizando 3 l.

O material nº 13, do fabricante E, é semelhante ao anterior, mas de fabricantes diferentes. É uma argamassa pré-dosada à base de cimento Portland, bastando apenas adicionar água. Para a preparação da argamassa, usa-se uma relação água/argamassa em torno de 0,13, segundo recomendação do fabricante. A mistura foi realizada adicionando-se 2/3 da água total de amassamento na argamassadeira, seguida do pó. Misturou-se por 2 minutos e, em seguida, acrescentou-se o restante da água, completando 3,20 l e misturando por mais 5 minutos.

O material nº 14, do fabricante E, é um material à base de cimento, polímeros e fibras sintéticas, pré-dosada e bicomponente, fornecido pronto para o uso, bastando misturar os componentes A e B. O componente B (pó) foi adicionado ao componente A (líquido), com o

auxílio de um misturador mecânico até a homogeneização do material, conforme recomendação do fabricante.

O material nº 15, do fabricante E, é um graute à base de resinas epóxicas modificadas, fornecida em 3 componentes, apresentado uma cor cinza. Os componentes A e B (resina básica e endurecedor) foram misturados separadamente. Em seguida à mistura de ambos, acrescentou-se o componente C (agregados), gradativamente, sob agitação intensa e contínua por 5 minutos.

4.5 MOLDAGEM

Para a moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados moldes cilíndricos (10 x 20 cm) e prismáticos (4 x 4 x 16 cm), confeccionados com aço. Os moldes foram tratados com cera desmoldante, a fim de formar uma película oleosa entre as argamassas e as formas, impedindo a aderência entre ambos e facilitando a desforma.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram adensados em quatro camadas iguais, cada uma submetida a 30 golpes para a devida compactação, segundo a norma NBR 5738 (ABNT, 2003). Os corpos-de-prova prismáticos foram executados em duas camadas iguais, cada uma recebendo 25 golpes. A compactação foi realizada utilizando-se uma barra de aço cilíndrica de 17 cm de comprimento, com extremidade de 2,5 cm de diâmetro. Após o adensamento, a superfície das argamassas foi regularizada com uma colher de pedreiro.

4.6 CURA

Os corpos-de-prova cilíndricos foram desmoldados após 24 h e mantidos em câmara úmida, com temperatura e umidade de acordo com as recomendações da norma NBR 9.479 (ABNT, 1994), por 28 dias. Os corpos-de-prova prismáticos foram desmoldados após 48 hs e mantidos submersos em água por 28 dias em câmara úmida, conforme a metodologia utilizada por CAMPS et al. (1990).

Os cp's cilíndricos e prismáticos dos materiais orgânicos tiveram a cura enquanto estavam nos moldes metálicos, pelo período de 24 e 48 h, respectivamente. Foi tomado este procedimento pois os fabricantes indicam que com 24 h o material já atinge quase 90% de sua polimerização e conseqüentemente de sua resistência à compressão, permitindo então que o material seja colocado em carga e dada a continuidade das operações, sabe-se que quando estes materiais são escolhidos para reparos de estruturas de concreto é devido as suas características de aderência, baixa permeabilidade e resistência mecânica e química, além dos curtos prazos de paradas de produção para realização das intervenções.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios obtidos no programa experimental descrito no capítulo anterior, bem como a análise e discussão dos mesmos. Os resultados obtidos, em cada um dos ensaios realizados, estão apresentados em forma de tabelas e gráficos, seguidos de uma análise estatística.

As tabelas estão apresentadas de três formas: a 1^a, onde constam todos os resultados; a 2^a, com os valores médios, desvios padrão e coeficiente de variação; e a 3^a onde constam os resultados médios dos materiais de composições similares, com a indicação dos respectivos fabricantes, que, juntamente com os gráficos, possibilitam uma melhor visualização dos resultados.

Os resultados obtidos no programa experimental foram estatisticamente avaliados por análise de variância com fatores hierárquicos. A análise de variância permitiu a verificação da influência de cada fator estudado no experimento. No entanto, com o intuito de avaliar a evolução da resistência dos materiais de reparo a ácidos, algumas comparações entre os fatores foram realizadas.

Conforme já descrito no capítulo 4, os ensaios de agressão química, resistência à tração na flexão e à compressão simples foram escolhidos como variáveis de resposta. A resistência ao ataque ácido pode ser avaliada pelo efeito das interações entre as variáveis investigadas (composição química e tipo de agressão). Logo, a resistência a ácidos é a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de perda de massa e resistência mecânica dos corpos-de-prova imersos em soluções ácidas, comparativamente aos corpos-de-prova que não foram submetidos ao ataque, chamados de corpos-de-prova de referência.

5.1 PERDA DE MASSA

Os ensaios de agressão química tiveram como resposta a perda de massa para cada um dos ácidos e materiais analisados.

5.1.1 Ácido acético

Foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada um dos 15 materiais testados, o que totalizou 30 cp's. A tabela 5 mostra os dados obtidos referentes ao ensaio de perda de massa para o ácido acético.

Tabela 5: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa (g) - ácido acético

CP		Massa Inicial	Massa ao final dos ciclos (g)					Perda de massa total	
Material	Nº		1	2	3	4	5	(g)	(%)
1 - P	1	535,20	533,80	531,50	527,40	520,10	512,60	22,60	4,22
	2	533,70	535,00	528,50	523,50	518,50	511,50	22,20	4,16
2 - M	1	580,30	575,70	572,80	568,90	561,30	555,70	24,60	4,24
	2	573,10	569,50	564,60	560,20	553,30	547,20	25,90	4,52
3 - M	1	582,80	583,30	581,60	579,00	573,50	564,80	18,00	3,09
	2	570,40	571,50	566,90	564,00	559,10	550,70	19,70	3,45
4 - P	1	572,20	570,00	568,90	566,30	563,30	560,80	11,40	1,99
	2	578,70	576,80	575,10	572,60	569,80	568,10	10,60	1,83
5 - E	1	517,10	516,60	516,30	516,30	516,30	516,20	0,90	0,17
	2	514,50	514,20	514,10	514,10	514,10	513,90	0,60	0,12
6 - M	1	523,70	526,70	518,40	500,10	481,10	466,40	57,30	10,94
	2	524,10	527,00	520,90	504,20	484,60	466,30	57,80	11,03
7 - P	1	512,60	513,90	505,80	493,60	477,80	473,20	39,40	7,69
	2	475,60	482,60	476,00	463,90	453,30	449,30	26,30	5,53
8 - M	1	578,90	582,40	578,90	573,30	563,20	556,90	22,00	3,80
	2	602,40	604,20	599,60	588,60	580,10	574,50	27,90	4,63
9 - M	1	553,50	555,00	550,50	538,50	524,30	510,20	43,30	7,82
	2	558,10	559,70	547,10	537,30	525,30	510,00	48,10	8,62
10 - E	1	501,60	501,10	501,00	501,00	501,00	501,30	0,30	0,06
	2	501,90	501,50	501,40	501,40	501,40	501,80	0,10	0,02
11 - P	1	513,90	521,50	518,60	492,00	483,80	450,50	63,40	12,34
	2	531,60	535,00	528,10	501,30	494,70	440,40	91,20	17,16
12 - M	1	553,00	553,20	548,70	541,10	535,00	528,10	24,90	4,50
	2	548,50	549,20	543,20	535,60	531,30	523,20	25,30	4,61
13 - M	1	593,30	594,30	588,40	582,60	575,70	559,80	33,50	5,65
	2	600,40	602,40	595,20	590,00	583,40	566,60	33,80	5,63
14 - P	1	565,00	565,90	563,20	560,00	556,60	541,50	23,50	4,16
	2	552,80	554,30	549,40	546,60	543,70	533,90	18,90	3,42
15 - E	1	546,80	546,80	546,30	546,90	556,10	547,80	-1,00	-0,18
	2	547,20	547,20	546,50	547,30	557,20	548,30	-1,10	-0,20

(valores negativos aumento de massa).

A tabela 6 apresenta um resumo dos dados obtidos, com média, desvio-padrão e coeficiente de variação da perda de massa total para cada material testado.

Tabela 6: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa - ácido acético - parâmetros estatísticos

Material	Média (%)	Desv. Padrão	Coef. de variação
1 - P	4,19	0,03	0,01
2 - M	4,38	0,14	0,03
3 - M	3,27	0,18	0,06
4 - P	1,91	0,08	0,04
5 - E	0,15	0,03	0,20
6 - M	10,98	0,04	0,00
7 - P	6,61	1,08	0,16
8 - M	4,22	0,42	0,10
9 - M	8,22	0,40	0,05
10 - E	0,04	0,02	0,50
11 - P	14,75	2,41	0,16
12 - M	4,56	0,05	0,01
13 - M	5,64	0,01	0,00
14 - P	3,79	0,37	0,10
15 - E	-0,19	0,01	0,05

(valores negativos aumento de massa).

A tabela 7 mostra os resultados dos ensaios de perda de massa quanto ao ataque do ácido acético, classificando os materiais de reparo por composição química similar.

Tabela 7: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa - ácido acético - composições químicas dos materiais de reparo

Composição Química / Material (Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (%)	Média (%)	Média (%)
10 - E- D			0,04
5 - E- B			0,15
15 - E- E			-0,19
3 - M- B	3,27		
8 - M- C	4,22		
2 - M- A	4,38		
12 - M- D	4,56		
13 - M- E	5,64		
9 - M- D	8,22		
6 - M- C	10,98		
4 - P- B		1,91	
14 - P- E		3,79	
1 - P- A		4,19	
7 - P- C		6,61	
11 - P- D		14,75	

(valores negativos aumento de massa).

Os materiais à base inorgânica e à base mista sofreram uma perda de massa muito maior que os de base orgânica (epóxi), a média de perda de massa dos materiais de base inorgânica e

mista tiveram valores muito próximos. Os cp's de base orgânica mantiveram-se íntegros, não apresentaram modificações nas suas superfícies, apenas alteração na sua coloração. Os materiais "5 - E" e "10 - E" tiveram, na média perda de massa de 0,04 % e 0,15 %, respectivamente. O material "15 - E" teve ganho de massa, 0,19 % em média, após os 5 ciclos de agressão. Estes resultados apresentam-se em consonância com os resultados de perda de massa em concreto polímero, com resinas poliéster isoftálica e ortoftálica (GORNINSKI, 2002), que sob as mesmas condições, o concreto polímero com adição de 16 % de cinza volante, obteve 0,02 % de perda de massa e para os concretos polímeros (resina ortoftálica) com adição de 8, 12 e 20 % de adição de cinza volante e os concretos polímeros (resina isoftálica) com 8, 12, 16 e 20 % de adição de cinza volante, todas as amostras obtiveram aumento de massa, variando de 0,02 % e 0,09 %, estes valores são muito pequenos e podem ser resultado da variabilidade dos próprios ensaios.

Inicialmente, é importante ressaltar que a média dos resultados de perda de massa dos corpos-de-prova de base orgânica, que foram submetidos ao ácido acético, foi nula. Os materiais de base mista foram os que tiveram maior perda de massa. Salienta-se que os concretos de cimento Portland, quando submetidos a estas condições, comumente tem grande perda de massa (MEBARKIA⁵ e VIPULANANDAN, 1995 apud GORNINSKI, 2002). Em concretos com adição de 9 % sílica ativa e relação água/cimento de 0,59 (KULAKOWSKI et al, 1997), foi observado 13,6 % de perda de massa e em concretos com adição de 9 % de cinza de casca de arroz e relação água/cimento de 0,60 (CASSAL, 2000), foi observado 18,2 % de perda de massa, para mesma solução ácida. A figura 6 mostra o comportamento dos materiais de diferentes composições quanto ao ataque do ácido acético.

⁵ MEBARKIA, S.; VIPULANANDAN, C.: Mechanical Properties and water diffusion in polyester polymer concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v.121, p. 1359-1365, 1995.

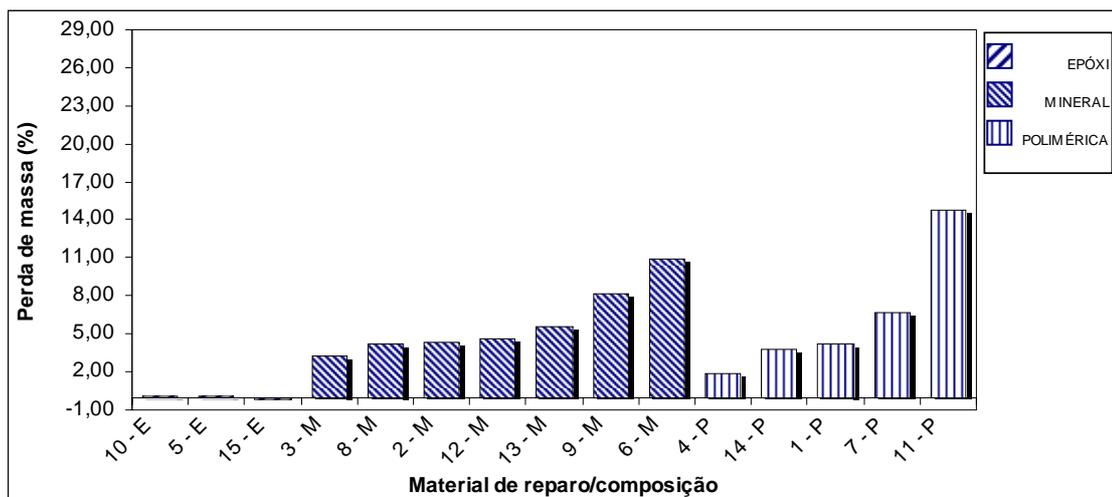


Figura 6: Perda de massa da agressão do ácido acético nos materiais de reparo, separados pela composição química dos materiais.

Pode-se afirmar que as fibras sintéticas incorporadas na composição dos materiais “1 – P”, “14 – P” e “12 – M” não tiveram influência na relação da perda de massa, pois comprova-se que os materiais com composições químicas similares sem a adição de fibras sintéticas obtiveram menor perda de massa, como por exemplo, “4 – P”, “2 – M”, “3 – M” e “8 – M”. As fibras até podem ser prejudiciais para perda de massa pois introduzem poros e só irão contribuir para resistência à tração na flexão.

Observou-se que após a ruptura dos corpos de prova, a existência de uma camada superficial que, embora não tenha sido removida pela lavagem, foi atacada pela solução. A espessura dessa camada variou pelo tipo de material, sendo maior nos que apresentaram maior porosidade, variando entre 0 a 2 mm.

Observando a olho nu, a matriz dos materiais que sofreram agressão química é exatamente igual à dos corpos-de-prova de referência, que não foram submetidos ao ataque.

A solução, inicialmente incolor e com cheiro forte, adquire rapidamente uma coloração rosada, após iniciar o ataque.

Mehta (1985) afirma que este ácido é muito agressivo a produtos cimentícios. Segundo os resultados dos ensaios pode-se confirmar a afirmativa do autor.

As figuras 7 a 21 mostram a diferença do aspecto dos corpos-de-prova submetidos ao ataque da solução de ácido acético, após os 5 ciclos de imersão comparativamente aos corpos-de-

prova de referência. O primeiro cp é o de referência e os dois abaixo são os que sofreram o ataque pela solução de ácido acético.



Figura 7: Aspecto dos cp's do material "1 - P", base mista, fabricante A, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Observa-se a perda da camada superficial e o aparecimento dos agregados maiores



Figura 8: Aspecto dos cp's do material "2 - M", base inorgânica, fabricante A, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Os cp's submetidos ao ataque ácido perderam a capa superficial da pasta, ficando nítido os agregados maiores



Figura 9: Aspecto dos cp's do material "3 – M", base inorgânica, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Observa-se que os cp's submetidos à solução do ácido acético tiveram pouca perda de massa, nota-se ainda a camada superficial que foi pouco removida

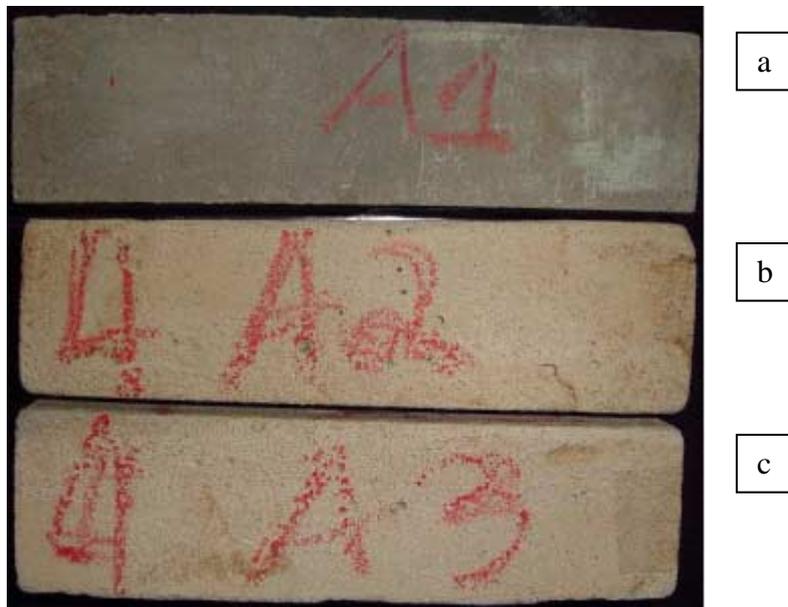


Figura 10: Aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Percebe-se nos cp's submetidos ao ataque ácido a mudança na coloração da argamassa e a baixa perda de massa, atingindo na média 1,91%



Figura 11: Aspecto dos cp's do material "5 - E", base orgânica, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Percebe-se a integridade dos materiais submetidos ao ataque ácido, observando-se somente mudança na coloração.



Figura 12: Aspecto dos cp's do material "6 - M", base inorgânica, fabricante C, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Observa-se claramente a redução da seção dos cp's submetidos ao ataque do ácido acético, os quais tiveram perda de massa maior que 10 %.



Figura 13: Aspecto dos cp's do material "7 - P", base mista, fabricante C. (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Esta argamassa contém fibras sintéticas em sua composição. Percebe-se a porosidade dos cp's, sendo prejudicial para perda de massa.



Figura 14: Aspecto dos cp's do material "8 - M", base inorgânica, fabricante C. (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Percebe-se a exposição dos agregados maiores nos cp's submetidos ao ataque da solução ácida. A camada superficial da pasta foi agredida pela solução e conseqüentemente removida.



Figura 15: Ataque pela solução de ácido acético. Aspecto dos cp's do material "9 – M", base inorgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Este material teve grande perda de massa, atingindo 8,22 % da massa inicial.



Figura 16: Aspecto dos cp's do material "10 – E", base orgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Observa-se a integridade dos cp's submetidos ao ataque ácido.



Figura 17: Aspecto dos cp's do material "11 - P", base mista, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução ácida. Observa-se a redução da seção dos cp's submetidos à solução do ácido acético, conseqüentemente grande perda de massa. Este material foi o que obteve maior perda de massa de todos os materiais analisados, 14,75%.



Figura 18: Aspecto dos cp's do material "12 - M", base inorgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. A perda de massa dos cp's submetidos ao ataque ácido foi quanto a remoção da camada superficial, com pouca diminuição da seção.



Figura 19: Aspecto dos cp's do material "13 – M", base inorgânica, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Observa-se a remoção da camada superficial dos materiais, deixando os agregados maiores expostos. Este material obteve 5,64 % de perda de massa.

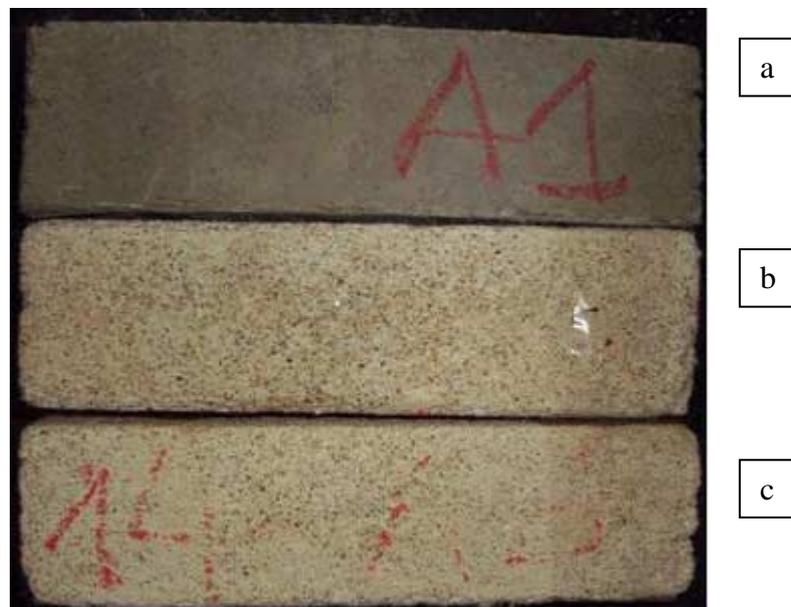


Figura 20: Aspecto dos cp's do material "14 – P", base mista, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Percebe-se ainda a existência da camada superficial do material após os 5 ciclos de agressão ácida. Este material contém em sua composição fibras sintéticas.



Figura 21: Aspecto dos cp's do material "15 – E", base orgânica, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido acético. Observa-se a integridade dos cp's após os 5 ciclos de ataque ácido. Este material de base orgânica obteve na média quase 0,20 % de aumento de massa

5.1.2 Ácido láctico

Foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada um dos 15 materiais testados, o que totalizou 30 cp's. A tabela 8 mostra os dados obtidos referentes ao ensaio de perda de massa para o ácido láctico.

Tabela 8: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa (g) - ácido láctico

CP	Material	Nº	Massa inicial	Massa ao final dos ciclos (g)					Perda de massa total	
				1	2	3	4	5	(g)	(%)
1 - P		1	511,70	516,80	514,90	511,40	508,30	504,50	7,20	1,41
		2	512,30	520,30	517,90	515,40	511,60	508,60	3,70	0,72
2 - M		1	582,20	585,20	584,00	579,00	573,50	563,90	18,30	3,14
		2	591,90	594,50	593,00	589,10	583,60	574,50	17,40	2,94
3 - M		1	569,50	568,30	566,50	563,80	559,30	550,70	18,80	3,30
		2	554,40	558,10	555,20	552,70	548,30	539,90	14,50	2,62
4 - P		1	573,70	572,80	571,70	569,00	567,30	565,30	8,40	1,46
		2	568,00	567,40	566,70	563,90	561,80	559,20	8,80	1,55
5 - E		1	522,60	522,10	521,80	521,80	522,10	522,00	0,60	0,11
		2	523,50	523,20	522,90	522,90	523,00	523,00	0,50	0,10
6 - M		1	530,50	538,00	539,00	526,70	518,50	511,90	18,60	3,51
		2	533,90	539,50	536,10	528,50	521,60	510,40	23,50	4,40
7 - P		1	486,00	488,60	489,70	484,60	481,30	472,10	13,90	2,86
		2	488,40	494,30	494,30	490,10	485,40	477,30	11,10	2,27
8 - M		1	596,50	599,70	597,60	594,60	588,20	583,30	13,20	2,21
		2	596,30	601,30	599,80	595,70	590,50	585,80	10,50	1,76
9 - M		1	571,50	573,60	565,60	561,10	552,60	544,10	27,40	4,79
		2	572,30	574,10	566,70	562,70	554,10	545,70	26,60	4,65
10 - E		1	478,00	477,60	477,50	477,50	477,70	478,00	0,00	0,00
		2	481,50	481,00	480,90	480,90	481,00	481,20	0,30	0,06
11 - P		1	507,30	515,60	503,70	493,50	487,20	470,60	36,70	7,23
		2	502,90	510,40	498,70	487,50	481,90	464,20	38,70	7,70
12 - M		1	561,90	561,80	555,80	551,80	548,90	543,50	18,40	3,27
		2	557,60	559,70	554,40	549,60	546,50	541,30	16,30	2,92
13 - M		1	577,20	581,90	575,10	570,50	567,00	551,60	25,60	4,44
		2	577,60	582,00	574,70	571,40	567,90	553,70	23,90	4,14
14 - P		1	570,90	575,40	569,00	566,80	564,60	547,20	23,70	4,15
		2	576,90	584,10	578,00	575,20	572,60	555,80	21,10	3,66
15 - E		1	566,50	566,20	565,90	566,30	566,60	567,00	-0,50	-0,09
		2	559,80	559,50	559,10	559,60	559,80	560,00	-0,20	-0,04

(valores negativos aumento de massa)

A tabela 9 apresenta um resumo dos dados obtidos, com média, desvio-padrão e coeficiente de variação da perda de massa total para cada material testado.

Tabela 9: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa - ácido láctico - parâmetros estatísticos

Material	Média (%)	Desv. Padrão	Coef. de variação
1 – P	1,06	0,34	0,32
2 – M	3,04	0,10	0,03
3 – M	2,96	0,34	0,11
4 – P	1,51	0,04	0,03
5 – E	0,11	0,01	0,09
6 – M	3,95	0,45	0,11
7 – P	2,57	0,29	0,11
8 – M	1,99	0,23	0,12
9 – M	4,72	0,07	0,01
10 – E	0,03	0,03	1,00
11 – P	7,46	0,23	0,03
12 – M	3,10	0,18	0,06
13 – M	4,29	0,15	0,03
14 – P	3,90	0,25	0,06
15 – E	-0,06	0,03	0,50

(valores negativos aumento de massa)

A tabela 10 mostra os resultados dos ensaios de perda de massa quanto ao ataque do ácido láctico, classificando os materiais de reparo por composição química similar.

Tabela 10: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa – ácido láctico – composições químicas dos materiais de reparo

Composição Química / Material (Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (%)	Média (%)	Média (%)
10 – E– D			0,03
15 – E– E			-0,06
5 – E– B			0,11
8 – M– C	1,99		
3 – M– B	2,96		
2 – M– A	3,04		
12 – M– D	3,10		
6 – M– C	3,95		
13 – M– E	4,29		
9 – M– D	4,72		
1 – P– A		1,06	
4 – P– B		1,51	
7 – P– C		2,57	
14 – P– E		3,90	
11 – P– D		7,46	

(valores negativos aumento de massa)

Conforme figura 22, nota-se claramente que os materiais que mais sofreram perda de massa foram os de base inorgânica, com exceção da argamassa “11 – P”, de base mista, que se apresentou mais suscetível ao ataque do ácido láctico, repetindo o efeito do ácido acético.

Os materiais de base orgânica se mantiveram íntegros, sem quaisquer modificações, durante todos os ciclos de agressão. A perda de massa nos materiais “5 – E” e “10 – E” foi muito pequena, 0,03% e 0,11%, respectivamente. Já no material “15 – E” obteve-se acréscimo de massa ao final dos ensaios, 0,06 %, fato também ocorrido com a ação do ácido acético. Em pesquisa realizada por Gorninski (2002), em concretos polímeros com resinas poliéster com adição de 8, 12 e 16 % de cinza volante, todos os resultados tiveram aumento de massa após os 5 ciclos de ataque por solução de ácido láctico, variando de 0,02% a 0,08%.

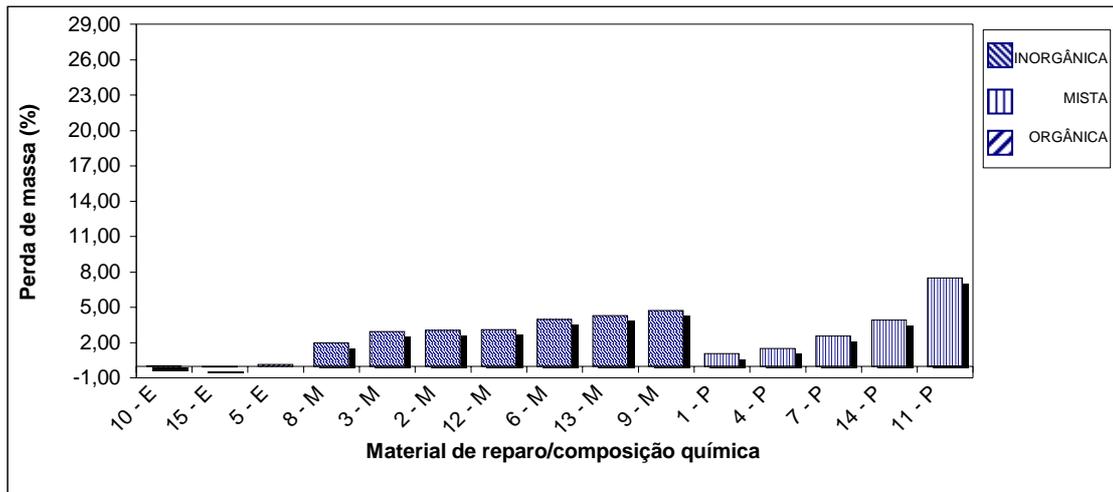


Figura 22: Perda de massa da agressão do ácido láctico nos materiais de reparo, separados pela composição dos materiais.

A média dos resultados obtidos de perda de massa no ensaio de agressão química mostrou que os materiais de base orgânica atingiram 0,03 % de perda de massa, em estudos realizados em concreto polímero com resina poliéster e adição de cinza volante, submetidos à mesma agressão, os corpos-de-prova tiveram aumento de massa, variando de 0,02 a 0,08% (GORNINSKI, 2002). Os materiais de base inorgânica apresentaram 3,43 % e os de base mista 3,30 % de perda de massa. Em estudo realizado em concretos com adição de 9 % de sílica ativa e relação água/cimento de 0,59 (KULAKOWSKI et al, 1997), quando submetido a este tipo de agressão ácida, a perda de massa foi de 17,00 %.

A solução do ácido láctico, inicialmente incolor, com o início da reação criou bactérias que ficaram aderidas aos materiais, com dificuldade de remoção, e a solução adquiriu uma tonalidade amarelada.

Após a ruptura dos corpos-de-prova, observou-se uma camada superficial agredida pela solução, variando de 0 a 0,25 mm.

As figuras 23 a 37 mostram a diferença do aspecto dos corpos-de-prova submetidos ao ataque da solução de ácido láctico, após os 5 ciclos de imersão, em relação aos corpos-de-prova de referência, sem sofrerem qualquer tipo de ataque. O primeiro cp é o de referência e os dois abaixo são os que sofreram o ataque pela solução de ácido láctico.



Figura 23: Aspecto dos cp's do material "1 – P", base mista, fabricante A, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Os cp's submetidos ao ataque do ácido láctico inicialmente tiveram incremento de massa, a partir do 3º ciclo de agressão ácida foi observada a redução da massa. Este material foi o que obteve menor perda de massa, em relação ao ataque do ácido láctico



Figura 24: Aspecto dos cp's do material "2 – M", base inorgânica, fabricante A, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Observou-se que nos primeiros ciclos de agressão houve aumento de massa, somente a partir do 3º ciclo a perda de massa foi verificada, atingindo 3,04% ao final do ensaio.



Figura 25: Aspecto dos cp's do material "3 – M", base inorgânica, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. No 1º ciclo de agressão houve incremento de massa. A partir do 2º ciclo o material foi perdendo a camada superficial, deixando os agregados maiores visíveis.



Figura 26: Aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Este material teve boa resistência ao ataque da solução do ácido láctico, atingindo apenas 1,51 % de perda de massa ao final dos 5 ciclos de agressão



Figura 27: Aspecto dos cp's do material "5 – E", base orgânica, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Este material manteve-se íntegro ao longo dos 5 ciclos de agressão, alterando apenas sua coloração.



Figura 28: Aspecto dos cp's do material "6 – M", base inorgânica, fabricante C, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Inicialmente este material teve aumento de massa, a partir do 3º ciclo verificou-se a redução da seção dos cp's.

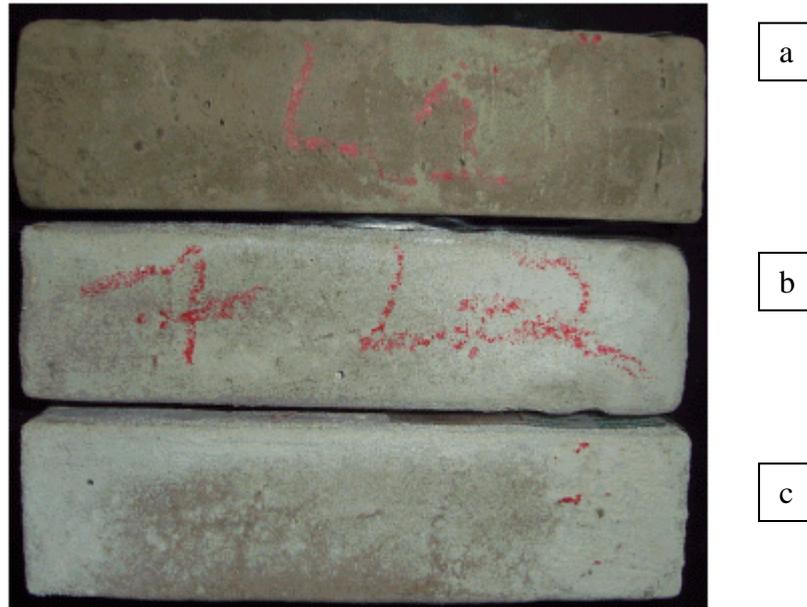


Figura 29: Aspecto dos cp's do material "7 - P", base mista, fabricante C, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Observa-se a remoção da camada superficial do material, isto ocorreu a partir do 3º ciclo.



Figura 30: Aspecto dos cp's do material "8 - M", base inorgânica, fabricante C, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Este material foi o que obteve menor perda de massa, quanto à agressão do ácido láctico, comparando com os materiais de mesma composição química.



Figura 31: Aspecto dos cp's do material "9 – M", base inorgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Este material foi o que obteve maior perda de massa, quanto à agressão do ácido láctico, comparando com os materiais de mesma composição química.



Figura 32: Aspecto dos cp's do material "10 – E", base orgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Percebe-se a integridade dos cp's após os 5 ciclos de agressão ácida.

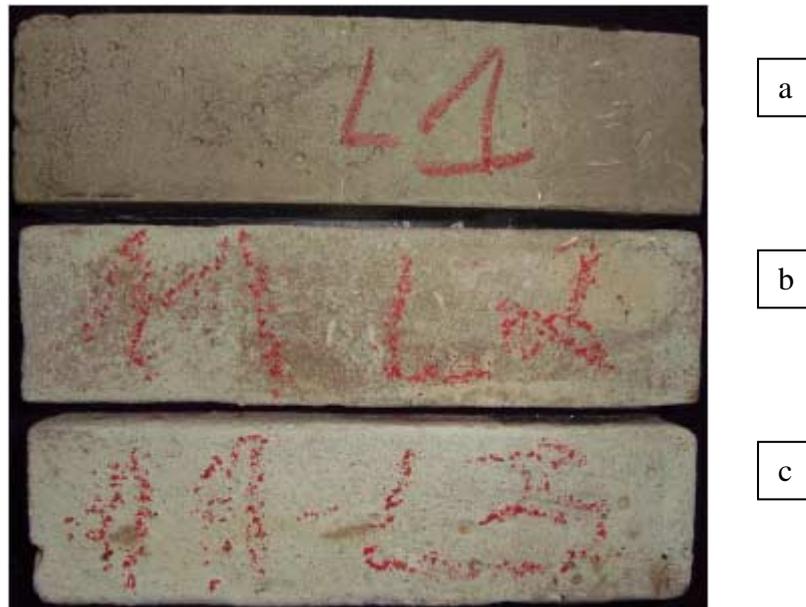


Figura 33: Aspecto dos cp's do material "11 – P", base mista, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Este material foi o que obteve maior perda de massa, quanto aos materiais de base mista, atingindo 7,46%.



Figura 34: Aspecto dos cp's do material "12 – M", base inorgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Observa-se a perda da camada superficial dos cp's ficando os agregados maiores expostos.



Figura 35: Aspecto dos cp's do material “13 – M”, base inorgânica, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Percebe-se a exposição dos agregados maiores nos cp's submetidos ao ataque da solução ácida, a camada superficial foi removida devido ao ataque da solução de ácido láctico.



Figura 36: Aspecto dos cp's do material “14 – P”, base mista, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Percebe-se ainda a existência da camada superficial notando-se o aparecimento superficial dos agregados maiores.



Figura 37: Aspecto dos cp's do material “**15 – E**”, base orgânica, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido láctico. Este material manteve-se íntegro ao longo dos 5 ciclos de agressão, alterando apenas sua coloração.

5.1.3 Ácido sulfúrico

Foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada um dos 15 materiais testados, o que totalizou 30 cp's. A tabela 11 mostra os dados obtidos referentes ao ensaio de perda de massa para o ácido sulfúrico.

Tabela 11: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa (g) - ácido sulfúrico

CP		Massa inicial	Massa ao final dos ciclos (g)					Perda de massa total	
Material	Nº		1	2	3	4	5	(g)	(%)
1 – P	1	523,90	515,40	501,20	489,40	447,00	431,60	92,30	17,62
	2	520,00	512,40	486,30	473,60	432,20	416,20	103,80	19,96
2 – M	1	561,20	558,90	556,80	552,90	541,10	527,20	34,00	6,06
	2	583,10	586,10	580,10	576,90	568,70	556,90	26,20	4,49
3 – M	1	571,10	565,10	550,30	523,30	493,90	454,50	116,60	20,42
	2	571,90	566,10	545,60	525,80	496,70	452,50	119,40	20,88
4 – P	1	583,40	574,90	570,00	558,20	552,40	533,80	49,60	8,50
	2	572,10	566,30	562,80	548,00	543,80	521,20	50,90	8,90
5 – E	1	526,70	526,30	526,30	526,30	526,50	526,60	0,10	0,02
	2	537,10	536,90	536,70	536,70	537,00	537,10	0,00	0,00
6 – M	1	541,10	541,50	538,50	507,90	498,90	493,70	47,40	8,76
	2	539,00	540,50	538,00	510,80	508,70	502,60	36,40	6,75
7 – P	1	504,30	494,10	478,60	430,50	409,60	400,70	103,60	20,54
	2	496,10	485,90	468,60	420,10	399,20	391,30	104,80	21,12
8 – M	1	607,30	609,10	604,40	576,70	561,10	551,60	55,70	9,17
	2	612,50	608,70	603,30	580,40	556,30	548,10	64,40	10,51
9 – M	1	569,30	564,60	547,10	524,70	496,70	488,10	81,20	14,26
	2	565,90	563,70	544,50	525,30	495,00	489,20	76,70	13,55
10 – E	1	499,40	498,90	498,90	498,90	499,00	499,10	0,30	0,06
	2	500,20	499,80	499,80	499,80	500,10	500,20	0,00	0,00
11 – P	1	517,10	511,40	504,80	498,70	493,20	489,40	27,70	5,35
	2	516,50	504,30	500,60	491,60	495,40	492,60	23,90	4,63
12 – M	1	563,00	557,00	541,40	509,00	494,10	489,50	73,50	13,06
	2	563,60	562,60	549,80	526,10	515,20	508,50	55,10	9,78
13 – M	1	589,60	589,30	568,20	553,50	533,70	487,40	102,20	17,33
	2	588,80	587,50	565,40	548,10	528,00	475,60	113,20	19,23
14 – P	1	554,00	551,30	516,90	497,80	475,20	411,90	142,10	25,65
	2	557,40	549,80	515,70	505,20	477,70	418,70	138,70	24,88
15 – E	1	554,10	555,00	555,20	555,40	556,10	556,80	-2,70	-0,49
	2	555,10	555,70	556,50	556,50	557,20	557,90	-2,80	-0,50

(valores negativos aumento de massa).

A tabela 12 apresenta um resumo dos dados obtidos, com média, desvio-padrão e coeficiente de variação da perda de massa total para cada material testado.

Tabela 12: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa - ácido sulfúrico - parâmetros estatísticos

Material	Média (%)	Desv. Padrão	Coef. de variação
1 – P	18,79	1,17	0,06
2 – M	5,28	0,78	0,15
3 – M	20,65	0,23	0,01
4 – P	8,70	0,20	0,02
5 – E	0,01	0,01	1,00
6 – M	7,76	1,00	0,13
7 – P	20,83	0,29	0,01
8 – M	9,84	0,67	0,07
9 – M	13,91	0,35	0,03
10 – E	0,03	0,03	1,00
11 – P	4,99	0,36	0,07
12 – M	11,42	1,64	0,14
13 – M	18,28	0,95	0,05
14 – P	25,27	0,38	0,02
15 – E	-0,50	0,01	0,02

(valores negativos aumento de massa).

A tabela 13 mostra os resultados dos ensaios de perda de massa quanto ao ataque do ácido sulfúrico, classificando os materiais de reparo por composição química similar.

Tabela 13: Resultado dos ensaios de agressão química - perda de massa – ácido sulfúrico – composições químicas dos materiais de reparo

Composição Química / Material (Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (%)	Média (%)	Média (%)
5 - E- B			0,01
10 - E- D			0,03
15 - E- E			-0,50
2 - M- A	5,28		
6 - M- C	7,76		
8 - M- C	9,84		
12 - M- D	11,42		
9 - M- D	13,91		
13 - M- E	18,28		
3 - M- B	20,65		
11 - P- D		4,99	
4 - P- B		8,70	
1 - P- A		18,79	
7 - P- C		20,83	
14 - P- E		25,27	

(valores negativos aumento de massa).

Conforme se observa nos resultados dos ensaios, a solução de ácido sulfúrico foi a mais agressiva aos materiais de base inorgânica e mista. Pode-se verificar, na tabela 11, a grande perda de massa de um ciclo de agressão para o outro. No caso da argamassa “14 – P” a perda de massa atingiu mais de 25 % da massa inicial ao final dos ensaios. A argamassa “7 – P”, também de base cimentícia e modificada com polímeros, totalizou quase 21 % de perda de massa.

Observa-se que a média dos valores obtidos dos materiais de base orgânica resultou em 0,15 % de aumento de massa. Os materiais de base mista foram os que perderam mais massa, 15,72 %, e os materiais de base inorgânica 12,44 %. Nos ensaios de agressão química por solução de ácido sulfúrico, realizado por Kulakowski et al, (1997), em concreto com 9 % de adição de sílica ativa e relação água/cimento de 0,59, a perda de massa foi de 32,30 %. Nos ensaios realizados por Cassal, (2000), em concretos com 9 % de adição de cinza de casca de arroz e relação água/cimento de 0,60, os valores de perda de massa foram de 26,20%, mostrando que qualquer dos materiais de reparo ensaiados tiveram desempenho bastante superior ao dos concretos convencionais com adição de superpozolanas. Nos ensaios realizados por Gorninski (2002), em concretos polímeros com adição de 8% e 20 % de cinza

volante, os resultados mostraram perda de massa de 0,02 % e 0,04 % e concretos polímeros com adições de 12 % e 16 % houve acréscimo de massa de 0,02 % e 0,04 %, respectivamente.

A figura 38 ilustra a agressão do ácido sulfúrico para os 3 tipos de materiais testados.

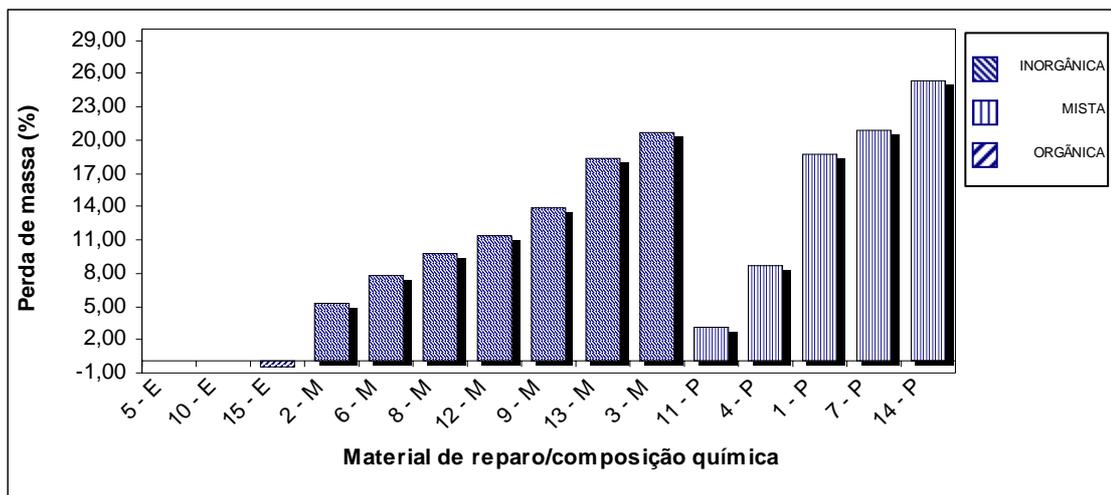


Figura 38: Perda de massa da agressão do ácido sulfúrico nos materiais de reparo, separados pela composição dos materiais.

O material removido dos corpos-de-prova se apresentava em forma de uma pasta mais clara que a argamassa original. As camadas de corrosão se apresentaram com espessuras variando entre 0 a 3 mm.

Observou-se a ocorrência do lascamento das arestas dos corpos-de-prova. Esta manifestação é típica do ataque por sulfatos, teoricamente consiste no início do processo de degradação.

Os materiais de base orgânica tiveram o mesmo comportamento que nos ataques dos ácidos acético e láctico, isto é, as argamassas “5 – E” e “10 – E”, tiveram uma perda de massa de valor irrisório, considerando-se desprezível, e a argamassa “15 – E” obteve ganho de massa. O aspecto destes corpos-de-prova foi alterado no que diz respeito à coloração.

Verificou-se que a perda de massa foi menor nos materiais com mais porosidade. Esse fato pode ser explicado, segundo Mehta e Monteiro (1994), onde a maior porosidade absorve melhor os efeitos das tensões internas geradas pela formação de compostos expansivos que ocorre durante o ataque por ácido sulfúrico. Em concretos onde a porosidade é menor, devido à relação a/c mais baixa, as tensões provocadas pela formação de produtos expansivos da reação dos íons sulfato com produtos de hidratação do cimento causam fissuração interna que

provoca perda de massa. No momento em que os espaços vazios são preenchidos pelos produtos expansivos, surgem tensões que provocarão uma fissuração provavelmente muito maior que aqueles com relação a/c menores, fato comprovado nos estudos apresentados por Bretanha (2000).

Comparando-se materiais de composições similares de diferentes fabricantes, os resultados surpreenderam, pois as argamassas de base mista dos fabricantes “A” e “C” ultrapassaram em 100% de perda de massa em relação às argamassas sem adição de polímeros. O mesmo ocorreu para o fabricante “E”, na qual a argamassa “14 – P” também obteve maior perda de massa que os materiais de composição inorgânica. Inclusive é importante observar que esta argamassa contém em sua composição fibras sintéticas.

As figuras 39 a 53 mostram a diferença do aspecto dos corpos-de-prova submetidos ao ataque da solução de ácido sulfúrico, após os 5 ciclos de imersão com relação aos corpos-de-prova de referência, que não sofreram ataque químico.



Figura 39: Aspecto dos cp's do material “1 – P”, base mista, fabricante A, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Percebe-se a redução da seção dos cp's submetidos ao ataque da solução do ácido sulfúrico, sendo removida a camada superficial e observando-se a exposição dos agregados maiores.



Figura 40: Aspecto dos cp's do material "2 – M", base inorgânica, fabricante A, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Este material foi o que obteve menor perda de massa, quanto aos materiais de composição inorgânica, sendo 5,28 %.



Figura 41: Aspecto dos cp's do material "3 – M", base inorgânica, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Observa-se a redução da seção dos cp's submetidos à agressão ácida. Este foi o material de base inorgânica que teve maior perda de massa, ultrapassando 20 % da massa inicial.



Figura 42: Aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Percebe-se a redução da seção dos cp's e o lascamento das arestas.



Figura 43: Aspecto dos cp's do material "5 – E", base orgânica, fabricante B, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Os cp's submetidos ao ataque ácido mantiveram-se íntegros ao longo dos 5 ciclos de agressão ácida.



Figura 44: Aspecto dos cp's do material "6 – M", base inorgânica, fabricante C, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Percebe-se a redução da seção dos cp's, a perda da camada superficial e o lascamento das arestas.

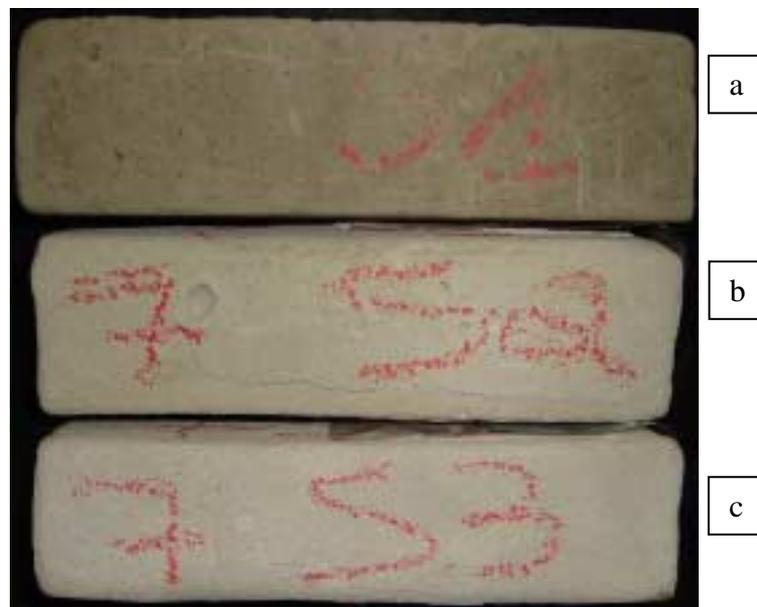


Figura 45: Aspecto dos cp's do material "7 – P", base mista, fabricante C, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Observa-se a redução da seção dos cp's submetidos à solução do ácido sulfúrico. Este material teve perda de massa maior que 20% da massa inicial.



Figura 46: Aspecto dos cp's do material "8 – M", base inorgânica, fabricante C, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Percebe-se a remoção da camada superficial, ficando os agregados maiores expostos.



Figura 47: Aspecto dos cp's do material "9 – M", base inorgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Verifica-se a redução da seção dos cp's e a exposição dos agregados maiores.



Figura 48: Aspecto dos cp's do material “10 – E”, base orgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Este material manteve-se íntegro ao longo dos 5 ciclos de agressão ácida.



Figura 49: Aspecto dos cp's do material “11 – P”, base mista, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Este material foi o que obteve menor perda de massa , comparados com os materiais de composição similar, atingindo 4,99%.



Figura 50: Aspecto dos cp's do material "12 – M", base inorgânica, fabricante D, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Verifica-se a redução da seção dos cp's e a exposição dos agregados maiores.



Figura 51: Aspecto dos cp's do material "13 – M", base inorgânica, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Percebe-se a grande perda de massa pela redução da seção dos cp's submetidos ao ácido sulfúrico. Este material atingiu na média 18,28% de perda de massa.



Figura 52: Aspecto dos cp's do material "14 – P", base mista, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Observa-se a deterioração dos cp's agredidos pela solução ácida. Este material foi o material de base mista que obteve maior perda de massa, 25,27%.



Figura 53: Aspecto dos cp's do material "15 – E", base orgânica, fabricante E, (a) sem ataque e (b, c) submetidos à solução de ácido sulfúrico. Percebe-se a integridade dos cp's submetidos ao ataque ácido, alterando apenas sua coloração.

5.1.4 Análise estatística dos resultados

Foi realizada uma análise de variância, a fim de averiguar isoladamente a influência das variáveis investigadas (tipo de composição química dos materiais, tipo de agressão química e fabricante de cada material) sobre o desempenho dos materiais de reparo, bem como a existência de possíveis interações entre fatores, material de reparo, tipo de ácido, fabricante dos materiais. Os resultados desta análise encontram-se sumarizados na tabela 13.

A técnica da análise de variância permite comparar grupos de observações através da comparação da variabilidade das médias entre os diferentes grupos com a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI; RIBEIRO, 1992).

Através do parâmetro F calculado, pode-se verificar o efeito da variação dos ácidos, dos materiais ou da interação entre estes e com o fabricante de cada material. 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 x genérico, $F_{\text{calculado}} = MQ_{\text{fator x}} / MQ_{\text{erro}}$ (RIBEIRO, 1995).

Através de “p” pode-se obter a significância dos fatores ou da interação entre os mesmos. Se “p” é menor que 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 (RIBEIRO, 1995).

A tabela 14 mostra a análise de variância dos resultados obtidos dos ensaios de perda de massa, onde o valor de “p” menor que 0,05 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa com um nível de confiança de 95%.

Tabela 14: Análise de variância para perda de massa, em função do ácido, material e fabricante.

Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F _{calculado}	p	Significância
ácido	2	810,61	405,305	183,33	<0,0001	S
material	2	881,34	440,67	199,33	<0,0001	S
material x ácido	4	325,48	81,37	36,81	<0,0001	S
fabricante (material)	6	280,16	28,016	12,67	<0,0001	S
fabricante x ácido (material)	20	1041,22	52,061	23,55	<0,0001	S
erro	51	112,75	2,210784			
total	89	3707,61				

Onde:

MQ = média quadrada

SQ = Soma quadrada

GL = graus de liberdade

F = valor calculado de F

S = Efeito significativo

Através da análise estatística mostrada na tabela 13, observa-se que as fontes de variação isoladas e as interações entre as mesmas apresentam significância sobre a perda de massa.

A figura 54 ilustra o efeito isolado do tipo de ácido em relação à perda de massa.

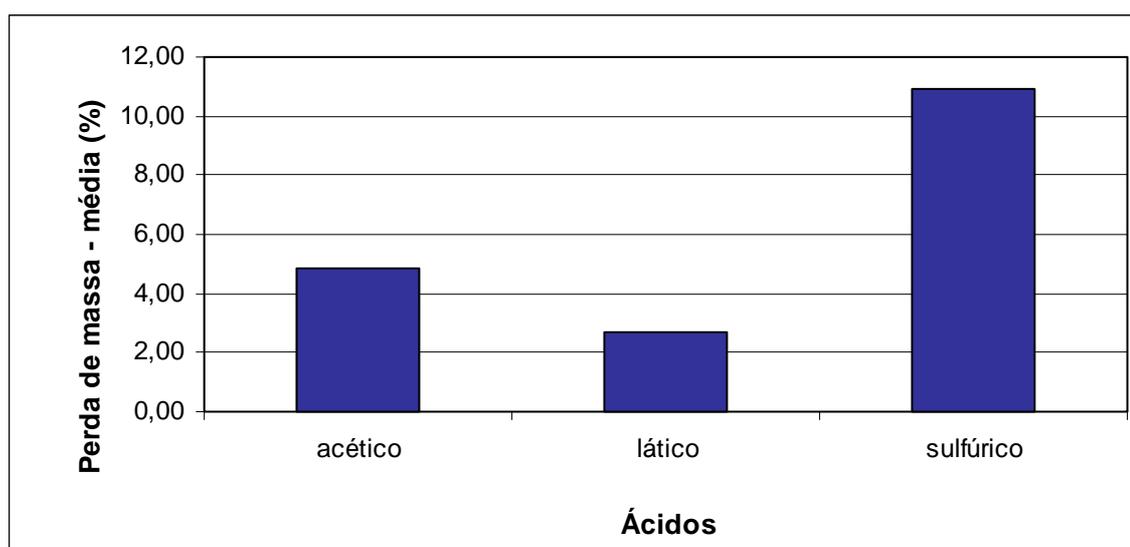


Figura 54: efeito isolado do tipo de ácido em relação à perda de massa

Observa-se claramente que o ácido sulfúrico é o ácido mais agressivo aos materiais de reparo analisados, seguido do ácido acético. O ácido lático foi o que se mostrou menos intenso na agressão aos materiais, em relação à perda de massa, atingindo na média somente 2,72%.

A figura 55 ilustra o efeito isolado do tipo de material em relação à perda de massa.

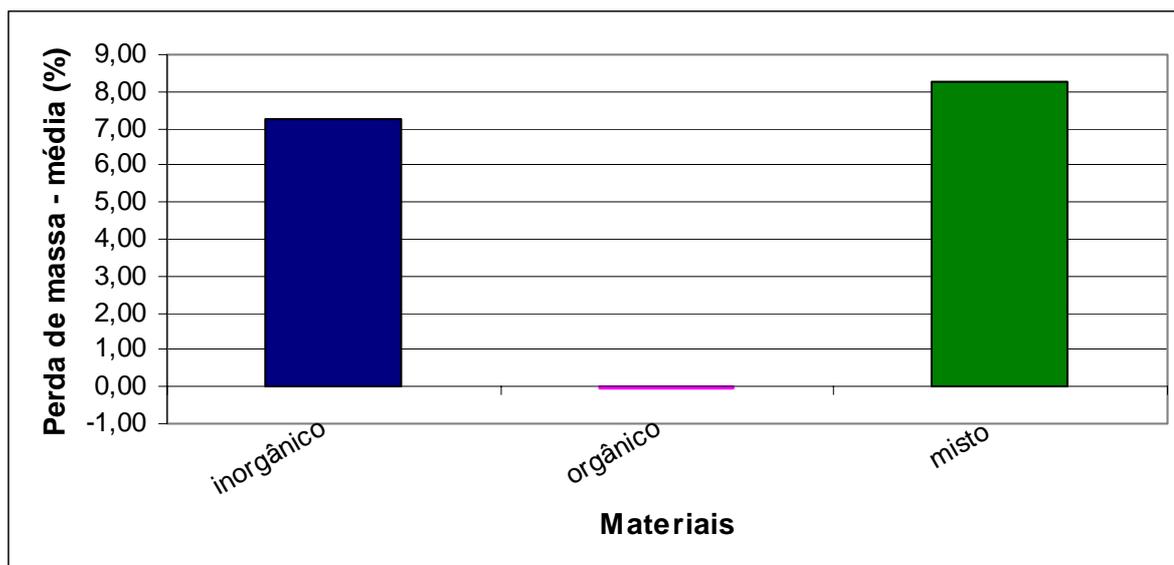


Figura 55: efeito isolado do tipo de material em relação à perda de massa

Os materiais de base orgânica foram os que tiveram menor valor de perda de massa, menos que 0,05%, isto é, mostraram-se mais resistentes ao ataque ácido do que os materiais de base inorgânica e mista, os quais tiveram comportamento similar, sendo os materiais de base mista menos resistente ainda à agressão ácida.

A figura 56 ilustra o efeito da interação do tipo de ácido e do tipo de material, em relação à perda de massa.

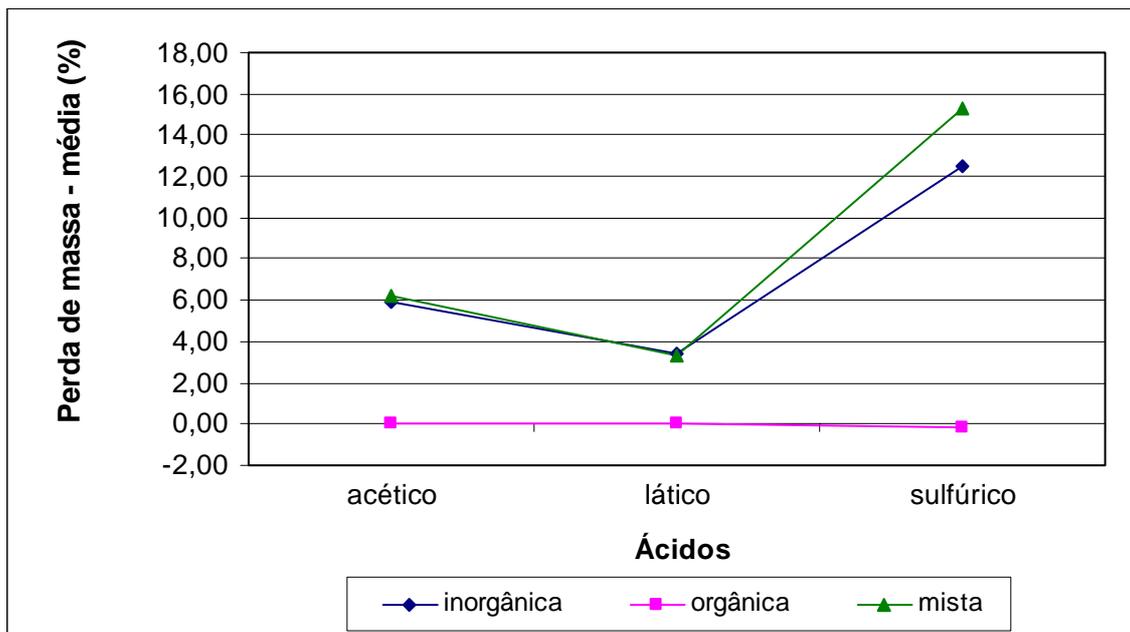


Figura 56: efeito da interação do tipo de ácido e do tipo de material em relação à perda de massa

Nota-se o efeito significativo da interação dos materiais com os ácidos, dependendo da composição química de cada material, os ácidos atacam de forma diferenciada, ou seja, para os materiais de base orgânica não existe influência do tipo de ácido, enquanto para os materiais de base inorgânica e mista ocorre variações na perda de massa, dependendo do ácido em questão, sendo a solução de ácido sulfúrico mais agressiva, atingindo 15,72 % de perda de massa para os materiais de base mista e 12,44 % para os materiais de base inorgânica.

A figura 57 mostra o efeito da interação do fabricante e do tipo de material

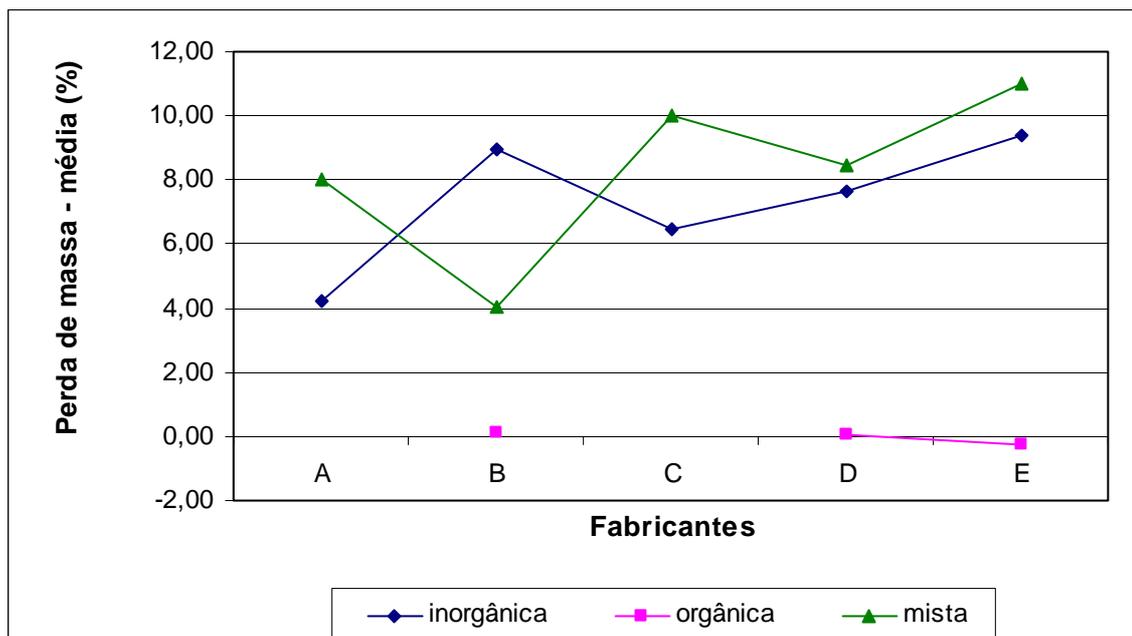


Figura 57: efeito da interação do fabricante e do tipo de material em relação à perda de massa

A figura 57 mostra que há interação entre os materiais e os fabricantes, pois dependendo do fabricante, os materiais de mesma base atuam de forma diferenciada, com exceção dos materiais de base orgânica.

Observa-se que o material de base inorgânica, do fabricante B, teve desempenho inferior ao material de mesma base dos fabricantes A, C e D e superior ao fabricante E. Os materiais de base mista também tiveram comportamentos diversos, variando de acordo com o fabricante.

A figura 58 mostra o efeito da interação do fabricante, tipo de material e do tipo de agressão ácida.

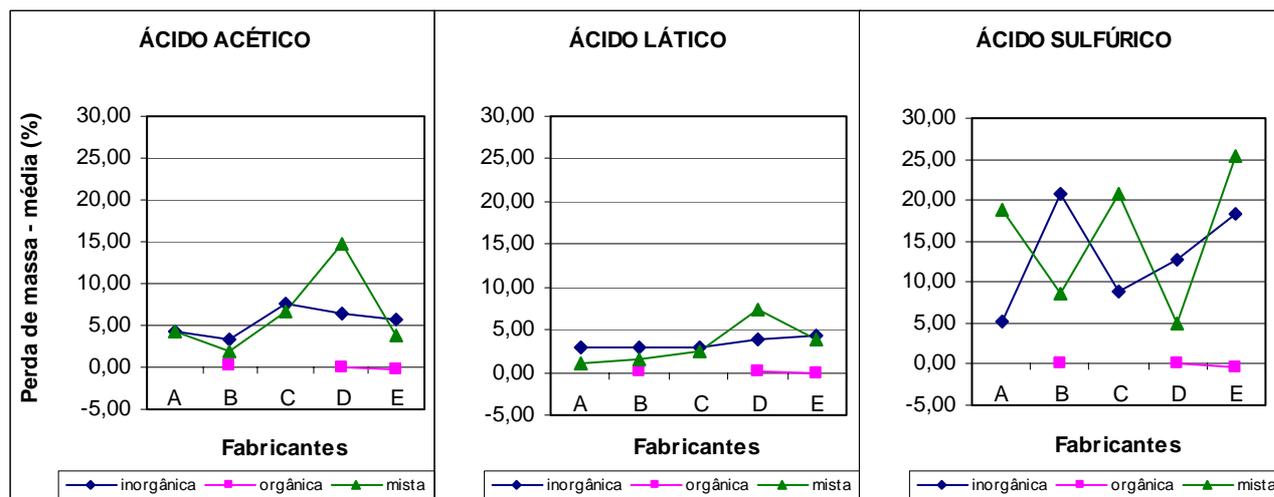


Figura 58: efeito da interação do fabricante, tipo de material e do tipo de agressão ácida, em relação à perda de massa.

Nesta interação pode-se verificar que o ataque de cada solução ácida atua de forma diferente nos materiais, pois dependendo do tipo de ácido, da composição química dos materiais e do fabricante, o comportamento varia. Os materiais de base mista têm comportamentos muito diferentes à medida que altera o fabricante e o tipo de agressão, por exemplo, o material de base mista do fabricante D obteve perda de massa de 14,75 % para a solução do ácido acético, enquanto que para o ataque do ácido sulfúrico, a perda de massa foi 4,99 %. O material de base mista do fabricante E obteve perda de massa de 3,79 % quando submetido ao ataque do ácido acético e ultrapassou os 25 % de perda de massa quando submetido ao ataque do ácido sulfúrico.

As figuras 59 a 73 mostram os corpos-de-prova agredidos pelas 3 soluções ácidas comparados com os corpos-de-prova de referência. Cada figura está disposta da seguinte maneira: o primeiro cp é o de referência, e está posicionado na parte superior da figura, seguidos por 2 cp's agredidos pelo ácido sulfúrico, 2 cp's agredidos pelo ácido acético e 2 cp's agredidos pelo ácido láctico.

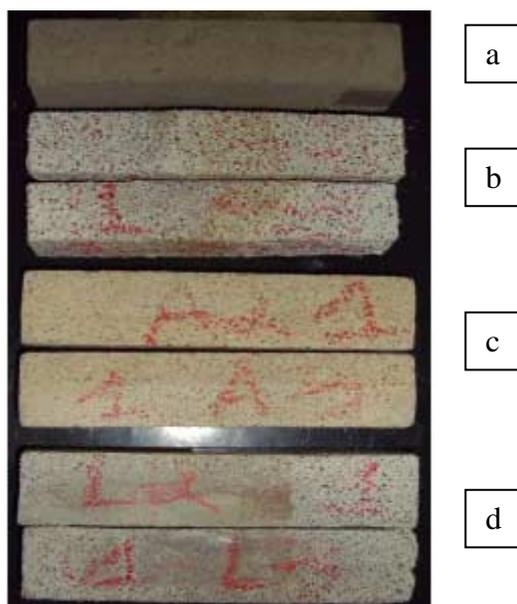


Figura 59: Aspecto dos cp's do material “1 – P”, base mista, fabricante A, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico

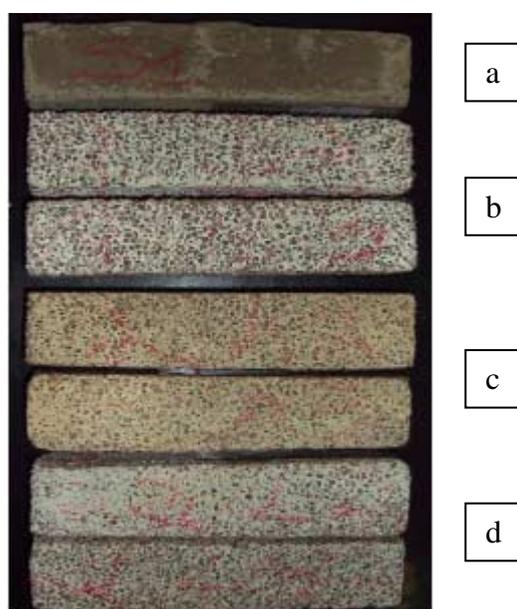


Figura 60: Aspecto dos cp's do material “2 – M”, base inorgânica, fabricante A, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico

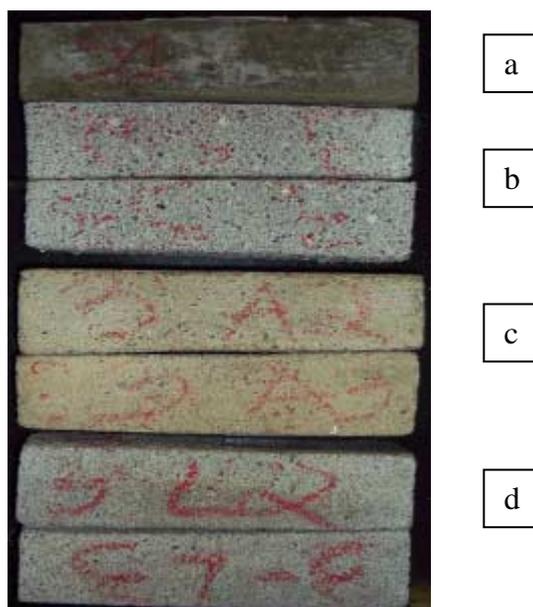


Figura 61: Aspecto dos cp's do material "3 – M", base inorgânica, fabricante B, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

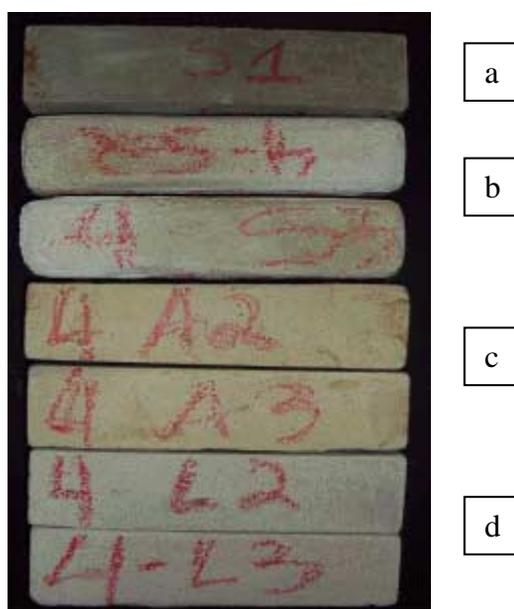


Figura 62: Aspecto dos cp's do material "4 – P", base mista, fabricante B, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

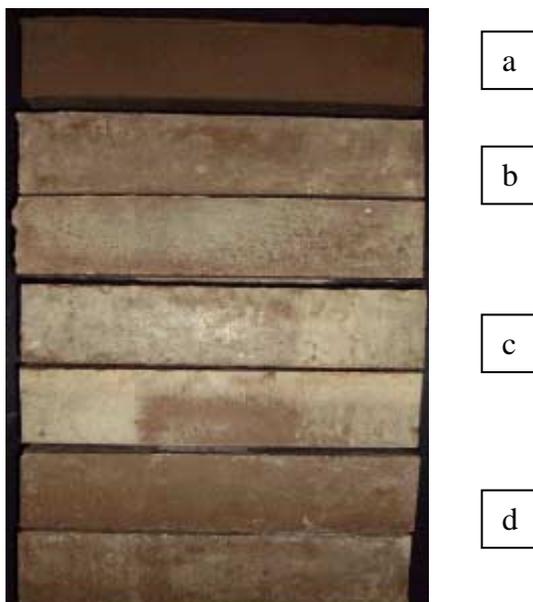


Figura 63: Aspecto dos cp's do material “5 – E”, base orgânica, fabricante B, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.



Figura 64: Aspecto dos cp's do material “6 – M”, base inorgânica, fabricante C, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

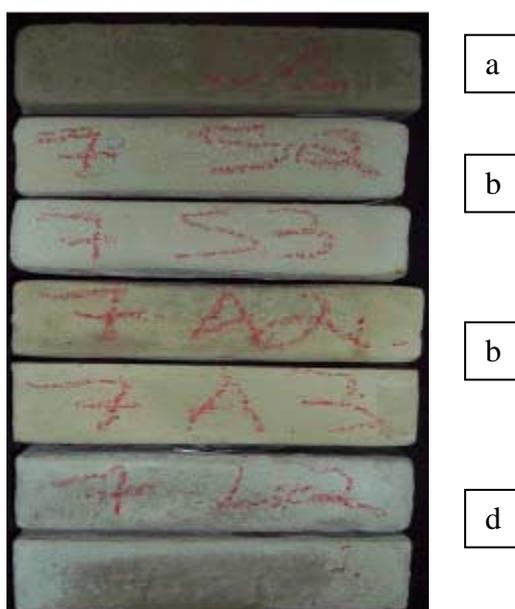


Figura 65: Aspecto dos cp's do material "7 - P", base mista, fabricante C, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

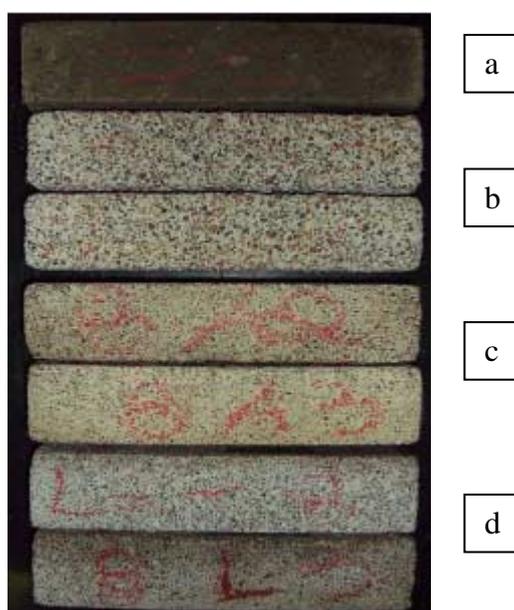


Figura 66: Aspecto dos cp's do material "8 - M", base inorgânica, fabricante C, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

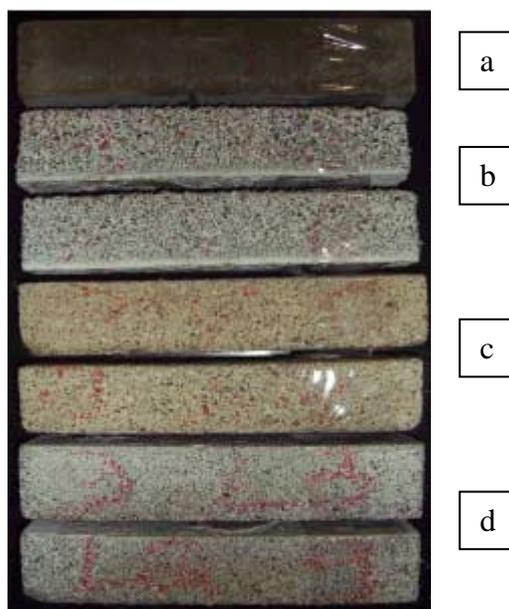


Figura 67: Aspecto dos cp's do material "9 - M", base inorgânica, fabricante D, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

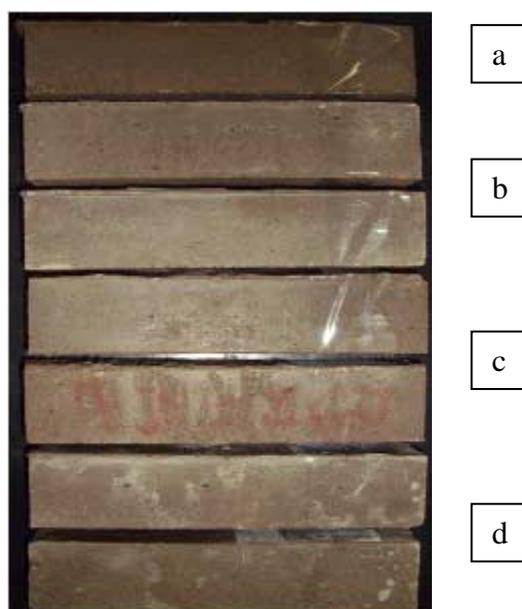


Figura 68: Aspecto dos cp's do material "10 - E", base orgânica, fabricante D, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

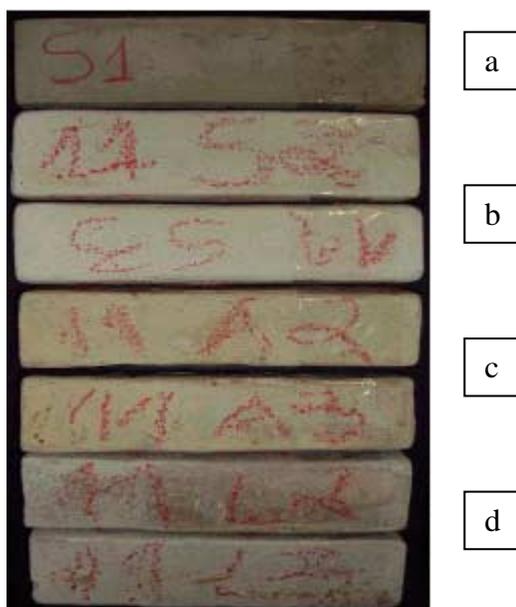


Figura 69: Aspecto dos cp's do material “11 – P”, base mista, fabricante D, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

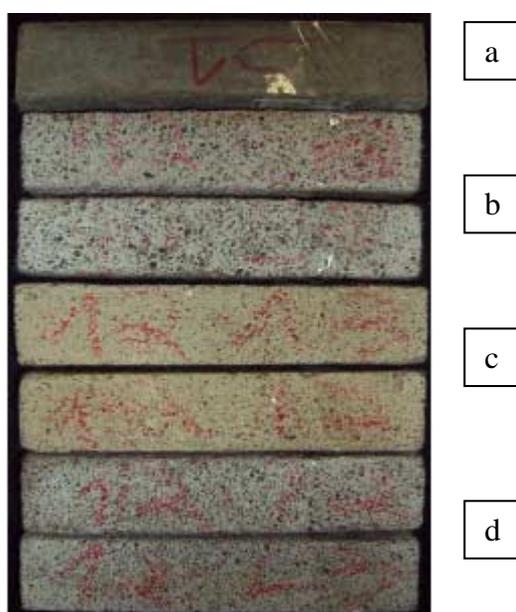


Figura 70: Aspecto dos cp's do material “12 – M”, base inorgânica, fabricante D, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

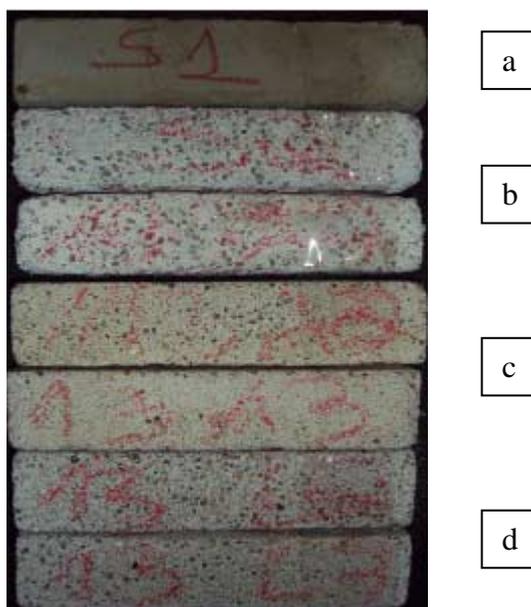


Figura 71: Aspecto dos cp's do material "13 – M", base inorgânica, fabricante E, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

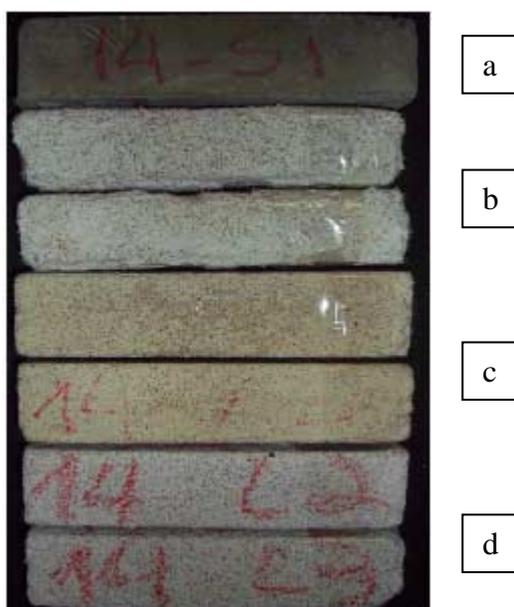


Figura 72: Aspecto dos cp's do material "14 – P", base mista, fabricante E, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

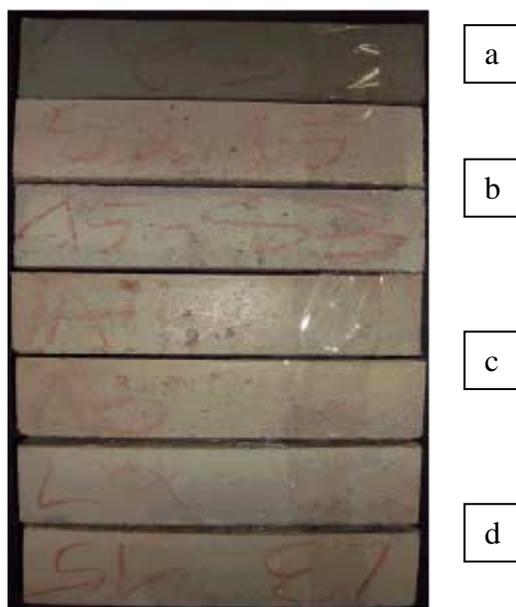


Figura 73: Aspecto dos cp's do material “15 – E”, base orgânica, fabricante E, (a) referência sem agressão, (b) submetido ao ácido sulfúrico, (c) submetidos ao ácido acético, (d) submetidos ao ácido láctico.

5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Foram ensaiados os 2 corpos-de-prova submetidos ao ensaio de perda de massa e mais 3 corpos-de-prova que serviram como referência para cada material. A seguir serão apresentados os resultados.

Os resultados destes ensaios servem como referência para comparação com os resultados que foram gerados no ensaio de ataque químico, já que os resultados obtidos nestes ensaios foram dos cp's agredidos pelas soluções ácidas.

5.2.1 Corpos-de-prova de referência

Nas tabelas 15, 16, 17 estão apresentados os resultados dos ensaios dos corpos-de-prova de referência submetidos ao ensaio de tração na flexão.

Tabela 15: Resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão – cp's de referência (MPa)

CP		Resistência à tração na flexão (MPa)	CP		Resistência à tração na flexão (MPa)
Material	Nº		Material	Nº	
1 – P	1	6,60	9 – M	1	7,95
	2	5,50		2	7,85
	3	7,85		3	8,70
2 – M	1	7,50	10 – E	1	26,85
	2	8,65		2	30,55
	3	6,90		3	26,10
3 – M	1	7,30	11 – P	1	10,25
	2	6,20		2	8,00
	3	6,35		3	9,60
4 – P	1	7,90	12 – M	1	7,10
	2	8,10		2	9,90
	3	11,70		3	8,25
5 – E	1	41,60	13 – M	1	8,55
	2	41,65		2	8,10
	3	41,40		3	8,45
6 – M	1	8,33	14 – P	1	10,55
	2	7,05		2	13,50
	3	7,50		3	9,60
7 – P	1	9,20	15 – E	1	28,40
	2	8,45		2	27,70
	3	7,00		3	26,40
8 – M	1	7,85			
	2	7,10			
	3	6,40			

Tabela 16: Resistência à tração na flexão - Parâmetros estatísticos

Material	Média (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. de variação
1 – P	6,65	0,96	0,14
2 – M	7,68	0,73	0,09
3 – M	6,62	0,49	0,07
4 – P	9,23	1,75	0,19
5 – E	41,55	0,11	0,00
6 – M	7,63	0,53	0,07
7 – P	8,22	0,91	0,11
8 – M	7,12	0,59	0,08
9 – M	8,17	0,38	0,05
10 – E	27,83	1,95	0,07
11 – P	9,28	0,95	0,10
12 – M	8,42	1,15	0,14
13 – M	8,37	0,19	0,02
14 – P	11,22	1,66	0,15
15 – E	27,50	0,83	0,03

Tabela 17: Resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão – cp's referência – composições químicas dos materiais de reparo

Composição Química / Material Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (MPa)	Média (MPa)	Média (MPa)
15 – E– E			27,50
10 – E– D			27,83
5 – E– B			41,55
3 – M– B	6,62		
8 – M– C	7,12		
6 – M– C	7,63		
2 – M– A	7,68		
9 – M– D	8,17		
13 – M– E	8,37		
12 – M– D	8,42		
1 – P– A		6,65	
7 – P– C		8,22	
4 – P– B		9,23	
11 – P– D		9,22	
14 – P– E		11,22	

A figura 74 ilustra as resistências à tração na flexão dos cp's de referência.

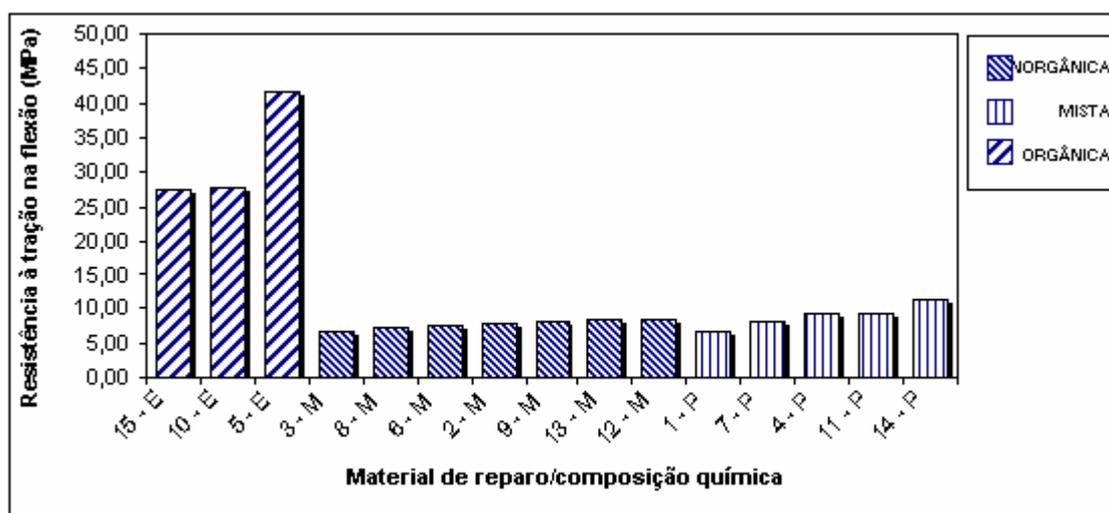


Figura 74: Resistência à tração na flexão dos cp's de referência

Verifica-se a semelhança no comportamento da resistência à tração na flexão dos materiais de base inorgânica e de base mista, com valores que variaram de 6,62 a 11,22 MPa. Os materiais de base orgânica obtiveram elevadas resistências à tração na flexão, conforme esperado, atingindo de 27,50 a 41,55 MPa.

5.2.2 Ácido acético

As tabelas 18, 19 e 20 apresentam os dados referentes ao ensaio de resistência à tração na flexão para as amostras submetidas à ação do ácido acético.

Tabela 18: Resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão após agressão em ácido acético (MPa)

CP		Resistência à tração na flexão (MPa)	CP		Resistência à tração na flexão (MPa)
Material	Nº		Material	Nº	
1 – P	1	5,65	9 – M	1	6,10
	2	4,55		2	6,55
2 – M	1	6,40	10 – E	1	26,40
	2	5,45		2	25,80
3 – M	1	7,65	11 – P	1	7,85
	2	7,30		2	4,55
4 – P	1	6,45	12 – M	1	5,55
	2	4,65		2	6,10
5 – E	1	56,60	13 – M	1	7,35
	2	42,00		2	7,00
6 – M	1	6,35	14 – P	1	7,95
	2	4,40		2	5,05
7 – P	1	6,60	15 – E	1	23,65
	2	5,55		2	27,40
8 – M	1	5,90			
	2	6,95			

Tabela 19: Resultado dos ensaios de tração na flexão após agressão em ácido acético - parâmetros estatísticos

Material	Média (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. de variação
1 – P	5,10	0,55	0,11
2 – M	5,93	0,47	0,08
3 – M	7,48	0,18	0,02
4 – P	5,55	0,90	0,16
5 – E	49,30	7,30	0,15
6 – M	5,38	0,98	0,18
7 – P	6,08	0,53	0,09
8 – M	6,43	0,52	0,08
9 – M	6,33	0,23	0,04
10 – E	26,10	0,30	0,01
11 – P	6,20	1,65	0,27
12 – M	5,83	0,28	0,05
13 – M	7,18	0,18	0,02
14 – P	6,50	1,45	0,22
15 – E	25,53	1,88	0,07

Tabela 20: Resultado dos ensaios de tração na flexão após agressão em ácido acético – composições químicas dos materiais de reparo

Composição Química / Material (Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (MPa)	Média (MPa)	Média (MPa)
15 – E– E			25,53
10 – E– D			26,10
5 – E– B			49,30
6 – M– C	5,38		
12 – M– D	5,83		
2 – M– A	5,93		
9 – M– D	6,33		
6 – M– C	6,43		
13 – M– E	7,18		
3 – M– B	7,48		
1 – P– A		5,10	
4 – P– B		5,55	
7 – P– C		6,08	
11 – P– D		6,20	
14 – P– E		6,50	

A figura 75 mostra claramente a diferença dos valores obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão dos cp's submetidos ao ataque da solução do ácido acético, para cada tipo de material.

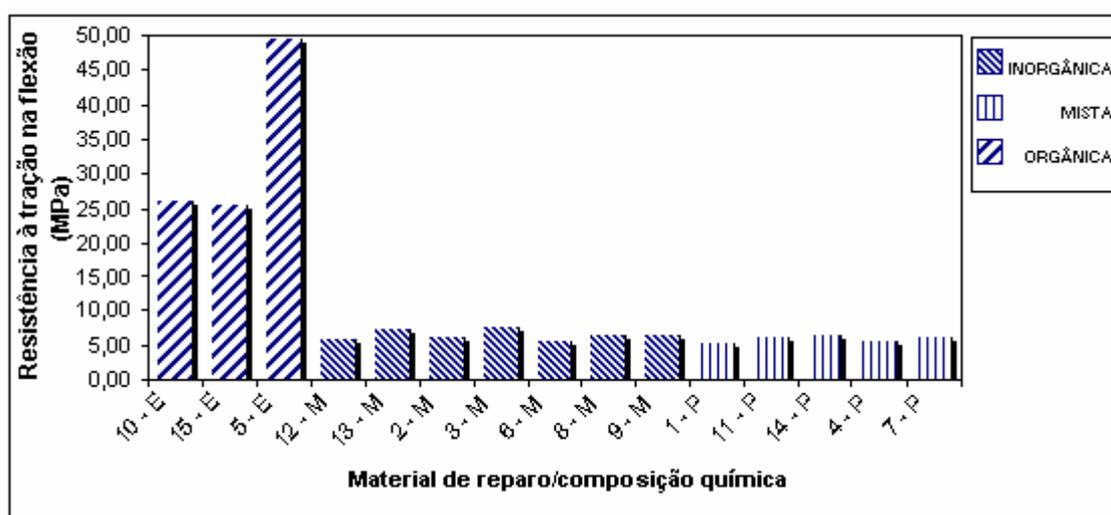


Figura 75: Resistência à tração na flexão dos cp's agredidos pelo ácido acético

Analisando-se os valores de resistência à tração na flexão dos cp's submetidos à solução do ácido acético, nota-se a perda da resistência para os materiais de base inorgânica e base mista, 17,62 % e 33,94 %, respectivamente. Os materiais de base orgânica, de um modo geral, tiveram incremento na resistência à tração na flexão, quase 4,00%.

Os materiais de base inorgânica comportaram-se de forma coerente, o material que teve maior resistência à tração na flexão foi o que teve menor perda de massa e o material que teve menor resistência à tração na flexão foi o que obteve maior perda de massa.

O mesmo não ocorreu com os materiais de base mista e de base orgânica, os resultados de resistência à tração na flexão e de perda de massa não foram inversamente proporcionais.

5.2.3 Ácido láctico

As tabelas 21, 22 e 23 apresentam os dados referentes ao ensaio de resistência à tração na flexão para as amostras submetidas à ação do ácido láctico.

Tabela 21: Resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão após agressão em ácido láctico (MPa)

CP		Resistência à tração na flexão (MPa)	CP		Resistência à tração na flexão (MPa)
Material	Nº		Material	Nº	
1 – P	1	6,80	9 – M	1	7,05
	2	6,60		2	8,15
2 – M	1	4,90	10 – E	1	22,90
	2	6,85		2	25,90
3 – M	1	7,85	11 – P	1	6,70
	2	7,00		2	5,20
4 – P	1	4,00	12 – M	1	6,20
	2	4,60		2	5,80
5 – E	1	37,70	13 – M	1	6,45
	2	37,25		2	4,95
6 – M	1	3,30	14 – P	1	7,90
	2	2,95		2	7,65
7 – P	1	7,80	15 – E	1	29,20
	2	7,70		2	27,60
8 – M	1	6,45			
	2	5,15			

Tabela 22: Resultado dos ensaios de tração na flexão após agressão em ácido lático - parâmetros estatísticos

Material	Média (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. de variação
1 – P	6,70	0,10	0,01
2 – M	5,88	0,98	0,17
3 – M	7,43	0,43	0,06
4 – P	4,30	0,30	0,07
5 – E	37,48	0,22	0,01
6 – M	3,13	0,18	0,06
7 – P	7,75	0,05	0,01
8 – M	5,80	0,65	0,11
9 – M	7,60	0,55	0,07
10 – E	24,40	1,50	0,06
11 – P	5,95	0,75	0,13
12 – M	6,00	0,20	0,03
13 – M	5,70	0,75	0,13
14 – P	7,78	0,13	0,02
15 – E	28,40	0,80	0,03

Tabela 23: Resultado dos ensaios de tração na flexão – ácido lático – composições químicas dos materiais de reparo

Composição Química / Material (Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (MPa)	Média (MPa)	Média (MPa)
10 – E– D			24,40
15 – E– E			28,40
5 – E– B			37,48
6 – M– C	3,13		
13 – M– E	5,70		
8 – M– C	5,80		
2 – M– A	5,88		
12 – M– D	6,00		
3 – M– B	7,43		
9 – M– D	7,60		
4 – P– B		4,30	
11 – P– D		5,95	
1 – P– A		6,70	
7 – P– C		7,75	
14 – P– E		7,78	

A figura 76 mostra claramente a diferença dos valores obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão dos cp's submetidos ao ataque da solução do ácido lático. Os materiais de base inorgânica e de base mista obtiveram resistências muito próximas, e muito menores que os materiais de base epóxi.

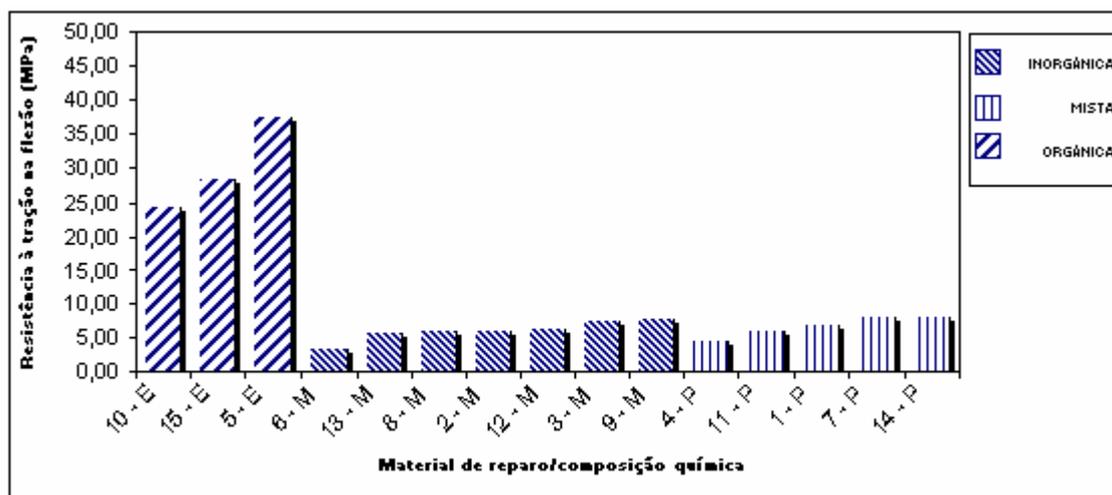


Figura 76: ilustração gráfica da resistência à tração na flexão dos cp's agredidos pelo ácido láctico

Os materiais de base mista foram os que perderam mais resistência comparando-se aos valores dos cp's de referência, atingindo 27,05 %, seguidos dos materiais de base inorgânica, que tiveram uma perda de 23,19 %. Os materiais de base orgânica tiveram uma perda de resistência à tração na flexão de 6,84 %.

5.2.4 Ácido sulfúrico

As tabelas 24, 25 e 26 apresentam os dados referentes ao ensaio de resistência à tração na flexão para as amostras submetidas à ação do ácido sulfúrico.

Tabela 24: Resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão após agressão em ácido sulfúrico (MPa)

CP		Resistência à tração na flexão (MPa)	CP		Resistência à tração na flexão (MPa)
Material	Nº		Material	Nº	
1 – P	1	7,60	9 – M	1	6,65
	2	5,65		2	7,05
2 – M	1	5,90	10 – E	1	30,40
	2	6,50		2	28,80
3 – M	1	5,45	11 – P	1	8,70
	2	5,30		2	8,05
4 – P	1	7,60	12 – M	1	5,80
	2	5,15		2	7,65
5 – E	1	41,30	13 – M	1	4,70
	2	41,15		2	5,65
6 – M	1	2,15	14 – P	1	5,45
	2	2,35		2	5,95
7 – P	1	5,55	15 – E	1	26,20
	2	4,90		2	24,95
8 – M	1	5,00			
	2	5,00			

Tabela 25: Resultado dos ensaios de tração na flexão após agressão em ácido sulfúrico - parâmetros estatísticos

Material	Média (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. de variação
1 – P	6,63	0,98	0,15
2 – M	6,20	0,30	0,05
3 – M	5,38	0,08	0,01
4 – P	6,38	1,23	0,19
5 – E	41,23	0,08	0,00
6 – M	2,25	0,10	0,04
7 – P	5,23	0,33	0,06
8 – M	5,00	0,00	0,00
9 – M	6,85	0,20	0,03
10 – E	29,60	0,80	0,03
11 – P	8,38	0,33	0,04
12 – M	6,73	0,93	0,14
13 – M	5,18	0,47	0,09
14 – P	5,70	0,25	0,04
15 – E	25,58	0,63	0,02

Tabela 26: Resultado dos ensaios de resistência à tração na flexão após agressão em ácido sulfúrico – composições químicas dos materiais de reparo

Composição Química / Material (Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (MPa)	Média (MPa)	Média (MPa)
15 – E– E			25,58
10 – E– D			29,60
5 – E– B			41,23
6 – M– C	2,25		
8 – M– C	5,00		
13 – M– E	5,18		
3 – M– B	5,38		
2 – M– A	6,20		
12 – M– D	6,73		
9 – M– D	6,85		
7 – P– C		5,23	
14 – P– E		5,70	
4 – P– B		6,38	
1 – P– A		6,63	
11 – P– D		8,38	

A figura 77 mostra claramente a diferença dos valores obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão dos cp's submetidos ao ataque da solução do ácido sulfúrico. Os materiais de base inorgânica e de base mista obtiveram resistências muito próximas, e muito menores que os materiais de base orgânica.

5.2.5 Análise estatística dos resultados

Foi realizada uma análise de estatística dos resultados obtidos, através da análise de variância, onde comprova-se a influência das resistências à tração na flexão de cada tipo de agressão ácida e composição química dos materiais e, da interação dos fatores, considerando também o fabricante de cada material. Esta análise encontra-se na tabela 27.

Tabela 27: Análise de variância para resistência à tração na flexão em função do ácido, material e fabricante.

Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F _{calculado}	p	Significância
Ácido	3	82,48	27,49	10,45	<0,0001	S
Material	2	13.333,44	6.666,72	2.534,40	<0,0001	S
material x ácido	6	59,08	9,85	3,74	0,0024	S
fabricante (material)	7	1.444,23	144,42	54,90	<0,0001	S
fabricante x ácido (material)	30	223,89	7,46	2,84	0,0001	S
erro	83	218,33	2,63			
total	134	15.896,38				

A figura 78 mostra o efeito isolado do tipo de ácido em relação à resistência à tração na flexão.

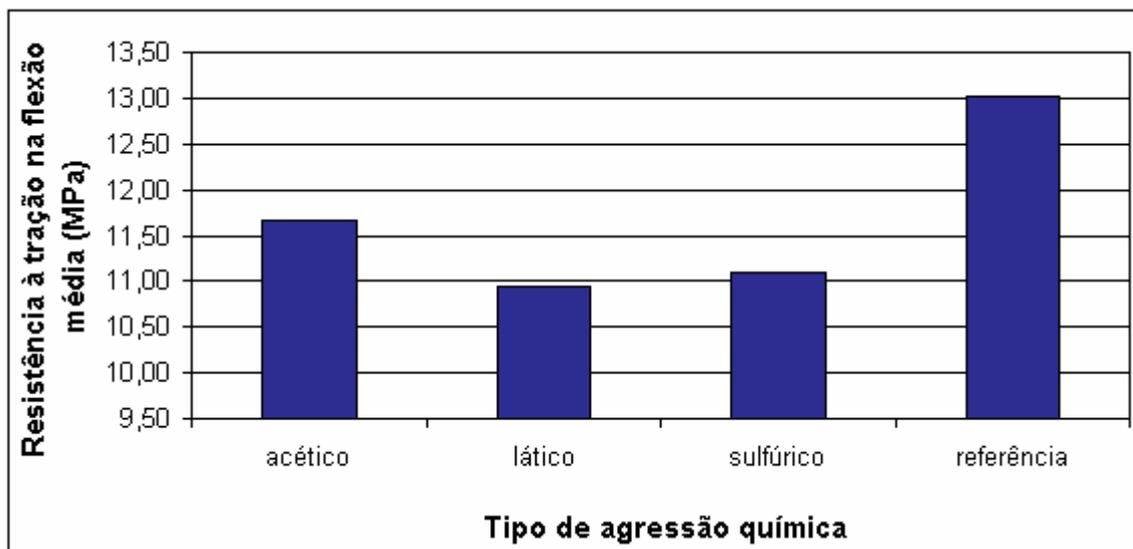


Figura 78: efeito isolado do tipo de ácido em relação à resistência à tração na flexão

A figura 79 mostra o efeito isolado do tipo de material em relação à resistência à tração na flexão.

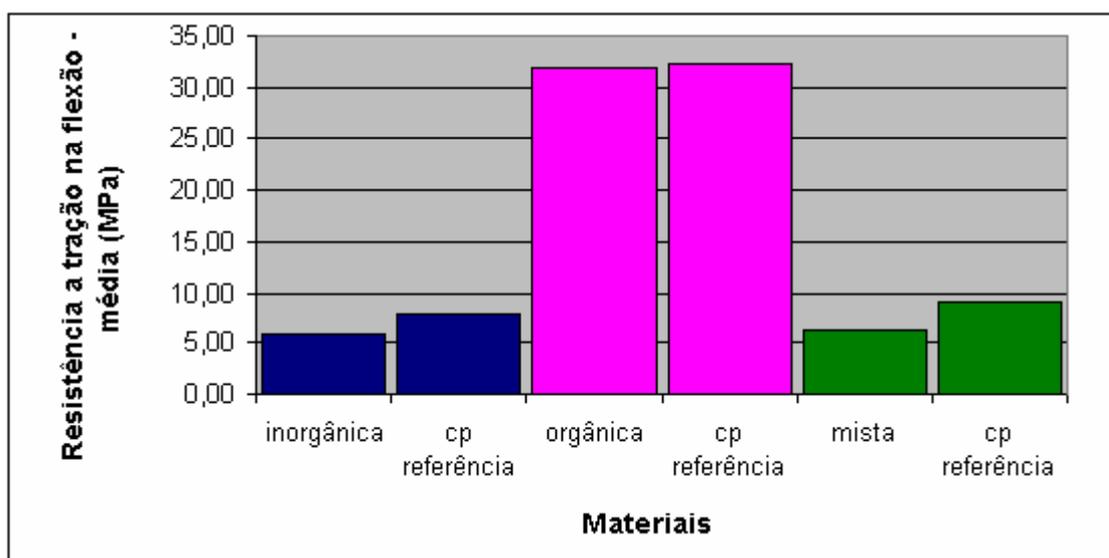


Figura 79: efeito isolado do tipo de material em relação à resistência à tração na flexão.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão são evidentes, onde mostram que os materiais de reparo de base orgânica possuem valores muito mais elevados que os de base inorgânica e de base mista. Observa-se que os materiais de base mista têm

resistência à tração na flexão maior que os de base inorgânica, se comparados os cp's de referência, e também se comparados com os cp's submetidos ao ataque ácido, portanto os materiais de base inorgânica tiveram menor perda de resistência à tração na flexão, comprovando-se maior suscetibilidade a este tipo de agressão. A figura 80 mostra que há interação entre os materiais e os ácidos.

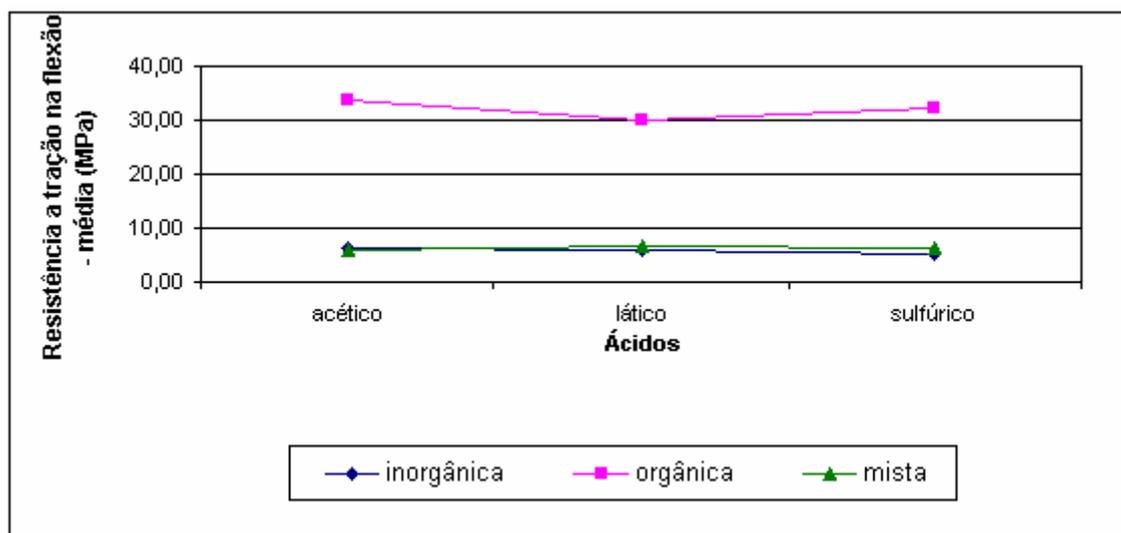


Figura 80: Resultados obtidos da interação dos fatores material x ácido em relação à tração na flexão

Nota-se o efeito significativo nesta interação, pois dependendo do tipo de material e da solução ácida, as resistências à tração na flexão têm resultados variados. Os materiais de base inorgânica tiveram os menores valores de resistência à tração na flexão para o ataque do ácido sulfúrico. Para os materiais de base orgânica, os menores resultados de resistência à tração na flexão foram para os cp's submetidos ao ataque da solução do ácido láctico. Os materiais de base mista tiveram menores resistências à tração na flexão quando submetidos à agressão do ácido acético.

A figura 81 mostra a interação dos fatores material com o fabricante.

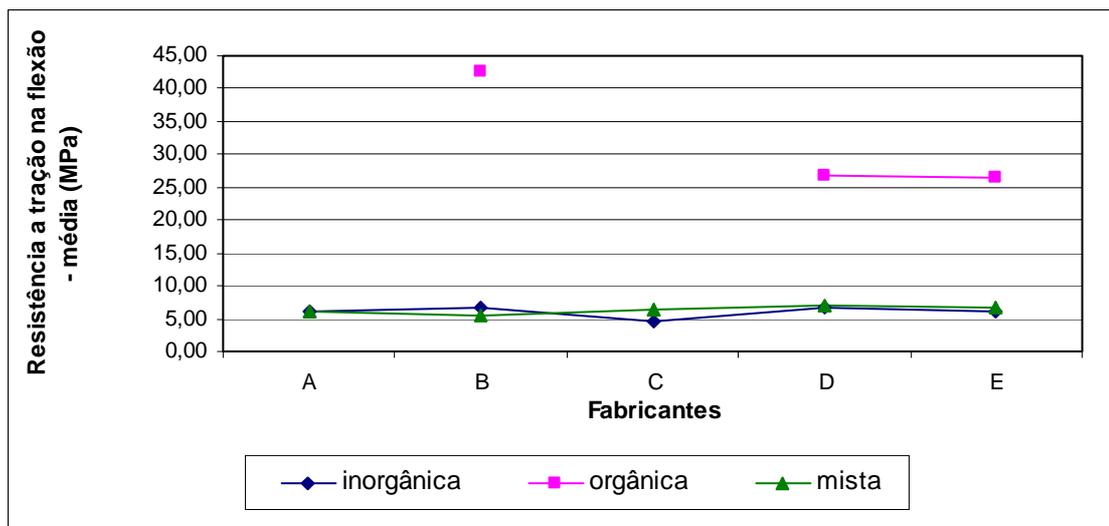


Figura 81: Resultados obtidos da interação dos fatores material x fabricante em relação à tração na flexão

A interação dos materiais com os fabricantes mostrou-se significativa no ensaio de resistência à tração na flexão, isto significa que dependendo do fabricante os materiais de mesma base têm comportamentos mecânicos diferentes. Isto é muito claro quando observa-se os materiais de base orgânica, o material do fabricante B teve resistência à tração na flexão muito superior aos dos fabricantes D e E, atingindo 42,67 MPa. A figura 82 mostra a interação dos fatores fabricante x ácido x material.

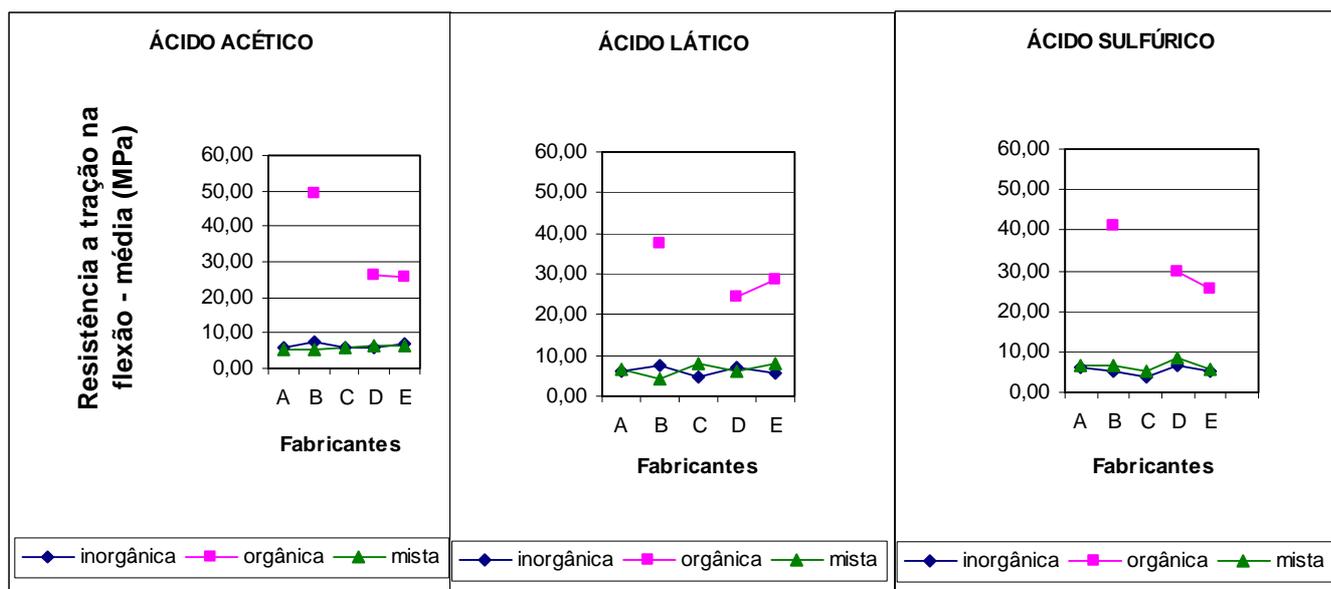


Figura 82: Resultados obtidos da interação dos fatores fabricante x ácido x material em relação à tração na flexão

Na interação dos fatores fabricante x material x ácido mostra o efeito significativo, isto quer dizer que dependendo do tipo de ácido, da composição química dos materiais e do fabricante as resistências à tração na flexão variam. Nos cp's submetidos ao ataque químico, os materiais de base orgânica, do fabricante D, tiveram menores resistências à tração na flexão quando agredidos pela solução do ácido láctico, 24,40 MPa. Os materiais de base inorgânica, do fabricante C, tiveram menores resistências à tração na flexão quando submetidos ao ataque da solução do ácido sulfúrico, 2,25 MPa e, os materiais de base mista, do fabricante D, tiveram maiores resistências quando submetidos à solução do ácido láctico, 7,60 MPa. Os materiais de base mista do fabricante B tiveram menores resistências à tração na flexão quando submetidos à agressão do ácido láctico, 4,30 MPa. Os materiais de mesma base, do fabricante D tiveram maiores resistências quando submetidos ao ácido sulfúrico, 8,38 MPa.

Os resultados de resistência à tração na flexão, aos 28 dias indicados pelos fabricantes nos catálogos comerciais podem ser verificados na tabela 4, do item 4.4, do capítulo 4 e são comparados com os resultados obtidos dos cp's de referência nos ensaios realizados nesta pesquisa, conforme se observa na figura 83.

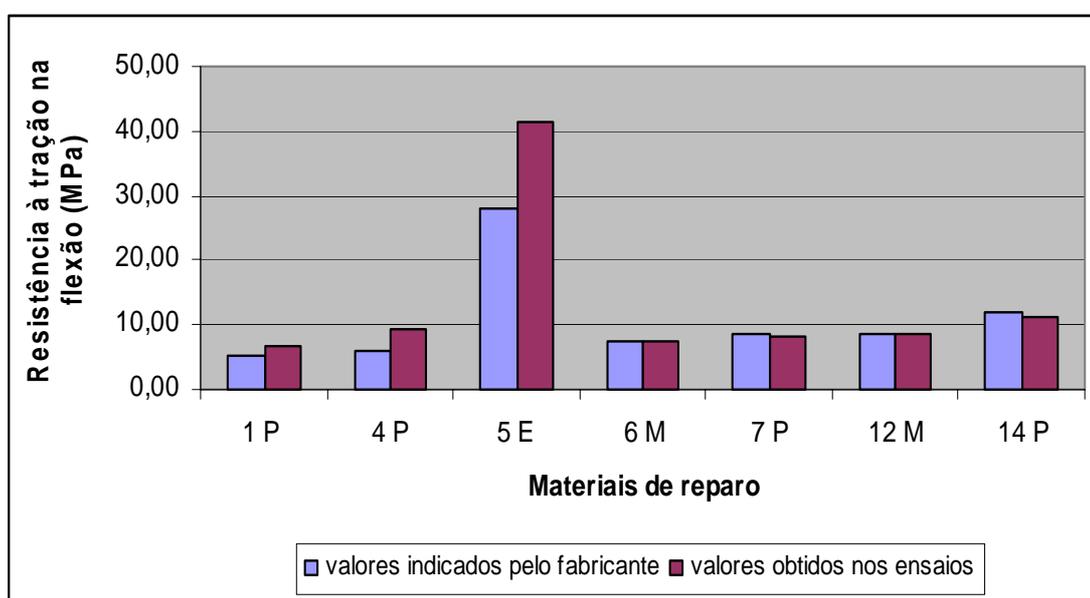


Figura 83: comparação dos resultados de resistência à tração na flexão – valores indicados pelo fabricante e dos ensaios realizados

Verifica-se que os resultados obtidos nos ensaios estão muito próximos aos indicados nos catálogos comerciais, e em alguns materiais observa-se que os valores ficaram acima dos indicados pelos fabricantes.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Nas tabelas 28, 29 e 30 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova das argamassas de reparo. Foram ensaiados 03 cp's de cada material, totalizando 45 cp's.

Tabela 28: Resultado dos ensaios de resistência à compressão simples

CP		Resistência à compressão (MPa)	CP		Resistência à compressão (MPa)
Material	Nº		Material	Nº	
1 – P	1	30,60	9 – M	1	46,10
	2	27,50		2	48,60
	3	28,50		3	43,30
2 – M	1	43,90	10 – E	1	49,90
	2	41,80		2	46,90
	3	42,30		3	51,60
3 – M	1	44,10	11 – P	1	28,50
	2	48,90		2	28,00
	3	50,40		3	27,00
4 – P	1	36,40	12 – M	1	42,80
	2	41,00		2	46,10
	3	40,50		3	46,90
5 – E	1	79,40	13 – M	1	51,90
	2	82,00		2	41,30
	3	82,30		3	45,30
6 – M	1	43,80	14 – P	1	45,30
	2	36,90		2	45,30
	3	41,50		3	45,60
7 – P	1	32,10	15 – E	1	50,40
	2	31,80		2	53,00
	3	31,60		3	51,90
8 – M	1	48,40			
	2	51,60			
	3	50,90			

Tabela 29: Resistência à compressão simples - Parâmetros estatísticos

Material	Média (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. de variação
1 – P	28,87	1,29	0,04
2 – M	42,67	0,90	0,02
3 – M	47,80	2,69	0,06
4 – P	39,30	2,06	0,05
5 – E	81,23	1,30	0,02
6 – M	40,73	2,87	0,07
7 – P	31,83	0,21	0,01
8 – M	50,30	1,37	0,03
9 – M	46,00	2,16	0,05
10 – E	49,47	1,94	0,04
11 – P	27,83	0,62	0,02
12 – M	45,27	1,77	0,04
13 – M	46,17	4,37	0,09
14 – P	45,40	0,14	0,00
15 – E	51,77	1,07	0,02

Tabela 30: Resistência à compressão simples – comparação dos materiais de diferentes composições químicas

Composição Química / Material (Fabricante)	Inorgânica	Mista	Orgânica
	Média (MPa)	Média (MPa)	Média (MPa)
10 – E– D			49,47
15 – E– E			51,77
5 – E– B			81,23
12 – M– D	45,27		
13 – M– E	46,17		
2 – M– A	42,67		
3 – M– B	47,80		
6 – M– C	40,73		
8 – M– C	50,30		
9 – M– D	46,00		
1 – P– A		28,87	
11 – P– D		27,83	
14 – P– E		45,40	
4 – P– B		39,30	
7 – P– C		31,83	

A figura 84 representa graficamente a diferença das resistências à compressão simples para os materiais com composições químicas diferentes.

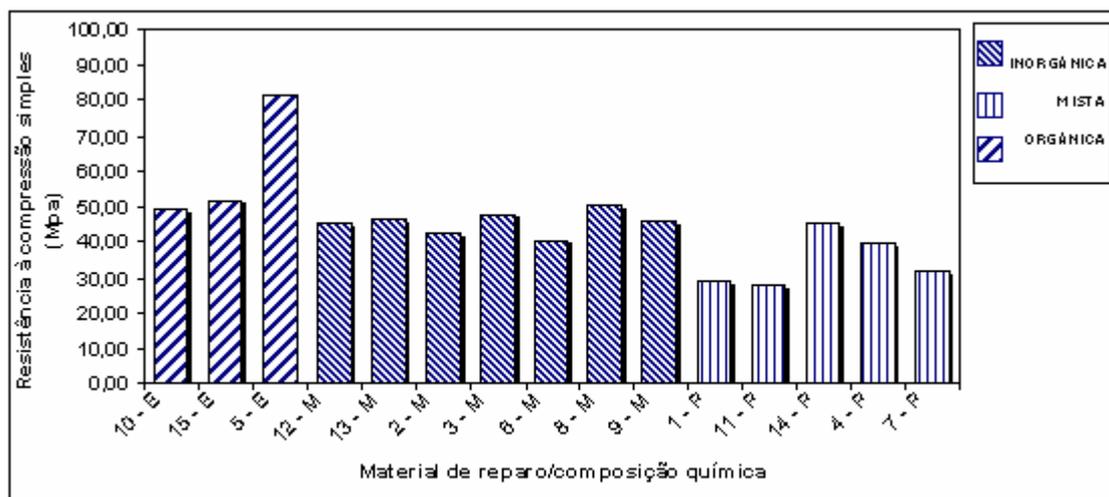


Figura 84: Resultados de resistência à compressão simples

Observou-se que os materiais de base orgânica tiveram maiores resistências, com valores variando de 49,47 a 81,23 MPa, seguido dos de base inorgânica, que variaram de 40,73 a 50,30 MPa. Os materiais de base mista tiveram as menores resistências à compressão simples, com valores de 27,83 a 45,40 MPa.

Segundo Cabrera et al (1989), citado por Silva Filho (1994), a resistência mecânica não prediz adequadamente o seu desempenho quanto à durabilidade, pois a mesma está relacionada muito mais com a porosidade e a permeabilidade do que com a resistência.

A análise estatística dos resultados foi realizada através da análise de variância, comprovando-se a influência das resistências à compressão simples dos materiais testados e da interação do material com o seu respectivo fabricante. Os resultados encontram-se na tabela 31.

Tabela 31: Análise de variância para resistência a compressão simples.

Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F _{calculado}	p	Significância
Material	2	3.866,62	1.933,31	198,14	<0,0001	S
fabricante (material)	10	2.599,11	259,91	26,64	<0,0001	S
erro	32	312,23	9,76			
total	44	6.778,90				

A figura 85 mostra o efeito isolado do material de reparo em relação à resistência à compressão simples.

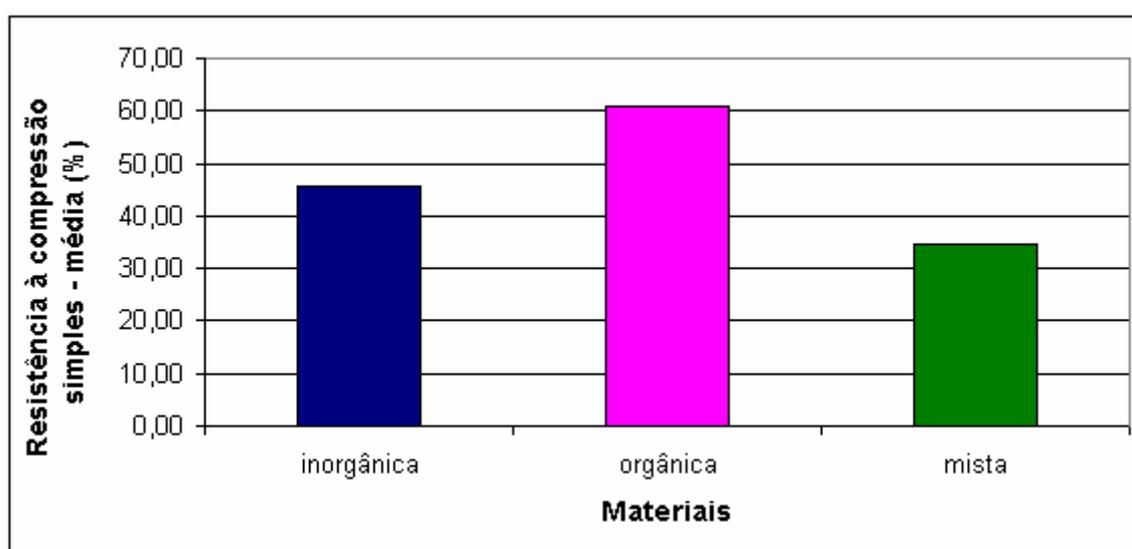


Figura 85: efeito isolado do material de reparo em relação à resistência à compressão simples

Comparando-se as resistências à compressão simples de materiais industrializados de reparo de base inorgânica, o qual atingiu na média 45,56 MPa, com estudos feitos em concretos com adição 15% de sílica ativa e relação água/cimento de 0,55, que atingiram 43,17 MPa (KULAKOWSKI et al., 1997) e, em concretos com adição de 9 % de cinza de casca de arroz e relação água/cimento de 0,60, que atingiram na média 44,78 MPa (CASSAL, 2000), percebe-se a proximidade dos resultados.

Os materiais industrializados, de base mista, atingiram na média 34,65 MPa, superando os resultados obtidos em concretos sem adição mineral e com relação água/cimento 0,60, atingindo 32,47 MPa (CASSAL, 2000) e quase atingindo os resultados obtidos em concretos água/cimento 0,55, que foram de 36,30 MPa (KULAKOWSKI, et al., 1997).

Os materiais de base orgânica atingiram na média, resistência de 60,82 MPa, podendo-se comparar com concretos com 6% de adição de cinza de casca de arroz e relação água/cimento de 0,40 (CASSAL, 2000), que atingiram 60,68 MPa. O material “5 – E”, do fabricante B foi o que teve maior resistência à compressão simples atingindo na média 81,23 MPa, podendo-se comparar com os resultados obtidos em ensaios de concreto polímero com resina poliéster isoftálica, com adição de 8 % de cinza volante (GORNINSKI, 2002), atingindo na média 80,42 MPa.

A figura 86 mostra que o efeito foi significativo na interação entre as duas variáveis analisadas em relação à resistência à compressão simples, pois dependendo do fabricante os materiais de mesma base podem ter maiores ou menores resistências à compressão simples. Isto é claro quando se observa os materiais de base orgânica, o material do fabricante B teve resistência à compressão simples de 81,23 MPa e o material do fabricante D somente 49,47 MPa.

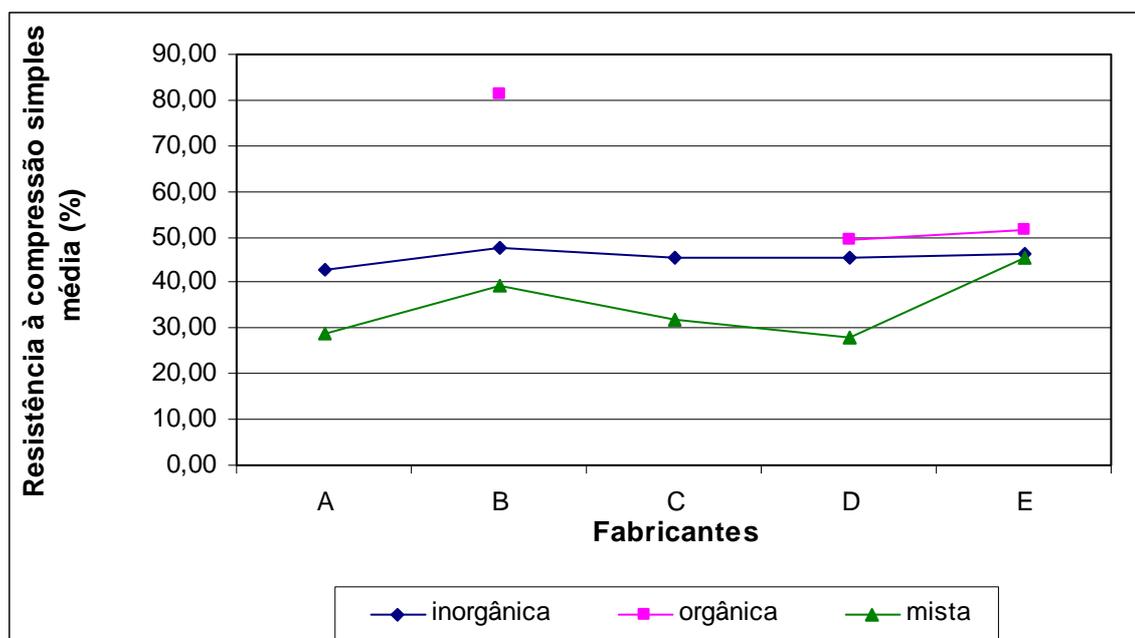


Figura 86: interação do material de reparo com o fabricante em relação à resistência a compressão simples

Conforme se verifica na tabela 4, do item 4.4, do capítulo 4, os valores das resistências à compressão simples, aos 28 dias, indicadas pelos fabricantes, são diferentes dos valores obtidos nos ensaios deste trabalho, com exceção do material “5 – E”, “7 – P”, “9 – M”, “11 – P” e “14 – P”, que tiveram valores muito próximos aos divulgados, considerando que os materiais foram dosados conforme recomendação do fabricante. Portanto nota-se novamente a necessidade de uma normalização destes produtos, uma vez que as propriedades divulgadas em catálogos comerciais podem levar a uma errada tomada de decisão quando da especificação dos produtos industrializados em obras de reparo, acarretando inúmeras conseqüências. O valor da resistência à compressão simples do material “13 – M”, indicado pelo fabricante está apresentado para 1 dia, por isso o valor dos ensaios realizados nesta pesquisa estão muito maiores.

A figura 87 mostra graficamente esta diferença para os materiais que indicam em seus catálogos técnicos essas propriedades com os resultados dos ensaios.

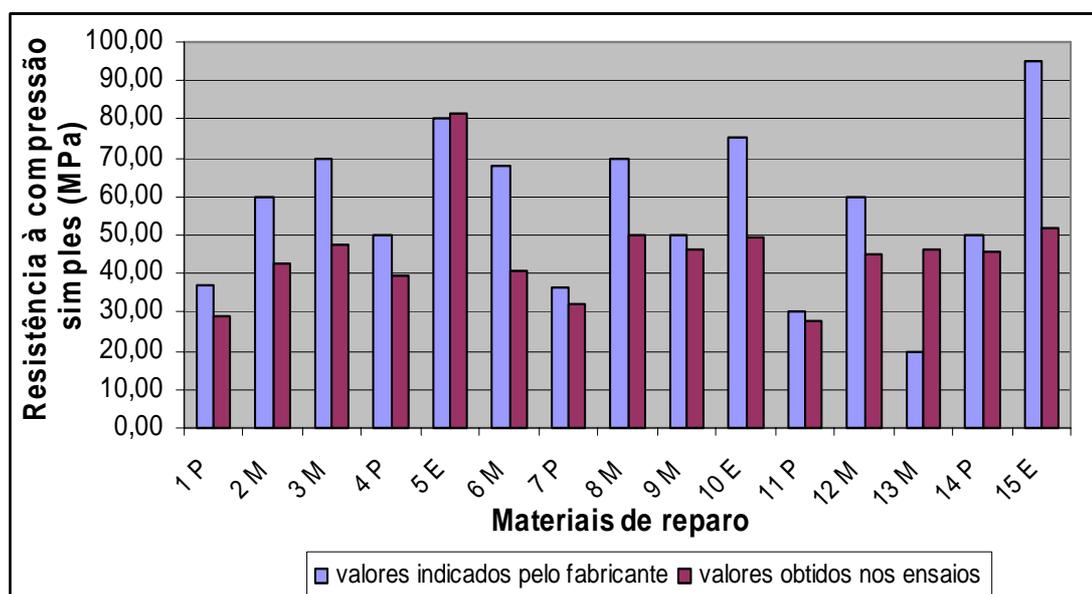


Figura 87: comparação dos resultados de resistência à compressão simples – valores indicados pelo fabricante e dos ensaios realizados

5.4 COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES ANALISADAS

A seguir foi realizada uma comparação dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa. A tabela 32 expressa os resultados obtidos nos ensaios de agressão química do ácido acético tendo como resposta a perda de massa (%), de resistência à tração na flexão (MPa). Os ensaios de resistência à compressão simples (MPa) servem como parâmetro de controle.

Tabela 32: Resultados obtidos nos ensaios de agressão do ácido acético, resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples.

Material	Composição química	Fabricante	Perda de massa média (%)	Resistência à tração na flexão média (MPa)	Resistência à compressão simples média (MPa)
5 – E	Orgânica (epóxi)	B	0,15	49,30	81,23
10 – E		D	0,04	26,10	49,47
15 – E		E	-0,19	25,53	51,77
2 – M	Inorgânica (cimento Portland)	A	4,38	5,93	42,67
3 – M		B	3,27	7,48	47,80
6 – M		C	10,98	5,38	40,73
8 – M		C	4,22	6,43	50,30
9 – M		D	8,22	6,33	46,00
12 – M		D	4,56	5,83	45,27
13 – M		E	5,64	7,18	46,17
1 – P	Mista (cimento Portland modificado com polímeros)	A	4,19	5,10	28,87
4 – P		B	1,91	5,55	39,30
7 – P		C	6,61	6,08	31,83
11 – P		D	14,75	6,20	27,83
14 – P		E	3,79	6,50	45,40

Observa-se que o material “5 – E”, de base orgânica, foi o que obteve a maior resistência à compressão simples e a maior resistência à tração na flexão, sendo considerado o material de base orgânica com melhor desempenho para proteção de estruturas de concreto em ambientes com a presença do ácido acético.

Em relação aos materiais de base inorgânica, o material “3 – M”, do fabricante B, foi o que obteve menor perda de massa e conseqüentemente maior resistência à tração na flexão. O

resultado obtido no ensaio de resistência à compressão simples pode ser considerado relativamente alto. O material de mesma base “6 – M”, do fabricante C, foi o que obteve maior perda de massa e menor resistência à tração na flexão. Considerando os materiais de base inorgânica o que teve melhor desempenho foi o do fabricante B.

Em relação aos materiais de base mista, o material que obteve menor resistência à compressão simples foi o mesmo que teve maior perda de massa, isto pode ser explicado pela grande porosidade do material comprovado no resultado de resistência à compressão simples. Conforme os resultados obtidos verifica-se que estes materiais, de uma forma geral, tem desempenho inferior comparando com os materiais de base orgânica e inorgânica.

A tabela 33 mostra os resultados obtidos nos ensaios de agressão química do ácido láctico, tendo como resposta a perda de massa (%), de resistência à tração na flexão (MPa) e de resistência à compressão simples (MPa).

Tabela 33: Resultados obtidos nos ensaios de agressão do ácido láctico, resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples.

Material	Composição química	Fabricante	Perda de massa média (%)	Resistência à tração na flexão média (MPa)	Resistência à compressão simples média (MPa)
5 – E	Orgânica (epóxi)	B	0,11	37,48	81,23
10 – E		D	0,03	24,40	49,47
15 – E		E	-0,06	28,40	51,77
2 – M	Inorgânica (cimento Portland)	A	3,04	5,88	42,67
3 – M		B	2,96	7,43	47,80
6 – M		C	3,95	3,13	40,73
8 – M		C	1,99	5,80	50,30
9 – M		D	4,72	7,60	46,00
12 – M		D	3,10	6,00	45,27
13 – M		E	4,29	5,70	46,17
1 – P	Mista (cimento Portland modificado com polímeros)	A	1,06	6,70	28,87
4 – P		B	1,51	4,30	39,30
7 – P		C	2,57	7,75	31,83
11 – P		D	7,46	5,95	27,83
14 – P		E	3,90	7,78	45,40

O material de base orgânica “5 – E”, do fabricante B, foi o que apresentou melhor desempenho, pois teve a maior resistência à compressão simples e a maior resistência à tração na flexão quando submetido ao ataque do ácido láctico.

Em relação aos materiais de base inorgânica, observa-se que o material “8 – M”, do fabricante C, foi o que teve maior resistência à compressão simples e menor perda de massa, apresentando boa resistência quanto à penetração da solução do ácido láctico.

O material de base mista “14 – P”, do fabricante E, foi o que teve maior resistência à compressão simples e maior resistência à tração na flexão. O valor da perda de massa foi inferior a 4,00%, isto pode ser devido à baixa porosidade do material comprovada pela elevada resistência à compressão simples. Pode-se considerar que este material tem maior resistência ao ataque do ácido láctico se comparado com os materiais de mesma base dos outros fabricantes.

A tabela 34 mostra os resultados obtidos nos ensaios de agressão química do ácido sulfúrico, tendo como resposta a perda de massa (%), de resistência à tração na flexão (MPa) e de resistência à compressão simples (MPa).

Tabela 34: Resultados obtidos nos ensaios de agressão do ácido sulfúrico, resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples.

Material	Composição química	Fabricante	Perda de massa média (%)	Resistência à tração na flexão média (MPa)	Resistência à compressão simples média (MPa)
5 – E	Orgânica (epóxi)	B	0,01	41,23	81,23
10 – E		D	0,03	29,60	49,47
15 – E		E	-0,50	25,58	51,77
2 – M	Inorgânica (cimento Portland)	A	5,28	6,20	42,67
3 – M		B	20,65	5,38	47,80
6 – M		C	7,76	2,25	40,73
8 – M		C	9,84	5,00	50,30
9 – M		D	13,91	6,85	46,00
12 – M		D	11,42	6,73	45,27
13 – M		E	18,28	5,18	46,17
1 – P	Mista (cimento Portland modificado com polímeros)	A	18,79	6,63	28,87
4 – P		B	8,70	6,38	39,30
7 – P		C	20,83	5,23	31,83
11 – P		D	4,99	8,38	27,83
14 – P		E	25,27	5,70	45,40

Os materiais de base orgânica tiveram elevadas resistências à compressão simples e à tração na flexão, dando destaque ao melhor desempenho do material do fabricante B. A perda de massa desses materiais foi muito pequena, podendo-se considerar resultado da variabilidade dos ensaios.

Os materiais de base inorgânica e base mista tiveram comportamentos variados. O material de base inorgânica que sofreu maior perda de massa, 20,65 %, teve alta resistência à compressão simples, 47,80 MPa. O mesmo ocorreu com os materiais de base mista, o material que apresentou maior perda de massa, 25,27 %, teve a maior resistência à compressão simples de 45,40 MPa. O comportamento desses materiais pode ser explicado devido aos produtos de reação do ácido sulfúrico com os compostos cimentícios dos materiais, que podem provocar reações expansivas gerando grandes tensões internas que causam micro fissuração, refletindo nos baixos valores da resistência à tração na flexão, bem como no aumento da perda de massa.

Os materiais de base inorgânica e base mista que obtiveram menor perda de massa foram os mesmos que apresentaram menor resistência à compressão simples, isso ocorre porque uma porosidade maior absorve melhor os produtos gerados pela formação da reação expansiva. Isto ocorre até que todos os vazios sejam preenchidos, a partir do momento em que os espaços vazios são preenchidos pelos produtos expansivos, surgem tensões que provocarão uma fissuração intensa nas estruturas de concreto.

Existe uma tendência clara que os materiais de base orgânica têm desempenho superior aos de base mista e inorgânica. O comportamento da perda de massa não segue exatamente a resistência à tração na flexão, uma vez que existem efeitos químicos e físicos interagindo de forma diferenciada nas propriedades analisadas.

Verifica-se que a solução do ácido sulfúrico é muito mais agressiva aos materiais de base inorgânica e mista e também a agressão é mais intensa quando comparado com as soluções do ácido acético e do ácido láctico. Em estruturas submetidas ao ataque do ácido sulfúrico deve-se dar preferência aos produtos de base orgânica para a proteção das mesmas, pois está comprovada a eficiência destes materiais quanto ao ambiente ácido.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o desempenho dos materiais de reparo industrializados e disponíveis no mercado nacional para estruturas de concreto agredidas por três soluções ácidas. Analisando-se os resultados obtidos e com base na revisão bibliográfica realizada, pode-se chegar as seguintes conclusões, considerando que as mesmas são validas para as condições e materiais utilizados nesta análise, devendo ser validada por novas pesquisas.

1. Os materiais de base inorgânica e mista sofreram perda de massa maior quando submetidos ao ataque da solução de ácido sulfúrico, atingindo 12,44 % e 15,72 % respectivamente. Para o ataque da solução do ácido acético a perda foi de 5,89 % e 6,25 %, reduzindo-se mais da metade da perda de massa do ataque do ácido sulfúrico. Para o ataque da solução do ácido láctico, a perda foi de 3,43 % e 3,30 %. Estes resultados demonstraram que os materiais de reparo industrializados são mais eficientes na proteção das estruturas de concreto, quando submetidos ao ataque das soluções de ácido acético, ácido láctico e ácido sulfúrico, comparados com concretos convencionais que atingiram valores de 26,20% para a agressão do ácido sulfúrico e 18,20% para a agressão do ácido acético (CASSAL, 2000). Concretos com adição de 9% de sílica ativa (KULAKOWSKI et. al., 1997) para as mesmas condições tiveram perda de massa de 13,60 % para o ácido acético, 17,00 % para o ácido láctico e 32,30 % para o ácido sulfúrico.

2. A perda de resistência à tração na flexão foi maior nos materiais de base mista submetidos ao ataque do ácido acético, 33,89 %, seguidos dos materiais de base inorgânica submetidos ao ataque da solução de ácido sulfúrico, 29,92 %. Os materiais de base orgânica foram os que obtiveram menor perda de resistência à tração na flexão, atingindo no máximo 6,84%, para a solução do ácido láctico. Nos ensaios de resistência a tração na flexão os materiais de reparo superaram os resultados indicados pelo fabricante, mesmo agredidos pelas soluções ácidas, fator este não considerado no teste dos fabricantes.

3. Os resultados de resistência à compressão simples, de uma forma geral, demonstraram valores muito abaixo dos indicados em catálogos comerciais dos fabricantes para todas as composições químicas testadas e todos os resultados dos materiais industrializados, de uma forma geral, equivaleram-se a concretos com adição de superpozolanas e concretos polímeros.

4. Os resultados obtidos nos ensaios de perda de massa e resistência à tração na flexão demonstraram que os materiais de reparo de base inorgânica, base mista e base orgânica, realmente se constituem materiais valiosos a serem utilizados no reparo de estruturas em ambientes ácidos, embora as formulações testadas nem sempre atinjam os patamares de desempenho referidos nos catálogos.

5. Pode-se verificar que o ataque de cada solução ácida atua de forma diferenciada nos materiais industrializados, pois dependendo da composição química dos materiais e do fabricante de cada material, o comportamento varia, tanto na perda de massa, quanto nos ensaios de resistência mecânica.

6. Para escolha adequada do material de reparo a ser utilizado há a necessidade de melhoria nos dados fornecidos pelos fabricantes, dando maior ênfase em resultados sobre desempenho destes materiais quanto à aderência, comportamento químico e absorção.

7. De todas as argamassas e grautes analisados, os materiais de base orgânica (epóxi) foram os que apresentaram as melhores características físicas, químicas e mecânicas. Portanto acredita-se que as argamassas industrializadas de base orgânica possam ser empregadas como parte de um sistema de reparo, constituindo-se o material de reconstituição de seção, uma vez que tem boas características que oferecem uma maior resistência a possível entrada de agentes agressivos.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A presente pesquisa mostrou que muitos aspectos da utilização dos materiais de reparo industrializados, especificamente como medida de proteção das estruturas de concreto inseridas em ambientes ácidos é uma alternativa viável e com resultados positivos se forem bem especificados e utilizados. Como sugestão para futuros trabalhos com esse objetivo pode-se citar:

1. Escolha de outros parâmetros para avaliar o ataque ácido em materiais industrializados;
2. Elaboração de especificações para divulgação em catálogos comerciais, visando maior facilidade para o usuário na hora da escolha do produto, bem como uma classificação básica comum para os materiais de reparo.
3. Análise do custo x benefício para utilização dos materiais de reparo industrializados na recuperação de estruturas de concreto.
4. Estudo do desempenho dos materiais de reparo industrializados com outros agentes agressivos para as estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS

- AGUADO, A. Orientación para la selección de la intervención. In: **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: reparación, refuerzo y protección**, 2003, Madrid, Spain. São Paulo: Rehabilitar, 2003. 1 CD-ROM.
- AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: Pini, 2000. 667 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide to Durable Concrete: Reported by ACI Committee 201**, Detroit, 1992. p. 544-574.
- ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão**. São Paulo: Pini, 1992, 104 p.
- ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: análise de manifestações patológicas nas estruturas no Estado de Pernambuco**. 1997. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica**. 1994. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- ASLAM, M.; SRIVASTAVA, R.S.; MINOCHA, A. K. Durability of Concrete in Sulphurous Atmosphere. **Indian Concrete Journal**, p.135-138, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.738: concreto: procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5.739: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **NBR 9.479: câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto**. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **NBR 12.142: concreto: determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 13.276: argamassa para assentamento e revestimentos para paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13.529: revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas**. Rio de Janeiro, 1995.
- BERTOLO, R. S.; SELMO, S.M.S. Argamassas de reparo de estruturas de concreto com corrosão de armaduras. **Revista Concreto**. São Paulo: IBRACON, v.33,n.38, p.64-73, mar./abr./maio. 2005.
- BICZOK, I. **La Corrosion del Hormigón y su Proteccion**. Bilbao, Spain: Urmo, 1972. 715 p.
- BOLETIM INFORMATIVO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Cimento Hoje**. São Paulo, v.7, n.50, p. 3, 2004.

BRETANHA, A. M. Análise da microestrutura de concreto produzidos com diferentes tipos de cimento e submetidos à ação de sulfatos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2000, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 16 p.

CALLEJA, M. Adiciones y cementos com adiciones. **Materiales de Construcción**, Madrid, Spain, n.190-191, p. 25-52, 1983.

CAMPS, J.P.; LAPLANCHE, A.; AL-RIM, K. Corrosion of concrete by sequestrating agents of detergents. In: PROTECTION OF CONCRETE, 1990, Dundee. **Proceedings...**Dundee: University of Dundee, 1990. 1v. p. 63-73.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo : Pini, 1988.

CÁNOVAS, M. F. Recomendaciones del C.E.B. sobre reparación y refuerzo de estructuras de hormigon armado. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION, 1., Y DE CONTROL DE CALIDAD, 3., 1991, Córdoba. **Anais...** Córdoba, Republica Argentina, CONPAT, 1991, 24 p.

CARMO, P. O. **Patologia das Construções**. Santa Maria/RS: Material Didático, 2000.

CASSAL, S.B. **A Influência da Adição de Cinza de Casca de Arroz na Resistência de Concretos a Ácidos**. 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. **Durable Concrete Structures: designe guide**. Lousanne: Thomas Telford, 1992. 112 p.

CORBO, F.; D'ELIA, A.C.I. Recuperação e manutenção das estruturas de concreto na área industrial. In: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: prevenção e recuperação, 1989, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 1989. 20 p.

CUSSON, D.; MAILVAGANAM, N. Durability of Concrete repair materials. **Concrete International**, São Paulo, v. 118, n. 3. 1996.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Rio Grande do Sul. 1988. 220f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DE BELIE, N.; COSTER, V.; NIEUWENBURG, D.V. Use of fly ash or silica fume to increase the resistance of concrete to feed acids. **Magazine of Concrete Research**, Detroit, v.49, n.181, p.337-344. 1997.

EMMONS, P.H. et al. Selecting durable repair materials: Performance criteria. **Concrete International**, São Paulo, v.22, n. 3. 2000.

FIGUEIREDO, E.J.P. **Metodologia de Avaliação de Sistemas Epóxi destinados à Injeção de Fissuras Passivas das Estruturas de Concreto**. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

FIGUEIREDO, E. J. P.; ANDRES, R. Reparo, Recuperação e proteção das estruturas de concreto das indústrias de celulose e papel no Brasil. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION, 1., Y DE CONTROL DE CALIDAD, 3., 1991, Córdoba. **Anais...** Córdoba, Republica Argentina, CONPAT, 1991, 16 p.

GORNINSKI, J.P. **Estudo da Influência das Resinas Poliéster Isoftálica e Ortoftálica e do Teor de Cinza Volante nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto polímero.** 2002. 167 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HELENE, P.R.L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado.** São Paulo: Pini, 1986. p-17-20.

HELENE, P.R.L. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto.** São Paulo: Pini, 1988. 113 p.

HELENE, P.R.L. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto.** São Paulo: Pini, 1992.

HELENE, P.R.L. Vida útil das estruturas de concreto. In: CONGRESSO IBERO AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 1997. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME/CPGEC, 1997, p.1-5.

HELENE, P.; MOREIRA, H. P.; FIGUEIREDO, E. P. Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros. **Boletim Técnico.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/286, 2001. 17 p.

HUSNI, R. Acciones sobre las estructuras de hormigón. In: **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón:** reparación, refuerzo y protección, 2003, Madri, Spain. São Paulo: Rehabilitar, 2003. 1 CD-ROM.

JIMENEZ, R.C.Reparacion y refuerzo de estructuras. In: **Curso de Reparacion de Obras de Hormigon.** Bilbao, Urmo, 1992. 21p.

KAZMIERCZAK, C. S. Metodologia para seleção de sistemas de pinturas para superfícies externas de concreto. IN: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION, 1., Y DE CONTROL DE CALIDAD, 3., 1991, Córdoba. **Anais...** Córdoba, Republica Argentina, CONPAT, 1991, 12 p.

KULAKOWSKI, M.P.; VIEIRA, F.P.; DAL MOLIN, D.C.C. **Relatório Convênio Camargo Correa Industrial.** Porto Alegre: NORIE/CPGEC/UFRGS, 1997.

LAWRENCE, D. Sulphate attack on Concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, n. 153, p. 249-264. 1990.

LIMA, R.C. **Avaliação da Eficiência de Inibidores de Corrosão em Reparo de Estruturas de Concreto.** 2000. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- LUDWIG, R. G.; ALMEIDA, S.A.S. Controle da corrosão por sulfatos no projeto de interceptores de esgoto. **Revista D.A.E.**, São Paulo, v.34, n.121, p. 70-81, 1979.
- MANGAT, P. S.; EL KHATIB, J. M. Influence of initial curing on sulphate resistance of blended cement concrete. **Cement and Concrete Research**, São Paulo, v.22, n.6, p.1089-1100. 1992.
- MANGAT, P. S.; O'FLAHERTY, F. J. Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches. **Cement and Concrete Research**, São Paulo, v.30, 2000, p. 125-136.
- MARSH, B. K.; JOSHI, R.C. Sulphate and acid resistance of cement paste containing pulverized limestone and fly ash. **Durability of Building Materials**. Rio de Janeiro, n.4, p.67-80. 1986.
- MEHTA, P.K. Studies on Chemical Resistance of low water-cement ratio concretes. **Cement and Concrete Research**. São Paulo, v.15, n.6. p. 969-978. 1985.
- MEHTA, P. K. Durability of concrete – fifty years of progress? In: SEMINÁRIO DE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. **Anais...** Porto Alegre: NORIE/CPGEC/UFRGS, 1993. 33 p. [Anexo aos anais]. 1993. Porto Alegre.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MORENO JR, R. Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto. 2002. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e Avaliação de Experimentos**. 2. ed. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1992. 213 p. Caderno Técnico.
- NEVILLE, A. M. Consideration of durability of concrete structures: past, present and future. **Materials and Structures**. Cachan: Rilem. v.34, n.236. p. 114-118. 2001.
- NINCE, A.A. **Levantamento de Dados sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste**. 1996. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 1996.
- OLIVEIRA, P. S. F. Procedimentos para preparo do substrato e Metodologia de execução de reparos. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION, 1., Y DE CONTROL DE CALIDAD, 3., 1991, Córdoba. **Anais...** Córdoba, Republica Argentina, CONPAT, 1991, 15 p.
- PERRY, R.; SLATER, D. H. Poluição do ar. In: IR. Benn, C.A. Mac Auliffe. **Química e Poluição**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1981. 134p.
- PRUDÊNCIO JR, L. R. Durabilidade do Concreto frente ao ataque de cloretos e sulfatos. In: SEMINÁRIO DE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993. Porto Alegre. **Anais...**Porto Alegre: NORIE/CPGEC/UFRGS, 1993. 12 p.

QUESADA, G. Procedimentos de reparación. In: **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: reparación, refuerzo y protección**, 2003, Madri, Spain. São Paulo: Rehabilitar, 2003. 1 CD-ROM.

REPETTE, W. L.; HELENE, P. R. L. Proteção do Concreto: uma necessidade em indústrias de celulose e papel. São Paulo. **Boletim Técnico**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/204, 1998.

RIBEIRO, J. L. **Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

RINCÓN, O. T.; HELENE, P. R. L. Materiales y Sistemas de Rehabilitación. . In: **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: reparación, refuerzo y protección**, 2003, Madri, Spain. São Paulo: Rehabilitar, 2003. 1 CD-ROM.

SELINGER, F. Sistemas de reparación de estructuras con fuertes deterioros. In: **Curso de estudos maiores de la Construcción – CENCO 92**. Madrid: Institute Eduardo Torroja, 1992. 104 p.

SILVEIRA, A.A. **A Utilização de Cinza de Casca de Arroz com Vistas a Durabilidade de Concretos: estudo do ataque por sulfatos**. 1996. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SILVA FILHO, L.C.P. Análise de variáveis influentes no desencadeamento de reações expansivas com sulfatos no concreto. In: SEMINÁRIO DE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993. Porto Alegre. **Anais...**Porto Alegre: NORIE/CPGEC/UFRGS, 1993. 16 p.

SOUZA, R.H. F. **Análise do Comportamento de Vigas de Betão Armado Reforçadas à Flexão e ao Esforço Transverso**. Lisboa, 1990. 320 f. Tese (Doutorado). Instituto Superior em Engenharia Civil, Lisboa, 1990.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255p.

STORTE, M. Argamassa polimérica como revestimento impermeável. **Revista Concreto. IBRACON**, v.33, n.38, p. 24-26, mar./abr./maio. 2005.

TEIXEIRA, L. M. **Adição de Polímeros ao concreto visando Durabilidade**. [S.l.:s.n], [199_?].

VIEIRA, F.P.et al. Durabilidade e Resistência mecânica de concreto e argamassas com adição de sílica ativa. **Revista EGATEA**. Porto Alegre: UFRGS, v.25, n.2, p.91-99, março/abril. 1997.

WEXLER, S.B et al. **Manual de Proteção Contra Corrosão Durante Armazenamento e Transporte**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Publicação nº 1099, 1976. 105 p.