

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**Reparo de Estruturas de Concreto: Contribuição ao
Estudo da Aderência**

Adriana Galletto

Campinas, SP
2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**Reparo de Estruturas de Concreto: Contribuição ao
Estudo da Aderência**

Adriana Galletto

Orientador: Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Jr.

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas, SP
Dezembro/2005

Atesto que esta é a versão definitiva de
dissertação/tese.

Prof. Dr.

Matrícula 048232-19/06/06

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA:	T/UNICAMP
	G136r
V.	Ed.
TOMBO BC/	72768
PROC.	16115-07
C ☐	D ☒
PREÇO	11,00
DATA	30/05/07
BIB-ID	412629

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G136r Galletto, Adriana
Reparo de estruturas de concreto: contribuição ao estudo da aderência / Adriana Galletto.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Newton de Oliveira Pinto Júnior
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Concreto. 2. Concreto – Manutenção e reparos. 3. Aderências. 4. Materiais de construção. 5. Edifícios reformas. I. Pinto Júnior, Newton de Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Repair of concrete structures: contribution to the bond study
Palavras-chave em Inglês: Concrete, Building repair, Maintenance and repair concrete, Adherence, Bond, Construction materials

Área de concentração: Edificações

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Samuel Giongo e Armando Lopes Moreno Júnior

Data da defesa: 15/12/2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**“REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO:
CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ADERÊNCIA”**

Adriana Galletto

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. NEWTON DE OLIVEIRA PINTO JÚNIOR
Presidente – Orientador – FEC/UNICAMP



Prof. Dr. JOSÉ SAMUEL GIONGO
EESC/USP



Prof. Dr. ARMANDO LOPES MORENO JÚNIOR
FEC/UNICAMP

Campinas, 15 de dezembro de 2005

Dedicatória

Aos meus pais, Rosa e Armando, e ao meu
noivo Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora, por toda luz e força nos instantes em que pensei em desistir.

Ao meu orientador Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Jr., pela confiança em mim depositada desde o início, pela paciência e ensinamentos no decorrer deste trabalho.

Aos professores Dr. Vladimir Antônio Paulon, Dr. Armando Lopes Moreno Jr. e Dr. Vitor Antônio Ducatti, da FEC-UNICAMP.

Ao professor da Universidade de Brasília, Dr. João Carlos Teatini de Souza Clímaco e ao professor da USP - São Carlos, Dr. Jefferson Benedicto Libardi Libório.

À equipe do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP: Ademir, Marçal, Marcelo, Rodolfo e em especial ao amigo Luciano Passos, por toda colaboração, apoio e paciência.

Ao Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, em especial à José Luis.

Às secretárias da pós-graduação Paula e Noemia, sempre tão atenciosas e prestativas.

Às empresas Fosroc Reax, Holcim (Brasil) S.A. e ao Engº José Mário da Casa D'Água, pela doação de alguns materiais utilizados nesta pesquisa.

Aos meus amigos Lígia, Gisleiva e Eduardo, sempre companheiros.

À Marlene Petrelli, pelas orações, apoio e entusiasmo com minhas conquistas.

Agradeço aos meus pais, Armando e Rosa, e à todas as pessoas da família que incentivaram a realização deste trabalho.

Ao meu noivo, Marcelo, por todo carinho, apoio e compreensão.

“Deus nos fez perfeitos e não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende de nossa vontade e perseverança” (Albert Einstein).

SUMÁRIO

	Página
Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xii
Lista de Símbolos e Abreviações	xv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURABILIDADE DO CONCRETO	6
2.1.1 Principais Causas de Deterioração de Estruturas de Concreto	17
2.1.1.1 Deterioração do Concreto por Causas Físicas	18
2.1.1.2 Deterioração do Concreto por Causas Químicas	20
2.1.1.3 Outros Fenômenos Patológicos	25
2.2 Considerações Gerais para a Determinação dos Procedimentos de Reparo ...	26
2.2.1 Propriedades e Classificação dos Materiais de Reparo	28
2.2.1.1 Concretos como Materiais de Reparo	31
2.2.1.2 Polímeros como Materiais de Reparo	31
2.2.1.2.1 Resinas Poliméricas	32

2.2.2	Preparo e Limpeza do Substrato para Aplicação de Adesivos	39
2.3	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA PONTE DE ADERÊNCIA	41
2.3.1	Resistência da Ponte de Aderência	41
2.3.2	Tipos de Ruptura	43
3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA JUNTA	45
3.1	ENSAIOS DE DESEMPENHO	45
3.1.1	Ensaio de Resistência à Tração	46
3.1.2	Ensaio de Resistência à Tração por Flexão	48
3.1.3	Ensaio de Resistência ao Cisalhamento	49
3.1.4	Ensaio de Reconstituição do Cilindro	50
3.1.5	Ensaio de Compressão-Cisalhamento	52
3.2	PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA JUNTA	56
3.2.1	Métodos de Preparação de Superfícies Rugosas	57
3.3	ANÁLISE DAS TENSÕES	60
3.3.1	Ruptura na Junta (prisma composto)	60
3.3.2	Ruptura Monolítica	64
3.4	CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB MODIFICADO PARA ANÁLISE DE TENSÕES	65
3.5	ÂNGULO CRÍTICO DA JUNTA	67
3.6	EFEITOS DA UMIDADE NA SUPERFÍCIE DA JUNTA	68
3.7	ESPESSURA DA CAMADA DE ADESIVO	69
3.8	IDADE DO CONCRETO E RETRAÇÃO	70
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL (Materiais e Métodos)	72
4.1	MATERIAIS CONSTITUINTES E RESISTÊNCIA	73
4.1.1	Escolha do Adesivo	74
4.2	MISTURA DOS CONCRETOS, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA	74
4.3	PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DAS JUNTAS	77

4.4	SISTEMAS ADESIVOS NAS JUNTAS	78
4.5	MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO DE REPARO	80
4.6	ENSAIO DE COMPRESSÃO-CISALHAMENTO	83
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	88
5.1	GENERALIDADES	88
5.2	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO PRISMA COMPOSTO EM RELAÇÃO À DO PRISMA MONOLÍTICO DE CONTROLE	89
5.2.1	Análise Global das Resistências de Aderência	99
5.2.2	Comparação com Outros Trabalhos	101
5.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS EM TERMOS DO CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB MODIFICADO	103
5.3.1	Introdução	103
5.3.2	Análise da Aderência dos Sistemas de Reparo com Junta de 60°	105
5.3.2.1	Superfície Rugosa	105
5.3.2.2	Superfície Lisa	108
6	CONCLUSÃO	111
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
	ANEXO A	120
	ANEXO B	128
	ANEXO C	134

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 Classes de agressividade ambiental	11
2.2 Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição	12
2.3 Classificação da agressividade ambiental visando a durabilidade do concreto	12
2.4 Eficiência das resinas adesivas	36
2.5 Procedimentos de preparo do substrato	40
3.1 Valores críticos do ângulo de junta e resistência mínima à compressão dos prismas compostos	63
4.1 Traço dos concretos (base e reparo) utilizados nos ensaios	73
4.2 Controle de moldagem dos prismas	82
4.3 Resistência média dos corpos de prova prismáticos ensaiados à compressão – NBR 5739	85
5.1 Resultados dos testes da Série 1: teste de compressão-cisalhamento de prisma composto com ângulo de junta de 30°	90
5.2 Resultados dos testes da Série 2: teste de compressão-cisalhamento de prisma composto com ângulo de junta de 45°	92
5.3 Resultados dos testes da Série 3: teste de compressão-cisalhamento de prisma composto com ângulo de junta de 60°	94

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Interrelacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho	7
2.2 Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório	9
2.3 Vida útil em função da distribuição estatística de componentes	14
2.4 Relação entre desempenho, manutenção e vida útil	15
2.5 Causas físicas da deterioração do concreto	17
2.6 Causas químicas da deterioração do concreto	18
2.7 Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado	23
2.8 Materiais e sistemas de reparo	30
2.9 Mistura mecânica da resina epóxi	37
2.10 Aplicação da resina epóxi em pilar a ser recuperado	38
3.1 Ensaio de Tração	47
3.2 Esquema do corpo de prova de flexão	48
3.3 Esquema de ensaio de cisalhamento	50
3.4 Esquema de corpo de prova para ensaio de reconstituição do cilindro	51
3.5 Esquema de corpo de prova para teste de compressão-cisalhamento	52
3.6 Conjunto para produção de fissuras controladas em placas de concreto e placas cortadas reparadas para obtenção de espécimes de ensaio	53
3.7 Modelo de equipamento para hidrodemolição	59
3.8 Relação entre as Tensões de Compressão-Cisalhamento e Círculo de Mohr	61
3.9 Critério de ruptura do tipo Mohr-Coulomb para prismas compostos	62
3.10 Resistência à compressão do prisma composto x ângulo da junta	64

3.11	Envoltória de ruptura para diferentes ângulos da junta de aderência	67
3.12	Espessura da camada de resina x tensão de tração correspondente	70
4.1	Modelos das fôrmas utilizadas para moldagem dos corpos-de-prova, com inclinação de 30°, 45° e 60°	75
4.2	Fôrmas com somente um dos lados concretado	76
4.3	Corpos-de-prova com substrato liso e rugoso	77
4.4	Corpos-de-prova recolocados nas fôrmas sem as cunhas divisórias	78
4.5	Aplicação de adesivo à base de epóxi na junta de aderência	79
4.6	Adensamento do concreto de reparo com uso de vibrador de imersão	80
4.7	Corpos-de-prova prismáticos nivelados por meio de “forro pacote”	83
4.8	Prensa utilizada no teste de compressão-cisalhamento	84
4.9	Rompimento de corpo-de-prova prismático íntegro de referência (monolítico).....	86
4.10	Rompimento de corpo-de-prova prismático composto com junta de 45° (ruptura monolítica)	86
4.11	Rompimento de corpo-de-prova prismático composto com junta de 60° (ruptura na junta de aderência)	87
5.1	Resistência dos prismas compostos com ângulo da junta de 30°.....	90
5.2	Ruptura monolítica de prisma composto com ângulo da junta de 30°	91
5.3	Resistência dos prismas compostos com ângulo da junta de 45°	92
5.4	Ruptura monolítica de prisma composto com ângulo da junta de 45°, reparado com adesivo epóxi	93
5.5	Ruptura na junta de prisma composto com ângulo de 45°, com pasta à base de resina acrílica como ponte de aderência e superfície lisa	94
5.6	Resistência dos prismas compostos com ângulo da junta de 60°	95
5.7	Ruptura monolítica de prisma composto com ângulo da junta de 60° e superfície lisa, reparado com adesivo epóxi	96
5.8	Ruptura na junta de prisma composto com ângulo de 60° e superfície rugosa seca e sem adesivo	97

5.9	Ruptura “mista” monolítica e na junta de prisma composto com ângulo de 60° e superfície lisa e seca, sem adesivo	98
5.10	Ruptura na junta de prisma composto com ângulo de 60° e superfície lisa	98
5.11	Resistência dos prismas compostos com sistema de reparo satisfatório	99
5.12	Resistência dos prismas compostos que apresentaram ruptura na junta	100
5.13	Prismas compostos com ruptura monolítica e resistência abaixo da mínima aceitável	101
5.14	Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas de reparo com superfície rugosa	106
5.15	Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas de adesivo epóxi, com alteração do coeficiente “ μ ”	107
5.16	Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas sem adesivo e superfície úmida e sistema com pasta à base de resina acrílica, com alteração do coeficiente “ μ ”	108
5.17	Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas de reparo com superfície lisa	109
5.18	Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) para os sistemas de reparo com superfície lisa, proposto por Austin, Robins e Pan (1999)	110

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

α – ângulo da junta com a normal à carga

ϕ – ângulo de atrito

μ – coeficiente de atrito

$\geq$ – maior ou igual

$\pm$ – mais ou menos

$\leq$ – menor ou igual

τ – tensão de cisalhamento

σ – tensão normal

σ_u – tensão normal última

a/c – relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

arc tan – arco tangente

ASTM – American Society Test Materials

c – coesão aparente

C₂S, β' -C₂S – silicato dicálcico (belita)

C₃A – aluminato tricálcico (alita)

C₃S – silicato tricálcico

C₄AF – ferroaluminato tetracálcico

Ca₂SO₄ – sulfato de cálcio

CaCO₃ – carbonato de cálcio

CaO – óxido de cálcio

CEB – Comitê Internacional do Beton

CH, Ca(OH)_2 – hidróxido de cálcio ou portlandita

cm – centímetro

cm^3 – centímetro cúbico

CO_2 – dióxido de carbono

cos – coseno

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

f_c – resistência à compressão axial do prisma composto

f_{c28} – resistência característica do concreto à compressão axial simples aos 28 dias de idade

f_{cc} – resistência à compressão cilíndrica do concreto

f_{ck} – resistência característica do concreto à compressão axial simples

f_{cp} – resistência à compressão axial do prisma monolítico

GPa – giga pascal

HCl – ácido clorídrico

kgf/s – quilograma-força por segundo

LA30 – prisma composto com pasta à base de resina acrílica, superfície lisa e ângulo da junta de 30°

LA45 – prisma composto com pasta à base de resina acrílica, superfície lisa e ângulo da junta de 45°

LA60 – prisma composto com pasta à base de resina acrílica, superfície lisa e ângulo da junta de 60°

LE30 – prisma composto com adesivo à base de epóxi, superfície lisa e ângulo da junta de 30°

LE45 – prisma composto com adesivo à base de epóxi, superfície lisa e ângulo da junta de 45°

LE60 – prisma composto com adesivo à base de epóxi, com superfície lisa e ângulo da junta de 60°

LSS30 – prisma composto sem adesivo, superfície lisa e seca e ângulo da junta de 30°

LSS45 – prisma composto sem adesivo, superfície lisa e seca e ângulo da junta de 45°

LSS60 – prisma composto sem adesivo, superfície lisa e seca e ângulo da junta de 60°

LSU30 – prisma composto sem adesivo, superfície lisa e úmida e ângulo da junta de 30°

LSU45 – prisma composto sem adesivo, superfície lisa e úmida e ângulo da junta de 45°

LSU60 – prisma composto sem adesivo, superfície lisa e úmida e ângulo da junta de 60°

M – prisma monolítico de referência

Mg²⁺ – magnésio

MgO – óxido de magnésio

Mg-S-H – silicato de magnésio hidratado

mm – milímetro

mm² – milímetro quadrado

MPa – mega pascal

NACE – National Association of Corrosion Engineers

NBR – Norma Brasileira Registrada

NH₄⁺ – amônia

pH – potencial de hidrogênio iônico

PVA – poli vinil acetato

RA30 – prisma composto com pasta à base de resina acrílica, superfície rugosa e ângulo da junta de 30°

RA45 – prisma composto com pasta à base de resina acrílica, superfície rugosa e ângulo da junta de 45°

RA60 – prisma composto com pasta à base de resina acrílica, superfície rugosa e ângulo da junta de 60°

RE30 – prisma composto com adesivo à base de epóxi, superfície rugosa e ângulo da junta de 30°

RE45 – prisma composto com adesivo à base de epóxi, superfície rugosa e ângulo da junta de 45°

RE60 – prisma composto com adesivo à base de epóxi, com superfície rugosa e ângulo da junta de 60°

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et les Recherches sur les Matériaux et les Constructions

RSS30 – prisma composto sem adesivo, superfície rugosa e seca e ângulo da junta de 30°

RSS45 – prisma composto sem adesivo, superfície rugosa e seca e ângulo da junta de 45°

RSS60 – prisma composto sem adesivo, superfície rugosa e seca e ângulo da junta de 60°

RSU30 – prisma composto sem adesivo, superfície rugosa e úmida e ângulo da junta de 30°

RSU45 – prisma composto sem adesivo, superfície rugosa e úmida e ângulo da junta de 45°

RSU60 – prisma composto sem adesivo, superfície rugosa e úmida e ângulo da junta de 60°

SBR – estireno butadieno

sen – seno

SO₄²⁻ – sulfato

tan – tangente

UR – umidade relativa

RESUMO

Galletto, Adriana. **Reparo de Estruturas de Concreto: Contribuição ao Estudo da Aderência**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. Dissertação de Mestrado.

O setor de reparo e reforço de concreto vem apresentando relevante importância na indústria da construção civil pelo aumento do volume de trabalho nesta área. Um dos métodos mais usuais de reparação estrutural é a remoção do concreto deteriorado e sua recomposição por meio da ligação com outro concreto, utilizando produtos denominados pontes de aderência. Entretanto, a falta de normalização e experiência científica acumulada conduz ao emprego desses materiais baseado somente em informações dos fabricantes e em experiências pessoais dos aplicadores, o que mostra a necessidade de um maior número de pesquisas acadêmicas sobre o assunto. O programa experimental desenvolvido avaliou o desempenho de três diferentes sistemas adesivos usualmente utilizados nos reparos estruturais (junta seca, adesivo à base de epóxi e adesivo à base de resina acrílica), por meio do ensaio de compressão-cisalhamento de prismas de concreto reconstituídos com junta diagonal (slant shear test), levando em consideração características como ângulo, umidade e rugosidade da superfície da interface, comparados a prismas monolíticos de concreto e em termos de critério de Mohr-Coulomb. Os resultados mostram que alguns sistemas de reparo podem prejudicar a resistência de aderência, como é o caso dos adesivos à base de resina acrílica, enquanto o epóxi é capaz de promover a aderência até mesmo em situações onde o ângulo da junta é considerado crítico.

Palavras Chave: **reparo, aderência, concreto.**

ABSTRACT

The repair section and concrete reinforcement comes presenting important in the industry of the construction for the increase of the work volume in this area. One of the most usual methods of structural repair is the removal of the deteriorated concrete and its repair by means of the connection with other concrete, using products of adherence. However, the normalization lack and accumulated scientific experience drives to the employment of those materials only based on the makers' information and in personal experiences of the professional, what shows the need of a larger number of academic researches on the subject. The developed experimental program usually evaluated the acting of three different adhesive systems used in the structural repairs (it joins drought, sticker to the epoxy and sticker to the base of acrylic resin), by means of the rehearsal of slant shear test of concrete prisms reconstituted with diagonal committee, taking in consideration characteristics as angle, humidity and roughness of the surface of the interface, compared monolithic prisms of concrete and in terms of approach of Mohr-Coulomb. The results show that some repair systems can harm the resistance of adherence, as it is the case of the stickers to the acrylic resin, while the epoxy is capable to promote the adherence even in situations where the angle of the committee is considered critical.

Words Key: repair, adherence, concrete.

1 INTRODUÇÃO

Por suas excelentes propriedades de versatilidade, resistência e economia, o concreto de cimento Portland se mostra como um dos mais importantes materiais de construção civil. Entretanto, não raro, obras de concreto têm apresentado algum grau de deterioração, desde manchas superficiais até comprometimento de sua função estrutural, implicando na necessidade de algum tipo de reparo e/ou reforço deste concreto, a fim de que o mesmo possa ter suas propriedades originais restabelecidas. A crescente quantidade de trabalhos nesta área e os elevados custos envolvidos tornaram o setor de reparos estruturais parte importante da indústria da construção civil.

A patologia do concreto pode estar implícita já na fase do projeto, em virtude do desconhecimento por parte do projetista em relação às propriedades e comportamentos dos materiais, e ao ambiente (macro-clima e micro-clima) ao qual estará exposta a edificação.

Os problemas patológicos podem também ocorrer na fase de construção da estrutura, pelos vícios de construção, ou ainda na fase de utilização da estrutura, pelo mau uso da edificação, por falta de manutenções necessárias para manter sua resistência e durabilidade ou pela ocorrência de acidentes.

Levando em consideração esses aspectos, a escolha dos materiais e técnicas de recuperação a serem empregados depende do diagnóstico do problema, das condições da região a ser tratada e das exigências de funcionamento do elemento a ser recuperado.

Dentre os diversos métodos utilizados num processo de reparação estrutural, um dos mais usuais é a remoção do concreto contaminado ou deteriorado e sua recomposição por meio da ligação com outro concreto. Essa união entre os dois concretos é realizada com produtos denominados pontes de aderência.

Além de reparos e/ou reforços de estruturas, as pontes de aderência podem também ser utilizadas nos casos de retomadas de concretagem durante a execução de uma estrutura, depois de determinado tempo, por suspensão temporária de atividades, o que se relaciona, por exemplo, àqueles casos em que se constroem os pavimentos-tipo de edifícios onde as continuidades das concretagens são realizadas em intervalos que podem variar de 15 dias a 30 dias, ou ainda no caso de ampliações de obras.

O produto utilizado como ponte de aderência deve promover uma união que restabeleça a integridade estrutural do componente e a durabilidade, mas para que isso seja possível, é primordial um tratamento adequado da superfície da junta, que deve estar limpa, sem poeira, óleo ou partículas soltas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O mercado da construção civil oferece inúmeros materiais e sistemas para recuperação, reparo e reforço das estruturas de concreto danificadas, sempre garantindo sua eficiência. Porém, pela inexistência de normas específicas para fabricação e aplicação, muitas vezes esses produtos são utilizados sem o conhecimento adequado de suas propriedades químicas e mecânicas, principalmente no que se refere à sua capacidade de aderência, que nem sempre é satisfatória. E, apesar de todo avanço tecnológico na engenharia estrutural, métodos racionais para os projetos de reparo ainda não alcançaram o mesmo refinamento e progresso atingidos pelos métodos de dimensionamento de estruturas novas. Essa falta de normalização e experiência científica acumulada, conduz ao emprego desses materiais baseado somente em informações dos

fabricantes e em experiências pessoais dos aplicadores, o que mostra a necessidade de um maior número de pesquisas acadêmicas nesta área tão importante e crescente da engenharia.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é a comparação do desempenho de três tipos de ponte de aderência usualmente utilizados nos reparos de estruturas de concreto: junta seca (concreto/concreto), adesivo à base de epóxi e adesivo à base de resina acrílica, aplicados no concreto convencional, por meio de um programa experimental que teve como base o ensaio de compressão-cisalhamento (slant shear test) e visa comparar estes sistemas na resistência de prismas compostos, com relação a prismas monolíticos, e em termos de Critério de Mohr-Coulomb.

Ainda com o objetivo de um estudo comparativo, essas pontes de aderência foram aplicadas a dois tipos de substrato: liso e rugoso, onde os corpos-de-prova apresentaram três ângulos de inclinação da junta: 30°, 45° e 60°.

1.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A apresentação deste trabalho foi disposta em sete capítulos, tratando os seguintes pontos:

O Capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa e o objetivo do trabalho.

No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica, onde são apresentadas as considerações gerais a respeito da durabilidade do concreto e determinação dos procedimentos de reparo, além dos princípios de funcionamento da ponte de aderência.

O Capítulo 3 apresenta os métodos de avaliação de desempenho da junta de aderência e uma análise do estado das tensões na interface de prismas reconstituídos, submetidos ao ensaio de compressão-cisalhamento. Cita, ainda, trabalhos realizados na área e propõe o uso do Critério de Mohr-Coulomb Modificado para a análise das tensões. Neste capítulo são apresentados também os fatores que podem influenciar nos resultados dos ensaios, como: preparação da superfície das juntas (rugosidade das juntas), coeficientes de atrito, ângulos das juntas, efeitos da umidade, espessura da camada de adesivo e idade do concreto.

O programa experimental é descrito no Capítulo 4, onde são apresentados o modo de preparação dos corpos-de-prova, as especificações dos materiais utilizados, os ângulos adotados, o tratamento da superfície das juntas e todo o desenvolvimento do ensaio.

No Capítulo 5 são apresentadas as análises dos resultados do programa experimental que utilizou o ensaio de compressão-cisalhamento para avaliação da resistência da aderência entre os dois concretos.

As conclusões e sugestões para futuros trabalhos são apresentadas no Capítulo 6, as referências bibliográficas no Capítulo 7 e, por fim, os anexos contendo as propriedades dos materiais utilizados como adesivos, as resistências à compressão dos 96 prismas compostos, 8 prismas monolíticos e 8 corpos-de-prova cilíndricos moldados para o programa experimental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Garcia (1998), o reparo em estruturas de concreto é, em geral, uma tarefa complexa em virtude da necessidade de uma precisa avaliação das condições estruturais, da identificação das fontes causadoras do enfraquecimento e/ou degradação, do grau de conhecimento necessário para o projeto e especificações de um reparo, e uma variedade de outras operações que usualmente envolvem o uso de materiais e técnicas especializadas que, muitas vezes, são empregados em circunstâncias desfavoráveis.

Cunha, Souza e Lima (1998) concordam que a identificação das causas do processo patológico que levou à degradação da estrutura será sempre um fator preponderante para a prescrição da mais adequada metodologia de reparação.

Existe um grande número de trabalhos técnicos e científicos relacionados com reparos e reforços de estruturas, assim como uma ampla oferta de materiais e sistemas. Por outro lado, segundo Andrade (1992), a experiência científica não é muito grande e em certas ocasiões ocorre uma falha precoce no reparo que poderia ser evitada com um estudo mais cuidadoso da situação. Em outras ocasiões a falha é inevitável por causa do escasso conhecimento sobre o comportamento dos materiais e sistemas de reparo, principalmente a longa duração.

Com base nesses dados, será abordada, a seguir, uma síntese das considerações necessárias para uma adequada execução de reparo e/ou reforço do concreto.

2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURABILIDADE DO CONCRETO

Segundo o Comitê do ACI-201 (1992), durabilidade do concreto é a sua capacidade de resistir as ações de intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

Neville (1997) concorda que o concreto deva suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido, mas isso não significa vida indefinida, nem significa suportar qualquer tipo de ação sem que seja necessária uma manutenção de rotina.

Aïtcin (2000) considera a durabilidade do concreto como um critério-chave para um bom projeto, porém comenta que o termo “durabilidade” pode ser vago, pois, além de caracterizar, em termos gerais, a resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos físicos e químicos, é importante que se considere também a natureza, a intensidade e os mecanismos implicados em cada um desses diversos ataques, que podem variar consideravelmente.

A água geralmente está envolvida em todo tipo de deterioração, e em sólidos porosos a permeabilidade do material habitualmente determina a taxa de degradação, de acordo com Mehta e Monteiro (1994) e Mays (1992).

Um maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos nos meios porosos como o concreto, tem permitido uma evolução no estudo da durabilidade, possibilitando associar a prática aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos.

Souza e Ripper (1998) citam o Guia Prático para Projeto de Estruturas de Concreto Duráveis, editado pelo CEB BM nº 183 (1989), como destaque dentre as recomendações para normalizações regionais a serem estabelecidas sobre o assunto, que apresenta um quadro definidor do conjunto de inter-relações entre os diversos fatores que influem na durabilidade e no desempenho de uma estrutura, resumido na figura 2.1.

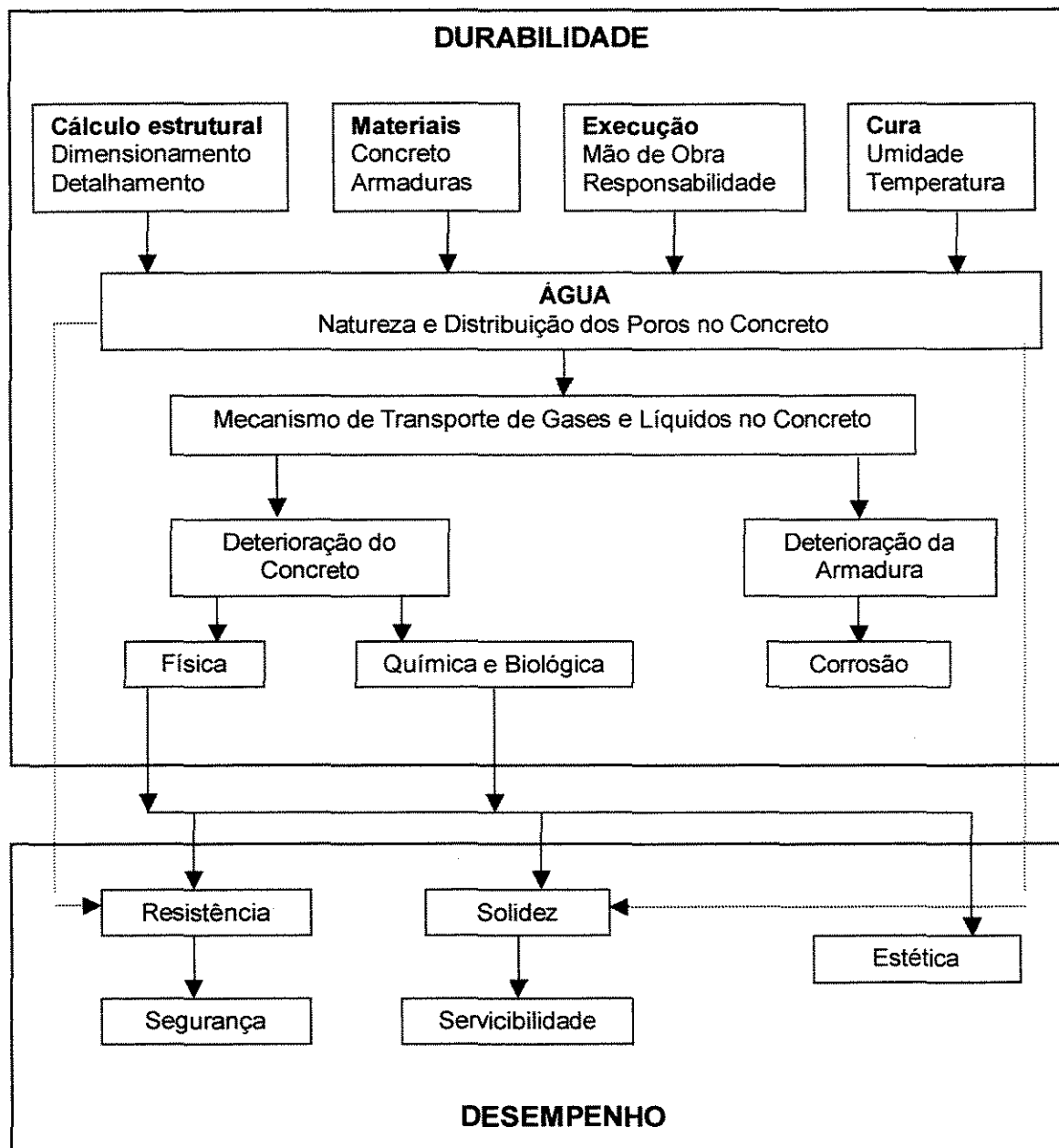


Figura 2.1. Interrelacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho – CEB – Boletim nº183 por Souza e Riper, 1998

Da observação deste quadro infere-se que a combinação dos agentes ambientais (temperatura, umidade, chuva, vento, salinidade e agressividade química ou biológica) transportados para a massa de concreto, assim como a resposta dessa massa a tal ação constitui os principais elementos do processo de definição da durabilidade, sendo a água (ou a umidade) o elemento principal de toda a questão, considerados adequados ao mecanismo de resistência.

O estudo das manifestações patológicas das edificações deve contemplar fases distintas de observação, análise e conclusão, que permitam ao especialista o levantamento das informações necessárias à formação de hipóteses, por meio de pesquisas “*in loco*”, pesquisas bibliográficas e ensaios laboratoriais, tornando possível desta maneira, a completa compreensão dos fenômenos envolvidos e a determinação das causas. A partir destes dados obtém-se a adoção da alternativa mais viável ao tratamento de manifestações patológicas, devendo-se considerar a relação custo/benefício e os recursos tecnológicos envolvidos em cada uma das alternativas de intervenção, ou seja, a técnica, os materiais e equipamentos necessários, segundo Lichtenstein (1985).

Andrade (1992), Garcia (1998) e Souza e Ripper (1998) recomendam, após o tratamento, que se monitore o comportamento não só da área recuperada, mas o comportamento global da estrutura.

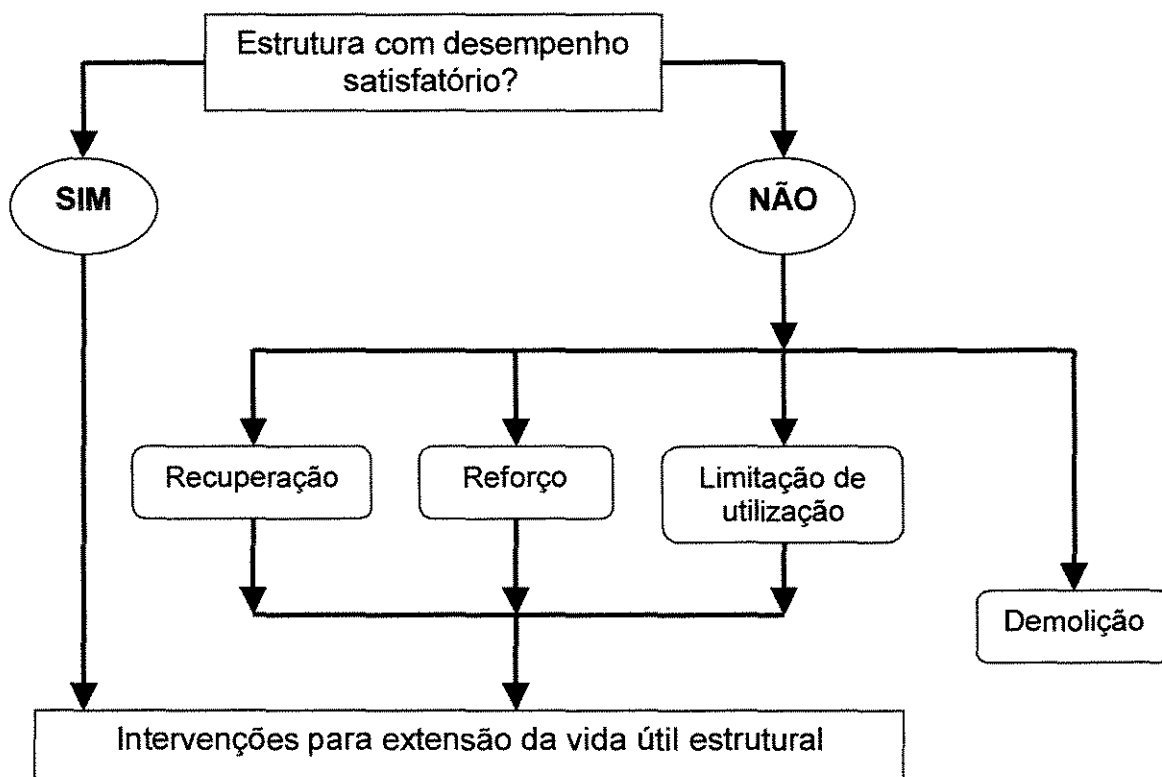


Figura 2.2. Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório. SOUZA e RIPER (1998)

De acordo com Helene (1983), é possível estabelecer a correspondência entre a agressividade do meio *versus* a durabilidade da estrutura de concreto, por meio do conhecimento, avaliação e classificação do grau de agressividade do ambiente e do tipo e geometria da estrutura de concreto.

A degradação do concreto pode ter início poucos meses após a conclusão da obra, e é mais significativa em estruturas localizadas em grandes centros urbanos, industriais e em ambientes marinhos. Assim, uma avaliação adequada da agressividade ambiental ou atmosfera circundante é um fator de extrema importância, devendo ser levada em conta durante o

planejamento da obra, pois nesta etapa podem ser tomadas providências para que a estrutura tenha uma maior durabilidade.

Outro aspecto importantíssimo a ser considerado é a temperatura. Tal fator é diretamente responsável pelo aumento da velocidade das reações químicas. De acordo com Helene (1985), as questões de deterioração química nas estruturas situadas em países de clima equatorial e tropical são mais graves e intensas que nas estruturas similares situadas em países de clima temperado, em função principalmente das altas temperaturas observadas em tais localidades.

Segundo o CEB (1992), é bastante difícil avaliar a ação do meio ambiente nas estruturas de concreto, visto que há uma interdependência entre os diversos fatores que o compõem. Assim, face à grande variedade e interação existente entre os diversos tipos de ambiente, um dos pontos mais importantes a ser verificado na definição da agressividade ambiental às estruturas de concreto é o micro-clima, que se refere à interação que ocorre entre o meio ambiente (ou macro-clima) e a superfície da estrutura.

O micro-clima é mais variável que o macro-clima, pois as estruturas de concreto podem estar sujeitas a uma maior ou menor variação de fatores como umidade e temperatura em certas áreas. Por exemplo, em uma mesma edificação, que está inserida em um determinado macro ambiente, podem existir fachadas que apresentem danos maiores do que outras, em função da maior temperatura incidente na mesma ou ação de névoa salina, caso esta edificação esteja situada em ambiente marinho. Desta forma, o efeito do micro-clima tanto pode acarretar diferentes manifestações patológicas em estruturas localizadas em um mesmo ambiente quanto em partes diferentes de uma mesma estrutura.

Helene (1997) afirma ser possível avaliar a agressividade ambiental segundo o ponto de vista da durabilidade da armadura e da durabilidade do próprio concreto. No caso dos projetos das estruturas correntes, pode-se considerar as classes apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classes de agressividade ambiental. HELENE (1997)

Classe de Agressividade	Agressividade	Risco de Deterioração da Estrutura
I	fraca	insignificante
II	média	pequeno
III	forte	grande
IV	muito forte	elevado

A classificação da agressividade do meio ambiente nas estruturas de concreto armado e protendido pode ser avaliada segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes de acordo com a tabela 2.2.

Uma classificação mais rigorosa, com base na concentração efetiva de certas substâncias agressivas no ambiente que envolve a estrutura ou suas partes pode também ser utilizada em casos especiais, recomendando-se os limites orientativos constantes da norma CETESB L1007. Em lugar dessa norma e no caso de agressividade ao concreto, um outro critério mais rigoroso pode ser a avaliação de determinações específicas conforme os valores referenciais propostos pelo CEB/FIB Model Code 1990, apresentados na tabela 2.3.

Tabela 2.2 – Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição. HELENE (1997)

MACRO-CLIMA	MICRO-CLIMA			
	Interior das Edificações		Exterior das Edificações	
	Seco $UR \leq 65\%$ (Salas, dormitórios ou ambientes revestidos com argamassa e pintura)	Úmido ou Ciclos de Molhagem e Secagem (Vestiários, banheiros, cozinhas, garagens, lavanderias)	Seco $UR \leq 65\%$ (Interior do nordeste brasileiro, partes protegidas de chuva em ambientes predominant. secos)	Úmido ou Ciclos de Molhagem e Secagem (Incluindo ambientes quimicamente agressivos)
rural	I	I	I	II
urbana	I	II	I	II
marinha	II	III	-----	III
respingos de maré	-----	-----	-----	IV
industrial	II	III	II	III
submersa $\geq 3m$	-----	-----	-----	-----
solo	-----	-----	não agressivo: I	úmido e agressivo: II, III ou IV

Tabela 2.3 – Classificação da agressividade ambiental visando a durabilidade do concreto. CEB (1990)

Classe de Agressividade	pH	CO ₂ agressivo mg/l	amônia NH ₄ ⁺ mg/l	magnésio Mg ²⁺ mg/l	sulfato SO ₄ ²⁻ mg/l	sólidos dissolv. mg/l
I	> 6	< 20	< 100	< 150	< 400	> 150
II	5,9 – 5,1	20 – 30	100 – 150	150 – 250	400 – 700	150 – 50
III	5,0 – 4,5	30 – 100	150 – 200	250 – 500	700	< 50
IV	< 4,5	> 100	> 250	> 500	> 1500	< 50

Para utilização da tabela 2.3:

- no caso de solos, a análise deve ser feita no extrato aquoso do solo;
- água em movimento, temperatura acima de 30°C, ou solo agressivo muito permeável, conduz a um aumento de um grau na classe de agressividade;
- ação física superficial tal como abrasão e cavitação aumentam a velocidade de ataque químico.

Em comentários acerca da durabilidade de concretos, Neville (1997) cita que é essencial que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto, ou pelo menos razoável. Portanto o concreto deve poder suportar o processo de deterioração a qual se suponha a ser submetido. Nessas condições o concreto é considerado durável.

A durabilidade de uma estrutura é então relacionada com o período de tempo que esta estrutura permanece em serviço; depara-se, portanto com o conceito de vida útil. A vida útil de um material ou componente pode ser definida como o período durante o qual as propriedades desse material ou componente permanecem acima de limites mínimos admissíveis.

Segundo Lichtenstein (1985), esses limites mínimos admissíveis variam em função das condições a que os materiais e componentes estejam expostos ou submetidos. Por exemplo, um concreto projetado com determinada composição de materiais e resistência mecânica pode apresentar um desempenho variado, dependendo do grau de exposição: local, meio ambiente, micro-região, compatibilidade de materiais etc.

Ainda assim, partindo-se da premissa de que todos os fatores intervenientes foram considerados, a vida útil de um material ou componente é obtido por meio de uma análise estatística, conforme figura 2.3.

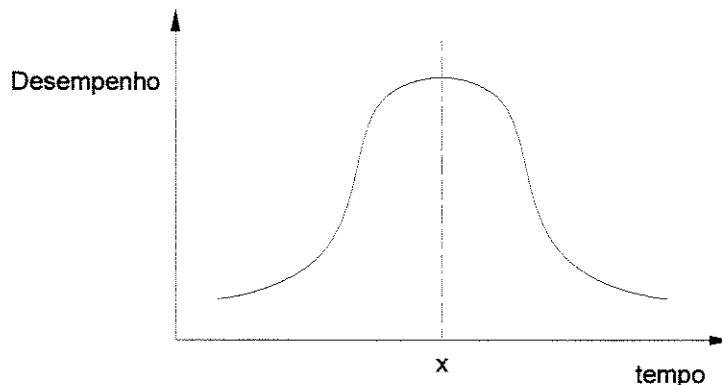


Figura 2.3 - Vida útil em função da distribuição estatística de componentes.
LICHTENSTEIN(1985)

A questão da vida útil das estruturas de concreto deve ser considerada como resultante de ações coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo: concepção ou planejamento; projeto; fabricação de materiais e componentes; execução propriamente dita e principalmente durante a etapa de uso da estrutura. É nessa etapa onde serão realizadas as operações de vistoria, monitoramento e manutenções preventivas e corretivas, indispensáveis numa consideração correta e sistêmica da vida útil. HELENE e PEREIRA (2003)

A observação de dois tipos de manutenção é feita por Helene (1992), citando as manutenções preventiva e corretiva.

A primeira é caracterizada por medidas tomadas com antecedência e previsão, durante o período de uso e manutenção da estrutura, pode ser associado a um custo de cinco a vinte e cinco vezes menor que aquele necessário à correção dos problemas gerados a partir da não intervenção preventiva tomada com antecedência à manifestação explícita de patologia. Já a manutenção corretiva, corresponde aos trabalhos de diagnósticos, prognóstico, reparo e proteção das estruturas que já apresentam manifestações patológicas, ou seja, correção de problemas evidentes. A estas atividades pode-se associar um custo 125 vezes superior ao custo de medidas que poderiam ser tomadas durante a fase de projeto e que implicariam em um mesmo grau de proteção e durabilidade que se estime da obra a partir da correção.

De acordo com Lichtenstein (1985), Souza e Ripper (1998) e Helene e Pereira (2003), o programa de manutenção, está associado também com a tipologia da obra, visto que no projeto a escolha dos materiais e a composição final do produto, para cada caso, deve estar associada à responsabilidade e riscos que a obra irá oferecer às pessoas e ao próprio meio ambiente. Por exemplo: os materiais especificados para uma residência não devem ser os mesmos que para uma central atômica. Nesse último caso, as inspeções serão mais freqüentes, porém os materiais devem ter um comportamento muito mais estável. Essa situação pode ser representada na figura 2.4.

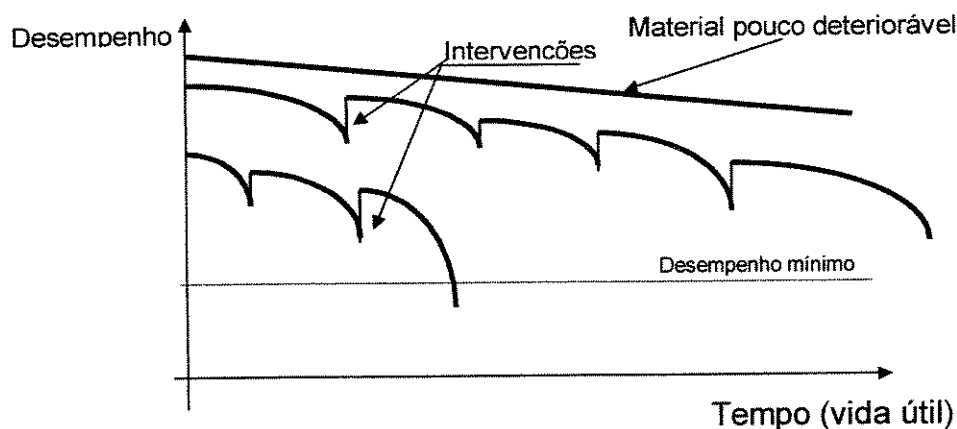


Figura 2.4 - Relação entre desempenho, manutenção e vida útil.
LICHTENSTEIN (1985)

Na tomada de decisão sobre a viabilidade de intervenções e manutenções, é importante o pleno conhecimento da relação investimento-desempenho. Muitas vezes grandes investimentos são utilizados para promover um curto período de desempenho aceitável da estrutura ou parte dela, o que do ponto de vista comercial é sinônimo de prejuízo, e má utilização de verbas públicas, no caso de obras municipais, estaduais, etc. SOUZA e RIPPER (1998)

Outro fator relevante na durabilidade de concretos é a facilidade com a qual os fluidos, tanto líquidos como gases, podem ingressar no concreto e se deslocar no seu interior; essa característica é mencionada como a permeabilidade do concreto.

Segundo Neville (1997), são três os principais fluidos importantes para a durabilidade que podem ingressar no concreto: água (pura ou contendo íons agressivos), dióxido de carbono e oxigênio. Eles podem se deslocar pelo concreto de três modos diferentes, mas todo deslocamento depende basicamente da estrutura da pasta de cimento hidratado. No caso do concreto o deslocamento dos diversos fluidos se efetua não somente por escoamento por meio do meio poroso, mas também por difusão e adsorção.

É comum o termo permeabilidade ser confundido com porosidade, deste modo é conveniente conceituar estas duas propriedades:

- Porosidade: Característica correlacionada com o volume, distribuição e características de poros que podem ou não ser interconectados. Significando que, no caso da pasta de cimento, podem até haver poros internos, porém se não conectados, não haverá passagem de fluidos.

- Permeabilidade: vazão de um fluido através de um corpo dada uma certa pressão e temperatura. Essa vazão depende do tamanho, da continuidade dos poros e da sua distribuição, e não somente da porosidade em si. A natureza do sistema poroso da pasta de cimento hidratado é de suma importância para a permeabilidade do concreto, considerando o interior de sua massa e a região de interface com os agregados. MEHTA & MONTEIRO (1994)

É importante atentar para a questão da porosidade na região da interface pasta/agregado. Sabe-se que esta região tem microestrutura diferente do restante da pasta. Segundo Neville (1997), é na região de interface que ocorrem microfissurações, e por esta razão poderia se esperar que a região de interface contribuísse significativamente para a permeabilidade do concreto.

Os agregados também podem conter poros, porém estes poros geralmente não possuem uma continuidade, além disso, as partículas dos agregados são envolvidas pela pasta de cimento, desse modo não há contribuição à permeabilidade do concreto.

2.1.1 Principais Causas de Deterioração de Estruturas de Concreto

As principais causas de deterioração são classificadas em causas físicas e químicas, segundo Souza e Ripper (1998), Neville (1997), Mehta e Monteiro (1994).

As figuras 2.5 e 2.6 ilustram esta classificação.

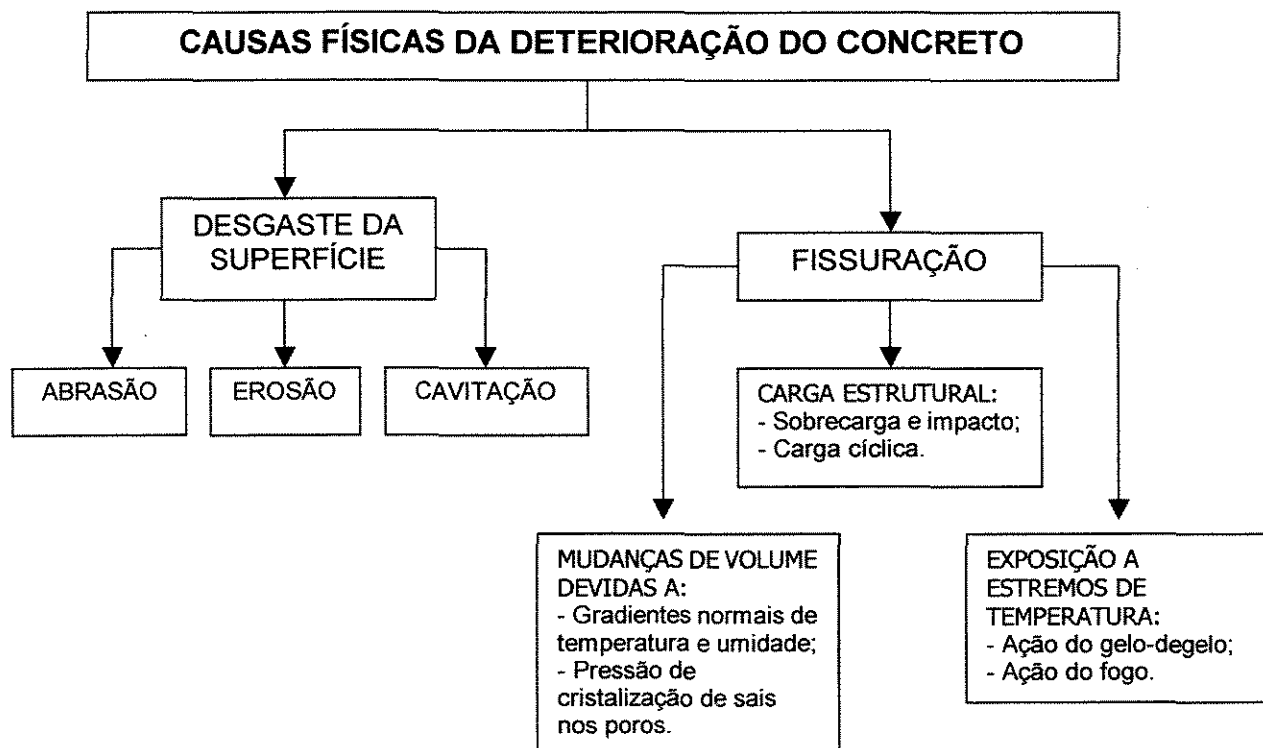


Figura 2.5 – Causas físicas da deterioração do concreto. MEHTA & MONTEIRO (1994)

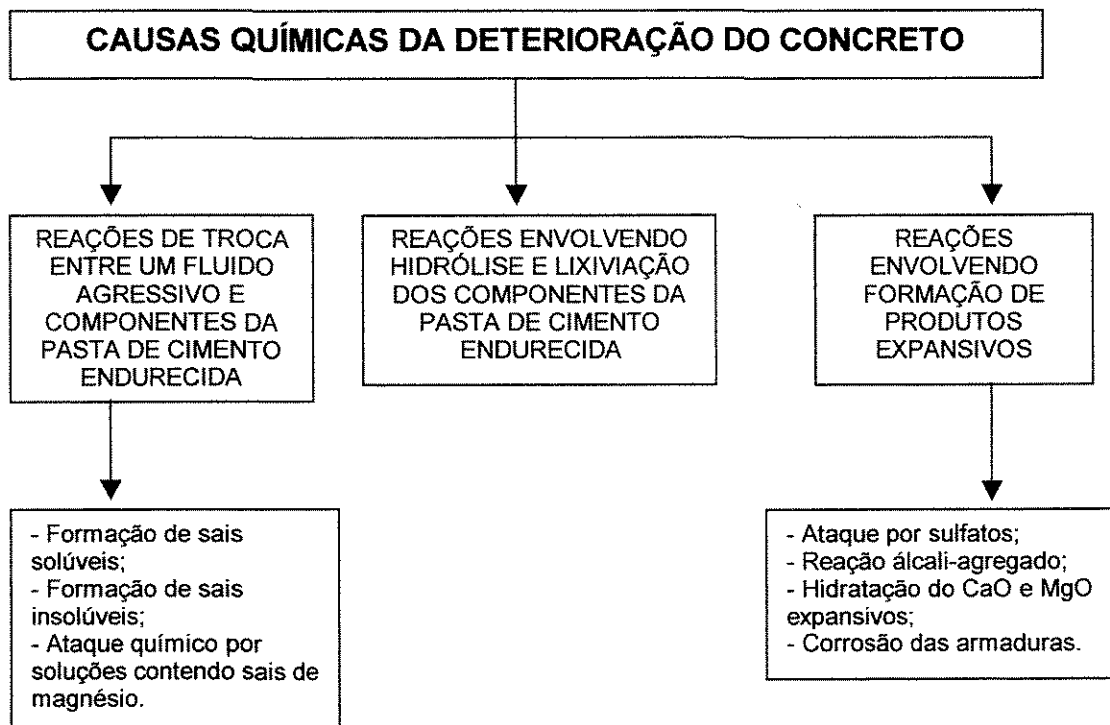


Figura 2.6 – Causas químicas da deterioração do concreto. MEHTA & MONTEIRO (1994)

2.1.1.1 Deterioração do Concreto por Causas Físicas

As causas de deterioração de origem física - ou mecânica - são agrupadas em duas categorias: deterioração por causa do desgaste superficial e da fissuração. SOUZA e RIPPER (1998), NEVILLE (1997) e MEHTA & MONTEIRO (1994).

- **Deterioração devido ao desgaste superficial**

Ocorre com a perda progressiva de massa a partir da superfície do concreto e pode se dar por três situações:

a) *abrasão*: se refere ao atrito seco. Um exemplo é o caso dos pavimentos e pisos industriais em virtude do tráfego de veículos;

b) *erosão*: termo normalmente usado para descrever o desgaste pela ação abrasiva de fluidos contendo partículas sólidas em suspensão. Pode ocorrer em estruturas hidráulicas, como em revestimentos de canais, vertedouros e tubulações para o transporte de água e esgoto;

c) *cavitação*: perda de massa pela formação de bolhas de vapor e sua subsequente ruptura em virtude das mudanças repentinas de direção em águas que fluem com alta velocidade.

• **Deterioração por causa da fissuração**

A fissuração é um dos mais importantes sintomas patológicos. Em todas as construções, nas quais intervém o concreto, aparecem fissuras que podem manifestar-se após anos, semanas ou, inclusive, mesmo após algumas horas.

As fissuras com abertura inferior a 0,05mm são consideradas microfissuras por não serem perceptíveis a olho nu e não serem significativas; as fissuras de amplitude entre 0,12 e 0,20mm não costumam oferecer perigo de corrosão das armaduras, salvo se o meio ambiente for agressivo. CÁNOVAS (1988)

De acordo com Cánovas (1988) e Neville (1997), diversos fatores podem levar a fissuração do concreto desde o estado plástico ao estado endurecido:

a) Fissuração no estado plástico

- fissura de retração plástica;
- fissura de assentamento plástico;
- fissura de retração térmica;
- fissura por secagem rápida;
- fissura de sedimentação pelo impedimento da armadura;
- fissura de sedimentação pelo impedimento do agregado;
- fissura por movimentação da fundação ou fôrma;

- fissura por movimentos laterais da fôrma.

b) Fissuração no estado endurecido

- fissuras por movimentações térmicas;
- fissuras por movimentações higroscópicas;
- fissuras pela atuação de sobrecargas;
- fissuras por deformabilidade excessiva de estruturas de concreto armado;
- fissuras por recalque de fundação;
- fissuras por retração de produtos à base de cimento;
- fissuras pela cristalização de sais nos poros.

2.1.1.2 Deterioração do Concreto por Causas Químicas

A resistência do concreto a processos destrutivos iniciados por reações químicas envolve geralmente, mas não necessariamente, interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio externo e os constituintes da pasta de cimento.

Entre as exceções estão as reações álcali-agregados que ocorrem entre os álcalis da pasta de cimento e certos materiais reativos quando presentes nos agregados; hidratação retardada do CaO e MgO cristalinos, se presentes em quantidades excessivas no cimento Portland, e corrosão eletroquímica da armadura de aço no concreto.

Grandes concentrações de íons de Na^+ , K^+ e OH^- , dissolvidos no gel dos poros, fornecem à pasta de cimento um pH que varia entre 12,5 a 13,5, altamente alcalino. Assim, é óbvio que o concreto estaria em um estado de desequilíbrio químico quando entrasse em contato com um meio ácido. Teoricamente, qualquer meio com pH menor que 12,5 pode ser qualificado

como agressivo porque a redução da alcalinidade do fluido dos poros levaria a uma desestabilização dos produtos cimentícios de hidratação.

Mehta e Monteiro (1994) citam as três situações em que reações químicas ocorrem em interação com a pasta de cimento endurecida:

a) *Hidrólise dos componentes da pasta de cimento*: águas contendo poucos ou nenhum íon de cálcio, quando em contato com a pasta de cimento Portland, causam a lixiviação do hidróxido de cálcio expondo outros componentes cimentícios à decomposição química. Esse processo leva o concreto a uma perda de resistência e afeta também a sua estética, pois o produto lixiviado, interagindo com o CO_2 presente no ar, resulta na precipitação de crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície;

b) *Reações por troca de cátions*: podem causar três tipos de reações deletérias. Dentre estas reações são destacadas as que formam sais solúveis, como o cloreto de cálcio, acetato de cálcio, cloreto de alumínio, cloreto de ferro e com maior destaque os ácidos carbônico e sulfúrico. Ainda podem ser formados sais de cálcio insolúveis e não expansivos (ácido oxálico, tartárico e fluorídrico) e o ataque químico contendo sais de magnésio (cloreto, sulfato ou bicarbonato de magnésio) que ao interagirem com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), transformam-se em silicato de magnésio hidratado (Mg-S-H), que não possui característica cimentícia.

c) *Reações formando produtos expansivos*: levando a tensões internas que se manifestam pelo fechamento de juntas de expansão, deslocamentos seguidos de fissuração, lascamento e pipocamento da estrutura.

São quatro os fenômenos associados com reações químicas expansivas:

- Ataque por sulfato: de acordo com Neville (1997), os sais sólidos não atacam o concreto, mas quando dissolvidos, podem reagir com a pasta de cimento endurecida. Alguns tipos de solo e água freática podem conter sulfatos de sódio, potássio, magnésio e cálcio, que reagem

com os produtos de hidratação do cimento. Esses sulfatos podem também ser proveniente de efluentes industriais e fertilizantes.

Apesar da grande quantidade de sulfatos na água do mar, a reação que ocorre entre os íons sulfato e o C_3A e o $C-S-H$, resultando a formação de etringita, não é associada com expansão deletéria, porque a etringita, bem como o gesso, são solúveis na presença de cloretos e podem ser lixiviados pela água do mar.

- Reação álcali-agregado: este processo químico é caracterizado quando alguns constituintes mineralógicos dos agregados reagem com os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, algumas adições minerais, agentes internos) dissolvidos na solução dos poros do concreto. O produto dessas reações invariavelmente é um gel higroscópico com característica expansiva. Tal característica é a responsável por movimentações diferenciais nas estruturas, fissurações, pipocamento, redução significativa das resistências à tração e compressão do concreto. Classifica-se em três as reações envolvendo álcalis:

- reação álcali-sílica: envolve a presença de sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) ou artificiais;

- reação álcali-silicato: envolve silicatos presentes nos feldspatos, folhelhos, argilosos, certas rochas sedimentares, metamórficas, ígneas e fundamentalmente a presença do quartzo deformado (tensionado) e minerais expansivos;

- reação álcali-carbonato: envolve certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas presentes nos poros do concreto.

- Corrosão da armadura do concreto: é o problema mais comum relacionado com a deterioração das estruturas de concreto. Trata-se de um fenômeno de natureza eletroquímica, que pode ser acelerado pela presença de agentes agressivos externos, do ambiente, ou internos, incorporados ao concreto. Para que a corrosão se manifeste é necessário que haja oxigênio (ar), umidade (água) e o estabelecimento de uma célula de corrosão eletroquímica (heterogeneidade da estrutura), que só ocorre após a despassivação da armadura. HELENE e PEREIRA (2003)

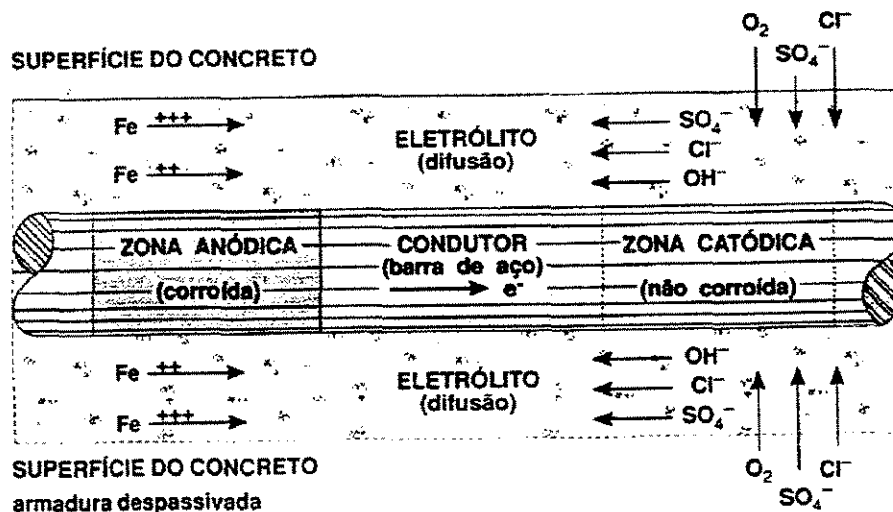


Figura 2.7 – Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado. HELENE e PEREIRA (2003)

A água está sempre presente no concreto e, geralmente, em quantidades suficientes para atuar como eletrólito, principalmente nas regiões da obra expostas às intempéries. Certos produtos de hidratação do cimento como o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita), que é solúvel em água, também formam nos poros e capilares uma solução saturada que constitui um bom eletrólito. HELENE (1986)

As causas deste problema são freqüentemente associadas à contaminação por cloretos e a carbonatação.

– despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto): ocorre por penetração do cloreto por meio de processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto que ao superarem, na solução dos poros do concreto, um certo limite em relação à concentração de hidroxilas, despassivam a superfície do aço e instalam a corrosão. Eventualmente, esses teores elevados de cloreto podem ter sido introduzidos durante o amassamento do concreto, geralmente por excesso de aditivos aceleradores de endurecimento.

O fenômeno não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto nem altera seu aspecto superficial. A identificação da frente ou da profundidade de penetração de certo teor crítico de cloreto requer ensaios específicos. Ao atingir a armadura pode promover séria corrosão com aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes;

– despassivação por carbonatação: ocorre por ação de gás carbônico da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto reduzindo o pH dessa solução. A despassivação deletéria só ocorre de maneira significativa em ambientes de umidade relativa abaixo de 98% e acima de 60%, ou em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a instalação da corrosão. O fenômeno de carbonatação propriamente dita, não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto e até aumenta sua dureza superficial. A identificação da frente ou profundidade de carbonatação requer ensaios específicos. Ao atingir a armadura, dependendo das condições de umidade ambiente pode promover séria corrosão com aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes.

- Hidratação do MgO e CaO cristalinos: o fenômeno da hidratação, tanto do periclásio (MgO) quanto do CaO, quando presentes em quantidades substanciais no cimento, podem causar expansão e fissuração no concreto. Atualmente o fenômeno da expansão em virtude da presença do CaO cristalino no cimento Portland é raro de ocorrer, pois os avanços incorporados no controle da manufatura asseguram que o conteúdo de CaO não combinado ou cristalino não exceda a 1%. Acima de 2,8%, há risco de ocorrer expansões consideráveis.

2.1.1.3 Outros Fenômenos Patológicos

São relacionados a seguir outros fenômenos patológicos freqüentemente observados em estruturas de concreto. CÁNOVAS (1988); MEHTA & MONTEIRO (1994); NEVILLE (1997)

- Desagregação – caracteriza-se pela perda do caráter conglomerante do cimento, levando a uma perda de coesão do concreto e reduzindo assim sua resistência mecânica. Pode indicar a ocorrência de ataque químico pela ação de sulfatos e/ou cloretos;

- Disgregação – caracteriza-se pela ruptura do concreto, em geral nas regiões salientes da peça. Um dos motivos mais freqüentes deste fenômeno é a corrosão das armaduras. A elevada pressão exercida pela camada expansiva do óxido dá lugar a um forte estado tensional no concreto;

- Eflorescência – a lixiviação dos compostos calcários, pode levar a formação de depósitos de sais na superfície de concreto, conhecidos como eflorescências. Pode ocorrer quando a água percola através do concreto e existe a possibilidade da sua evaporação. O carbonato de cálcio (CaCO_3) formado pela reação do Ca(OH)_2 com o CO_2 é deixado na forma de um depósito branco. Também se encontram depósitos de sulfato de cálcio (Ca_2SO_4);

- Ninhos de concretagem – é comum confundir ninhos de concretagem com segregação. A segregação surge pelo mau planejamento da concretagem (por exemplo, lançamento do concreto de altura inadequada e concreto excessivamente plástico), ocasionando uma separação entre a argamassa e os agregados. Os ninhos de concretagem podem surgir por mau adensamento, altas taxas de armadura, como por exemplo, em pé de pilar, ou por incompatibilidade de dimensões do agregado graúdo, impedindo a passagem do concreto em determinadas regiões resultando em espaços sem preenchimento não só de pasta, mas também do agregado graúdo surgindo “buracos” ao longo da peça;

- Lixiviação – fenômeno geralmente ligado a uma redução significativa do pH do concreto, levando a despassivação das armaduras. É caracterizada pela dissolução da pasta de cimento do concreto por causa da incidência de águas ácidas, águas moles, chuvas ácidas e outros produtos que causem o carreamento dos compostos hidratados.

2.2 Considerações Gerais para a Determinação dos Procedimentos de Reparo

A recente norma Européia EN 1504, trata da proteção e reparo das estruturas de concreto, onde os principais grupos relativos a produtos e sistemas de reparo são:

- Sistemas de proteção de superfícies;
- Argamassas e concretos para reparos estruturais e não-estruturais;
- Aderência estrutural;
- Injeção para concreto;
- Grautes para ancoragem de armaduras e para preenchimento de vazios externos;
- Prevenção da corrosão das armaduras.

Para que o reparo apresente um bom desempenho, é necessário que as propriedades do material de reparo e as do substrato sejam corretamente combinadas. Isso deve assegurar que o material de reparo possa resistir às tensões resultantes do carregamento das mudanças de volume da estrutura, em um meio ambiente específico sem apresentar sinais de deterioração precoce por fissuras ou destacamento do substrato, segundo Moreno e Selmo (2001).

Sobre os diversos materiais desenvolvidos para utilização em trabalhos de reabilitação de estruturas de concreto, a maioria da literatura existente é comercial e nem sempre são baseadas em pesquisas profundas, assim, é recomendável a execução de uma análise individual desses materiais. (GARCIA, 1998)

Independentemente do material utilizado, existe uma série de cuidados tão imprescindíveis para o sucesso de uma intervenção de reparação quanto à correta escolha e aplicação dos produtos da união concreto novo-concreto velho. A NACE – National Association of Corrosion Engineers (1990), por exemplo, estabelece um roteiro para caracterizar e diagnosticar os problemas de corrosão das armaduras e daí proceder aos reparos necessários, bem como à aplicação de técnicas para o controle da corrosão. O roteiro consiste nos seguintes passos principais:

- Inspeção visual e física: avaliação da estrutura e pesquisa da corrosão;
- Estudo do local e do meio físico: poluição do ar, solo, água, intemperismo, exposição a meios corrosivos, correntes de fuga etc;
- Estudo da estrutura: avaliação das condições das barras de aço e do concreto, avaliação das condições eletroquímicas e determinação das causas e fatores de corrosão;
- Revisão da história do edifício: “as built”, reparos anteriores, controles e avaliação da corrosão porventura existente;
- Verificação da integridade estrutural: verificação da qualidade do concreto por meio de ensaios de permeabilidade, medidas do teor de ar, medidas de descolamentos e expansão - elaboração de mapeamentos, avaliação do desempenho com base em ensaios de carga, mapeamento e medida de fissuras etc;
- Corrosão do metal: determinação das condições da corrosão - potencial eletroquímico do aço, exames metalográficos, taxas de corrosão, etc;
- Fatores que afetam a corrosão do metal: espessura do revestimento, potencial eletroquímico, concentração de íons agressivos em diversas profundidades, resistividade do concreto, absorção de umidade do concreto, resistência à penetração dos cloretos; pH do concreto e espessura de carbonatação, uso e comportamento mecânico da estrutura, meio físico onde está a estrutura, existência e estado do revestimento protetor.

As opções de reparo são escolhidas em função das análises efetuadas com os resultados obtidos da rotina de inspeção e consistem em:

- Nenhuma ação imediata;

- Reparos mínimos;
- Reparos significativos.

A preocupação maior da NACE, nessa publicação, é com reparos a base de proteção catódica visando impedir a corrosão por cloretos. Quanto à união do concreto velho com o novo, a única recomendação é que ela seja efetuada com materiais que possuam compatibilidade físico-química com a proteção catódica escolhida.

O American Concrete Institute possui alguns documentos que estabelecem os procedimentos para a avaliação e reparos de estruturas de concreto fissuradas. Basicamente esses documentos descrevem as causas e mecanismos da fissuração, métodos de avaliação e controle e finalmente os tipos de reparo das estruturas fissuradas. Não há recomendações quanto ao emprego de materiais para a ligação concreto velho-concreto novo, exceto quando se utilizam resinas epoxídicas. Tal fato parece corroborar a opinião de alguns pesquisadores que afirmam que a aplicação de resinas epoxídicas como pontes de aderência é a que resulta melhor desempenho do conjunto.

O Departamento de Engenharia do Corpo de Exército Norte-Americano elaborou, em 1995, um manual denominado EM1110-2-2002, para avaliação e recuperação de estruturas de concreto, indicando materiais e métodos apropriados para cada tipo de patologia.

2.2.1 Propriedades e Classificação dos Materiais de Reparo

Segundo Andrade (1992), os materiais destinados ao reparo de estruturas de concreto podem ser agrupados em três famílias. A figura 2.8 apresenta um diagrama da composição dos materiais relacionados a seguir:

- a) Materiais à base de cimento;
- b) Materiais cujo aglomerante orgânico é à base de polímeros termoe estáveis;

c) Materiais com aglomerantes mistos formados por cimento Portland e polímeros termoplásticos.

Os materiais à base de cimento, em sua maioria, contêm diversos aditivos com a finalidade de melhorar suas propriedades, como retração, exudação, tempo de pega e consistência.

Os materiais de reparo cuja base é de natureza orgânica são muito variados em composição, sendo os mais comuns os materiais à base de resinas epóxi, resinas poliéster, base poliuretano, base acrílica e outros, alguns deles são empregados dissolvidos na água de amassamento, dando lugar a materiais mistos.

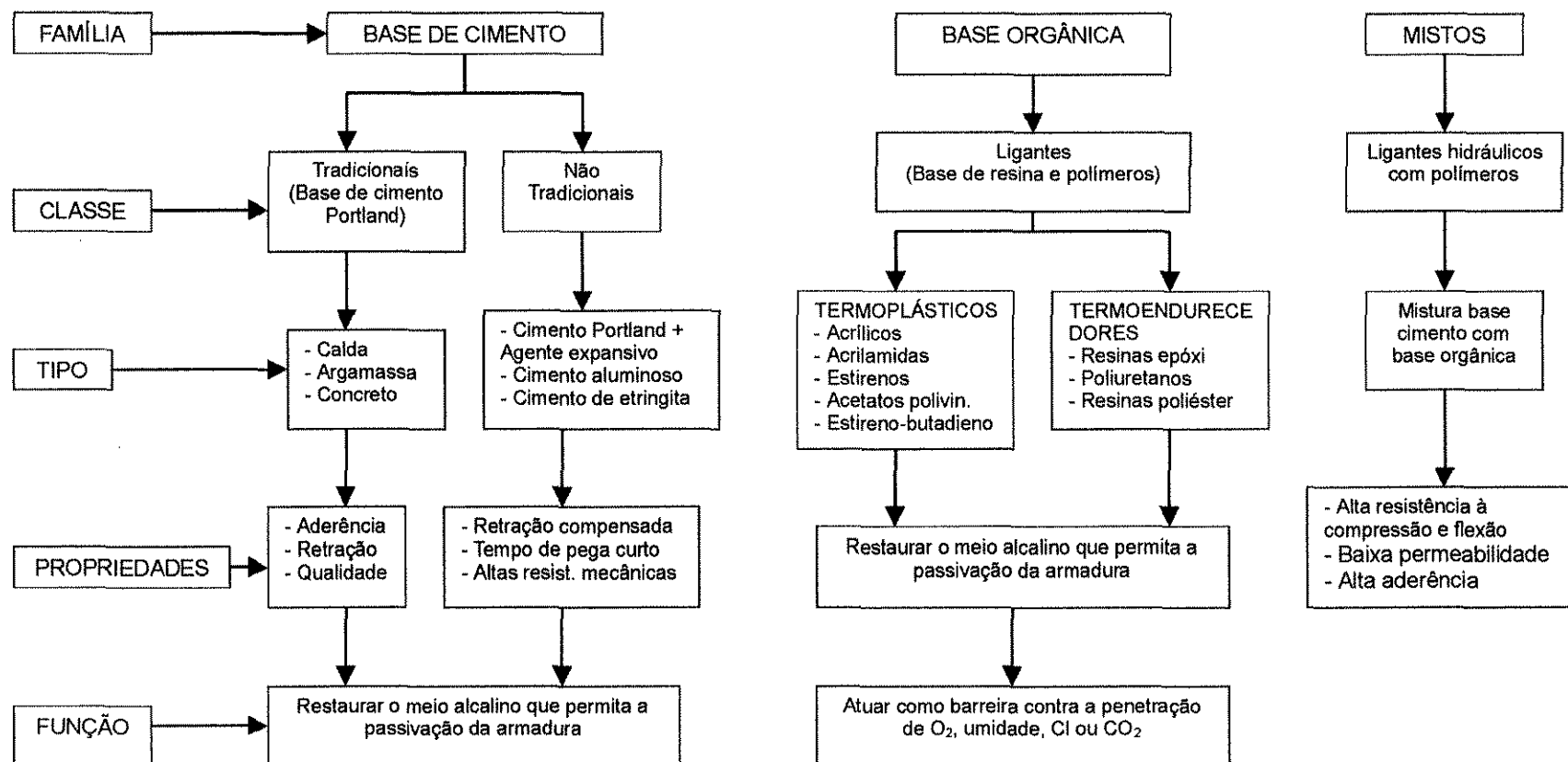


Figura 2.8 – Materiais e sistemas de reparo (ANDRADE, 1992)

2.2.1.1 Concretos como Materiais de Reparo

O concreto de cimento Portland é tradicionalmente usado em reparos e reforços. Na maioria das vezes, requer um traço especialmente formulado para cada caso, de forma a se melhorar algumas de suas características naturais. Pode ser necessário um concreto com alta resistência inicial, ausência de retração na secagem, expansões leves e controladas, elevada aderência ao substrato, baixa permeabilidade e outras propriedades, normalmente obtidas por meio do emprego de aditivos e adições, tais como superplastificantes, redutores de água, impermeabilizantes, escória de alto forno, cinza volante, sílica ativa etc. (EM1110-2-2002, 1995)

O concreto utilizado no reparo deverá apresentar resistência no mínimo igual ao do concreto existente na estrutura, com granulometria e diâmetro máximo do agregado compatíveis com o serviço, segundo Garcia (1998).

2.2.1.2 Polímeros como Materiais de Reparo

A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidades repetidas). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetições denominadas meros.

A matéria prima para produção de um polímero é o monômero, dependendo do tipo de monômero (estrutura química) podemos dividir os polímeros em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras. (MILES e BRISTON, 1965; MANO e MENDES, 1999)

Do ponto de vista das propriedades físicas, os polímeros são classificados em termoplásticos, termofixos (ou termoendurecidos) e elastômeros.

Os termoplásticos são aqueles que, mesmo no seu estado acabado, podem ser repetidamente amolecidos e endurecidos, respectivamente pelo aumento e diminuição da

temperatura, retomando as suas propriedades normais e, geralmente, não requerem agente de cura.

Os polímeros termofixos (ou termoendurecidos) são formados por cadeias com várias ligações químicas entre si, característica esta que fornece propriedades rígidas ao material. Os termofixos no seu estado final são basicamente insolúveis e infusíveis. Estes materiais muitas vezes são líquidos em algum estágio do processamento, mas, após o processo de cura por calor, catalisador ou algum outro meio físico-químico, não podem ser novamente amolecidos pela ação do calor. De uma forma geral, uma resina termoplástica pode ser convertida em termofixa pela adição de agentes de ligação cruzada, aumentando assim a rigidez do polímero, segundo Rosen (1993).

Os elastômeros são materiais formados por cadeias ligeiramente ligadas entre si. Esta característica fornece propriedades elásticas. A formação dessas ligações recebe nome de vulcanização que é um processo químico de fundamental importância às borrachas introduzindo a elasticidade e melhorando a resistência mecânica. Elastômeros são polímeros que à temperatura ambiente podem ser deformados repetidamente em pelo menos duas vezes o seu comprimento original.

Na construção civil, são utilizados principalmente polímeros sintéticos, ou na forma de resinas, com algumas adições, como é o caso dos selantes, tintas e adesivos, ou então na forma de plásticos, na maioria das aplicações, tais como tubos, telhas, isolantes térmicos, laminados e outros (MANO, 1991).

2.2.1.2.1 Resinas Poliméricas

Resina é uma substância amorfa ou uma mistura de massa molecular intermediária ou alta, insolúvel em água, mas solúvel em alguns tipos de solventes orgânicos e que, à temperatura ambiente, é sólida ou um líquido muito viscoso que amolece gradualmente por aquecimento.

Todas as resinas naturais são solúveis e fusíveis, e todos os polímeros sintéticos que obedecem às condições acima apontadas são também chamados de resinas estáticas.

As resinas termoplásticas como poliestireno, polibutadieno, acetatos e propinatos de polivinila são muito utilizadas sob a forma de emulsões, adicionadas às argamassas e concretos de cimento, ou como aglomerantes. Já os polímeros termoestáveis, obtidos por poliadição (resina epóxi) ou por policondensação (resina poliéster), são geralmente utilizados como aglomerantes.

Abordaremos a seguir as duas resinas utilizadas como ponte de aderência, nos experimentos deste trabalho: resina epóxi e resina acrílica.

a) Resina Epóxi

As resinas epóxi fazem parte de uma família de polímeros termofixos, de grande importância na construção civil. São resinas sintéticas derivadas da indústria petroquímica. Suas propriedades incluem: excelente adesividade; resistência química a muitos ácidos, álcalis e solventes; elevada resistência mecânica e dureza; boa durabilidade e baixa retração. A resina epóxi pode proporcionar endurecimento rápido e desenvolver uma alta resistência final em curto espaço de tempo a temperatura ambiente; a velocidade de endurecimento depende acima de tudo da temperatura e do tipo de formulação do sistema de resina. Entretanto, como outros materiais orgânicos, a resina epóxi tem relativamente uma baixa resistência ao calor, que pode impedir o seu uso para fins estruturais onde exista risco de fogo ou altas temperaturas. (ASTM C881-78; MAILVAGANAM, 1997)

Existe uma série de recomendações para as resinas epoxídicas. Considerando-se a escolha e caracterização da resina, talvez o documento mais completo seja a ASTM C 881(1990). Nele, as resinas epoxídicas são classificadas por tipo, grau, classe e cor. A classificação por tipo é função do tipo de união, dos materiais que serão unidos e da função estrutural da peça; são considerados 7 tipos de resina, a saber:

- TIPO I: para aplicação em estruturas não portantes na ligação entre concretos endurecidos;
- TIPO II: para aplicação em estruturas não portantes na ligação entre concreto fresco e concreto endurecido;
- TIPO III: para aplicação como ligante entre materiais antiderrapantes e concretos endurecidos e como ligante em argamassas ou concretos epoxídicos usados em superfícies sujeitas a movimentações térmicas ou mecânicas;
- TIPO IV: para aplicação em estruturas portantes na ligação entre concretos endurecidos e outros materiais e como ligante para argamassas epoxídicas e concretos;
- TIPO V: para aplicação em estruturas portantes na ligação entre concreto fresco e concreto endurecido;
- TIPO VI: para ligação e selagem de elementos pré-fabricados com cordoalhas internas e para o levantamento tramo-a-tramo de elementos com protensão temporária;
- TIPO VII: para aplicação como selante não estrutural para elementos pré-fabricados quando se faz o levantamento tramo-a-tramo sem protensão temporária.

A classificação por grau é definida em função das características de viscosidade e consistência, a classe da resina é função das faixas de temperatura em serviço e a classificação por cor, é meramente se a resina pode ou não ser colorida.

As resinas do tipo II e V resultam da mistura de dois componentes, A (bisphenol-a, epichlorohydrin, com ou sem diluente) e B (agente de cura). A ASTM C 881 (1990) prescreve ainda os cuidados na manipulação da resina, os métodos dos ensaios necessários à avaliação da qualidade do produto e as condições de aceitação e rejeição da resina.

De acordo com a literatura (ASTM C 881, 1990; MANO e MENDES, 1999; MANO, 1991; MILES e BRISTON, 1965), as principais propriedades da resina epóxi são:

Viscosidade:

- Alta - representa dificuldade na mistura;
- Baixa - pode ser absorvida pelo concreto.

Os valores recomendados variam de 2 a 10 Pa.s; comercialmente, no Brasil, encontram-se valores de 0,15 a 15 Pa.s, à temperatura de 25°C.

Tempo de utilização (Gel time / Pot life): é o intervalo de tempo transcorrido desde o instante da mistura do endurecedor com a resina até o instante em que o adesivo começa a endurecer deixando de ser trabalhável.

Resistência à compressão: devido ao fato das resinas epoxídicas serem muito mais resistentes que o concreto convencional, essa propriedade não é relevante para a ligação desse tipo de concreto (a ASTM não especifica valores).

Módulo de elasticidade: quanto mais se assemelharem o módulo de elasticidade da ponte de aderência ao concreto, menores serão as deformações na interface transversal.

Coeficiente de dilatação térmica: quanto maior a diferença entre os coeficientes do concreto e da resina, maiores as tensões surgidas na camada superficial do concreto por causa das variações de temperatura. A ASTM, no entanto, fixa apenas a temperatura de deformação ao calor e não prevê exigências quanto à compatibilidade térmica entre resina e concreto.

As técnicas de aplicação e preparo da superfície do concreto para sistemas epoxídicos são bastante detalhados pelo ACI (1992). Particularmente a ACI 503.2 detalha especificamente a ligação concreto novo/velho.

É interessante notar que, dentre todos os adesivos sintéticos disponíveis no mercado, os que são à base de epóxi se têm mostrado mais eficientes sob todos os pontos de vista, segundo Dannenberg e May, citado por Helene (1988), conforme se visualiza na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Eficiência das resinas adesivas. Dannenberg e May, por HELENE (1988)

Resina Adesiva	Aderência					Resistência				Custo Relativo
	Papel	Madeira	Metal	Cerâmica	Borracha	Água	Solventes	Álcalis	Ácidos	
Alquídica	6	7	5	6	7	7	2	2	5	3
Nitrato de Celulose	5	3	1	5	5	3	2	2	4	5
Resina Epoxídica	10	10	8	8	8	8	9	9	8	7
Resina Furânica	8	7	1	8	7	7	10	10	8	5
Resina Melamínica	10	10	2	2	2	7	9	5	5	5
Resina Fenólica	9	8	2	6	7	8	10	7	8	4
Poliéster	6	8	2	5	7	7	6	1	6	4
Poli (etil acrilato)	3	4	3	5	6	8	2	5	7	5
Poli (vinil acetato) - PVA	8	7	7	7	3	3	3	4	6	3
Poli (vinil cloruro)	5	7	6	7	6	8	6	10	9	4
Copolímero de Polivinil	4	7	6	7	7	8	7	8	9	4
Silicone	4	6	7	7	8	10	7	6	0	6
Uretana	8	10	10	9	10	7	8	4	4	9

0 = DEFICIENTE

10 = EXCELENTE

Optando-se por resinas epoxídicas como ponte de aderência, uma série de cuidados deve ser tomada: a superfície do concreto velho deve se encontrar limpa, isenta de poeira, graxa e partículas soltas. É fundamental que a superfície esteja totalmente seca.

Com a superfície devidamente preparada e limpa, prepara-se o adesivo que, em geral é bi-componente (endurecedor + resina) misturando-se bem os componentes até que o produto se

torne homogêneo. É aconselhável que a mistura seja mecânica usando, por exemplo, de uma hélice acoplada a uma furadeira à baixa rotação (figura 2.9).



Figura 2.9 – Mistura mecânica da resina epóxi (foto da autora).

Após a mistura, aplicar o adesivo em toda área de contato, formando um filme uniforme e sem empoçamentos (figura 2.10).

O material a ser colado deverá entrar em contato com o adesivo epóxi ainda pegajoso, obedecendo-se o tempo de manuseio especificado pelo fabricante da resina, levando-se em consideração que esse tempo varia em função da temperatura ambiente e, portanto será aumentado ou reduzido em função disto.



Figura 2.10 – Aplicação da resina epóxi em pilar a ser recuperado (foto da autora).

b) Resina Acrílica

As resinas acrílicas são polímeros e copolímeros de éster acrílico e ácidos de metacrilato. Suas propriedades físicas variam de elastômeros à plásticos duros. (MAILVAGANAM, 1997)

Por serem, geralmente, estáveis no sistema água / cimento, estas resinas são utilizadas em reparos de estruturas de concreto para modificar o cimento Portland, de três maneiras:

- preparo de uma pasta de cimento, onde 50% da água de mistura é substituída pela resina acrílica;
- mistura de água e resina na proporção 1:1, aplicado diretamente ao substrato a ser colado;
- substituição total ou parcial da água de amassamento pela resina acrílica no concreto fresco (concreto novo) a ser aplicado sobre o concreto endurecido.

Quando misturado ao cimento, o adesivo à base de resina acrílica forma um filme aderente responsável pela união dos dois concretos nos casos de reparo.

Por meio de ensaios laboratoriais, pôde ser constatada a ineficiência da aplicação diretamente ao substrato da resina diluída em água, por não ocorrer a formação deste filme aderente, o que implica em má aderência. MAILVAGANAM (1997)

No caso da utilização de adesivos à base de acrílico, é necessário que a superfície do concreto velho se encontre limpa, isenta de poeira, graxa e partículas soltas, mas, diferente da superfície a receber epóxi, ao invés de seca, ela deve ser saturada com água, tomando-se o cuidado para não deixar empoçamentos.

2.2.2 Preparo e Limpeza do Substrato para Aplicação de Adesivos

Os procedimentos de preparo e limpeza do substrato são responsáveis por 50% ou mais do sucesso de uma recuperação ou reforço. De acordo com o ACI (1989), Garcia (1998) e Helene e Pereira (2003), uma superfície inadequadamente preparada não permite boa união de dois materiais, mesmo que o adesivo especificado seja o melhor possível para determinada situação.

O preparo do substrato trata-se do conjunto de procedimentos realizados antes da limpeza superficial e da aplicação propriamente dita dos materiais e produtos de correção, ou seja, são os tratamentos prévios da superfície dos componentes estruturais. A tabela 2.5 a seguir reúne os principais procedimentos de preparo. HELENE (1992)

Tabela 2.5 – Procedimentos de preparo do substrato. HELENE (1992)

Procedimento	Procedimento mais adequado para tratamento de			
	Concreto com superfície		Aço com superfície	
	seca	úmida	seca	úmida
Escarificação manual	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Disco de desbaste	aceitável	adequado	aceitável	aceitável
Escarificação mecânica	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Demolição	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Lixamento manual	inadequado	aceitável	adequado	aceitável
Lixamento elétrico	adequado	aceitável	adequado	aceitável
Escovamento manual	adequado	aceitável	adequado	aceitável
Pistola de agulha	inadequado	inadequado	adequado	adequado
Jato de areia seco ou úmido	adequado	adequado	adequado	aceitável
Disco de corte	aceitável	adequado	adequado	adequado
Queima controlada	adequado	inadequado	inadequado	inadequado
Remoção de graxa e óleo impregnados	inadequado	adequado	inadequado	adequado
Máquina de desbaste superficial	aceitável	adequado	inadequado	inadequado

Além dos métodos mecânicos, é possível também se proceder à limpeza e preparo da superfície usando substâncias químicas.

Uma substância a ser utilizada, segundo o ACI (1989), é o ácido clorídrico (HCl), comumente chamado de ácido muriático, à concentração especificada para “encrespar” a

superfície. O ácido clorídrico reage com a pasta de cimento endurecida e expõe o agregado bom, mas é importante salientar que a aplicação deste ou qualquer outro ácido pode afetar a armadura, no caso de concreto armado, além disso, é necessário verificar se a presença do ácido não afetará quimicamente o produto a ser utilizado como ponte de aderência.

No caso de existir, na superfície a ser tratada, a impregnação de óleos ou graxas, é possível fazer a limpeza também por meio de produtos removedores à base de solventes de alta penetração, adequadamente formulados para esta finalidade. HELENE (1992)

Para uma correta especificação da superfície, o primeiro passo é determinar a condição desejada da superfície. Esta determinação normalmente é ditada pelo sistema de união entre os concretos a ser utilizado, vai depender também da qualidade do concreto e das exigências elásticas da união.

2.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA PONTE DE ADERÊNCIA

2.3.1 Resistência da Ponte de Aderência

De acordo com o boletim 162 do CEB (1983), a resistência da ponte de aderência é dada por dois componentes: adesão e atrito.

Adesão, segundo a ASTM 907-91b, é o estado no qual duas superfícies são mantidas juntas por forças interfaciais as quais podem constituir-se de forças de valência, ação de intertravamento, ou ambas.

A adesão é influenciada pelos seguintes fatores:

- rugosidade da superfície da junta - para ligação entre concretos comuns. A tabela do CEB (1983), a seguir, mostra os diferentes valores de adesão para condições de rugosidade variáveis;

Condição da interface	Adesão (N/mm²)
Lisa	1,0
Média (jateada)	1,7
Áspera (serrilhada)	1,9

- tratamento da superfície da junta - quanto maior a área de agregados exposta, maior a resistência da interface;

- método de colocação do novo concreto - por exemplo, se a superfície do concreto velho for jateada e saturada antes da colocação do concreto novo, o resultado final será satisfatório;

- uso de agentes de ligação ou uso de concretos especiais - podem propiciar bons valores de adesão.

Outros fatores tais como idade relativa entre o concreto novo e o velho, resistência e fluência do concreto não apresentam nenhum efeito sobre a resistência da junta.

Atrito, de acordo com o CEB-FIP CODE 1990 é o mecanismo de transferência de tensões tangenciais ao longo da interface a qual está simultaneamente sujeita à compressão normal e cisalhamento.

O atrito é influenciado pelos seguintes fatores:

- tamanho e forma dos agregados - agregados maiores e mais angulosos resultam em maiores coeficientes de atrito;

- rugosidade da superfície - maiores rugosidades resultam em maiores áreas de contato e maiores coeficientes de atrito, podendo-se tomar como base os valores a seguir, indicados pelo CEB (1983);

Condição da interface	Coefficiente de atrito
Lisa	0,70
Média (jateada)	0,95
Áspera (serrilhada)	1,55

Experimentalmente, Clímaco e Regan (2001), chegaram nos seguintes coeficientes de atrito:

Condição da interface	Coefficiente de atrito
Lisa	0,70
Média	0,90
Áspera	1,40

- resistência à compressão do concreto - quanto maior a resistência do concreto, melhor o comportamento do agregado e da pasta ao longo da superfície de contato;
- tensão normal de compressão - quando a tensão normal aumenta, o deslocamento por cisalhamento diminui;
- ciclos de carregamento - que provoca uma deterioração progressiva das superfícies em contato. BRITO e FERNANDES-HACHICH (1994)

2.3.2 Tipos de Ruptura

No caso das resinas adesivas, uma das formas de avaliar o comportamento da junta é verificando as formas possíveis de ruptura da mesma. Distinguem-se três principais tipos de ruptura de uma junta: BRITO e FERNANDES-HACHICH (1994).

a) Ruptura coesiva na resina - a coesão apresentada pelo substrato é superior à da ponte de aderência adotada. As possíveis causas para esse tipo de falha são:

- proporcionamento inadequado da resina e do endurecedor, propiciando quebra da estrutura reticulada formada pela solidificação do polímero, atribuindo zonas internas de fraqueza;
- condições inadequadas de temperaturas para estocagem, mistura e/ou endurecimento;
- aplicação do produto fora do tempo de utilização, podendo gerar defeitos mecânicos por causa da má compactação, inclusão de ar ou aparecimento de fissuras;
- reações químicas originárias da incompatibilidade dos sistemas empregados e cimento;
- variações de tensões durante a fase de cura;
- escolha inadequada da resina.

b) Ruptura Coesiva no substrato - ocorre porque normalmente a camada superior do concreto apresenta resistência inferior à do restante. Tal comportamento pode ser atribuído a:

- existência de nata superficial, provocada por segregação ou consequência da vibração;
- problemas na cura ou cura insuficiente;
- impregnação superficial com óleos, graxas ou gordura.

c) Ruptura adesiva - caracterizada pela falha na região de contato entre a ponte de aderência e o concreto. As principais razões concernentes a este tipo de ruptura dizem respeito às:

- condições superficiais do substrato;
- propriedades físico-químicas das pontes de aderência.

3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA JUNTA

Embora sejam inúmeros os materiais de reparo existentes no mercado, ainda não há normas ou recomendações aplicáveis à sua completa avaliação de desempenho. Os ensaios existentes são propostos por pesquisadores ou instituições para a avaliação de uma ou outra propriedade, não existindo, por enquanto, um conjunto de ensaios consensual e suficiente.

As primeiras publicações sobre o assunto datam de 1973. Destacam-se as especificações MMM-B 350B da Federal Specification, a ACI 503: *Use of epoxy compound with concrete*, do American Concrete Institute, e as contribuições da RILEM Technical Committee 52 RAC e das Japanese Standards for some Polymer Concrete.

Os ensaios utilizados para a avaliação dos materiais de reparo podem ser divididos em: ensaios de desempenho, ensaios de caracterização das pontes de aderência ou ensaios de acompanhamento. Abordaremos neste trabalho os ensaios de desempenho, por serem considerados os mais importantes.

3.1 ENSAIOS DE DESEMPENHO

Consistem em avaliar o comportamento da união de corpos-de-prova de concreto ou argamassa geralmente não armados, a solicitações as quais a estrutura estará provavelmente submetida.

Os ensaios normalmente empregados são resumidamente descritos a seguir.

3.1.1 Ensaios de Resistência à Tração

O concreto tem como característica a baixa resistência à tração. Portanto, se um ensaio apresenta apenas a informação de que a resistência da aderência excede a resistência à tração do concreto, esta informação é de pouca relevância, visto que a resistência à tração é, na maioria das vezes, desprezada nos estados limites últimos. Além disso, os ensaios de tração, de acordo com Garcia (1998), apresentam o inconveniente de, na análise dos resultados, a dispersão poder mascarar os diferentes desempenhos de sistemas adesivos.

Todavia, alguns métodos de ensaios de tração podem ser usados para avaliar, em caráter preliminar, a resistência da aderência de concretos ou argamassas, e, apesar das limitações mencionadas, algumas informações podem ser úteis.

Existem dois diferentes métodos destrutivos de ensaio à tração: o ensaio direto proposto pela Norma BS6319 – Parte 7 da British Standard (1985), figura 3.1 (a), e o ensaio de tração indireto baseado no “Ensaio Brasileiro” de compressão diametral, figura 3.1 (b).

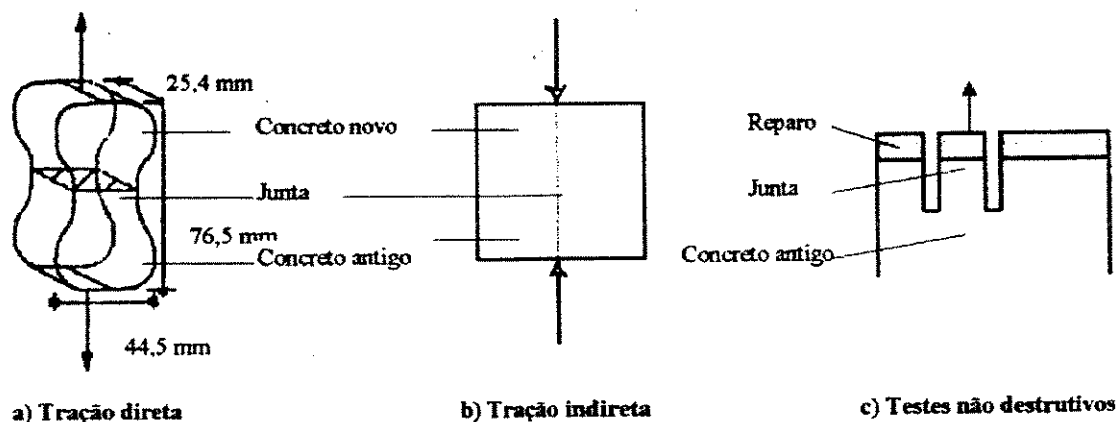


Figura 3.1 – Ensaio de Tração. GARCIA (1998)

No ensaio proposto pela British Standard (1985), além das desvantagens já citadas, são questionáveis as dimensões extremamente reduzidas das amostras, que dificilmente representariam situações reais de reparo.

No “Ensaio Brasileiro”, o reparo é moldado sobre a superfície produzida pelo fendilhamento de um cubo, e novamente submetido à compressão diametral. Segundo Clímaco (1990), citado por Garcia (1998), os resultados deste ensaio apresentam resistência à tração dos cubos recompostos virtualmente iguais às resistências à tração dos concretos – original ou de reparo – mais fracos, confirmando a limitação do ensaio.

Alguns ensaios não-destrutivos (ou de destruição limitada) para avaliar a resistência à tração “*in loco*” do concreto têm sido usados para fornecer uma avaliação preliminar da resistência de aderência, particularmente com o objetivo de se mapear a uniformidade da execução ou como auxiliar na localização de defeitos locais. A figura 3.1 (c) ilustra o ensaio de tração efetuado sobre um corpo-de-prova broqueado a uma profundidade que compreenda o reparo, a junta e o substrato.

3.1.2 Ensaios de Resistência à Tração por Flexão

Este ensaio pode ser efetuado em prisma de concreto de 125mm x 125mm x 565mm, conforme Figura 3.2. Trata-se de uma adaptação do método “ASTM C-78 Flexural Strength of Concrete”, onde o referido prisma é ensaiado à flexão.

Emprega-se em geral um conjunto de 2 ou mais prismas para cada avaliação: concreto velho/concreto velho ou concreto velho/concreto novo. Esses prismas são moldados em laboratório, com um concreto previamente caracterizado e, se possível, semelhante aos que irão ser unidos em obra. Após adensados e curados em câmara úmida, $UR \geq 90\%$ e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ até a idade que se considere suficiente para o ensaio, são retirados da câmara úmida, cortados ao meio com disco diamantado, deixando-se secar pelo menos 48 horas até atingir o equilíbrio com as condições do ambiente do laboratório.

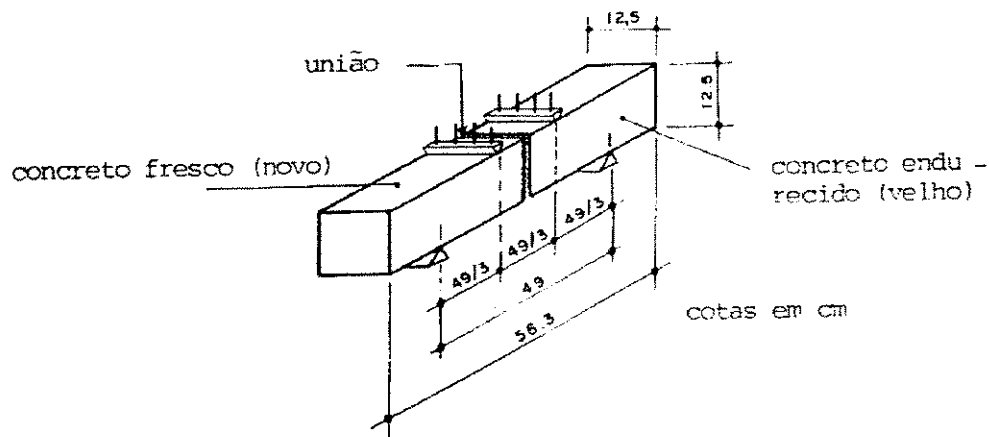


Figura 3.2 – Esquema do corpo-de-prova de flexão. HELENE (1988)

Tratando-se da união do concreto velho/concreto velho, basta limpar adequadamente as superfícies cortadas, o que pode ser feito com a aplicação de produtos químicos apropriados, aplicar o adesivo na espessura recomendada pelo fabricante e unir novamente as metades, com auxílio de “torniquetes”. Após 24 horas, os corpos-de-prova podem retornar à câmara úmida onde

aguardarão, junto com os dois corpos-de-prova testemunhos de concreto íntegro, a cura completa do produto, que em geral é de 7 dias.

No caso da união concreto velho/concreto novo, as duas metades, depois de cortadas e secas, são recolocadas em duas fôrmas, aplicado o adesivo e reconcretadas as metades faltantes. Como, normalmente, não interessa ter dois concretos com características mecânicas muito distintas, é necessário estudar as dosagens dos dois concretos em função da idade em que se pretende romper os corpos-de-prova. Naturalmente, é necessário aqui também moldar corpos-de-prova de referência. Após cura adequada em câmara úmida e endurecimento total do adesivo, procede-se ao ensaio.

Adota-se o carregamento nos terços, dois cutelos, pois assim se garante toda uma região central sob mesma solicitação de momento fletor e força cortante, oferecendo iguais probabilidades de ruptura a várias secções. O desempenho do adesivo é avaliado pela observação do local onde se deu a ruptura – fora ou na junta unida – e da comparação da tensão de ruptura dos prismas unidos com as tensões obtidas dos prismas de referência.

Este ensaio deixa a desejar, porque o mínimo que se pode esperar de uma formulação epóxi com finalidade estrutural é a de que possua aderência e resistência à tração superior à do concreto, que, como bem se sabe, é bastante baixa, ou melhor, é a sua propriedade mecânica menos importante. HELENE (1988); GARCIA (1998).

3.1.3 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento puro é sempre difícil de medir. Por melhor que seja a montagem do ensaio sempre existe o risco de aparecimento de excentricidades que dão origem a momentos e trações que prejudicam a avaliação correta do cisalhamento e a reprodutibilidade dos ensaios. Têm-se obtido resultados satisfatórios adaptando o método recomendado pelo "Corps of

Engineers - U. S. Army, CRD C 590", que consiste basicamente num ensaio de compressão realizado sobre uma "estrutura" composta de três prismas, conforme figura 3.3.

Para comparar e conhecer as características do concreto é conveniente moldar corpos-de-prova com diâmetro de 15 cm e altura de 30 cm, como referência. Essa determinação só pode ser realizada facilmente para verificação da união concreto velho com velho. A avaliação deve ser efetuada com base na observação da superfície da união e na força obtida.

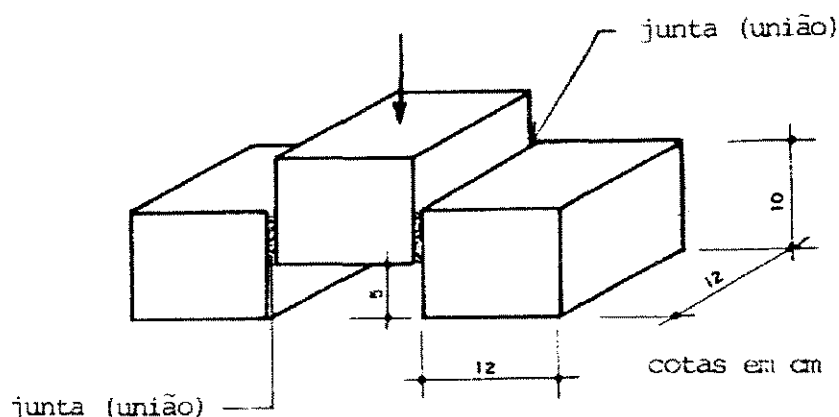


Figura 3.3 – Esquema de ensaio de cisalhamento. HELENE (1988)

3.1.4 Ensaio de Reconstituição do Cilindro

Considerando que a resistência do concreto para fins estruturais é avaliada por meio das resistências de corpos-de-prova cilíndricos, dois pesquisadores americanos, Krieg (1976) e Nordby (1976), citados por Helene (1988), propuseram um ensaio onde é possível verificar de maneira global o desempenho do adesivo. Trata-se de ensaiar um corpo-de-prova cilíndrico de diâmetro 15 cm por 30 cm de altura, previamente cortado com disco diamantado em duas metades, através de uma superfície, formando um ângulo de 30° com a geratriz do cilindro, conforme figura 3.4.

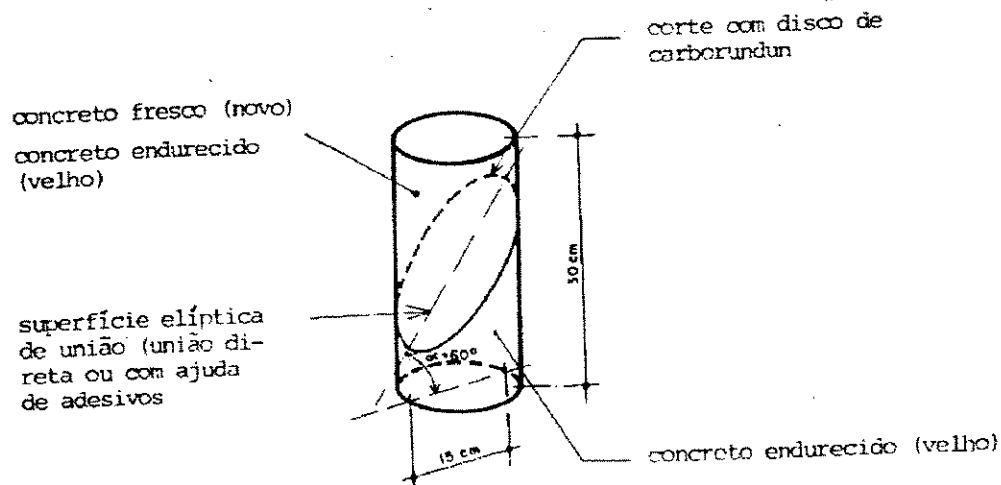


Figura 3.4 – Esquema de corpo-de-prova para ensaio de reconstituição do cilindro.
HELENE (1988)

Depois de cortado e seco, é novamente unido, permitindo avaliar o desempenho de uniões concreto velho/concreto velho e concreto velho/concreto novo. Os corpos-de-prova, novamente recompostos, estarão sujeitos a tensões de compressão, cisalhamento e tração tal qual originalmente. O desempenho é facilmente calculado a partir da verificação da capacidade do adesivo em reconstituir, em toda a sua plenitude, as características do corpo-de-prova original confeccionado com concreto íntegro e de referência. Nesta avaliação, é interessante medir a resistência de ruptura para fins de comparação e observar, ou mesmo fotografar, a forma de ruptura do corpo-de-prova, no sentido de avaliar a capacidade de reconstituição da formulação ensaiada.

Em 1978, a ASTM C-882/78 “Bond Strength of Epoxy - Resin Systems Used with Concrete”, normalizou um método de ensaio semelhante a este, porém efetuado em corpos-de-prova de argamassa. Além desta modificação, o cálculo da resistência de ruptura é efetuado pela relação entre a carga máxima lida na prensa e dividida pela área da superfície elíptica originada pelo corte do corpo-de-prova, exigindo valores superiores a 18,6 MPa. Esse método tal qual como está proposto na ASTM oferece menos informações que aquele efetuado diretamente com um concreto em tudo semelhante ao que irá ser unido em obra.

3.1.5 Ensaio de Compressão-Cisalhamento

O ensaio consiste na compressão axial de um corpo-de-prova prismático composto, com a junta fazendo determinado ângulo com a direção da carga, conforme figura 3.5. O estado de tensões na interface combina tensões normal e cisalhante, numa razão que depende do ângulo entre a junta e a direção da carga aplicada.

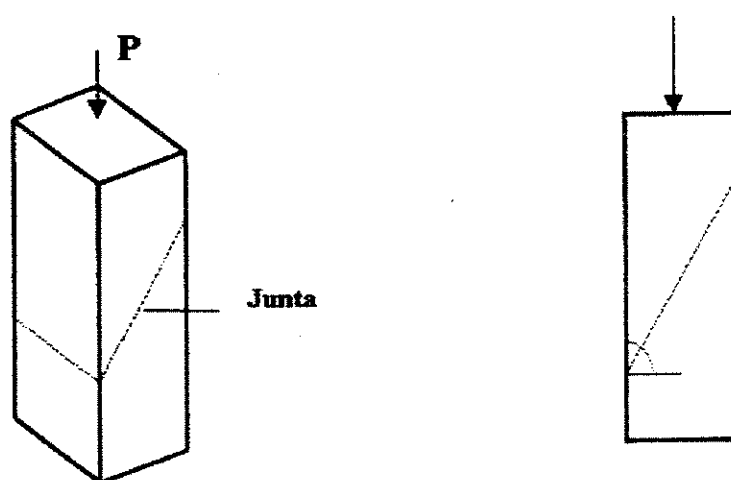


Figura 3.5 – Esquema de corpo-de-prova para ensaio de compressão-cisalhamento.
GARCIA (1998)

Clímaco (1990), citado por Garcia (1998), menciona algumas vantagens do método:

- estado de tensões na junta bastante representativo de situações típicas de reparo;
- possibilidade de obtenção de sensibilidade razoável com respeito à resistência da aderência, com baixos coeficientes de variação nos resultados;
- procedimentos simples de ensaio;
- facilidade para simulações reais de reparo.

Alguns dos pontos mencionados justificam a adoção do método pela maioria dos pesquisadores e também das normas internacionais para avaliação da aderência, entretanto, várias

versões do método têm sido utilizadas, com diferenças substanciais nos ângulos da junta, dimensões dos corpos-de-prova e preparação da superfície.

Tabor (1978) propôs um ensaio usando um prisma composto com uma superfície de concreto fraturada na junta e ângulo de 60° com a normal em relação ao carregamento. A geração de uma superfície fraturada foi obtida por fendilhamento de uma placa de concreto com dimensões 150 mm x 150 mm x 55 mm. A placa de concreto é então colocada entre dois pares de chapa de aço trapezoidais concordantes, com a linha de união no mesmo plano vertical e é montado um “sanduiche” entre placas de borracha de dureza elevada, em uma prensa (figura 3.6). Quando a compressão é aplicada pela prensa, a dilatação das lâminas produz o fendilhamento da placa de concreto ao longo da linha definida pelos cortes das chapas de aço. As duas metades das placas de concreto são reparadas por injeção de resina na fissura controlada ou por meio de argamassa ou concreto novo. Quando as placas reparadas estão secas, a placa de concreto é serrada para se obter prismas de ensaio medindo 55 mm x 55 mm x 150 mm. Uma série de prismas de controle são produzidos pela divisão daquela originalmente utilizada no ensaio.

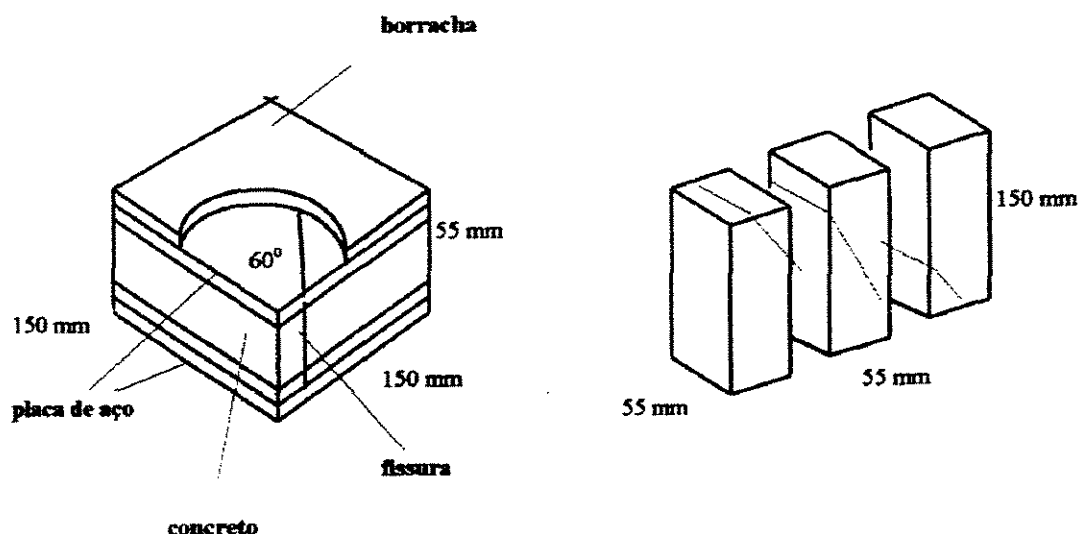


Figura 3.6 – Conjunto para produção de fissuras controladas em placas de concreto e placas cortadas reparadas para obtenção de espécimes de ensaio. TABOR (1978)

Os modos de ruptura devem ser registrados e, de acordo com Tabor (1978), os prismas reparados podem romper em um dos seguintes modos:

- ruptura diagonal na junta, com força mais baixa que a de controle, sem ruptura do concreto;
- ruptura diagonal na junta, com força ligeiramente mais baixa que a de controle, podendo ou não haver alguma ruptura no concreto, onde esse tipo de ruptura indica que uma boa adesão foi desenvolvida, mas tensões adicionais na junta, causadas, em geral, pelo baixo módulo do composto adesivo, são excessivas para a junta;
- ruptura diagonal do concreto paralela à junta e aproximadamente 5 mm afastada desta, ruptura esta que pode ocorrer com uma força similar à do cilindro de controle e indica excelente aderência do concreto, com um material de reparo com módulo de elasticidade mais baixo;
- ruptura de “pirâmide-dupla”, típica dos corpos-de-prova de controle, onde a força de ruptura pode ser igual ou superior que a de controle, demonstrando um reparo com sucesso, em que um desempenho monolítico foi plenamente alcançado.

A norma britânica BS6319: Parte 4 (1978) incorporou os procedimentos de ensaio de Tabor, incluindo os ângulos de juntas a 60° em relação à seção transversal, mas propôs formas alternativas de reparos, de acordo com a necessidade dos processos sob investigação. Contudo, a junta fraturada é mais indicada pela norma por ser a mais representativa para situações de reparo.

Eyre e Domone (1985), citado por Clímaco (1989), questionaram o uso da BS6319 com um ângulo único e superfície fraturada. Eles propuseram o uso de dois ângulos, 30° e 50°, e sugeriram que uma superfície de junta cortada fosse usada como padrão. Os ensaios foram realizados em prismas de 100 mm x 148 mm x 300 mm.

A Norma Francesa NFP18-872 (1993) utiliza prismas com dimensões 100mm x 100mm x 300mm, serrados no ângulo de 60° com a seção transversal, e reparados por lançamento do concreto fresco ou por colagem de outra metade de prisma de concreto endurecido.

A Norma Italiana, aplicada por Camomilla (1981) em sua pesquisa, adota prismas medindo 70 mm x 70 mm x 200 mm com junta de 73°.

De acordo com a Norma ASTM C882-83 (1983), a resistência da aderência de um sistema de juntas à base de resina epóxi é determinado por ensaios de cilindros de 76mm x 152mm moldados com argamassa de cimento portland. Os cilindros são feitos em duas partes, divididas ao meio com aplicação de resina epóxi sobre a junta, após a escarificação da superfície, com auxílio de jato de areia ou escova de aço, em um ângulo de 60° em relação à transversal.

A variedade dos métodos para avaliação experimental é encontrada na literatura com vários trabalhos apresentados no RILEM (1986), mostrando uma necessidade de se alcançar um método padrão único e confiável.

Na pesquisa realizada por Wall e Shrive (1988), foram utilizados prismas com dimensões 102 mm x 102 mm x 305 mm e ângulo da junta de 60°, onde testaram a eficiência de adesivos à base de resina epóxi, resina acrílica, SBR (estireno butadieno), látex PVA e argamassa de cimento Portland.

Salles e Souza (1991) apresentaram um programa experimental para avaliar a resistência entre a ligação do concreto velho e o novo, onde adotaram prismas com 150 mm x 150 mm x 300 mm, para os ângulos de 30° e 45°, sem a utilização de ponte de aderência, ou seja, junta seca concreto/concreto, com superfície rugosa apicoada com ponteira e marreta.

Silva (1997), em um programa de ensaios para avaliar a capacidade de aderência da resina poliuretânica para a colagem de peças de concreto, usou prismas compostos de 100 mm x 100 mm x 300 mm com juntas inclinadas a 30° e 63,43°.

Garcia (1998), em experimento para avaliação da capacidade de união de diversas pontes de aderência, moldou prismas com dimensões 100 mm x 100 mm x 300 mm, com ângulos da junta 63°, 67,5° e 72,5°, tomando como base a pesquisa de Clímaco (1990) que utilizou estas mesmas dimensões comparadas às dimensões 150 mm x 150 mm x 1000 mm, cujos resultados mostraram que os prismas menores reproduzem satisfatoriamente os resultados obtidos com os prismas maiores, com a vantagem de serem mais fáceis de moldar. Estes mesmos ângulos foram adotados por Clímaco e Regan (2001), para prismas de 150 mm x 150 mm x 1000 mm e 102 mm x 102 mm x 305 mm.

Nos ensaios realizados por Austin, Robins e Pan (1999) foram utilizados prismas com 100mm x 100mm x 400mm e ângulos da junta 0°, 15°, 30°, 45° e 60°.

3.2 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA JUNTA

Os pesquisadores são unânimes em dizer que uma boa preparação da superfície é fator essencial para o sucesso de reparos do concreto. É fundamental que o substrato de concreto seja minuciosamente limpo e apresente resistência mecânica.

Walters (1954) realizou um extensivo programa de ensaios de tração direta, com vários métodos de preparação de superfícies rugosas, concluindo que os diferentes métodos para se obter superfície rugosa não produzem resultados muito diferentes. O desempenho da aderência na ruptura é satisfatório se a camada superficial constituída por nata de cimento ou argamassa é removida. Contudo, parece ser aceitável apenas deixar a superfície de concreto em seu estágio natural depois da vibração, apresentando a superfície uma camada rugosa de 5 mm em média ou mais.

Para a avaliação de técnicas de reparo estrutural a interface deve simular a textura usual, ou seja, áspera com agregado exposto, segundo Clímaco (1989), que discorda do uso de

superfícies obtidas por corte, propostas por Eyre e Domone (1985), por serem exageradamente lisas.

Clímaco (1990), citado por Garcia (1998), testou um grupo de prismas compostos com juntas lisas que apresentaram resultados de resistência de aderência muito pobres e relações de compressão-cisalhamento inferiores a 50% comparados aos prismas monolíticos de controle.

Em seu trabalho, Robins e Austin (1995) utilizaram prismas com juntas lisas e rugosas, concluindo que as juntas rugosas são em torno de 20% mais resistentes em comparação às juntas lisas.

Garcia (1998) cita Daschner (1976) que realizou um programa de ensaios com diferentes superfícies pré-moldadas: lisa, em dente de serra e uniformemente arranhada algumas horas após a cura do concreto. Suas conclusões foram de que as tensões de aderência das juntas rugosas são bem maiores que as das juntas lisas, mas as diferenças entre as várias preparações de superfície não são muito relevantes.

Mesmo contaminadas por óleo desmoldante as juntas rugosas apresentaram melhor resistência de aderência que juntas lisas limpas e sãs, segundo o estudo realizado por Austin, Robins e Pan (1999).

3.2.1 Métodos de Preparação de Superfícies Rugosas

São vários os métodos utilizados pelos pesquisadores para obtenção de uma superfície rugosa da junta de aderência, desde escarificação manual feita por talhadeira e marreta leve, jato de areia e até hidrojateamento. (COURAND, 2000)

O ACI 303 R (1982) propõe a utilização de jato de areia para deixar o agregado exposto, especificando uma profundidade de 6 mm para proporcionar uma boa aderência entre o concreto base e o reparo.

Salles e Souza (1991) escarificaram a superfície da junta por meio de ponteira e marreta, até que o agregado graúdo estivesse livre da camada de pasta de cimento. Este mesmo método foi utilizado por Vanderlei e Clímaco (1996) e também por Fagury (2002) em suas pesquisas.

Dois tipos de superfícies rugosas foram testadas por Robins e Austin (1995), durante o ensaio de compressão-cisalhamento: uma obtida com o uso de pistola de agulhas pneumática e a outra superfície fraturada, obtida por fendilhamento do corpo-de-prova de concreto. As duas superfícies apresentaram comportamento similar, entretanto, Clímaco e Regan (2001) não concordam com o método da superfície fraturada por fendilhamento, pois o mesmo não representa a maioria das situações de preparo de substrato para reparo e, em sua pesquisa, utilizaram a pistola de agulhas para atingir a rugosidade desejada, além do que, superfícies fraturadas por fendilhamento apresentam microfissuras que podem mascarar os resultados da resistência da aderência, segundo Austin, Robins e Pan (1999).

Garcia e Clímaco (2001) adotaram a escarificação mecânica feita com escova de aço adaptada a uma furadeira elétrica, até expor o agregado graúdo a uma profundidade de 5mm a 10mm.

Para grandes áreas a serem recuperadas, vários pesquisadores indicam o jateamento de areia, entretanto, no Brasil, o Ministério do Trabalho e Emprego baixou a Portaria nº 99 de 19 de outubro de 2004, proibindo a utilização do jateamento de areia em todo o país. Essa medida foi tomada para evitar o crescente número de trabalhadores com silicose, doença pulmonar crônica e fatal adquirida por meio da inalação de poeiras que contenham finas partículas de sílica e cujo principal sintoma é a perda da capacidade respiratória, provocada pelo endurecimento das paredes dos pulmões (fibrose pulmonar).

Como alternativa em substituição ao jateamento de areia, o próprio Ministério do Trabalho e Emprego indica o jateamento com um subproduto da bauxita ou granalha de aço esférica e particulada, que pode ser feito com o mesmo equipamento do jato de areia, ou ainda a hidrodemolição.

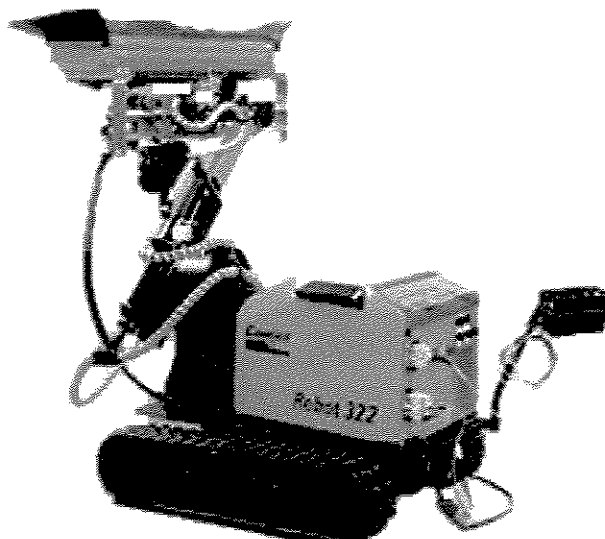


Figura 3.7 – Modelo de Equipamento para Hidrodemolição. (www.conjet.com)

A hidrodemolição trata-se de um método para a remoção seletiva do concreto deteriorado com profundidade pré-determinada, usando-se jato de água com alta pressão. O jato de água é obtido de uma bomba de alta pressão, acionada por um motor diesel, emitindo aproximadamente 200 litros por minuto a uma pressão de 1100 bar. Esse sistema é relativamente novo no Brasil e tem a vantagem de não causar danos às barras da armadura de aço, além da inexistência de poeira e vibração.

A hidrodemolição como método para obtenção de superfície rugosa para reparos e reforços de estruturas de concreto também é indicado por Hindo (1990), que concluiu em seu trabalho que a utilização de martelotes pneumáticos podem causar microfissuras no concreto,

afetando a resistência da aderência. A proporção e quantidade destas microfissuras vão variar em função da capacidade do martetele pneumático e da qualidade do concreto a ser reparado.

3.3 ANÁLISE DAS TENSÕES

Quando um prisma composto, contendo uma junta formando um ângulo relação ao eixo longitudinal, é submetido à compressão axial, o desenvolvimento das tensões e os modos de ruptura dependem principalmente da eficiência da aderência. (AUSTIN, ROBINS e PAN, 1999)

Segundo Garcia (1998) e Clímaco e Regan (2001), e se a adesão é eficiente, as tensões ao longo da junta são transmitidas por uma combinação de coesão e atrito e, nesse caso, a ruptura se dará no concreto, podendo ocorrer de duas formas: do tipo de pirâmide-dupla, comum no ensaio de corpos-de-prova monolíticos, ou uma ruptura diagonal próxima à junta. Caso a adesão for insuficiente, a ruptura diagonal ocorrerá ao longo da linha da junta.

3.3.1 Ruptura na Junta (prisma composto)

Quando a ruptura ocorre na junta, o estado global de tensões na interface apresenta, macroscopicamente, tensões de compressão e cisalhamento e o Critério de Mohr-Coulomb pode ser usado para descrever a resistência última.

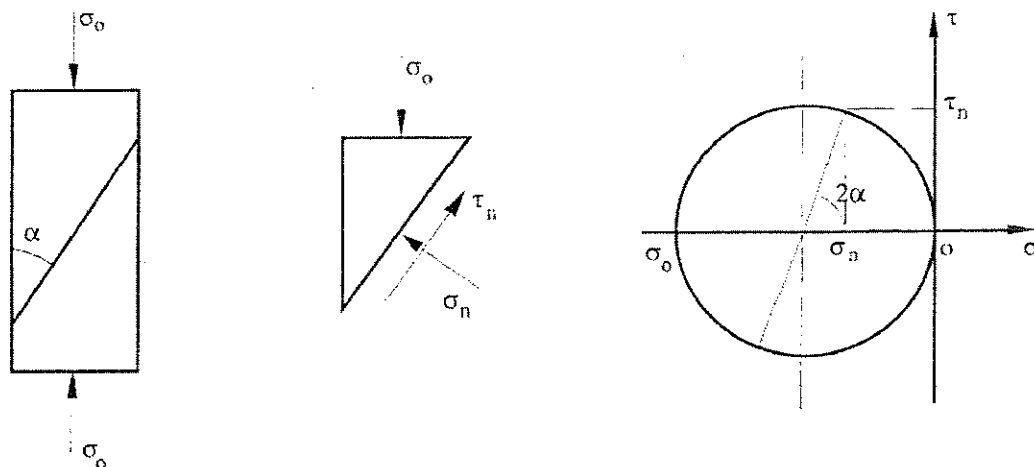


Figura 3.8 – Relação entre as Tensões de Compressão-Cisalhamento e Círculo de Mohr. (AUSTIN, ROBINS e PAN, 1999)

O Critério de Mohr-Coulomb trata-se de um dos critérios mais simples de resistência do concreto em estados múltiplos de tensão. Segundo a hipótese de Coulomb há ruptura do material quando a tensão de cisalhamento num determinado plano vence a resistência a deslizamento originada em duas parcelas: uma proveniente da coesão do material e outra vinda do coeficiente de atrito. Essa condição de deslizamento é dada pela equação:

$$\tau = c + \mu \cdot \sigma \quad 3.1$$

Sendo:

τ = tensão de cisalhamento na junta

c = coesão aparente

μ = coeficiente de atrito na interface

σ = tensão normal na junta

Esta expressão é representada pela reta inclinada da figura 3.9, com a inclinação definida pelo que normalmente é chamado “ângulo de atrito” da junta: $\phi = \arctg \mu$. O atrito μ é função da rugosidade da superfície de concreto. A coesão c , representado na figura 3.9 pela intersecção da reta inclinada com o eixo vertical das tensões de cisalhamento, depende da resistência à

compressão e tração do concreto e, de acordo com Garcia (1998) e Clímaco e Regan (2001) é afetado pelas condições ambientais, preparação da superfície, duração do carregamento e uso de pontes de aderência.

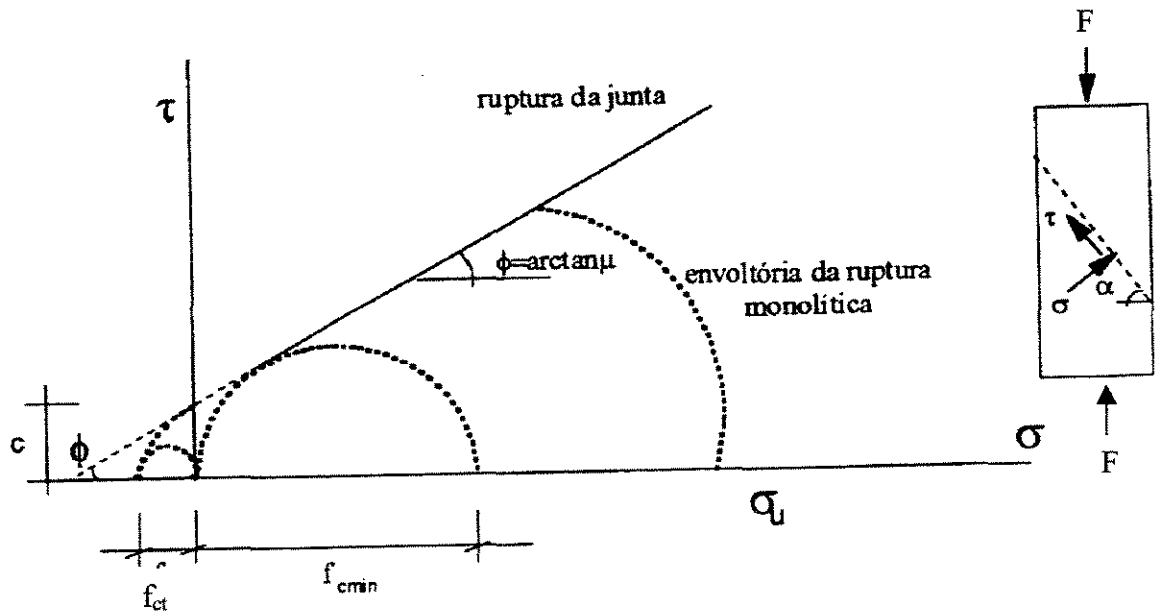


Figura 3.9 – Critério de ruptura do tipo Coulomb para prismas compostos.
GARCIA (1998); CLÍMACO e REGAN (2001)

A resistência à compressão axial, governada pelo aparecimento de um “plano de enfraquecimento”, é:

$$f_c = c \cdot \frac{1 + \tan^2 \alpha}{\tan \alpha - \mu} \quad 3.2$$

Sendo:

f_c = resistência à compressão axial do prisma composto

α = ângulo da junta com a normal à força aplicada

Assumindo um valor constante para “c”, para dado concreto e condições definidas, o ângulo crítico é:

$$\alpha_{crit} = \arctan(\mu + \sqrt{\mu^2 + 1}) \quad 3.3$$

Esse ângulo crítico da junta é definido por Austin, Robins e Pan (1999) como a inclinação em que a carga necessária para produzir uma ruptura na junta de aderência é mínima.

Segundo Clímaco e Regan (2001) a resistência à compressão do prisma composto é dada por:

$$f_c = \frac{c \cdot 1 + (\mu + \sqrt{\mu^2 + 1})^2}{\sqrt{\mu^2 + 1}} \quad 3.4$$

Os mesmos pesquisadores propuseram valores de α_{crit} e f_{cmin} , conforme as expressões 3.3 e 3.4, mostrados na tabela 3.1, valores também adotados por Garcia (1998).

Tabela 3.1 – Valores críticos do ângulo de junta e resistência mínima à compressão dos prismas compostos. GARCIA (1998); CLÍMACO e REGAN (2004)

Interface	c	μ	α_{crit}	f_{cmin}
Áspera	$0,25 f_{cc}^{2/3}$	1,4	72,2°	$1,56 f_{cc}^{2/3}$
Média	$0,25 f_{cc}^{2/3}$	0,9	66,3°	$1,12 f_{cc}^{2/3}$
Lisa	0,5 MPa	0,7	62,5°	1,92 MPa

$f_{cc}^{2/3}$ = resistência à compressão cilíndrica do concreto.

“Áspera” representa uma interface com o agregado exposto.

Segundo Clímaco (1989), o ângulo crítico depende do grau de aspereza da superfície e que, a partir de determinado ângulo, a ruptura se dará de forma monolítica e não na junta,

independente da resistência desta. Assim, os procedimentos adotados pelas normas de diferentes países merecem ser questionados, pois apresentam significantes diferenças quanto ao ângulo da junta e preparação da superfície e, ainda, quanto à forma e dimensões das amostras, sem que justificativas consistentes sejam apresentadas.

Na figura 3.10, proposta por Clímaco e Regan (2001), com base na equação 3.2, fica evidenciada a variação que ocorre na resistência à compressão do prisma composto em função da rugosidade e ângulo da junta.

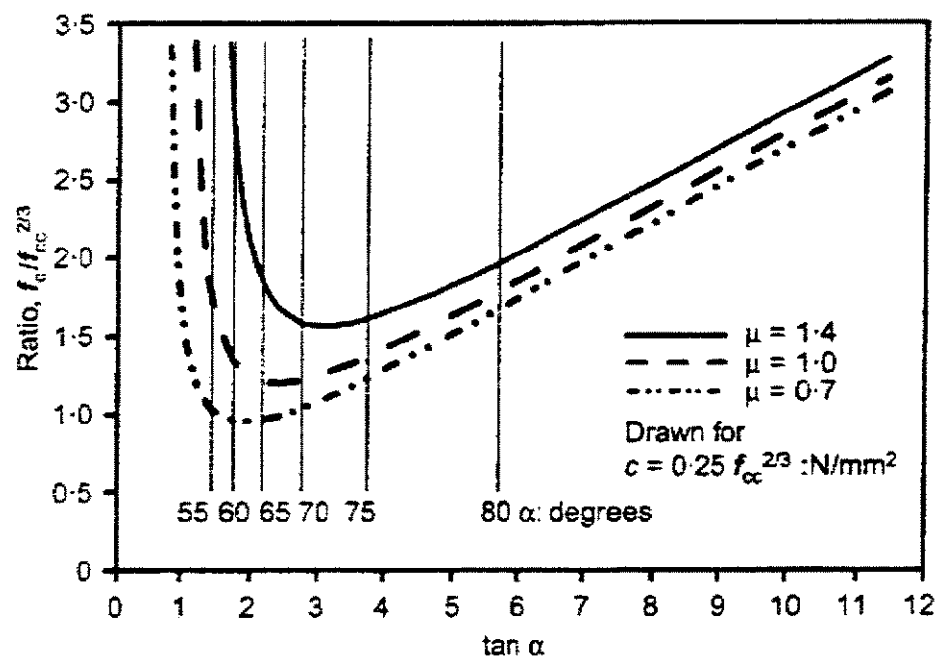


Figura 3.10 – Resistência à compressão do prisma composto x ângulo da junta.
 CLÍMACO e REGAN (2001)

3.3.2 Ruptura Monolítica

Se a junta for resistente, o corpo-de-prova romperá de forma monolítica, ou seja, como se fosse um corpo-de-prova íntegro, ou romperá no concreto adjacente à junta. As tensões últimas

de cisalhamento e normal na interface podem ser expressas em termos da resistência longitudinal (f_c) e do ângulo α , pelas expressões:

$$\begin{aligned}\sigma &= f_c \cos^2 \alpha \\ \tau &= f_c \sin \alpha \cos \alpha\end{aligned}\tag{3.5}$$

As expressões podem ser representadas como na figura 3.8, pelo Círculo de Mohr mostrado pela linha tracejada. Para a construção do Círculo de Mohr, o diâmetro adotado é a resistência à compressão do prisma de concreto monolítico e, se o atrito dos pratos da prensa ao concreto forem desprezados, a tensão normal última é:

$$\sigma_u = 0,95 f_{cc}\tag{3.6}$$

onde f_{cc} é a resistência à compressão do cilindro.

O semicírculo define a região onde a ruptura monolítica de esmagamento deve predominar. A reta inclinada e o trecho de circunferência definem uma envoltória de modos de ruptura mostrada na figura 3.8.

3.4 CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB MODIFICADO PARA ANÁLISE DE TENSÕES

Como mencionado no item 3.3.1, no caso de uma ruptura na junta, as tensões globais na interface são de compressão e cisalhamento e podem ser definidas pela expressão 3.1.

A parte inicial da curva da envoltória da figura 3.9 é baseada na hipótese de que a resistência à tração do concreto é “zero”, o que, segundo Garcia (1998), parece ser adequado para a previsão da resistência de juntas lisas de concreto. Para o caso de superfície de juntas ásperas,

este valor pode ser conservativo, como mostrado na pesquisa de Clímaco e Regan (2001) que obtiveram, como média das resistências últimas em ensaios de cisalhamento direto de prismas compostos os valores a seguir:

- Junta sem adesivo e seca: $\tau_u = 0,148 f_{ccmin}^{2/3}$
- Junta com camada de argamassa comum: $\tau_u = 0,144 f_{ccmin}^{2/3}$
- Junta com camada de resina epóxi: $\tau_u = 0,268 f_{ccmin}^{2/3}$

Por esta razão, ao invés do arco do círculo, uma linha reta é proposta entre o ponto onde o arco é tangente à envoltória da ruptura da junta, correspondendo à equação:

$$\tau = 0,10 f_{cc}^{2/3} + 3,0 \sigma \quad 3.7$$

Segundo Clímaco e Regan (2001) esta proposta se mostrou segura para os sistemas adesivos com resistência de aderência igual ou superior àquela do concreto novo colocado diretamente ao concreto antigo sem camada adesiva.

Na mesma linha de pesquisa, Robins e Austin (1995) concluíram que o Critério de Mohr-Coulomb deve ser reformulado para ângulos da junta de aderência iguais ou menores que 45°, de forma a se determinar uma nova envoltória de ruptura para as inclinações de junta que se distanciam do ângulo de 60°, proposto por várias normas.

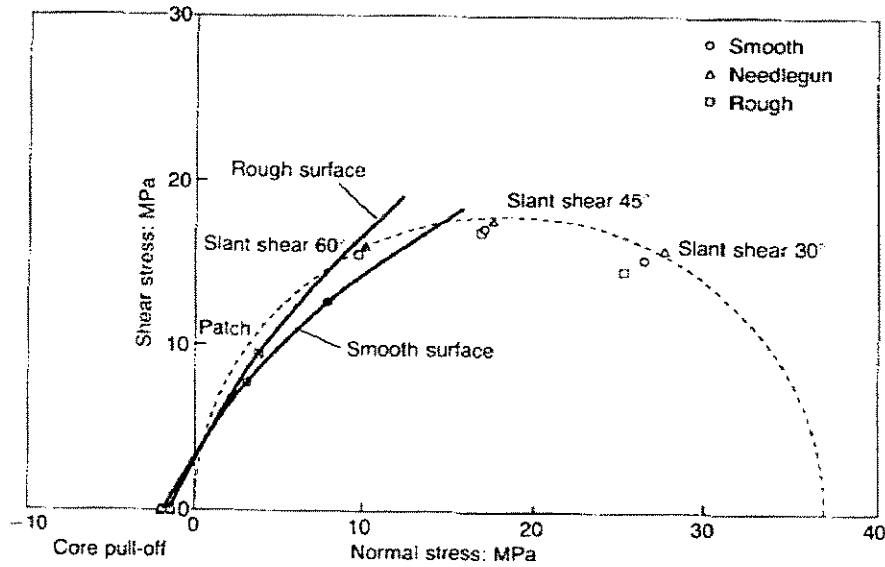


Figura 3.11 – Envoltória de ruptura para diferentes ângulos da junta de aderência.
ROBINS e AUSTIN (1995)

3.5 ÂNGULO CRÍTICO DA JUNTA

De acordo com Austin, Robins e Pan (1999) o ângulo da junta tem efeito muito significativo na tensão e modo de ruptura, mas esse fator, até os dias de hoje, recebeu pouca atenção dos pesquisadores.

O ângulo crítico da junta depende do coeficiente de atrito e, caso a ruptura seja governada pelo Critério de Mohr-Coulomb, esse ângulo pode ser definido, conforme já descrito, pela expressão 3.3:

$$\alpha_{crit} = \arctan(\mu + \sqrt{\mu^2 + 1})$$

Entretanto, apesar da influência direta deste ângulo na resistência de aderência nos ensaios de compressão-cisalhamento, vários trabalhos não levam em consideração esta influência e apresentam valores diferentes para estes parâmetros.

O ACI 318/83 estipula o atrito $\mu = 1,0$ para superfícies ásperas com uma profundidade de aproximadamente 6 mm, que corresponde, neste caso, ao ângulo crítico de $67,5^\circ$ pelo Critério de Mohr-Coulomb. Pelo CEB (1983), que considera $\mu = 0,95$, o ângulo crítico corresponde à $66,77^\circ$.

Franke (1986), em seu trabalho, adotou para superfície jateada $\mu = 0,70$, correspondendo ao ângulo crítico de $62,5^\circ$, porém, em sua pesquisa, adotou 60° .

Garcia (1998) e Clímaco e Regan (2001) adotaram para superfície rugosa $\mu = 1,4$, chegando ao ângulo crítico de $72,2^\circ$.

O sistema de aderência adotado é outro fator importante a ser considerado, pois poderá produzir diferentes inclinações no critério de ruptura do tipo Mohr-Coulomb. Isto sugere, de acordo com Garcia (1998), que os valores de coesão “c” e do coeficiente de atrito “ μ ” dependem do tipo de material usado como ponte de aderência.

3.6 EFEITOS DA UMIDADE NA SUPERFÍCIE DA JUNTA

Os efeitos causados pelo umedecimento da superfície da junta de concreto, antes do lançamento do concreto novo num reparo ou reforço, parecem ser variáveis.

Segundo o Concrete Society Report 26, dependendo da porosidade do concreto, o seu umedecimento com água limpa é necessário para conter a absorção da camada adesiva, justificando que sem o umedecimento, o tempo de pega desta camada pode ser curto.

Wall e Shrive (1988) concluíram em sua pesquisa que os efeitos da umidade são benéficos quando é utilizada uma camada adesiva à base de cimento Portland.

Walters (1954), Paulay, Park e Phillips (1974) declaram que o umedecimento da junta diminui a resistência da aderência e que as juntas secas melhoram consideravelmente a adesão.

A pesquisa de Robins e Austin (1995) mostrou uma melhor aderência dos substratos secos em relação aos úmidos.

Nos trabalhos realizado por Clímaco (1989) e Clímaco e Regan (2001), o umedecimento da superfície, antes do reparo, mostrou ser prejudicial à aderência nos grupos sem camada adesiva, com diferença de 4% a 10% em relação à superfície seca.

Nos seus manuais, os fabricantes de adesivo recomendam superfície seca para o uso de resinas à base de epóxi e superfície saturada sem empoçamentos, ou seja, com remoção da água livre, para o uso de resinas acrílicas, SBR, látex ou outros sistemas de polímeros modificados.

3.7 ESPESSURA DA CAMADA DE ADESIVO

A espessura da camada adesiva influi nos resultados do ensaio de compressão-cisalhamento para reparos de concreto e, mesmo sendo de grande importância, essa informação usualmente não é fornecida pelos fabricantes, que apenas informam o consumo de material por área.

Uma camada excessivamente espessa de adesivo causará redução substancial na resistência da ligação entre os dois concretos, segundo Wall, Shrive e Gamble (1986).

Hranilovic (1986) apresentou uma comparação entre os resultados da análise pelos métodos dos elementos finitos e os dados experimentais de ensaios de compressão-cisalhamento de prismas compostos, com juntas de argamassa de cimento e de resina epóxi. Em ambos os ensaios ocorreu uma concentração de tensões no final da junta, sendo que os valores desta concentração diminuíram significativamente quando a espessura da camada de adesivo foi menor (abaixo de 5 mm). Esta concentração de tensões foi atribuída às discrepâncias no módulo de elasticidade do adesivo e do concreto.

Na figura 3.12 é mostrada a influência da espessura da camada de resina sobre a tensão de tração, por meio da qual Souza e Ripper (1998) concluíram que as espessuras de adesivo devem sempre ser pequenas, da ordem do milímetro.

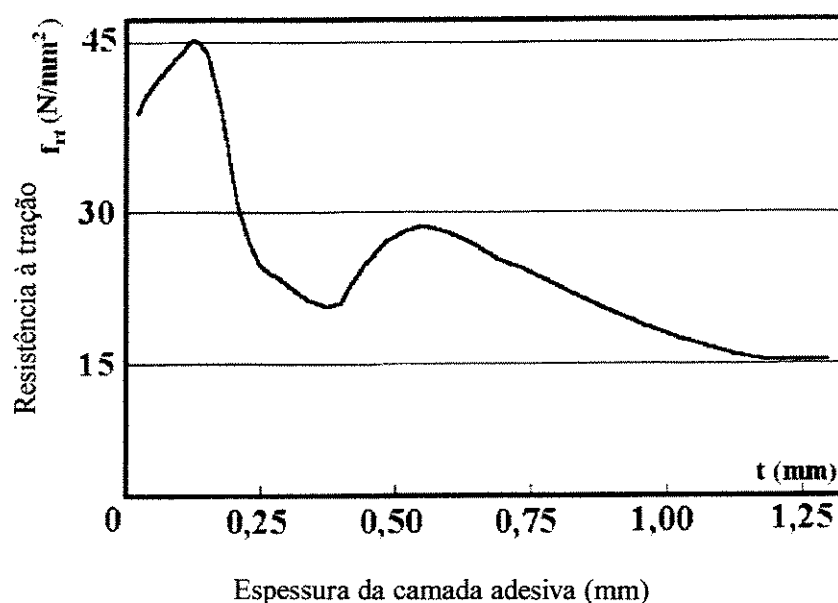


Figura 3.12 – Espessura da camada de resina x tensão de tração correspondente.
SOUZA e RIPPER (1998)

3.8 IDADE DO CONCRETO E RETRAÇÃO

Os efeitos da idade do concreto-base sobre a resistência da aderência no caso de reparo, ainda é motivo de discussão. Existem algumas recomendações na literatura de que o concreto-base não deve ter idade menor que sete dias quando do reparo, mas existe pouca informação acerca de como considerar a influência da idade do concreto-base ou da retração do concreto fresco (de reparo) sobre a aderência.

Segundo Paulay, Park e Phillips (1974), a idade do concreto tem pouca influência. Concordando, Salles e Souza (1991), concluíram em suas pesquisas que:

- idades de concreto até 60 dias não apresentam influência nos resultados de resistência à compressão;
- para ângulos de junta a 30° não houve influência da utilização de dois concretos de idades diferentes nos resultados da resistência à compressão.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL (Materiais e Métodos)

O estudo experimental pretendeu avaliar a resistência da aderência nas juntas, utilizando prismas compostos com quatro sistemas adesivos comumente aplicados em reparos e reforços de estruturas de concreto.

O ensaio utilizado foi o de compressão-cisalhamento, que consiste na compressão axial de um corpo-de-prova prismático composto, com a junta formando determinado ângulo com a direção da força onde o estado de tensões na interface combina tensões normal e cisalhante, numa razão que depende do ângulo entre a junta e a direção da força aplicada.

A aderência foi avaliada pelo desempenho das interfaces entre o concreto existente e o reparo, com o ensaio de prismas compostos com três ângulos diferentes da junta e dois tipos de substrato, bem como pela análise dos modos de ruptura e das forças de ruptura referidas à respectiva resistência do concreto.

No caso dos prismas compostos com ângulo da junta de 60° , considerado por muitos pesquisadores como o ângulo crítico, além da análise dos resultados experimentais, adotou-se também uma avaliação por meio de um critério de ruptura do tipo Mohr-Coulomb Modificado.

4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES E RESISTÊNCIA

Todos os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foram caracterizados com base em ensaios normalizados, informações obtidas na literatura e informações dos fabricantes em catálogos comerciais.

Os concretos foram produzidos no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, com cimento tipo CP II-E-32, areia com diâmetro máximo de 2,4 mm e módulo de finura igual a 2,32 mm e pedra britada 1 com diâmetro máximo de 19,00 mm e módulo de finura 6,71 mm classificada como diabásio. O traço desse concreto é apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Traço dos concretos (base e reparo) utilizados nos ensaios.

Constituintes do Concreto	Traço 1:2:3 (kg)
Cimento (massa)	460
Areia (massa seca)	922
Pedra (massa seca)	1383
Relação a/c	0,60

Dois tipos de adesivo foram utilizados como ponte de aderência: adesivo à base de epóxi e adesivo à base de resina acrílica. Foram realizados também ensaios com juntas sem adesivo, ou seja, concreto/concreto sem nenhum produto químico como ponte de aderência, com substrato úmido e seco.

4.1.1 Escolha do Adesivo

Em virtude da grande variedade de adesivos disponíveis no mercado, foram caracterizados três adesivos, de diferentes fabricantes, de cada um dos dois tipos utilizados neste trabalho, e escolhidos o adesivo à base de epóxi e o adesivo à base de resina acrílica que apresentaram os melhores desempenhos nos ensaios.

Os ensaios adotados para a caracterização dos adesivos à base de epóxi foram baseados nas Normas Americanas ASTM D 695M – 91 para Determinação da Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade e ASTM D 638M – 93 para Determinação da Resistência à Tração, e foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Os adesivos à base de resina acrílica foram submetidos ao ensaio de Determinação da Resistência à Compressão do Cimento Portland NBR 7215:1995, onde substituiu 50% da água de amassamento da mistura.

Os resultados obtidos são mostrados no Anexo A deste trabalho.

4.2 MISTURA DOS CONCRETOS, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA

As misturas foram feitas em betoneira de eixo inclinado, com 150 litros de capacidade, à temperatura ambiente de $25^{\circ}\text{C} \pm 2$ e umidade relativa de 65%. Primeiramente a betoneira foi “lubrificada” com uma quantidade reduzida (em torno de 10 %) do traço de concreto de mesma composição da dosagem a ser misturada, para compensar a argamassa que adere às paredes da betoneira. Após este procedimento, a colocação dos materiais obedeceu a seguinte ordem:

- a) lançamento da pedra e 50 % da água da mistura;
- b) adição de todo o cimento;
- c) restante da água;
- d) colocação da areia.

A moldagem dos corpos-de-prova foi feita em duas etapas. Foram utilizadas fôrmas prismáticas com as mesmas dimensões adotadas por Salles e Souza (1989) por serem fáceis de moldar e ensaiar, ou seja, 150 mm x 150 mm x 300 mm, divididas as partes por uma placa de madeira, com três ângulos de inclinação: 30°, 45° e 60° (figura 4.1). O objetivo desses diferentes ângulos foi verificar qual o mais apropriado para a aderência entre concretos. Foram moldados 32 corpos-de-prova com cada um dos três ângulos e, na primeira etapa da moldagem, somente um dos lados da fôrma foi preenchido por concreto (figura 4.2).

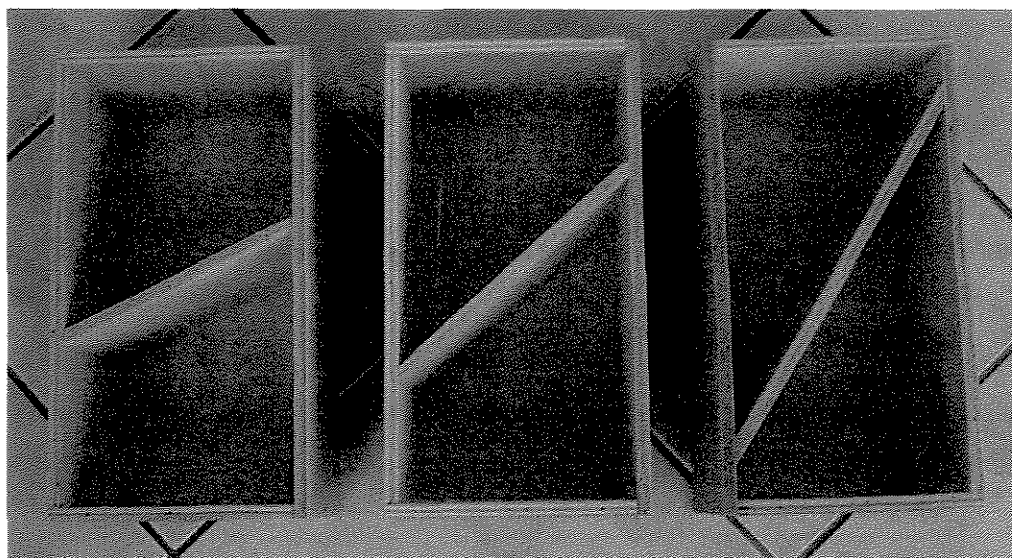


Figura 4.1 – Modelos das fôrmas utilizadas para moldagem dos corpos-de-prova, com inclinação de 30°, 45° e 60°.

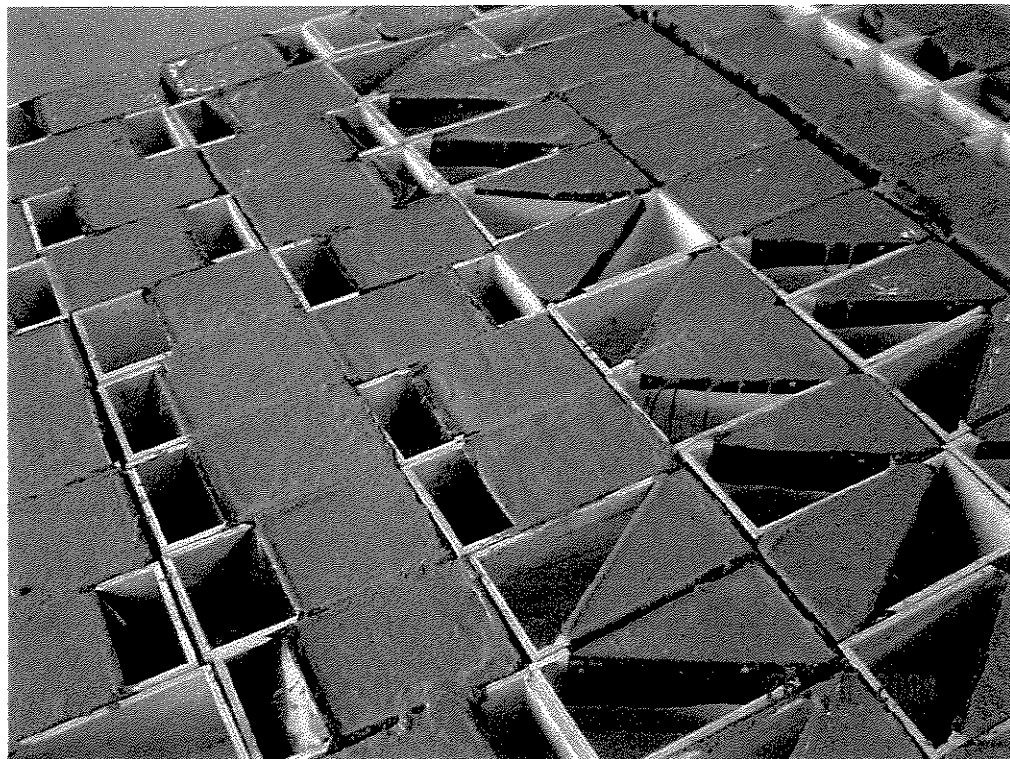


Figura 4.2 – Fôrmas com somente um dos lados concretado.

Para evitar que os cantos em ângulo do concreto se quebrassem, as fôrmas foram encapadas com lona plástica para facilitar a desfôrma, uma vez que o uso de qualquer desmoldante estava descartado, pois poderia contaminar o concreto e afetar a aderência.

Visando um controle da resistência do concreto e eficiência do sistema de reparo, foram moldados 4 corpos-de-prova prismáticos monolíticos com dimensões 150mm x 150mm x 300mm e mais 4 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 100mm x 200mm.

O adensamento do concreto foi feito com auxílio de vibrador de imersão, a desmoldagem se deu 24 ± 4 horas após a concretagem e a cura dos corpos-de-prova se deu ao ar, em ambiente de laboratório à temperatura de 25°C e umidade relativa de 75%.

4.3 PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DAS JUNTAS

Passadas 72 horas da concretagem, os corpos-de-prova começaram a ter as superfícies inclinadas tratadas (figura 4.3), sendo que 50% das amostras com ângulos de inclinação de 30°, 45° e 60° tiveram sua superfície de aderência lisa, apenas lixada a mão com a finalidade de eliminar qualquer contaminação do concreto, e os outros 50% tiveram sua superfície de contato escarificada com ponteira e marreta até que o agregado graúdo estivesse livre da camada de pasta de cimento, a fim de se obter rugosidade, com o propósito de comparar o comportamento de aderência nos dois tipos de substrato.

No sétimo dia após a concretagem, os corpos-de-prova, com seus substratos convenientemente preparados receberam uma limpeza com ar-comprimado para a remoção de poeira e qualquer partícula solta remanescente do processo de escarificação, então foram recolocados nas fôrmas, agora sem as cunhas divisórias (figura 4.4), e receberam a aplicação dos sistemas adesivos conforme descrito a seguir.

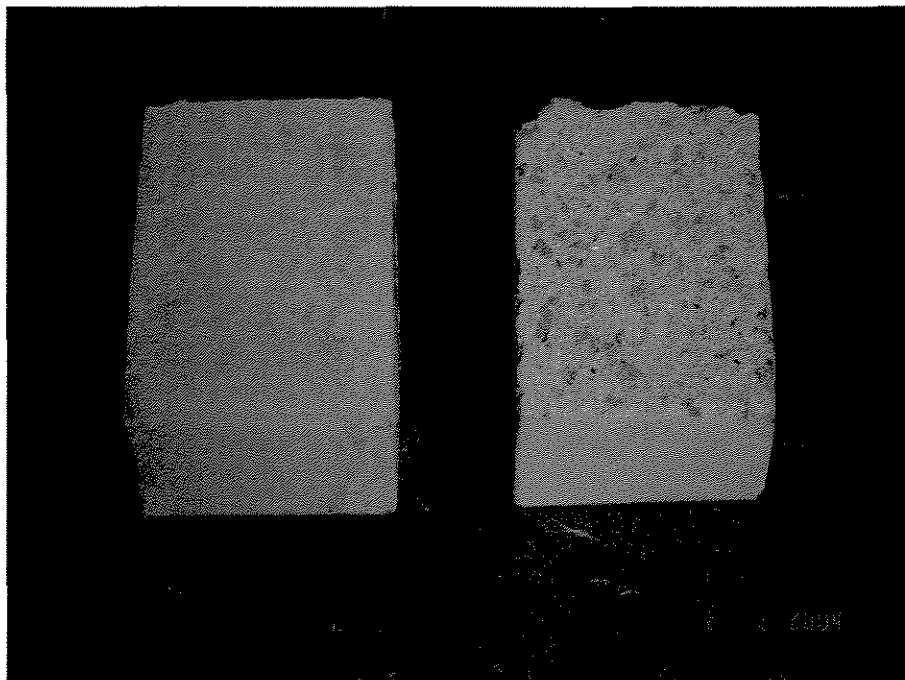


Figura 4.3 – Corpos-de-prova com substrato liso e rugoso.

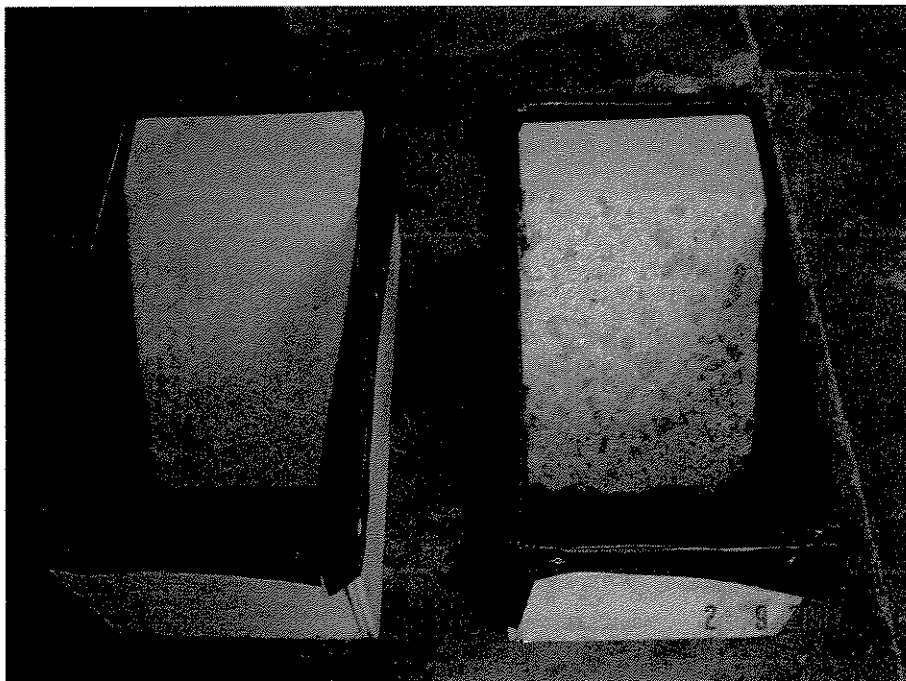


Figura 4.4 – Corpos-de-prova recolocados nas fôrmas sem as placas divisórias.

4.4 SISTEMAS ADESIVOS NAS JUNTAS

Na etapa seguinte à recolocação dos corpos-de-prova nas fôrmas, as juntas receberam os sistemas adesivos, de acordo com as recomendações dos fabricantes e com base em outras pesquisas realizadas. Tomou-se o cuidado de manter a junta livre de qualquer resíduo como óleo, graxa e poeira a fim de não comprometer a aderência. Os sistemas aplicados foram:

- Sem adesivo – para as amostras que não receberam nenhum produto químico como adesivo, foram adotadas, além das duas rugosidades de superfície (lisa e rugosa), superfície úmida (saturada sem empoçamentos) e seca para receber o concreto de reparo;
- Adesivo à base de epóxi – foi usado um produto bi-componente e a mistura das duas partes (denominadas A e B) foi manual e enérgica por 5 minutos, com o cuidado para não elevar excessivamente a temperatura da mistura. Depois de homogeneizada, a mistura foi aplicada com

auxílio de pincel sobre o substrato completamente limpo e seco (figura 4.5), obedecendo o tempo de vida útil da mistura recomendada pelo fabricante, que é de 15 minutos a 20 minutos (a 25°C) e a espessura de aproximadamente 3mm, recomendada pelos pesquisadores da área.

- Adesivo à base de resina acrílica – foi preparada uma pasta com traço 1:1:3 (resina acrílica: água: cimento), misturada até a obtenção de uma consistência fluida e homogênea e aplicada com pincel sobre toda a área da junta saturada (sem empoçamentos), seguindo a recomendação dos fabricantes deste tipo de produto.



Figura 4.5 – Aplicação de adesivo à base de epóxi na junta de aderência.

4.5 MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO DE REPARO

Terminada a aplicação dos sistemas adesivos, iniciou-se a concretagem do complemento dos prismas, ou seja, o concreto de reparo. Este concreto seguiu exatamente a mesma dosagem descrita no item 4.1 e os mesmos procedimentos de mistura, adensamento (figura 4.6) e cura do concreto-base, já descritos no item 4.2.

Na concretagem do reparo, o concreto-base estava com idade de 7 dias. Nesta fase também foram moldados 4 corpos-de-prova prismáticos monolíticos com dimensões 150mm x 150mm x 300mm e mais 4 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 100mm x 200mm, para controle da resistência do concreto e do sistema de reparo.



Figura 4.6 – Adensamento do concreto de reparo com uso de vibrador de imersão.

Finalizada a segunda etapa da concretagem, os prismas formavam 26 grupos, com 4 amostras cada, conforme apresentado na tabela 4.2.

O valor de referência para avaliação dos prismas compostos foi obtido pela média da resistência dos 8 corpos-de-prova monolíticos, sendo 4 amostras moldadas na primeira fase (concreto-base) e mais 4 moldadas na segunda fase (concreto de reparo), com base no fato de que os dois concretos contribuíram para a resistência do prisma reparado.

Tabela 4.2 – Controle de moldagem dos prismas

Grupo	Nomenclatura Adotada	Ângulo da junta	Sistema Adesivo	Rugosidade	Quant. Corpos-de-prova
1	LSS30	30°	sem adesivo - substrato seco	lisa	4
2	RSS30	30°	sem adesivo - substrato seco	rugosa	4
3	LSU30	30°	sem adesivo - substrato úmido	lisa	4
4	RSU30	30°	sem adesivo - substrato úmido	rugosa	4
5	LA30	30°	pasta à base de resina acrílica	lisa	4
6	RA30	30°	pasta à base de resina acrílica	rugosa	4
7	LE30	30°	adesivo epóxi	lisa	4
8	RE30	30°	adesivo epóxi	rugosa	4
9	LSS45	45°	sem adesivo - substrato seco	lisa	4
10	RSS45	45°	sem adesivo - substrato seco	rugosa	4
11	LSU45	45°	sem adesivo - substrato úmido	lisa	4
12	RSU45	45°	sem adesivo - substrato úmido	rugosa	4
13	LA45	45°	pasta à base de resina acrílica	lisa	4
14	RA45	45°	pasta à base de resina acrílica	rugosa	4
15	LE45	45°	adesivo epóxi	lisa	4
16	RE45	45°	adesivo epóxi	rugosa	4
17	LSS60	60°	sem adesivo - substrato seco	lisa	4
18	RSS60	60°	sem adesivo - substrato seco	rugosa	4
19	LSU60	60°	sem adesivo - substrato úmido	lisa	4
20	RSU60	60°	sem adesivo - substrato úmido	rugosa	4
21	LA60	60°	pasta à base de resina acrílica	lisa	4
22	RA60	60°	pasta à base de resina acrílica	rugosa	4
23	LE60	60°	adesivo epóxi	lisa	4
24	RE60	60°	adesivo epóxi	rugosa	4
25	M	0°	inexistente (amostra monolítica)	inexistente	8

4.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO-CISALHAMENTO

Após a cura completa dos prismas compostos, considerando 28 dias de cura para o concreto de reparo e, conseqüentemente, 35 dias para o concreto-base, os corpos-de-prova foram preparados e submetidos ao ensaio de Determinação da Resistência à Compressão Axial – NBR 5739:1994, sendo este o método que rege o Ensaio de Compressão-Cisalhamento de Prismas Compostos.

O preparo anterior ao ensaio consistiu no nivelamento da base e do topo dos corpos-de-prova, onde os espécimes cilíndricos foram capeados com enxofre e caulim, e os espécimes prismáticos receberam uma placa de “forro pacote” com espessura de 1cm, colados em suas extremidades com silicone (figura 4.7).

Para os ensaios dos corpos-de-prova foi utilizada uma prensa hidráulica da marca Soil Test com capacidade de 1.200 kN, com uma aplicação de força de 3 kN/s (figura 4.8).



Figura 4.7 – Corpos-de-prova prismáticos nivelados por meio de “forro pacote”.

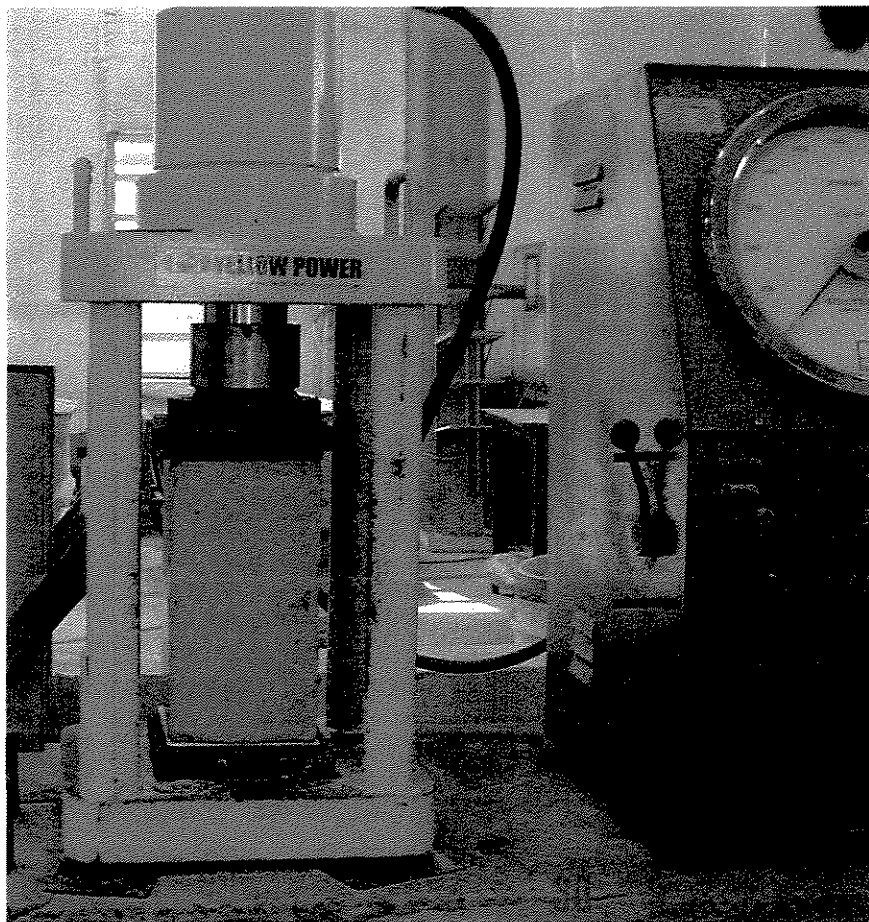


Figura 4.8 – Prensa utilizada no ensaio de compressão-cisalhamento.

A média da resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos foi de 32,77 MPa. Os resultados completos são apresentados no Anexo B, tendo-se, na tabela 4.3, as médias obtidas no Ensaio de Compressão-Cisalhamento dos corpos-de-prova prismáticos.

Tabela 4.3 – Resistência média dos corpos-de-prova prismáticos ensaiados à compressão – NBR 5739:1994.

Grupo	Nomenclatura	Resistência Média de Ruptura (MPa)
1	LSS30	25,91
2	RSS30	27,62
3	LSU30	25,12
4	RSU30	26,03
5	LA30	24,65
6	RA30	25,24
7	LE30	27,85
8	RE30	29,75
9	LSS45	27,43
10	RSS45	28,34
11	LSU45	26,87
12	RSU45	27,83
13	LA45	24,81
14	RA45	26,96
15	LE45	29,48
16	RE45	31,96
17	LSS60	19,22
18	RSS60	27,73
19	LSU60	17,05
20	RSU60	23,87
21	LA60	15,77
22	RA60	22,25
23	LE60	27,82
24	RE60	29,15
25	M	30,73



Figura 4.9 – Rompimento de corpo-de-prova prismático íntegro de referência (monolítico).

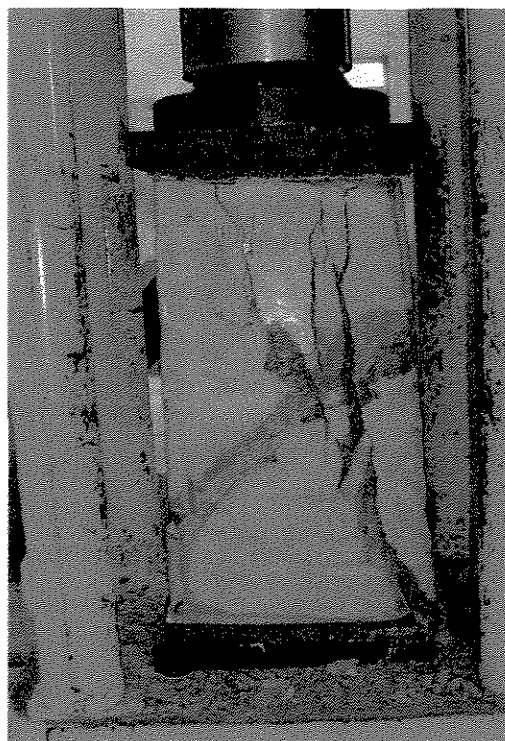


Figura 4.10 – Rompimento de corpo-de-prova prismático composto com junta de 45° (ruptura monolítica).



Figura 4.11 – Rompimento de corpo-de-prova prismático composto com junta de 60° (ruptura na junta de aderência).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 GENERALIDADES

O programa experimental empregou o ensaio de compressão-cisalhamento de prismas compostos de concreto com junta inclinada com a finalidade de avaliar as resistências de aderência de sistemas utilizados, freqüentemente, em reparos de estruturas de concreto.

A resistência à compressão de cada prisma composto foi obtida dividindo-se a força de ruptura pela área da seção transversal (aproximadamente 150mm x 150mm).

As rupturas dos corpos-de-prova foram classificadas de 3 maneiras no programa experimental:

- ruptura na junta (J): ruptura do prisma por deslizamento na junta, sem danos ao concreto adjacente;
- ruptura monolítica (M): ruptura somente no concreto, sem danos à junta;
- ruptura “mista” monolítica e na junta (MJ): parte da ruptura ocorre no concreto e parte na junta.

A eficiência da junta inclinada do prisma composto, com os diversos sistemas adesivos, pode ser analisada de 2 formas diferentes:

- a) em termos de porcentagem f_c/f_{cp} em cada série, sendo:

f_c = resistência média à compressão de 4 prismas compostos de cada série;

f_{cp} = resistência de referência do concreto à compressão, sendo esta a média da resistência dos prisma monolíticos do concreto-base e do concreto de reparo.

Para ser considerado eficaz, segundo Kriegh, citado por Helene (1988), o corpo-de-prova composto deve alcançar uma resistência mínima de 90% da resistência do corpo-de-prova monolítico, confeccionado com concreto íntegro e de referência, configurando, assim, um sistema de reparo com aderência satisfatória.

b) em termos de um Critério de Mohr-Coulomb Modificado:

Conforme formulação apresentada anteriormente no Capítulo 3, item 3.4, são calculadas as tensões últimas na interface dos prismas compostos, normal (σ) e cisalhante (τ), sendo analisada a posição relativa dos pontos com estas coordenadas em relação às retas da envoltória de ruptura proposta por Clímaco e Regan (2001).

5.2 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO PRISMA COMPOSTO EM RELAÇÃO À DO PRISMA MONOLÍTICO DE CONTROLE

Os resultados dos ensaios de compressão-cisalhamento do programa experimental são apresentados no Anexo B.

Nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, os resultados dos diversos sistemas de reparo são apresentados em ordem decrescente da razão de aderência f_c/f_{cp} dos prismas compostos, com indicação do tipo de ruptura ocorrido.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios da Série 1: ensaio de compressão-cisalhamento de prisma composto com ângulo de junta de 30°.

Grupo	Nomencl.	Sistema Adesivo	Tipo de Ruptura		Razão f_c/f_{cp} em Relação ao Prisma de Controle (%)
8	RE30	adesivo epóxi	M	M	97
			M	M	
7	LE30	adesivo epóxi	M	M	91
			M	M	
2	RSS30	sem adesivo - substrato seco	M	M	90
			M	M	
4	RSU30	sem adesivo - substrato úmido	M	M	85
			M	M	
1	LSS30	sem adesivo - substrato seco	M	M	84
			M	M	
3	LSU30	sem adesivo - substrato úmido	M	M	82
			M	M	
6	RA30	pasta à base de resina acrílica	M	M	82
			M	M	
5	LA30	pasta à base de resina acrílica	M	M	80
			M	M	

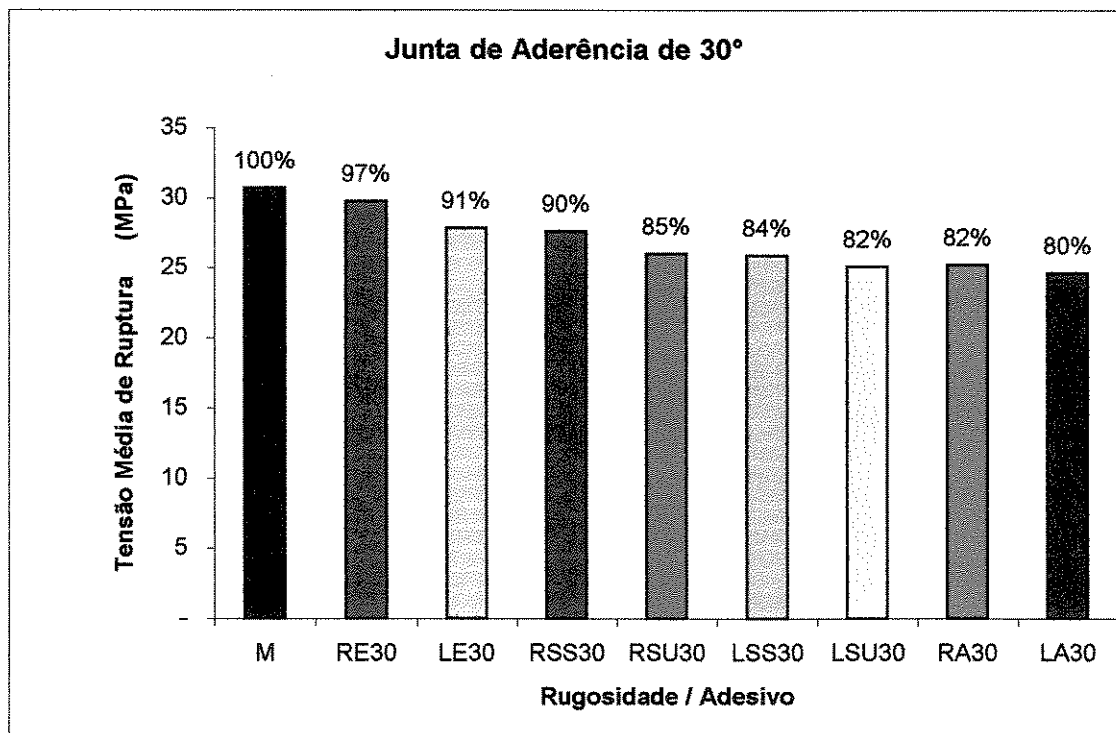


Figura 5.1 – Resistência dos prismas compostos com ângulo da junta de 30°.

Como pode ser observado na tabela 5.1 e na respectiva figura 5.1, para juntas com ângulo de 30°, todos os prismas compostos tiveram ruptura monolítica e, apesar de todos os corpos-de-prova apresentarem, relativamente, bons resultados de resistência de aderência, só podem ser considerados satisfatórios os sistemas de reparo onde foi utilizado adesivo epóxi, com obtenção de razão f_c/f_{cp} de 97% e 91% respectivamente para o substrato rugoso (RE30) e liso (LE30), e o sistema sem adesivo com substrato rugoso e seco (RSS30) que apresentou razão f_c/f_{cp} igual a 90%.

O valor de resistência média mais baixo foi apresentado pelo grupo dos corpos-de-prova com superfície lisa e ponte de aderência com pasta à base de resina acrílica, com f_c/f_{cp} de 80%.



Figura 5.2 – Ruptura monolítica de prisma composto com ângulo da junta de 30°.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios da Série 2: ensaio de compressão-cisalhamento de prisma composto com ângulo de junta a 45°.

Grupo	Nomencl.	Sistema Adesivo	Tipo de Ruptura		Razão f_c/f_{cp} em Relação ao Prisma de Controle (%)
16	RE45	adesivo epóxi	M	M	104
			M	M	
15	LE45	adesivo epóxi	M	M	96
			M	M	
10	RSS45	sem adesivo - substrato seco	M	M	92
			M	M	
9	RSU45	sem adesivo - substrato úmido	M	M	91
			M	M	
12	LSS45	sem adesivo - substrato seco	M	M	89
			M	M	
14	RA45	pasta à base de resina acrílica	M	M	88
			M	M	
11	LSU45	sem adesivo - substrato úmido	M	M	87
			MJ	MJ	
13	LA45	pasta à base de resina acrílica	J	J	81
			J	J	

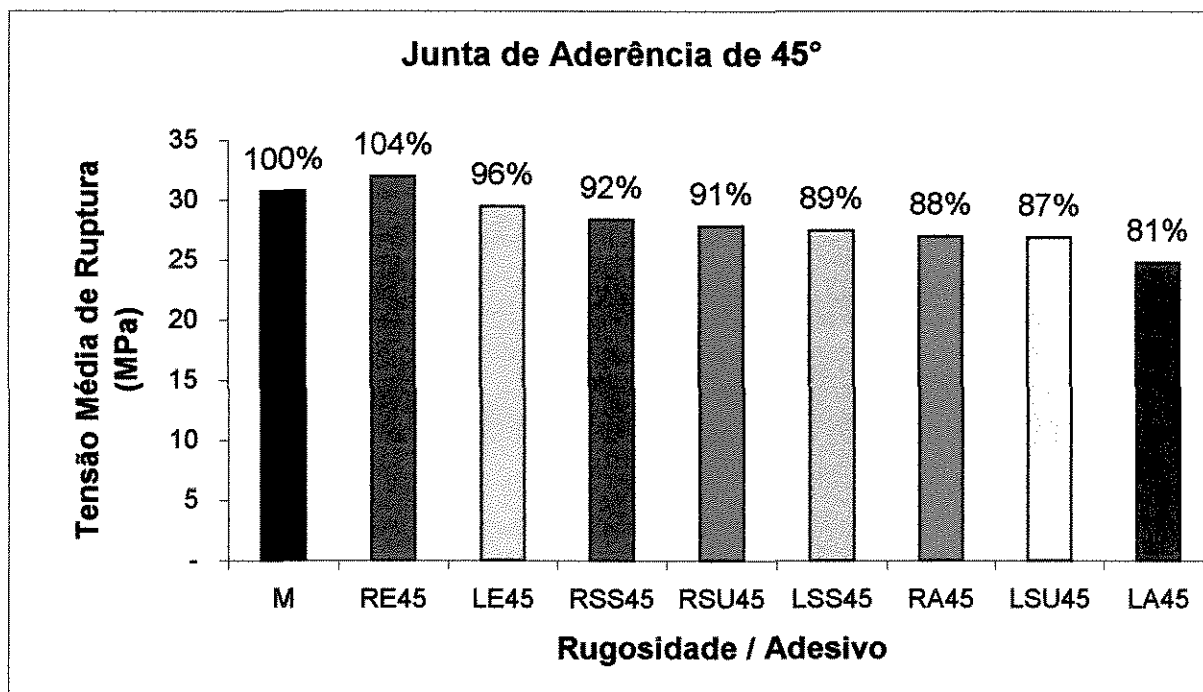


Figura 5.3 – Resistência dos prismas compostos com ângulo da junta de 45°.

A tabela 5.2 e a figura 5.3 mostram o comportamento dos prismas compostos com ângulo da junta de 45° , onde as resistências de aderência satisfatórias foram para os corpos-de-prova reparados com adesivo epóxi (RE45 e LE45) e sem adesivo com substrato rugoso (RSS45 e RSU45).

Todos os prismas compostos que receberam pasta à base de resina acrílica como ponte de aderência e superfície lisa sofreram ruptura na junta (figura 5.5).



Figura 5.4 – Ruptura monolítica de prisma composto com ângulo da junta de 45° , reparado com adesivo epóxi.



Figura 5.5 – Ruptura na junta de prisma composto com ângulo de 45°, com argamassa à base de resina acrílica como ponte de aderência e superfície lisa.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios da Série 3: ensaio de compressão-cisalhamento de prisma composto com ângulo de junta de 60°.

Grupo	Nomencl.	Sistema Adesivo	Tipo de Ruptura		Razão f_c/f_{cp} em Relação ao Prisma de Controle (%)
24	RE60	adesivo epóxi	M	M	95
			M	M	
23	LE60	adesivo epóxi	M	M	91
			M	M	
18	RSS60	sem adesivo - substrato seco	J	MJ	90
			MJ	J	
21	RSU60	sem adesivo - substrato úmido	J	J	78
			J	J	
22	RA60	pasta à base de resina acrílica	J	J	72
			J	J	
17	LSS60	sem adesivo - substrato seco	J	MJ	63
			J	J	
19	LSU60	sem adesivo - substrato úmido	J	J	55
			J	J	
21	LA60	pasta à base de resina acrílica	J	J	51
			J	J	

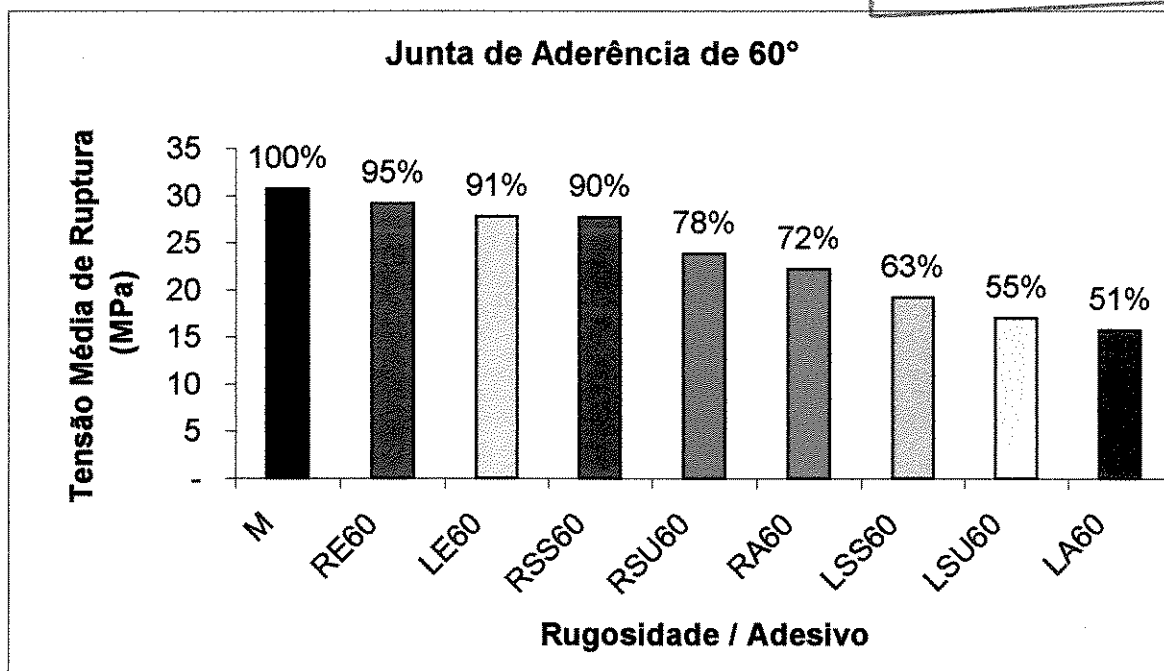


Figura 5.6 – Resistência dos prismas compostos com ângulo da junta a 60°.

O comportamento dos prismas compostos com ângulo da junta de 60° é mostrado na tabela 5.3 e na figura correspondente 5.6.

Os corpos-de-prova colados com adesivo epóxi, independentemente da superfície rugosa ou lisa (RE60 e LE60), apresentaram aderência satisfatória e foram os únicos com 100% de ruptura monolítica do concreto (figura 5.7).

Apesar de atenderem ao requisito proposto por Kriegh, citado por Helene (1988), ou seja, razão f_c/f_{cp} igual 90%, 50% dos espécimes com junta rugosa e seca sem adesivo (RSS60) sofreram ruptura “mista” monolítica e na junta e os outros 50% ruptura na junta (figura 5.8).

Com exceção de um corpo-de-prova com junta lisa e seca sem adesivo (LSS60), que sofreu ruptura “mista” monolítica e na junta, mostrado na figura 5.9,

todos os demais prismas compostos com superfície lisa sofreram ruptura na junta (figura 5.10) e apresentaram resistências médias de aderência bastante baixas: 63% para o grupo LSS60, 55% para LSU60 e 51% para LA60.

Os prismas com superfície rugosa e úmida (RSU60) e os com superfície rugosa e pasta à base de acrílico (RA60) também romperam na junta de aderência.

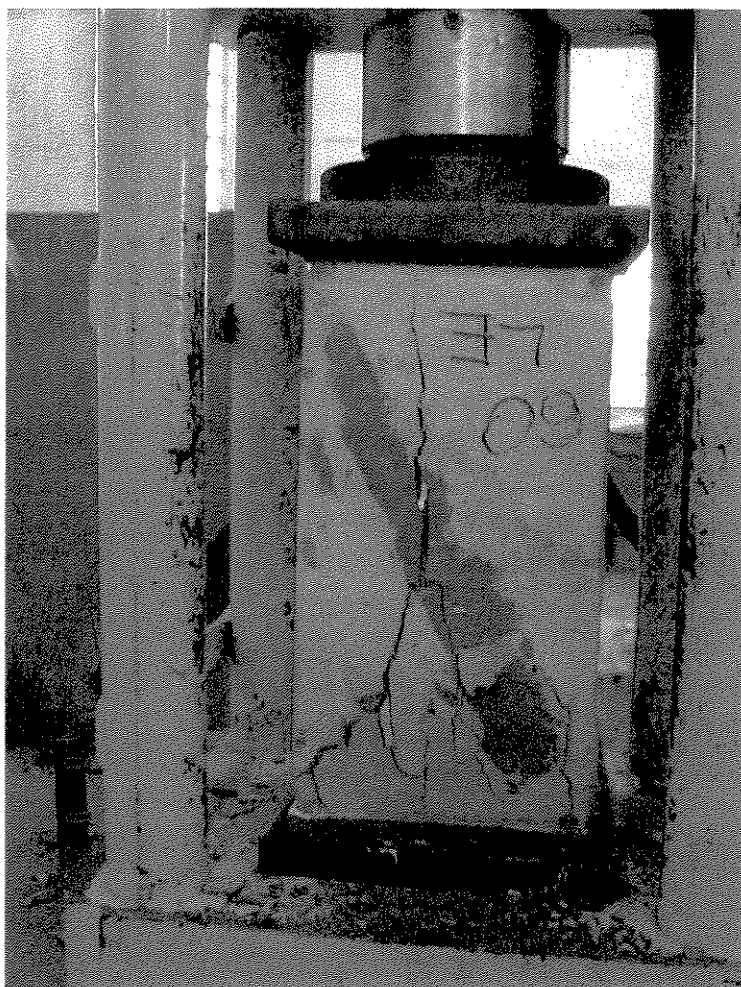


Figura 5.7 – Ruptura monolítica de prisma composto com ângulo da junta de 60° e superfície lisa, reparado com adesivo epóxi.

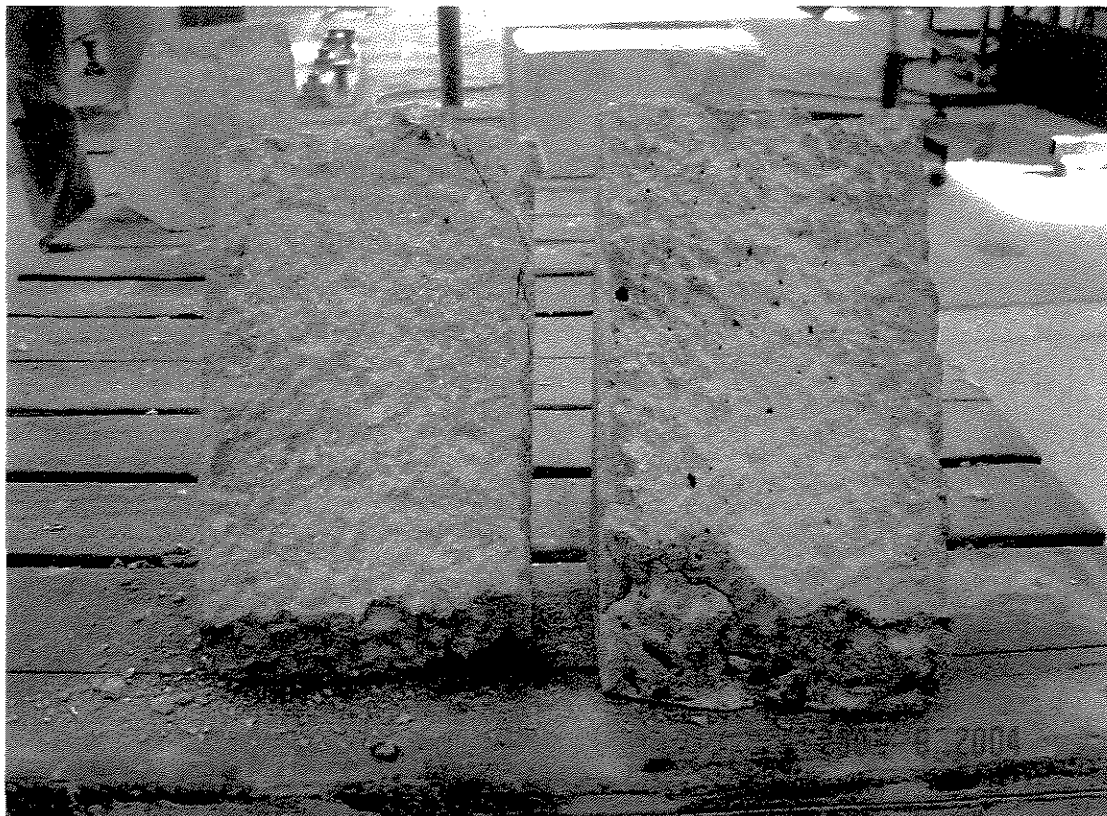


Figura 5.8 – Ruptura na junta de prisma composto com ângulo de 60° e superfície rugosa seca e sem adesivo.

Figura 5.9 – Ruptura “mista”
monolítica e na junta de prisma
composto com ângulo de 60° e
superfície lisa e seca, sem adesivo.



Figura 5.10 – Ruptura na junta de prisma composto com ângulo de 60° e
superfície lisa.

5.2.1 Análise Global das Resistências de Aderência

Dos 24 grupos de prismas compostos, com variação de ângulo da junta, rugosidade e sistema adesivo:

- 9 apresentaram resistência média de aderência satisfatória, atendendo a razão f_c/f_{cp} igual ou maior que 90% (figura 5.11), além de ruptura monolítica do concreto. Estes grupos incluem todos os que utilizaram epóxi como ponte de aderência, independentemente de substrato liso ou rugoso, totalizando 6 grupos e mais 3 grupos sem adesivo com substrato rugoso;

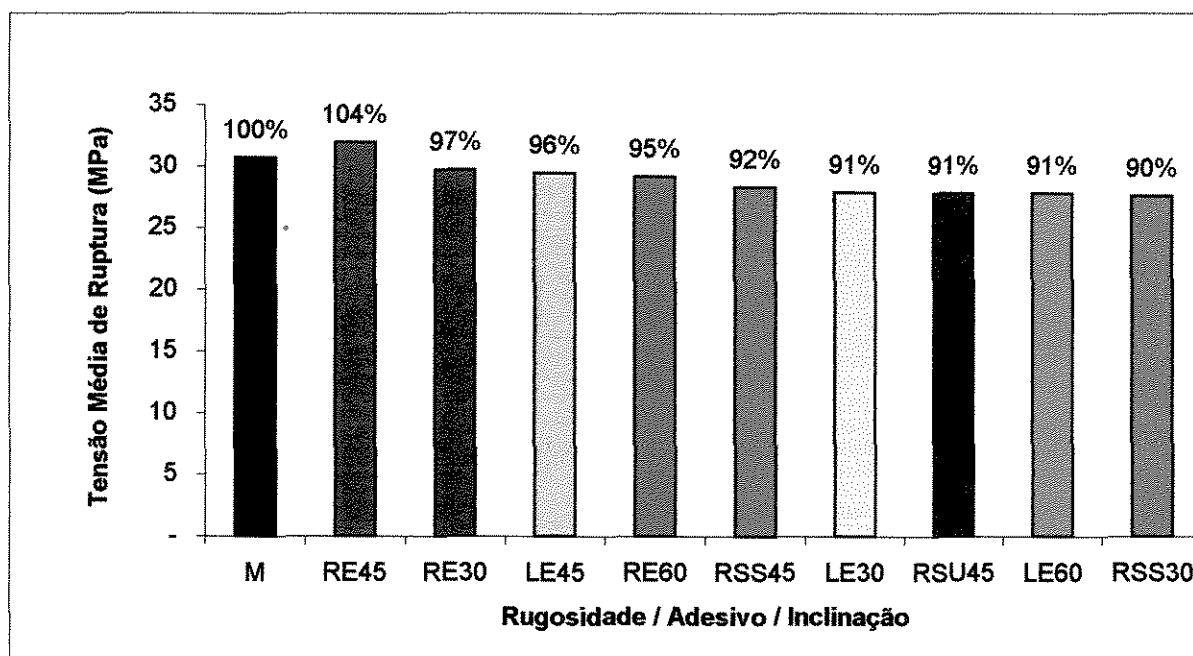


Figura 5.11 – Resistência dos prismas compostos com sistema de reparo satisfatório.

- 7 grupos tiveram ruptura na junta e razão f_c/f_{cp} inferior a 90% e 1 grupo $f_c/f_{cp} = 90\%$, dentre os quais 5 grupos com ângulo da junta de 60° e 3 grupos com ponte de aderência com pasta à base de resina acrílica (figura 5.12);

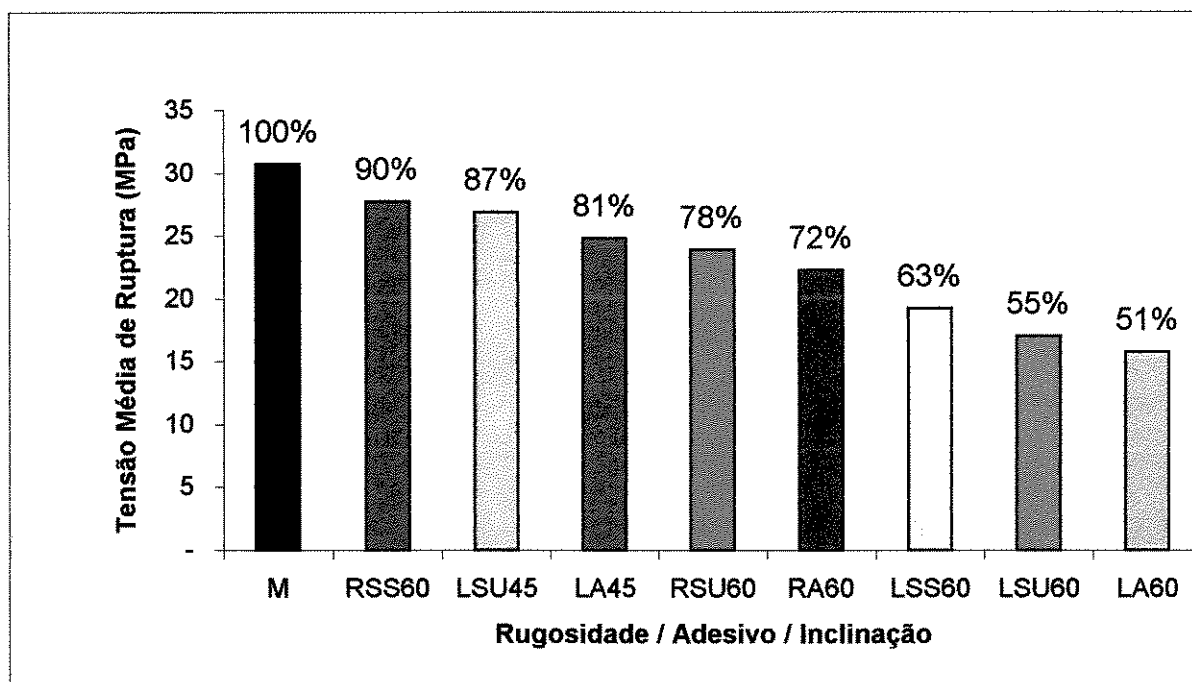


Figura 5.12 – Resistência dos prismas compostos que apresentaram ruptura na junta.

- 7 grupos, apesar de ruptura monolítica do concreto, não atenderam a resistência mínima de 90% em relação aos prismas monolíticos, embora 2 grupos (LSS45 e RA45) tenham apresentado resistências médias bem próximas à recomendada (figura 5.13).

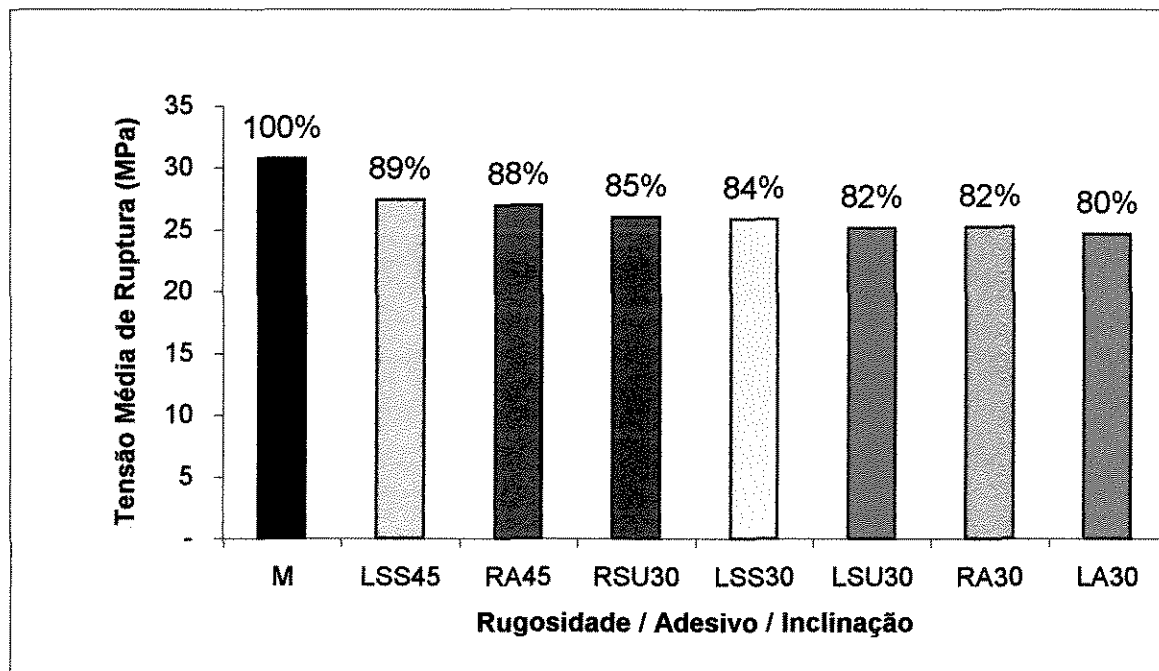


Figura 5.13 – Prismas compostos com ruptura monolítica e resistência abaixo da mínima aceitável.

5.2.2 Comparação com Outros Trabalhos

a) Rugosidade da Superfície da Junta

Clímaco (1990), citado por Garcia (1998), testou prismas compostos com juntas lisas de 60° e 70° e obteve valores de resistência à compressão-cisalhamento pequenos, com médias inferiores a 50% em relação à resistência dos prismas monolíticos de referência.

Nos ensaios realizados por Robins e Austin (1995) com prismas compostos com junta de 60°, as amostras com juntas lisas apresentaram valores aproximadamente 20% inferiores aos com juntas rugosas.

No presente trabalho, as resistências dos prismas com ângulos da junta de 30° e 45° e superfícies lisas apresentaram em média valores 5% abaixo das rugosas. Já no caso das juntas de 60°, as superfícies lisas mostraram resistências em torno de 19% menores que as rugosas.

b) Ângulo da Junta de Aderência

Salles e Souza (1991) ensaiaram prismas compostos com dimensões 15 cm x 15 cm x 30 cm, sem adesivo, com juntas de 30° e 45°. No caso das juntas de 30°, a ruptura foi do tipo monolítica para todos os corpos-de-prova, enquanto que as amostras de 45° romperam na junta.

Nos ensaios realizados por Clímaco e Regan (2001) com prismas compostos com ângulo da junta de 60°, os que tiveram adesivo à base de epóxi como ponte de aderência sofreram ruptura mista, ou seja, parte da ruptura no concreto e parte na junta, os demais, que receberam outros tipos de ponte de aderência, romperam na junta.

Neste trabalho, todos os prismas compostos com ângulo da junta de 30° tiveram ruptura monolítica. No caso dos prismas com junta de 45°, 81% sofreram ruptura monolítica, 6% ruptura do tipo mista e 13% ruptura na junta. A maioria dos prismas com ângulo da junta de 60° sofreu ruptura na junta, correspondendo a 66% do total das amostras com este ângulo; 9% tiveram ruptura mista e 25% ruptura monolítica, sendo estes todos os prismas compostos que receberam adesivo à base de epóxi.

c) Umidade na Superfície da Junta

O trabalho de Robins e Austin (1995) apresenta resistências das juntas úmidas em torno de 10% inferiores às juntas secas.

Para ângulo da junta de 60°, Clímaco e Regan (2001) constataram que o umedecimento da superfície reduziu a resistência dos prismas compostos em torno de 7%.

Wall e Shrive (1988), que ensaiaram corpos-de-prova com junta de 60°, notaram acréscimo de 9% na resistência das juntas úmidas reparadas com pasta de cimento Portland, em comparação às juntas secas.

Nesta pesquisa, as resistências das juntas de 30° e 45° não foram tão influenciadas pela umidade das superfícies, onde as úmidas apresentaram em média valores 2,5% menores que as secas. Já no caso das juntas de 60°, as superfícies úmidas apresentaram resistências médias 10% inferiores às rugosas.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS EM TERMOS DO CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB MODIFICADO

5.3.1 Introdução

Conforme exposto anteriormente, é também recomendável proceder a análise do desempenho dos diferentes sistemas de aderência por meio de um critério de ruptura do tipo Mohr-Coulomb, que analisa as relações entre as tensões normais e de cisalhamento na interface entre o reparo e o concreto antigo, com ensaios de juntas próximas aos ângulos considerados críticos.

De acordo com Austin, Robins e Pan (1999), a avaliação por um critério de Mohr-Coulomb, além de contribuir na avaliação do comportamento global das juntas, permite estudar a influência da aplicação de agente adesivo na interface, que pode resultar em mudanças na inclinação da reta limite que caracteriza a ruptura na junta, associada ao coeficiente de atrito μ .

Como já mencionado no item 3.3.1 do Capítulo 3, no caso de uma ruptura na junta, o estado de tensões na interface é de compressão e cisalhamento, podendo estas tensões serem

expressas em termos da resistência à compressão do prisma composto f_c e do ângulo α entre a linha da junta e a horizontal.

As tensões cisalhantes e normais, conforme item 3.2.2 deste trabalho, podem ser representadas pelas expressões:

$$\sigma = f_c \cos^2 \alpha$$

$$\tau = f_c \sin \alpha \cos \alpha$$

sendo α é o ângulo da junta com a normal à carga.

Por terem se mostrado adequados para situações reais de reparo, foram adotados para este trabalho os valores de coeficiente de atrito e coesão aparente propostos originalmente por Regan (1986) e aplicados por Garcia (1998) e Clímaco e Regan (2001), sendo:

Interface	c	μ
Áspera	$0,25 f_{cc}^{2/3}$	1,4
Lisa	0,5 MPa	0,7

Para um determinado sistema adesivo, obtidas as resistências individuais f_c dos prismas compostos com junta inclinada de um ângulo de α com a horizontal, a junta será considerada eficiente, segundo o critério proposto, se os pontos, cujas coordenadas são as tensões últimas normal e cisalhante, situarem-se acima da reta que define a envoltória de ruptura que:

- corta o eixo y em $c = 0,25 f_{cc}^{2/3}$, inclinação $\phi = \arctan \mu$, $\mu = 1,4$, para superfície rugosa;
- corta o eixo y em $c = 0,5 \text{ MPa}$, inclinação $\phi = \arctan \mu$, $\mu = 0,7$, para superfície lisa.

5.3.2 Análise da Aderência dos Sistemas de Reparo com Junta de 60°

Foram realizadas comparações entre as tensões últimas na junta, τ e σ , por meio dos resultados do rompimento de 32 corpos-de-prova de ensaio com ângulo da junta de 60°, ensaiados nesta pesquisa, com reparo de curto prazo, assim considerado pela moldagem do reparo sobre o concreto-base com a idade de 7 dias. Os resultados completos são apresentados no Anexo C.

5.3.2.1 Superfície Rugosa

A figura 5.14 mostra os resultados dos ensaios de compressão-cisalhamento, com as tensões normal (σ) e cisalhante (τ) na junta referenciada ao termo $f_{cc}^{2/3}$ para as juntas rugosas.

Considerando a resistência e o tipo de ruptura de cada prisma, obtidos pelo ensaio de compressão-cisalhamento, era esperado que o sistema adesivo pasta à base de resina acrílica e o sistema sem adesivo com superfície úmida apresentassem valores bem abaixo da reta que define a envoltória de ruptura, pois todas as amostras referentes à estes sistemas de reparo sofreram ruptura na junta de aderência.

O sistema composto por junta com substrato seco e sem adesivo, onde 50% das amostras tiveram ruptura mista e 50% ruptura na junta, atendeu ao critério de Mohr-Coulomb Modificado aplicado por Garcia (1998) e Clímaco e Regan (2001).

No caso das juntas com adesivo à base de epóxi, esperava-se valores acima da envoltória, por terem apresentado ruptura monolítica e boa resistência de aderência.

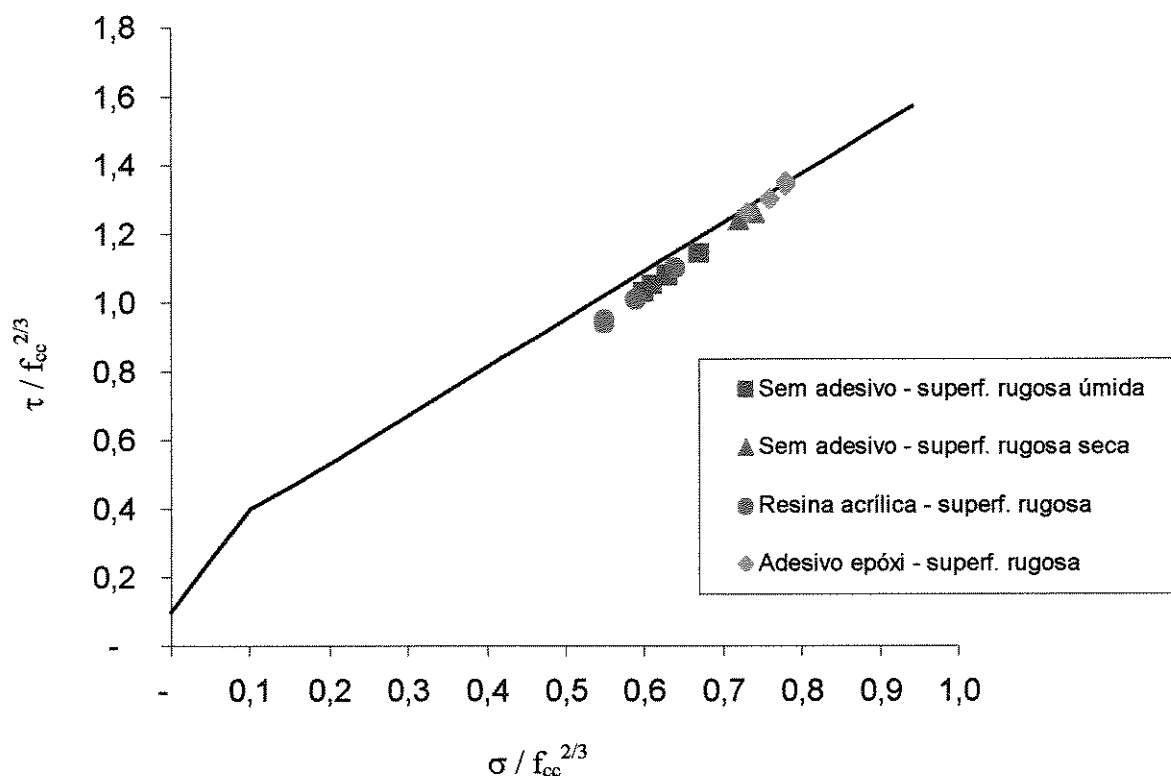


Figura 5.14 – Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas de reparo com superfície rugosa.

Os resultados obtidos por Clímaco e Regan (2001) em seu trabalho, indicaram que as constantes na equação podem ser afetadas pelo material adesivo. Com base nisso, os mesmos pesquisadores sugerem que para adesivo epóxi, por exemplo, devam ser considerados valores mais baixos de “ μ ” possivelmente em combinações com valores mais altos de “ c ”. Garcia (1998) propõe manter o valor de “ c ” e adotar $\mu = 1,15$ para o epóxi.

Baseado nestas propostas, com a finalidade de teste, um novo diagrama foi traçado para o sistema de adesivo à base de epóxi, onde o valor de “ c ” foi mantido igual a $0,25 f_{cc}^{2/3}$ e o valor de “ μ ” foi reduzido para 1,2. A figura 5.15 mostra a validade desta alternativa.

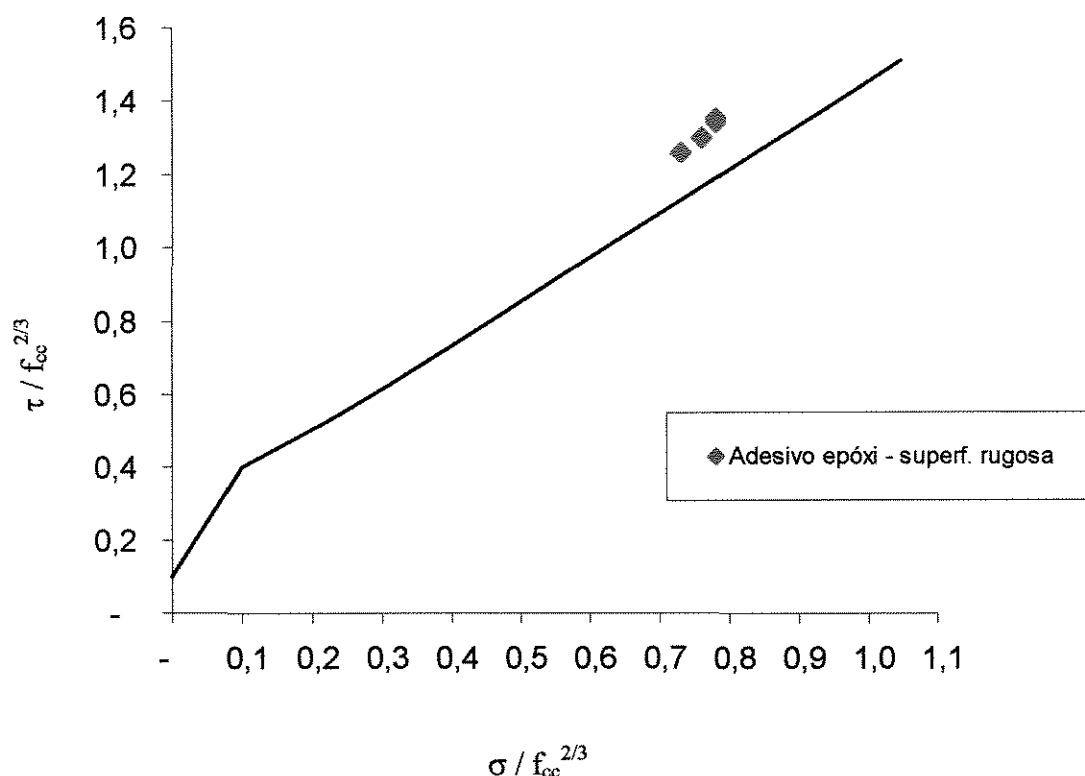


Figura 5.15 – Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas de adesivo epóxi, com alteração do coeficiente " μ ".

Para os prismas compostos sem adesivo com superfície úmida e para os que utilizaram pasta à base de resina acrílica, os resultados dos ensaios de compressão-cisalhamento mostraram que estes sistemas de aderência não foram satisfatórios, enquanto que, pelo critério de Mohr-Coulomb Modificado, os mesmos se apresentaram como parcialmente satisfatórios, pois, segundo Garcia (1998), os pontos interceptados pela reta ou que não se encontrarem muito abaixo dela poderão ser considerados como sistemas razoavelmente eficientes quanto à aderência.

Mediante esta afirmação, um outro diagrama foi traçado mantendo o valor de " c " e aumentando o valor de " μ " para 1,5 (figura 5.16).

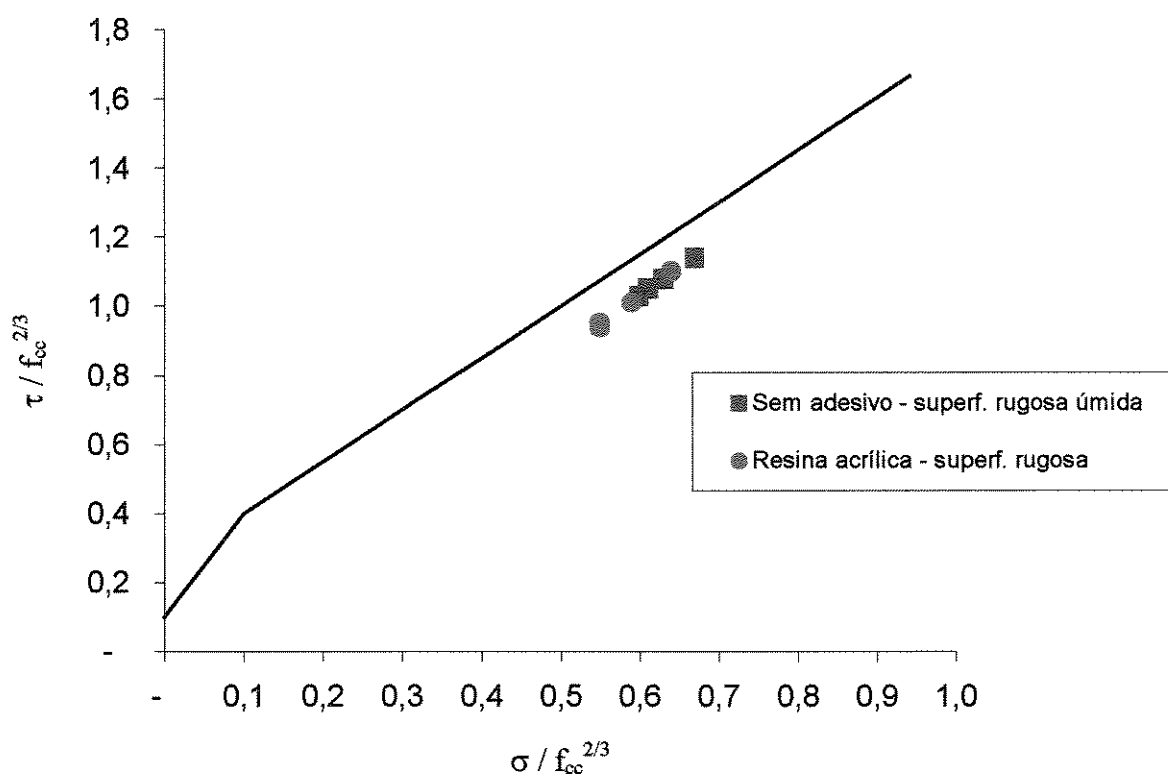


Figura 5.16 – Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas sem adesivo e superfície úmida e sistema com pasta à base de resina acrílica, com alteração do coeficiente “ μ ”.

5.3.2.2 Superfície Lisa

A figura 5.17 mostra os resultados dos ensaios de compressão-cisalhamento, com as tensões normal (σ) e cisalhante (τ) na junta referenciada ao termo $f_{cc}^{2/3}$ para as juntas lisas, considerando $c = 0,5$ MPa e $\mu = 0,7$.

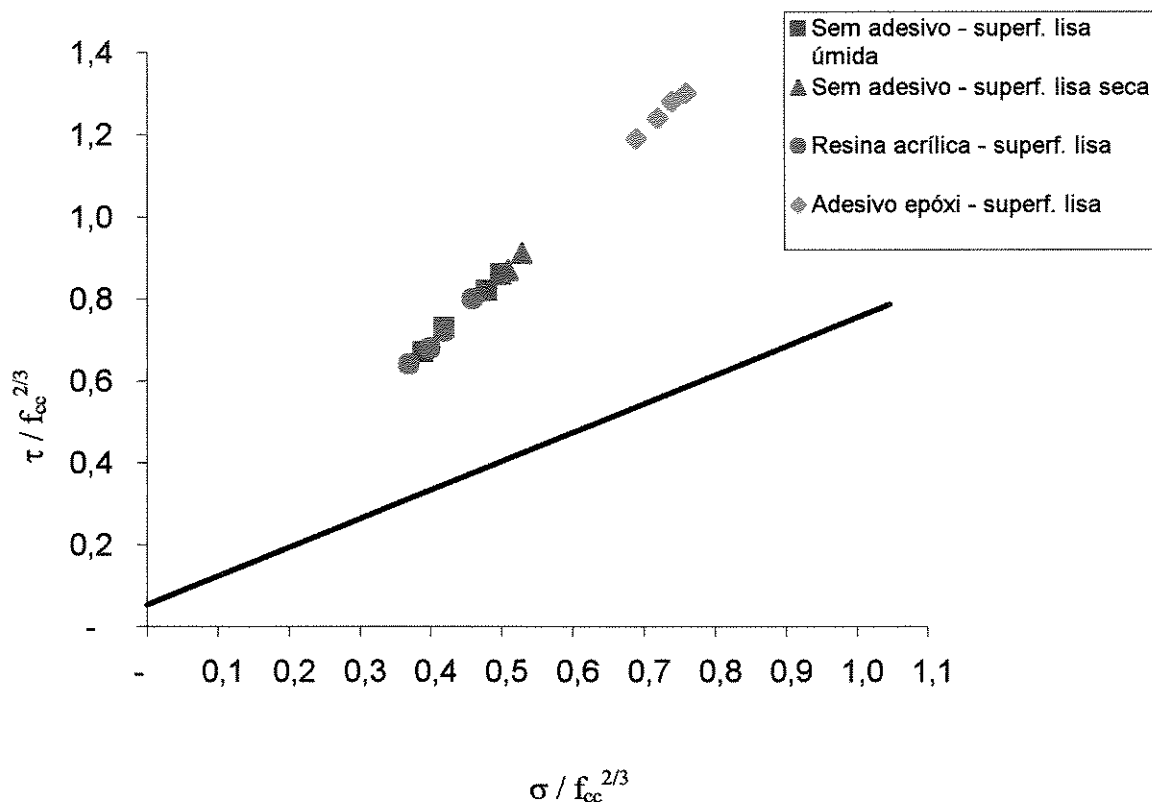


Figura 5.17 – Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) relativas à resistência do concreto ($f_{cc}^{2/3}$) para os sistemas de reparo com superfície lisa.

O diagrama baseado no critério de Mohr-Coulomb Modificado para juntas lisas proposto por Regan (1986), no caso do presente trabalho, atendeu somente aos prismas compostos que tiveram adesivo epóxi como ponte de aderência e apresentaram ruptura monolítica. Os demais sistemas sofreram ruptura na junta e apresentaram resistências baixas no ensaio de compressão-cisalhamento, assim, era esperado que os pontos referentes á estes sistemas se situassem abaixo da reta.

Austin, Robins e Pan (1999) questionam a proposta de Regan (1986) e sugerem uma envoltória de ruptura a partir da equação:

$$y = 2,621 + 1,979x - 0,0462x^2 \quad 5.1$$

onde “x” e “y” correspondem à σ e τ , respectivamente.

A figura 5.18 apresenta os dados dos cilindros compostos com ângulo da junta de 60° e superfície lisa, deste programa experimental, lançados no diagrama proposto por Austin, Robins e Pan (1999).

Este diagrama se mostrou adequado aos sistemas sem adesivo e com pasta à base de resina acrílica, entretanto, não atendeu ao sistema com adesivo à base de epóxi.

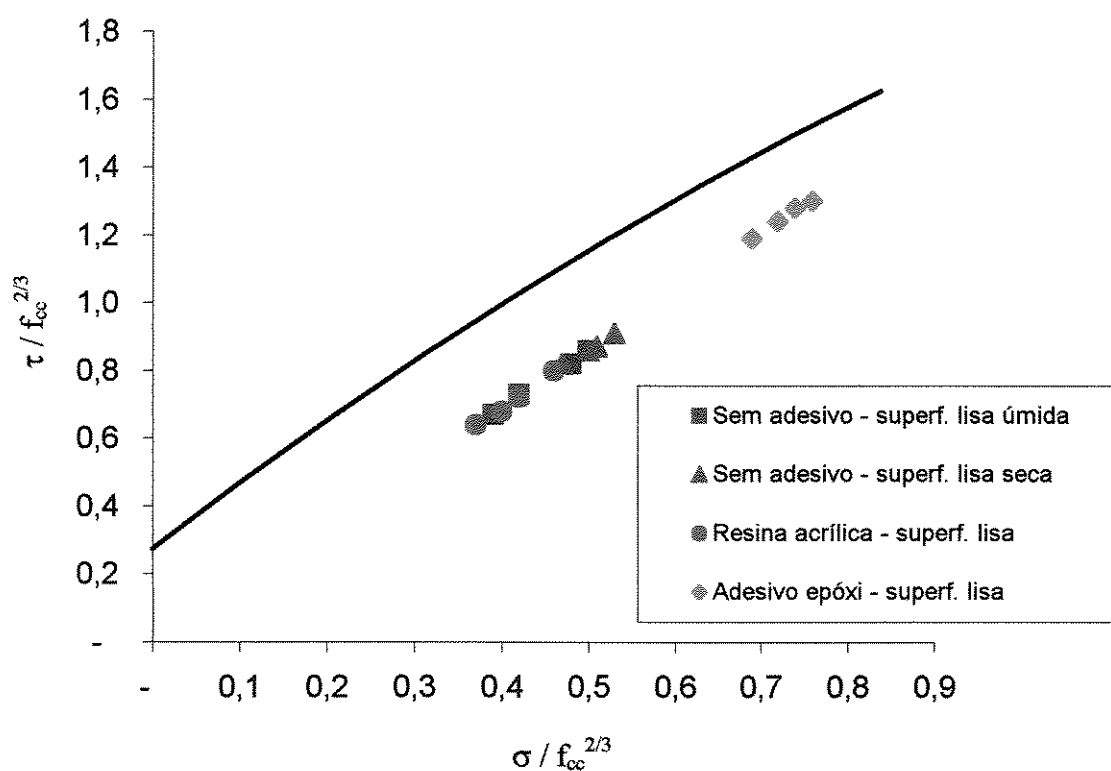


Figura 5.18 – Diagrama de tensões na junta ($\sigma \times \tau$) para os sistemas de reparo com superfície lisa, proposto por Austin, Robins e Pan (1999).

6 CONCLUSÃO

Apesar da conclusão de que o concreto é um material reparável, é grande a diversidade de problemas envolvidos no reparo das estruturas de concreto, onde várias questões ainda não foram solucionadas, dentre as quais:

- carência de normas específicas para execução de reparos e reforços das estruturas de concreto;
- literaturas baseadas em pesquisas de laboratório bastante fragmentadas e parciais;
- existência no mercado de um grande número de produtos destinados à colagem entre concretos, onde nem todos desempenham essa função adequadamente, podendo até prejudicar a aderência;
- falta de monitoramento de estruturas que passaram por reparos e reforços, a fim de se conhecer o desempenho do sistema utilizado.

Para avaliar a resistência da aderência na interface dos reparos de concreto envolvendo a ligação entre concreto novo e antigo, um programa experimental foi desenvolvido com base no teste de compressão-cisalhamento de prismas compostos, pelo fato de ser representativo de estados de tensões reais.

O objetivo foi a análise da influência de fatores como a rugosidade e umidade da superfície, o sistema utilizado como ponte de aderência e o ângulo de inclinação da junta, com relação a prismas monolíticos, e em termos de um Critério de Mohr-Coulomb Modificado, onde as principais conclusões foram:

- a) Nos prismas compostos com adesivo à base de epóxi como ponte de aderência, independentemente do ângulo da junta e da rugosidade, todos os modelos testados sofreram ruptura monolítica e apresentaram resistências superiores aos 90% com relação aos prismas monolíticos, atendendo a proposta de Kriegh (1976), apesar da perda média de resistência à compressão de 6% dos prismas de superfície lisa em comparação aos de superfície rugosa. Desta forma, o adesivo à base de epóxi se mostrou o mais apropriado quando não há um controle rigoroso da rugosidade e do ângulo de inclinação da junta, entretanto, é imprescindível que a junta esteja totalmente seca para a eficácia do sistema adesivo;
- b) Todas os modelos com ângulo da junta de 30° tiveram ruptura monolítica, mas somente os sistemas epóxi e sem adesivo com superfície rugosa e seca apresentaram resistência satisfatória;
- c) Quanto ao ângulo de aderência, os melhores resultados foram demonstrados pelos prismas com junta de 45° e os piores com junta de 60°;
- d) A pasta à base de resina acrílica, indicada comercialmente como adesivo, mostrou efeito prejudicial à aderência;
- e) Neste trabalho, os modelos com as juntas secas demonstraram resistências superiores àqueles com juntas úmidas na ligação de dois concretos sem a utilização de adesivos, principalmente para os prismas compostos com ângulo da junta de 60° (10% em média);

- f) O Critério de Mohr-Coulomb Modificado, com a adoção dos coeficientes “c” (coesão aparente) e “ μ ” (coeficiente de atrito na interface) propostos por Regan (1986) e aplicados por Garcia (1998) e Clímaco e Regan (2001), somente atendeu ao sistema sem adesivo com superfície rugosa e seca e ao sistema epóxi com superfície lisa;
- g) Para as superfícies rugosas, a redução de 1,4 para 1,2 do coeficiente de atrito “ μ ” para os prismas compostos com adesivo à base de epóxi e, o aumento de “ μ ” para 1,5 para os prismas com pasta à base de resina acrílica e sem adesivo com superfície úmida, permitiu que estes sistemas de reparo se enquadrassem no Critério de Mohr-Coulomb Modificado;
- h) No caso dos prismas compostos com substrato liso que não atenderam ao Critério de Mohr-Coulomb Modificado, a adoção de uma nova envoltória de ruptura, proposta por Austin, Robins e Pan (1999), se mostrou satisfatória.

Como sugestões para trabalhos futuros propõem-se:

- Estudo da durabilidade dos sistemas de reparo, com exposição dos prismas compostos á diversas condições como: temperaturas elevadas, umidade, ambientes quimicamente agressivos;
- Correlacionar os ângulos das juntas e os sistemas adesivos de modo a se adequar o Critério de Mohr-Coulomb á estas variáveis, determinando-se novos valores para o coeficiente de atrito e a coesão da junta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo, Editora Pini, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 503-2**. “Standard Specification for Bonding Plastic Concrete to Hardened Concrete with a Mult-Component Epoxy Adhesive”, **ACI Journal**, September 1978.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 303 R-74**. Control of Cracking in Concrete Structures, **ACI Manual of Concrete Practice, Part 3**, 1982.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 318-83**. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 1983.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Surface Preparation for Adhesives**, Concrete International, vol. 11, nº 9, September 1989.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - **COMMITTEE 503.2** “Standard Specification for Repairing Concrete of Epoxy Mortar”, **ACI Manual of Concrete Practice**, sept./oct. 1992.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - **COMMITTEE 546** “Concrete Repair Guide”, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 882** “Bond Strength of Epoxy - Resin Systems Used with Concrete”, 1978.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 881** “Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete”. Annual Book of ASTM Standards, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D 695M** “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics (Metric)”, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D 638M** “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Metric)”, 1993.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo, Editora Pini, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 5738:1984**. “Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova de Concreto, Cilíndricos ou Prismáticos – procedimentos”. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 5739:1994**. “Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos – Método de Ensaio”. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7215:1996**. “Determinação da Resistência à Compressão do Cimento Portland”. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7217:1994**. “Agregados – Determinação da Composição Granulométrica”. Rio de Janeiro, 1994.

AUSTIN, S.; ROBINS, P and PAN, Y. **Shear Bond Testing of Concrete Repairs**. Cement and Concrete Research, nº 29, 1999.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Portaria nº 99**, outubro 2004.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS6319: Part 4**. “Testing of Resin Compositions for Use in Construction. Method for Measurement of Bond Strength (Slant Shear Method)”, 1984.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS6319: Part 7**. “Testing of Resin Compositions for Use in Construction. Method for Measurement of Tensile Strength (Slant Shear Method)”, 1985.

BRITO, N. D. e FERNANDES-HACHICH, V. C. **Aderência entre o Concreto Velho e o Novo**, EPUSP, São Paulo, 1994.

CAMOMILLA, G. General Report, **Proceedings of an International Conference on Gestion des Ouvrages d’art**. Vol. II, Editions Anciens ENPC, Paris, 1981.

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

CARRASQUILLO, R. L.; NILSON, A. H. and SLATE, F. O. **Properties of high strength concrete subject to short-term**. ACI Journal, Proceedings, v. 78, n° 3, may-june 1981.

CLÍMACO, J. C. T. S. Avaliação da Resistência de Aderência entre Concretos de Diferentes Idades. In: 31° Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, São Paulo, 1989. **Anais**.

CLÍMACO, J. C. T. S. Uma Análise dos Métodos de Avaliação de Aderência e Uso de Agentes Adesivos no Reparo de Estruturas de Concreto. In: XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, UFRGS, Rio Grande do Sul, Brasil, nov. 1991. **Anais**.

CLÍMACO, J. C. T. S. and REGAN, P. E. **Evaluation of Bond Strength between Old and New Concrete in Structural Repairs**, Magazine of Concrete Research, vol. 53, n° 6, december 2001.

COMITE INTERNATIONAL DU BETON (CEB) **Mechanisms of Load Transfer Between Old and Added Materials**, Bulletin d'Information n° 162, august 1983.

COMITE INTERNATIONAL DU BETON (CEB) **FIP MODEL CODE 1990**, Bulletin d'Information n° 205 – “Final Draft”- july 1991.

COURARD, L. **Parametric Study for the Creation of the Interface between Concrete and Repair Products**. Materials and Structures, vol. 33, january-february 2000.

CUNHA, A. J. P., SOUZA, V. C. M. e LIMA, N. A. **Acidentes Estruturais na Construção Civil** Vol. 2, São Paulo, Editora Pini, 1998.

FAGURY, S. C. **Concretos e Pastas de Elevado Desempenho: Contribuição aos Estudos de Reparos Estruturais e Ligações entre Concretos Novo e Velho, com Tratamento da Zona de Interface**, 2002, Dissertação de Mestrado, EESC-USP.

FOSROC REAX. **Guia de Produtos**, São Paulo, 2004.

GARCIA, S. R. A. **Avaliação da Resistência de Aderência de Materiais para Reparo de Estruturas de Concreto**, 1998, 159 f., Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

FRANKE, L. The Dimensioning of Adhesive-bonded Joints in Concrete Building Components. Proceedings: RILEM International Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete, Chapman and Hall, London, 1986. **Anais**.

GARCIA, S. R. A. e CLÍMACO, J. C. T. S. Eficiência da Aderência de Materiais de Reparo para Estruturas de Concreto. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Foz do Iguaçu, PR, 2001. **Anais.**

HELENE, P. R. L. **La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón.** Barcelona, Revista Hormigón, AATH, n. 10, p. 25-35, may/ago 1983.

HELENE, P. R. L. **Durabilidade do Concreto versus Agressividade do Meio** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2ª Coletânea de Divisão de Edificações sobre “Tecnologia de Edificações”, São Paulo, 1985.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo, Editora Pini, 1986.

HELENE, P. R. L. **Ensaio para Controle de Adesivos Epóxi Destinados a Estrutura de Concreto** – Tecnologia de Edificações (IPT) – Editora Pini, São Paulo, 1988.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.** São Paulo, Editora Pini, 1992.

HELENE, P. R. L. **Vida Útil das Estruturas de Concreto.** In: COMPAT 97 – IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 1997.

HELENE, P. R. L. e PEREIRA, F. **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón.** São Paulo, Paulo Helene e Fernanda Pereira Editores, 2003.

HIDRODEMOLIÇÃO DE CONCRETO – **Robot322.JPG.** Altura 250 pixels x Largura 206 pixels. Formato JPG. Disponível em: www.conjet.com/products/robot322.htm. Acesso em: 14 out 2005.

HINDO, K. R. **In-Place Bond Testing and Surface Preparation of Concrete,** ACI Concrete International, abril 1990.

HRANILOVIC, M. Failure Criteria for Structural Joints. Proceedings: RILEM International Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete, Chapman and Hall, London, 1986. **Anais.**

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das Construções: Procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações,** 1985, Dissertação de Mestrado, EPUSP.

MAILVAGANAM, N. P. **Effective Use of Bonding Agents** – IRC – Institute for Research in Construction, Construction Technology Update nº11, Canada, 1997.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**, São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1991.

MANO, E. B. e MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**, São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1999.

MAYS, G. **Durability of Concrete Structures: Investigation, Repair, Protection**. London, Spon, 1992.

MBT DEGUSSA. **Manual Técnico**, Edição 2004, São Paulo, 2004.

METHA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo, Editora Pini, 1994.

MILES, D. C. e BRISTON, J. H. **Tecnologia dos Polímeros**, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1975.

MORENO Jr., R. & SELMO S. M. S. **Reparos localizados superficiais em estruturas de concreto – Análise da aderência segundo métodos de ensaios distintos**. In: 43º IBRACON-REIBRAC - Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS – NACE, **Maintenance and Rehabilitation Consideration for Corrosion Control of Existing Steel Reinforced Concrete Structures**. 1990.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo, Editora Pini, 1997.

OTTO BAUMGART / VEDACIT. **Manual Técnico**, Edição nº 40, São Paulo, 2004.

PAULAY, T; PARK, R. and PHILLIPS, M. H. Horizontal Construction Joints in Cast-in-place Reinforced Concrete. ACI – Special Publication SP42-47, Detroit, 1974. **Anais**.

ROBINS, P and AUSTIN, S. **Development of Patch Test to Study Behaviour of Shallow Concrete Patch Repairs**. Magazine of Concrete Research, vol. 45, nº 164, 1993.

ROSEN, S.L. **Fundamental Principles of Polymeric Materials**. New York, J. Wiley, 1993.

SALLES, M. T. e SOUZA, V. C. M. Estudo Experimental da Ligação Concreto Velho/Concreto Novo em Peças Fletidas. In: 33º Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, São Paulo, ago.1989. **Anais**.

SALLES, M. T. e SOUZA, V. C. M. **Ligação Concreto Velho/Concreto Novo em Peças Fletidas: Uma Análise Experimental.** In: XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, UFRGS, Rio Grande do Sul, Brasil, nov. 1991. **Anais.**

SIKA. **Manual Técnico 2005 Sika**, Edição nº 45, Revisão 1, São Paulo, maio 2005.

SILVA, E. F. **Concreto de Alto Desempenho: Estudo de Propriedades Mecânicas**, 1997, 113 f., Dissertação de Mestrado – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

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

TABOR, L.J. **The Evaluation of Resin Systems for Concrete Repairs.** Magazine of Concrete Research, vol. 30, nº 105, 1978.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **EM 1110-2-2002 - Engineering and Design - Evaluation and Repair of Concrete Structures**, Washington, USA, 1995.

VANDERLEI, E. e CLÍMACO, J. C. T. S. **Reparo de Pilares de Concreto Armado com Remoldagem da Seção Transversal.** In: 38º Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, São Paulo, 1996. **Anais.**

WALL, J. S. E SHRIVE, N. G. and GAMBLE, B. R. **Testing of Bond between Fresh and Hardened Concrete.** Proceedings: RILEM International Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete, Chapman and Hall, London, 1986. **Anais.**

WALL, J. S. E SHRIVE, N. G. **Factors Affecting Bond between New and Old Concrete.** ACI Materials Journal, march-april, 1988.

WALTERS, T. A. **Study of the Tensile Strength of Concrete across Constrution Joints.** Magazine of Concrete Research, vol. 6, nº 18, 1954.

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DAS RESINAS À BASE DE EPÓXI

Foram moldados e ensaiados corpos-de-prova à tração e compressão de 3 resinas à base de epóxi, de diferentes fabricantes, com a finalidade de se verificar qual delas apresenta melhor comportamento. Os valores obtidos com estes ensaios determinaram a escolha do epóxi para utilização como ponte de aderência para os prismas compostos testados neste trabalho.

Os adesivos epóxi testados foram:

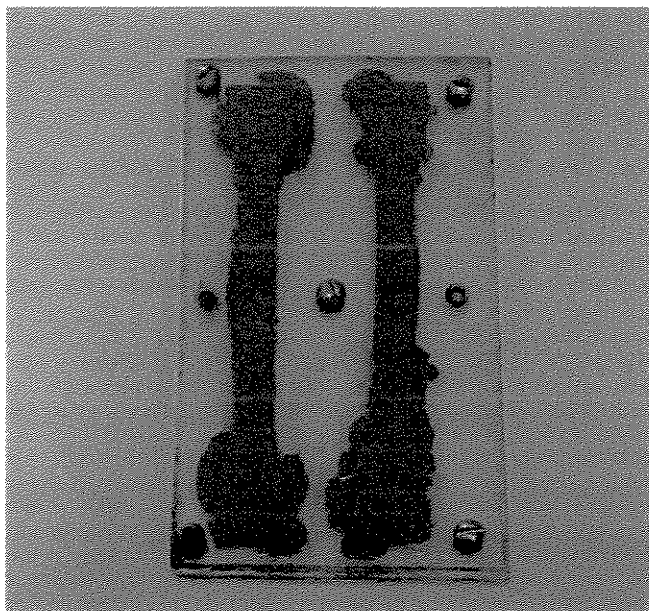
- Nitobond EPMF (Fosroc Reax);
- Compound (Otto Baumgart);
- Sikadur 32 (Sika).

a) Resistência à Tração Direta

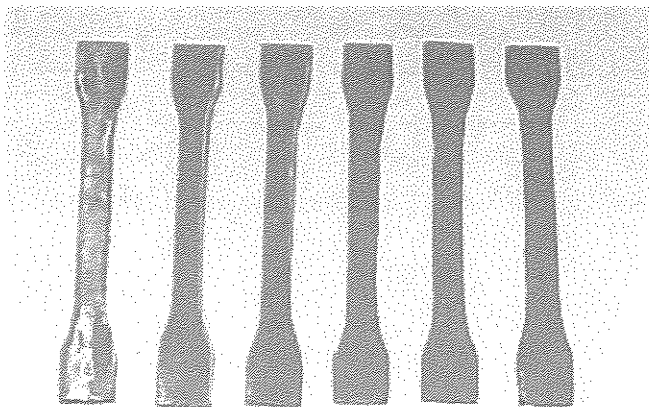
Os ensaios de tração direta foram executados segundo a Norma Americana ASTM D 638M-93, para determinação das propriedades elásticas das resinas à base de epóxi utilizadas neste trabalho. Essa norma prescreve a usinagem dos corpos-de-prova, porém, como o epóxi é um material sensível à temperatura, o processo de usinagem poderia afetar suas reais características, mascarando os resultados obtidos com o ensaio de tração, assim, a confecção dos corpos-de-prova se deu por moldagem com a utilização de formas acrílicas. Foram moldados 6

corpos-de-prova com espessura de 10 mm para cada uma das 3 resinas testadas, totalizando 12 amostras.

As resinas, bi-componentes, sofreram mistura manual com a utilização de uma espátula, até apresentarem cor e consistência homogênea.



Molde em acrílico com a resina epóxi já injetada.



Modelos de corpos-de-prova para o ensaio de tração.

Após a cura de 7 dias (no mínimo) dos corpos-de-prova de epóxi, os mesmos foram submetidos ao ensaio de tração com deformação controlada.



Ensaio de tração e determinação do módulo de elasticidade.



Corpos-de-prova após ensaio de tração.

Os resultados obtidos para cada grupo das 3 resinas são apresentados nas tabelas a seguir.

Corpo-de-Prova	A (mm²)	Tensão (MPa)
Nitobond EPMF 1	44,10	31,98
Nitobond EPMF 2	45,90	31,19
Nitobond EPMF 3	45,50	31,20
Nitobond EPMF 4	44,30	32,75
Nitobond EPMF 5	44,10	31,36
Nitobond EPMF 6	49,00	28,34
MÉDIA	45,48	31,14

Resultados experimentais da resina Nitobond EPMF.

Corpo-de-Prova	A (mm²)	Tensão (MPa)
Compound 1	47,20	31,76
Compound 2	48,30	36,54
Compound 3	46,20	37,08
Compound 4	49,50	30,04
Compound 5	47,20	34,62
Compound 6	45,00	33,15
MÉDIA	47,23	33,87

Resultados experimentais da resina Compound.

Corpo-de-Prova	A (mm²)	Tensão (MPa)
Sikadur 1	47,20	29,99
Sikadur 2	45,80	26,40
Sikadur 3	47,20	23,77
Sikadur 4	49,00	22,24
Sikadur 5	48,70	27,10
Sikadur 6	46,80	27,52
MÉDIA	47,45	26,17

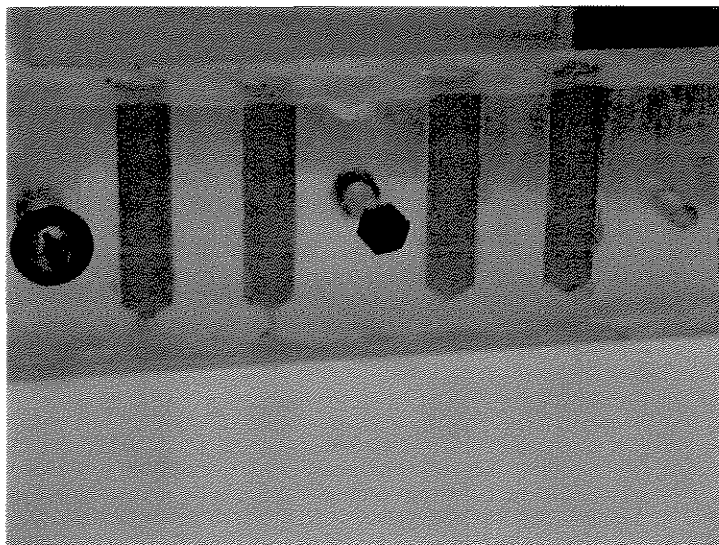
Resultados experimentais da resina Sikadur 32.

b) Resistência à Compressão

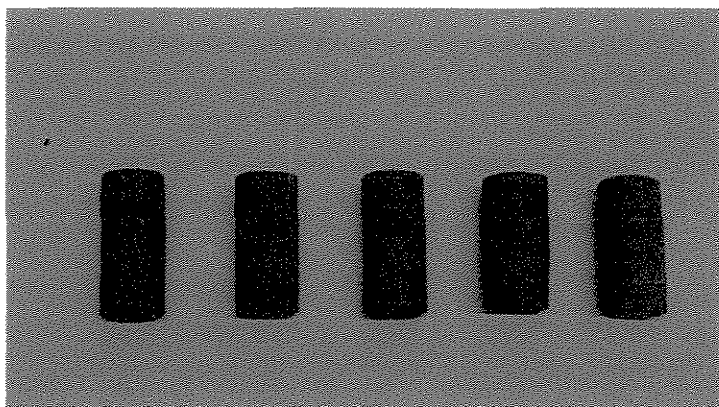
Para determinação da resistência à compressão, a Norma Americana ASTM D 695M-91 prescreve que o corpo-de-prova deve ter altura de 25 mm e diâmetro de 12,5 mm.

Novamente, para este ensaio, as resinas bi-componentes foram misturadas manualmente, com a utilização de uma espátula, até apresentarem cor e consistência homogênea.

Após a mistura, o adesivo à base de epóxi foi despejado na forma com o auxílio de um funil de vidro.



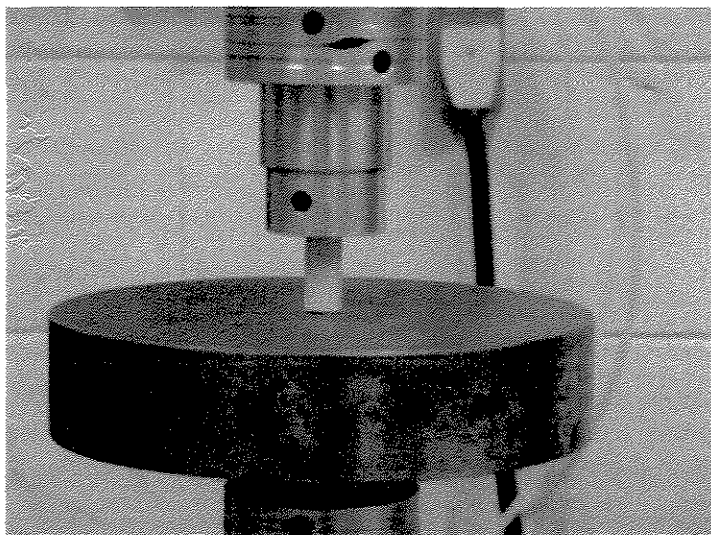
Forma utilizada para moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio de compressão.



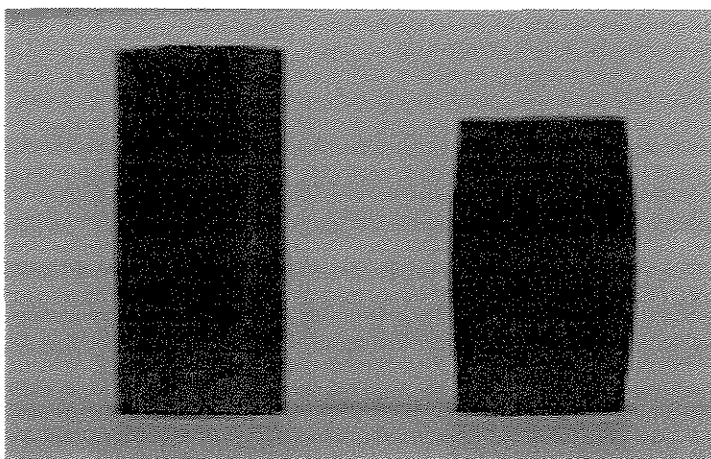
Modelo dos corpos-de-prova para o ensaio de compressão.

Após a cura completa dos corpos-de-prova (mínimo de 7 dias), os mesmos foram ensaiados à compressão em uma prensa do tipo “Controls”, com carregamento constante e deformação controlada.

Foram ensaiados 5 corpos-de-prova com diâmetro de 12,5 mm e altura de 25 mm, de cada uma das 3 resinas à base de epóxi testadas, totalizando 15 amostras.



Ensaio de compressão da resina à base de epóxi.



Modelo de corpo-de-prova antes e depois do ensaio à compressão.

Os resultados dos ensaios das 3 resinas testadas são mostrados na tabela a seguir.

n. CP	Tensão (MPa)		
	Nitobond EPMF	Sikadur 32	Compound
1	57,56	60,51	69,75
2	56,87	-	65,71
3	57,61	65,10	68,29
4	57,31	61,47	69,51
5	54,71	58,76	69,34
Média	56,81	61,46	68,52

c) Escolha do Adesivo à Base de Epóxi

Após os ensaios de tração e compressão dos 3 tipos de resina à base de epóxi, foi escolhida como ponte de aderência para os prismas compostos o adesivo de nome comercial Compound, fabricado pela Otto Baumgart, por ter apresentado os melhores resultados nos ensaios realizados.

ANEXO B

CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS DE ADERÊNCIA DOS SISTEMAS ADESIVOS

As resistências dos sistemas adesivos utilizados no programa experimental foram calculadas por meio do ensaio de compressão dos corpos-de-prova prismáticos, de acordo com a NBR 5739:1994.

Nas tabelas B1 a B5, são mostrados os resultados das resistências de compressão obtidas nos ensaios, sendo apresentados os seguintes itens:

- o ângulo correspondente a cada moldagem;
- a área (em cm²);
- o tipo de ruptura;
- a força de ruptura (em kgf);
- a tensão de ruptura dos prismas (em MPa);
- a tensão média f_{cp} do prismas monolíticos (em MPa);
- a tensão média f_c dos prismas compostos (em MPa);
- a razão f_c/f_{cp} (em %).

Por meio dos ensaios foram obtidas as forças aplicadas nos prismas, permitindo o cálculo das tensões e, por fim calculadas as razões de f_c/f_{cp} . Durante a realização dos ensaios foram anotados os modos de rupturas ocorridos nos corpos-de-prova prismáticos compostos.

B1 - CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS DE CONTROLE (MONOLÍTICOS)

INCL. DA JUNTA	PONTE DE ADERÊNCIA	DIMENSÕES (cm)		ÁREA (cm²)	FORÇA DE RUPTURA (kgf)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA fcp (MPa)
0	monolítico - base	15,00	15,00	225,00	66.600,00	29,60	30,73
0	monolítico - base	14,90	15,00	223,50	65.300,00	29,22	
0	monolítico - base	14,90	15,00	223,50	67.000,00	29,98	
0	monolítico - base	14,90	15,00	223,50	66.200,00	29,62	
0	monolítico - reparo	15,00	15,00	225,00	72.000,00	32,00	30,73
0	monolítico - reparo	15,00	15,10	226,50	70.000,00	30,91	
0	monolítico - reparo	14,90	15,10	224,99	72.800,00	32,36	
0	monolítico - reparo	14,90	14,80	220,52	71.000,00	32,20	

B2 - RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA SEM ADESIVO / SUPERFÍCIE ÚMIDA (SU)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	DIMENSÕES (cm)		ÁREA (cm²)	TIPO DE RUPTURA	FORÇA DE RUPTURA (kgf)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA fc (MPa)	fc/fcp (%)
30°	liso	15,10	15,00	226,50	monolítica	57.500,00	25,39	25,12	82
		15,20	15,20	231,04	monolítica	57.400,00	24,84		
		15,10	15,00	226,50	monolítica	57.000,00	25,17		
		15,20	15,00	228,00	monolítica	57.200,00	25,09		
30°	rugoso	15,10	15,20	229,52	monolítica	61.500,00	26,80	26,02	85
		15,50	15,30	237,15	monolítica	58.000,00	24,46		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	58.100,00	25,82		
		15,00	14,90	223,50	monolítica	60.400,00	27,02		
45°	liso	15,00	15,00	225,00	monolítica	62.000,00	27,56	26,87	87
		14,90	15,00	223,50	mista	58.300,00	26,09		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	63.000,00	28,00		
		15,00	15,00	225,00	mista	58.100,00	25,82		
45°	rugoso	15,00	15,00	225,00	monolítica	64.100,00	28,49	27,83	91
		14,90	15,00	223,50	monolítica	62.300,00	27,87		
		14,80	15,00	222,00	monolítica	59.400,00	26,76		
		15,20	15,00	228,00	monolítica	64.300,00	28,20		
60°	liso	15,00	14,90	223,50	na junta	33.000,00	14,77	17,05	55
		15,00	15,20	228,00	na junta	43.500,00	19,08		
		14,80	15,10	223,48	na junta	36.000,00	16,11		
		14,80	15,00	222,00	na junta	40.500,00	18,24		
60°	rugoso	15,10	15,00	226,50	na junta	54.200,00	23,93	23,87	78
		15,00	14,90	223,50	na junta	56.800,00	25,41		
		15,10	14,90	224,99	na junta	52.500,00	23,33		
		15,30	14,80	226,44	na junta	51.600,00	22,79		

B3 - RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA SEM ADESIVO / SUPERFÍCIE SECA (SS)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	DIMENSÕES (cm)		ÁREA (cm²)	TIPO DE RUPTURA	FORÇA DE RUPTURA (kgf)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA fc (MPa)	fc/fcp (%)
30°	liso	15,00	15,00	225,00	monolítica	59.000,00	26,22	25,91	84
		15,20	15,10	229,52	monolítica	59.300,00	25,84		
		15,20	15,00	228,00	monolítica	58.200,00	25,53		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	58.600,00	26,04		
30°	rugoso	15,10	15,10	228,01	monolítica	63.500,00	27,85	27,62	90
		15,00	15,20	228,00	monolítica	63.000,00	27,63		
		15,20	15,00	228,00	monolítica	61.800,00	27,11		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	62.800,00	27,91		
45°	liso	15,10	15,00	226,50	monolítica	64.200,00	28,34	27,43	89
		14,90	15,00	223,50	monolítica	61.400,00	27,47		
		14,90	15,00	223,50	monolítica	61.800,00	27,65		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	59.100,00	26,27		
45°	rugoso	15,00	15,00	225,00	monolítica	64.100,00	28,49	28,34	92
		15,00	15,00	225,00	monolítica	63.900,00	28,40		
		15,10	15,00	226,50	monolítica	63.500,00	28,04		
		15,20	15,00	228,00	monolítica	64.800,00	28,42		
60°	liso	15,00	15,00	225,00	na junta	43.000,00	19,11	19,22	63
		15,00	15,00	225,00	na junta	43.500,00	19,33		
		15,00	15,10	226,50	mista	46.000,00	20,31		
		14,90	15,00	223,50	na junta	40.500,00	18,12		
60°	rugoso	15,10	15,00	226,50	mista	63.200,00	27,90	27,73	90
		15,00	15,00	225,00	na junta	61.800,00	27,47		
		15,10	15,00	226,50	na junta	62.200,00	27,46		
		15,10	14,90	224,99	mista	63.200,00	28,09		

B4 - RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DO ADESIVO À BASE DE RESINA ACRÍLICA (A)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	DIMENSÕES (cm)		ÁREA (cm²)	TIPO DE RUPTURA	FORÇA DE RUPTURA (kgf)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA fc (MPa)	fc/fcp (%)
30°	liso	15,00	15,10	226,50	monolítica	55.500,00	24,50	24,65	80
		15,00	15,00	225,00	monolítica	55.300,00	24,58		
		14,80	15,00	222,00	monolítica	55.000,00	24,77		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	55.700,00	24,76		
30°	rugoso	15,00	15,20	228,00	monolítica	57.600,00	25,26	25,24	82
		15,20	15,00	228,00	monolítica	57.000,00	25,00		
		15,10	14,90	224,99	monolítica	57.400,00	25,51		
		15,00	15,10	226,50	monolítica	57.000,00	25,17		
45°	liso	15,10	15,00	226,50	na junta	53.800,00	23,75	24,81	81
		15,10	15,00	226,50	na junta	55.200,00	24,37		
		14,90	14,90	222,01	na junta	57.200,00	25,76		
		15,00	15,00	225,00	na junta	57.000,00	25,33		
45°	rugoso	15,00	15,00	225,00	monolítica	53.500,00	23,78	26,96	88
		15,00	15,20	228,00	monolítica	62.000,00	27,19		
		14,90	14,90	222,01	monolítica	68.200,00	30,72		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	58.800,00	26,13		
60°	liso	15,10	15,00	226,50	na junta	40.000,00	17,66	15,77	51
		14,90	15,00	223,50	na junta	35.500,00	15,88		
		14,90	15,00	223,50	na junta	32.000,00	14,32		
		15,00	15,00	225,00	na junta	34.200,00	15,20		
60°	rugoso	15,00	15,00	225,00	na junta	47.000,00	20,89	22,25	72
		15,00	15,10	226,50	na junta	48.000,00	21,19		
		15,00	15,00	225,00	na junta	50.400,00	22,40		
		14,90	15,00	223,50	na junta	54.800,00	24,52		

B5 - RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DO ADESIVO À BASE DE EPÓXI (E)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	DIMENSÕES (cm)		ÁREA (cm²)	TIPO DE RUPTURA	FORÇA DE RUPTURA (kgf)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA fc (MPa)	fc/fcp (%)
30°	liso	15,20	15,00	228,00	monolítica	63.000,00	27,63	27,84	91
		15,10	15,20	229,52	monolítica	63.500,00	27,67		
		15,00	15,10	226,50	monolítica	63.300,00	27,95		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	63.300,00	28,13		
30°	rugoso	15,00	15,10	226,50	monolítica	67.000,00	29,58	29,75	97
		15,00	15,00	225,00	monolítica	68.200,00	30,31		
		15,10	15,00	226,50	monolítica	67.300,00	29,71		
		15,00	15,20	228,00	monolítica	67.000,00	29,39		
45°	liso	15,10	15,00	226,50	monolítica	69.000,00	30,46	29,48	96
		14,80	15,00	222,00	monolítica	64.400,00	29,01		
		14,90	15,00	223,50	monolítica	65.500,00	29,31		
		14,90	15,00	223,50	monolítica	65.100,00	29,13		
45°	rugoso	14,90	15,00	223,50	monolítica	71.600,00	32,04	31,96	104
		14,90	15,00	223,50	monolítica	70.000,00	31,32		
		15,30	15,00	229,50	monolítica	74.200,00	32,33		
		15,00	15,00	225,00	monolítica	72.300,00	32,13		
60°	liso	15,00	15,20	228,00	monolítica	65.800,00	28,86	27,82	91
		15,10	15,00	226,50	monolítica	60.100,00	26,53		
		15,10	15,00	226,50	monolítica	62.200,00	27,46		
		15,30	15,10	231,03	monolítica	65.700,00	28,44		
60°	rugoso	15,10	15,00	226,50	monolítica	67.800,00	29,93	29,14	95
		15,00	15,00	225,00	monolítica	65.200,00	28,98		
		15,00	14,90	223,50	monolítica	62.300,00	27,87		
		14,90	14,80	220,52	monolítica	65.700,00	29,79		

ANEXO C

CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS ADESIVOS EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB MODIFICADO

Os resultados das tensões de compressão e de cisalhamento dos sistemas adesivos foram usadas para a avaliação segundo um Critério de Mohr-Coulomb Modificado, apresentado no Capítulo 3, para os prismas compostos com ângulo da junta de 60°, por ser este o ângulo considerado como crítico por muitos pesquisadores e normas.

Para esta análise, foram utilizados os seguintes dados obtidos no programa experimental:

c – coesão aparente;

μ - coeficiente de atrito na interface;

f_{cc} – resistência média à compressão dos cilindros monolíticos do concreto base e reparo, com conversão, por meio da proposta de Carrasquillo (1981), de 10 cm x 20 cm para 15 cm x 30 cm.

Conforme item 3.3.2, as tensões normal e cisalhante são calculadas por:

$$\sigma = f_c \cos^2 \alpha$$

$$\tau = f_c \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha$$

Dados preliminares:

$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$

$c = 0,5 \text{ MPa}$

$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$

$\mu = 0,7 \text{ (interface lisa)}$

C1 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS SEM ADESIVO / SUPERFÍCIE LISA E ÚMIDA (LSU)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma / f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau / f_{cc}^{2/3}$
60°	liso	na junta	14,77	17,05	3,69	0,39	6,35	0,67
		na junta	19,08		4,77	0,50	8,20	0,86
		na junta	16,11		4,03	0,42	6,93	0,73
		na junta	18,24		4,56	0,48	7,84	0,82

Dados preliminares:

$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$

$c = 0,25. f_{cc}^{2/3} = 0,25.(29,50)^{2/3} = 2,38 \text{ MPa}$

$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$

$\mu = 1,4 \text{ (interface rugosa)}$

C2 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS SEM ADESIVO / SUPERFÍCIE RUGOSA E ÚMIDA (RSU)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma / f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau / f_{cc}^{2/3}$
60°	rugoso	na junta	23,93	23,87	5,98	0,63	10,29	1,08
		na junta	25,41		6,35	0,67	10,93	1,14
		na junta	23,33		5,83	0,61	10,03	1,05
		na junta	22,79		5,70	0,60	9,80	1,03

Dados preliminares:

$$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$$

$$c = 0,5 \text{ MPa}$$

$$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,7 \text{ (interface lisa)}$$

C3 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS SEM ADESIVO / SUPERFÍCIE LISA E SECA (LSS)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma / f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau / f_{cc}^{2/3}$
60°	liso	na junta	19,11	19,22	4,78	0,50	8,22	0,86
		na junta	19,33		4,83	0,51	8,31	0,87
		mista	20,31		5,08	0,53	8,73	0,91
		na junta	18,12		4,53	0,47	7,79	0,82

Dados preliminares:

$$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$$

$$c = 0,25 \cdot f_{cc}^{2/3} = 0,25 \cdot (29,50)^{2/3} = 2,38 \text{ MPa}$$

$$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$$

$$\mu = 1,4 \text{ (interface rugosa)}$$

C4 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS SEM ADESIVO / SUPERFÍCIE RUGOSA E SECA (RSS)

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma / f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau / f_{cc}^{2/3}$
60°	rugoso	mista	27,90	27,73	6,98	0,73	12,00	1,26
		na junta	27,47		6,87	0,72	11,81	1,24
		na junta	27,46		6,87	0,72	11,81	1,24
		mista	28,09		7,02	0,74	12,08	1,26

Dados preliminares:

$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$

$c = 0,5 \text{ MPa}$

$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$

$\mu = 0,7 \text{ (interface lisa)}$

**C5 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS COM ADESIVO
À BASE DE RESINA ACRÍLICA SOBRE SUPERFÍCIE LISA (LA)**

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma / f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau / f_{cc}^{2/3}$
60°	liso	na junta	17,66	15,77	4,42	0,46	7,59	0,80
		na junta	15,88		3,97	0,42	6,83	0,72
		na junta	14,32		3,58	0,37	6,16	0,64
		na junta	15,20		3,80	0,40	6,54	0,68

Dados preliminares:

$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$

$c = 0,25. f_{cc}^{2/3} = 0,25.(29,50)^{2/3} = 2,38 \text{ MPa}$

$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$

$\mu = 1,4 \text{ (interface rugosa)}$

**C6 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS COM ADESIVO
À BASE DE RESINA ACRÍLICA SOBRE SUPERFÍCIE RUGOSA (RA)**

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma / f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau / f_{cc}^{2/3}$
60°	rugoso	na junta	20,89	22,25	5,22	0,55	8,98	0,94
		na junta	21,19		5,30	0,55	9,11	0,95
		na junta	22,40		5,60	0,59	9,63	1,01
		na junta	24,52		6,13	0,64	10,54	1,10

Dados preliminares:

$$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$$

$$c = 0,5 \text{ MPa}$$

$$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,7 \text{ (interface lisa)}$$

**C7 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS COM ADESIVO
À BASE DE EPÓXI SOBRE SUPERFÍCIE LISA (LE)**

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma /$ $f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau /$ $f_{cc}^{2/3}$
60°	liso	monolítica	28,86	27,82	7,22	0,76	12,41	1,30
		monolítica	26,53		6,63	0,69	11,41	1,19
		monolítica	27,46		6,87	0,72	11,81	1,24
		monolítica	28,44		7,11	0,74	12,23	1,28

Dados preliminares:

$$f_{cc} = 29,50 \text{ MPa}$$

$$c = 0,25. f_{cc}^{2/3} = 0,25.(29,50)^{2/3} = 2,38 \text{ MPa}$$

$$f_{cc}^{2/3} = 9,55 \text{ MPa}$$

$$\mu = 1,4 \text{ (interface rugosa)}$$

**C8 - TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO DOS SISTEMAS COM ADESIVO
À BASE DE EPÓXI SOBRE SUPERFÍCIE RUGOSA (RE)**

INCL. DA JUNTA	SUBSTRATO	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA f_c (MPa)	σ	$\sigma /$ $f_{cc}^{2/3}$	τ	$\tau /$ $f_{cc}^{2/3}$
60°	rugoso	monolítica	29,94	29,15	7,49	0,78	12,87	1,35
		monolítica	28,98		7,25	0,76	12,46	1,30
		monolítica	27,88		6,97	0,73	11,99	1,26
		monolítica	29,79		7,45	0,78	12,81	1,34