

ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE CONCRETOS DE DIFERENTES
IDADES

LEANDRO ABI-SAMARA SANTANA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES

MARÇO - 2004

ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE CONCRETOS DE DIFERENTES IDADES

LEANDRO ABI-SAMARA SANTANA

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Jean Marie Désir

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO - 2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**
10/2005

Santana, Leandro Abi-Samara

Estudo da aderência entre concretos de diferentes idades /
Leandro Abi-Samara Santana. – Campos dos Goytacazes, 2004.
viii, 92 f. : il.

Orientador: Jean Marie Désir

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia
Civil. Campos dos Goytacazes, 2004.

Área de concentração: Estruturas

Bibliografia: f. 81-90

1. Aderência 2. Concreto 3. Resistência 4. Reforço 5.

ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE CONCRETOS DE DIFERENTES IDADES

LEANDRO ABI-SAMARA SANTANA

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 03 de março de 2004.

Comissão Examinadora

Prof. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares (D. Sc.) - UERJ

Prof. Dylmar Penteado Dias (D. Sc.) - UENF

Prof. Sergio Luis González Garcia (D. Sc.) - UENF

Prof. Jean Marie Désir (D. Sc.) – UENF

Orientador

DEDICATÓRIA

À Carla, Marina e Matheus,
Letícia e Veran,
Auta e Estéfanos.

“A maior descoberta de nossa geração é que o Ser Humano,
mudando as atitudes internas em sua mente,
pode mudar os aspectos externos de sua vida”.

Willian James

AGRADECIMENTOS

Um trabalho experimental é fruto de um esforço coletivo. Desta forma muitos contribuíram de maneira direta e indiretamente para a concretização deste.

Agradeço a Deus, Fonte Suprema de energia e amor.

Aos meus pais Letícia e Veran pelo amor, educação, incentivo e possibilidade de realizar este sonho. Aos meus avós Auta e Estéfanos pelo exemplo de vida, amor e carinho herdados.

Aos meus amores Carla, Marina e Matheus, pelo sacrifício e tolerância destes anos.

Aos amigos Márcia e Uiracy pelo incentivo, idéias e ajuda.

Aos amigos de Laboratório pela amizade, ajuda e convívio sadio. Em especial aos amigos Schwan, Gabriel, Willisses, Aline, Bruno, Elaine, Gustavo, Vitor, Leonardo, Mário, Marcos, Enio, Milton, André, Maikkon e Renzo.

Aos professores Dylmar, Jonas, Tibana e Saboya pelas idéias, ajudas e cobranças.

Ao professor Jean Marie pela amizade, orientação e paciência.

Aos funcionários da Secretária do LECIV, em especial Flávia e Nilza.

Aos anônimos que deram sua contribuição.

À FAPERJ pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabelas.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
1) Introdução.....	1
1.1) Histórico da recuperação estrutural.....	1
1.2) Motivação e objetivo da tese.....	5
1.3) Organização da dissertação.....	6
2) Revisão bibliográfica.....	8
2.1) Estudo da aderência.....	8
2.1.1) Aderência aço-concreto.....	8
2.1.2) Aderência concreto-concreto.....	9
2.1.3) Aderência fibra de carbono-concreto.....	21
2.2) Técnicas de reparos.....	22
2.2.1) Materiais e técnicas empregados nas intervenções.....	23
2.2.1.1) Materiais.....	23
2.2.1.2) Técnicas de reforço e/ou recuperação.....	24
2.3) Determinação das variáveis de projeto.....	30
2.3.1) Definição das variáveis.....	30
2.3.1.1) Preparação da superfície.....	30
2.3.1.2) Resistência do concreto.....	36
2.3.1.2.1) Resistência à compressão.....	38
2.3.1.2.2) Resistência à tração.....	39
2.3.1.2.3) Módulo de elasticidade.....	42
2.3.2) Métodos para avaliação da aderência.....	43
2.3.2.1) Resistência de aderência à tração direta.....	44
2.3.2.2) Resistência de aderência à tração na flexão	44
2.3.2.3) Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão.....	45

2.3.2.4) Resistência de aderência ao cisalhamento direto.....	46
2.3.2.5) Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão.....	46
3) Programa experimental.....	50
3.1) Materiais.....	50
3.1.1) Agregado miúdo.....	50
3.1.2) Agregado graúdo.....	51
3.1.3) Cimento.....	52
3.1.4) Concreto.....	52
3.2) Confeccões das fôrmas e moldagem das vigas.....	54
3.3) Descrição das vigas.....	57
3.3.1) Carregamento e esforços solicitantes.....	57
3.3.2) Esforços resistentes.....	57
3.4) Instrumentação.....	58
3.4.1) Tensotast.....	58
3.4.2) Extensômetro mecânico.....	60
3.5) Montagem e procedimento do ensaio.....	60
3.5.1) Montagem.....	60
3.5.2) Procedimento do ensaio.....	61
4) Resultados e discussões.....	68
4.1) Influência do tipo de tratamento na deformada da Viga.....	68
4.2) Relação carga de ruptura na flexão versus tipo de tratamento para as diferentes resistências.....	71
4.3) Deslocamento relativo na superfície de reparo.....	72
4.4) Influência do tipo de tratamento no reparo da viga.....	76
5) Considerações finais.....	78
5.1) Conclusões.....	78
5.2) Sugestões para trabalhos futuros.....	79

Bibliografia.....81

Anexo A – Cálculo de dosagem dos concretos.....91

LISTA DE FIGURAS

2.1 – “Consoles de concreto” (EMMONS & VAYSBURD, 1996).....	10
2.2 – Variação da fração de resistência de contato versus número de ciclos (CAO & CHUNG, 2001).....	15
2.3 – Diagramas tensão-deformação com diferentes aderências (CARRAZEDO, 2002).....	18
2.4 – Configurações do ensaio de resistência de aderência à tração direta. Desenho sem escala. Dimensões em mm.....	44
2.5 – Configurações do ensaio de resistência de aderência à tração na flexão. Desenho sem escala. Dimensões em mm.....	45
2.6 – Configuração prismática do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão. Desenho sem escala. Dimensões em mm..	46
2.7 – Configuração do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto. Desenho sem escala. Dimensões em mm.....	46
2.8 – Configuração do corpo de prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (NF P 18-851, 1986). Desenho sem escala. Dimensões em mm	47
2.9 – Configuração do corpo de prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão e à compressão (ROBINS & AUSTIN, 1995). Desenho sem escala. Dimensões em mm.....	47
2.10 – Ensaio de compressão-cisalhamento (CLIMACO, 1990).....	48
2.11 – Ensaio Sanduíche (CHEN <i>et al.</i> , 1995).....	49
3.1 – Curva granulométrica.....	52
3.2 – Concretagem dos corpos de prova cilíndricos.....	54
3.3 – Confeção das fôrmas.....	55
3.4 – Concretagem dos corpos de prova prismáticos.....	55
3.5 – Vigas posicionadas no tanque de cura.....	56
3.6 – Posicionamento dos pontos de medição das deformações (1 ao 6).....	59
3.7 – Tensotast e seus gabaritos.....	59
3.8 – Posicionamento do extensômetro mecânico.....	60
3.9 – Fluxograma da metodologia dos ensaios.....	61
3.10 – Caracterização do agregado graúdo.....	62
3.11 – Fôrmas com os moldes de isopor.....	63

3.12 – Tipos de tratamento superficial: esarificada versus natural.....	64
3.13 – Posicionamento da instrumentação.....	66
3.14 – Ensaio mecânico de compressão uniaxial para os corpos de prova cilíndricos.....	66
3.15 – Ensaio mecânico de compressão diametral para os corpos de prova cilíndricos.....	67
3.16 – Ensaio mecânico de tração na flexão para os corpos de prova prismáticos.....	67
3.17 – Coleta de dados para os corpos de prova prismáticos.....	67
4.1 – Flechas para f_{ck} 18 MPa.....	69
4.2 – Flechas para f_{ck} 25 MPa.....	70
4.3 – Flechas para f_{ck} 32 MPa.....	70
4.4 – Variação da resistência à tração na flexão em função da variação do f_{ck}	71
4.5 – Diagrama carga x deformação para a viga CN 18 nos pontos 5 e 6.....	73
4.6 – Diagrama carga x deformação para a viga CE 18 nos pontos 5 e 6.....	73
4.7 – Diagrama carga x deformação para a viga CN 25 nos pontos 5 e 6.....	74
4.8 – Diagrama carga x deformação para a viga CE 25 nos pontos 5 e 6.....	74
4.9 – Diagrama carga x deformação para a viga CN 32 nos pontos 5 e 6.....	75
4.10 – Diagrama carga x deformação para a viga CE 32 nos pontos 5 e 6.....	75
4.11 – Deformação experimental das vigas 18-32 CN.....	76
4.12 – Deformação experimental das vigas 18-32 CE.....	77

LISTA DE TABELAS

2.1 – Procedimentos de preparo do substrato (HELENE, 1992).....	32
2.2 – Procedimentos de limpeza do substrato (HELENE, 1992).....	33
2.3 – Equações para obtenção do módulo de elasticidade (MPa) (FREITAS <i>et al.</i> , 2000).....	43
3.1 – Propriedades físicas da areia.....	51
3.2 – Propriedades físicas da brita 1.....	51
3.3 – Propriedades físicas da brita 0.....	51
3.4 – Propriedades físicas do cimento.....	52
3.5 – Composição do concreto das vigas de referência e do substrato.....	53
3.6 – Composição dos concretos de reparo.....	53
3.7 – Valores médios dos ensaios de compressão diametral e uniaxial.....	56
3.8 – Tipos de reparos e tratamento superficial.....	65
4.1 – Desvio padrão e coeficiente de variação da resistência à tração na flexão.....	72

RESUMO

A Engenharia Civil está passando por uma etapa de renovação. Hoje se preocupa mais com o comportamento mecânico do que com o estrutural. Muitas obras estão apresentando as consequências dessa omissão. Neste sentido faz-se necessário o conhecimento de problemas patológicos e possíveis formas de intervenção, seja para definir um projeto de recuperação ou de reforço.

Este trabalho procura avaliar a propriedade de aderência entre os concretos de idades diferentes no comportamento de vigas de concreto recuperadas e/ou reforçadas.

É apresentado um estudo experimental sobre o comportamento de vigas reparadas de concreto não armadas, variando-se a resistência do concreto de reparo e o tipo de superfície de contato entre o substrato e o novo material; foram empregados, nesse estudo, concretos de três classes de resistência característica (18, 25 e 32 MPa). Realizou-se o ensaio de flexão a quatro pontos para cada classe de resistência do concreto combinada com cada tipo de tratamento de superfície.

Efetou-se uma análise estatística dos resultados experimentais procurando identificar a influência dos dois parâmetros que afetam a propriedade de aderência concreto-concreto. Os resultados obtidos comprovaram a influência do tipo de superfície de tratamento e a resistência do material de reparo sobre a aderência.

ABSTRACT

Civil Engineering is improving its old point-of-view where it was given more attention to the mechanical behavior of the concrete than to its structural behaviour. Many buildings nowadays present the consequences of this old thought and it is necessary to understand all the problems that came from there to define the best way to either recovery or reinforce the concrete.

On this study it was evaluated the bond properties between different ages of concrete at concrete beams that were reinforced and recovery.

It was also evaluated the behaviour of the non-reinforced concrete where it was changed the concrete's resistance as well as the type of the surfaces between the old materials and the new ones. The concrete beams belonged to three concrete's specific resistance (18, 25 e 32 MPa) and the four point bending test was applied combined to different types of surface's treatment.

The experimental results confirm that either the changes on the treatment of the concrete's surface or the changes on the concrete's resistance does interfere with the concrete's bond properties.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Histórico da recuperação estrutural

Segundo RIPPER & SOUZA (1998), desde os primórdios da civilização o homem tem se preocupado com a construção de estruturas adaptadas às suas necessidades, sejam elas habitacionais (casas e edifícios), laborais (escritórios, indústrias, silos, galpões etc.), ou de infra-estrutura (barragens, pontes, metrô etc.). Com isto, a humanidade acumulou um grande acervo científico ao longo do tempo, permitindo o desenvolvimento da tecnologia da construção, abrangendo a concepção, o cálculo, a análise e o detalhamento das estruturas, bem como a tecnologia de materiais e as respectivas técnicas construtivas.

O concreto de cimento Portland tem provado ser um dos materiais de construção mais empregados e adequados para estruturas. De acordo com a concepção econômico-social do nosso país, uma porcentagem significativa das obras utiliza o concreto armado como material estrutural ou empregam o concreto como material não estrutural.

A Engenharia Civil tem sofrido uma grande mudança em termos do emprego de novos materiais, de técnicas construtivas (inclui-se a modernização de máquinas e equipamentos), métodos de projetos e também da concepção de preservação e durabilidade da obra executada.

HELENE (1992) relata que embora o concreto possa ser considerado um material bastante durável (desde que receba manutenção sistemática e programada), há construções que apresentam manifestações patológicas em intensidade e incidência significativas, acarretando elevados custos para sua correção, podendo haver comprometimento dos aspectos estéticos e na maioria das vezes, redução da capacidade resistente, chegando, em certas situações, ao colapso parcial ou total da estrutura.

SITTER (1984) formulou uma lei de custos dividindo as etapas construtivas e de uso em quatro períodos, correspondente ao projeto, à execução propriamente dita, à

manutenção preventiva efetuada antes dos primeiros três anos e à manutenção corretiva efetuada após surgimento de problemas; atribuindo a cada um o custo de uma progressão geométrica de razão cinco. Assim sendo, a atividade envolvida na manutenção corretiva pode associar um custo 125 vezes superior ao custo das medidas que poderiam ter sido tomadas em projeto e que implicariam num mesmo “grau” de proteção e durabilidade, estimada da obra a partir da correção. FAGURY & LIBÓRIO (2002) citaram que o custo direto da recuperação estrutural quando a obra está em uso pode alcançar o valor de até cento e cinquenta dólares para cada dólar envolvido na fabricação correta do elemento estrutural. Indiretamente esse custo poderá ser maior se considerados os transtornos proporcionados aos usuários da construção, os lucros cessantes, etc.

No entanto, segundo CLÍMACO & NEPOMUCENO (1994), apesar de ser crescente o reconhecimento da importância da manutenção estrutural, são ainda insuficientes, mesmo nos países desenvolvidos, as disposições normativas específicas para tal atividade. Neste sentido foi elaborada em 1987, a Norma Europeia EN 1504, que trata da proteção e reparo de estruturas de concreto. De acordo com KAY & WYATT (1997), o Comitê Técnico da CEN (Comitê Europeu de Normalização) formado para a realização da EN 1504, identificou seis grupos principais relativos a produtos e sistemas de reparo. São eles:

- 1) Sistemas de proteção de superfícies;
- 2) Argamassas e concretos para reparos estruturais e não-estruturais;
- 3) Aderência estrutural;
- 4) Injeção para concreto;
- 5) Graute para ancoragem de armaduras e para preenchimento de vazios externos;
- 6) Prevenção à corrosão das armaduras.

SABBATINI (1997) definiu que um problema patológico pode ser entendido como uma situação em que a estrutura analisada ou parte desta, num determinado instante da sua vida útil, não apresenta desempenho previsto em projeto.

O problema é identificado, de modo geral, a partir das manifestações ou sintomas patológicos que se traduzem por modificações estruturais e/ou funcionais na parte afetada, representando sinais de aviso dos defeitos surgidos.

LICHTENSTEIN (1985) comentou que as manifestações, uma vez conhecidas e corretamente interpretadas, podem conduzir ao entendimento do problema, possibilitando a sua resolução a partir de uma intervenção, cujo nível estará vinculado, principalmente, à relação entre o desempenho estabelecido para a estrutura e o desempenho constatado.

De acordo com TEIXEIRA JR. (1994), no passado, se por acaso a estrutura apresentasse sinais de deterioração ou diminuição da sua capacidade resistente, devido aos aspectos relacionados com a capacidade técnica e também com o pouco desenvolvimento de materiais eficientes que permitissem a recuperação e/ou reforço da estrutura de forma econômica, era freqüente demolir a obra e construir uma outra com as características desejadas.

MORGAN (1996) citou em sua pesquisa que muito do trabalho de reparo do concreto empregado na primeira metade do século passado era relativamente simples do ponto de vista de engenharia de materiais e que, primeiramente, envolvia a substituição do dano ou concreto deteriorado por cimento Portland convencional, concretos, argamassas, grautes ou gunita (argamassas injetadas). No entanto, a partir dos anos 60, um excesso de novos materiais e sistemas de reparo de concreto foram introduzidos e acharam uma crescente utilização. Esta extensão resultou em polímeros puros como resina epóxi, poliésteres e alguns sistemas de base poliuretana.

Em função da idade da estrutura, muitas estruturas de concreto vêm chegando ao fim de sua utilização estipulada em projeto. Assim a manutenção e o reparo tornaram-se uma importante parte do projeto e da indústria da construção.

CLÍMACO (1975) ressaltou que o projeto de um reparo estrutural durável e efetivo deve selecionar uma técnica adequada a cada trabalho específico e, além disso, permitir a avaliação de seu desempenho por meio de testes.

De acordo com GARCIA & CLÍMACO (2001) o reparo em estruturas de concreto é, em geral, uma tarefa complexa, devido à necessidade de uma precisa avaliação das condições estruturais, da identificação das fontes causadoras dos danos e/ou degradação dos materiais, do grau de conhecimento necessário para o projeto e especificações do reparo e de muitas operações que, usualmente, envolvem técnicas e materiais especializados, muitas vezes empregados em circunstâncias desfavoráveis.

Em geral, a escolha entre recuperar ou reconstruir uma estrutura de concreto está relacionada com os fatores sócio-econômicos da região. Atualmente, dependendo da extensão do dano, é comum decidir-se pela recuperação e/ou reforço da estrutura devido às seguintes razões:

- 1) Capacitação técnica de alguns profissionais;
- 2) Valor histórico da estrutura;
- 3) Custos elevados da demolição e reconstrução da estrutura;

- 4) Disponibilidade de novos materiais e equipamentos que possibilitam e facilitam a execução da recuperação e/ou reforço;
- 5) Pesquisas realizadas garantindo a eficiência de algumas técnicas empregadas.

A integridade estética, as dimensões dos elementos estruturais, a concentração de tensões na interface entre o elemento de recuperação e a estrutura antiga e a facilidade e rapidez na execução do reparo são alguns exemplos de condicionantes na escolha da técnica de recuperação a ser empregada em uma estrutura de concreto armado. Entretanto, a combinação entre origem do dano, sua localização e o tipo de estrutura pode levar a muitas opções de intervenções para a recuperação do defeito ou dano.

Com a viabilidade econômica da recuperação de estruturas danificadas, recorre-se a empresas ou profissionais do ramo, que ao recuperarem uma estrutura, tendem para soluções mais conservadoras e menos econômicas devido à falta de dados experimentais que comprovem o funcionamento das várias opções de intervenção.

Ainda não há uma norma para se dimensionar com economia e segurança a recuperação de uma estrutura e muito menos quantificar a capacidade resistente da estrutura recuperada que está diretamente relacionada com a qualidade de aderência proporcionada entre o material pré-existente e o material de reparo/reforço.

Este trabalho tem por finalidade contribuir para o melhor conhecimento desta importante propriedade que é a aderência entre os diferentes materiais e analisar a influência do tipo de superfície de contato e a variação da resistência do concreto empregado como reparo sobre esta propriedade.

1.2 Motivação e objetivo da tese

GARCIA & CLÍMACO (2001) estudaram vários produtos comercializados como “agentes adesivos” na indústria da construção civil, os quais são utilizados na execução de reparos e reforços de estruturas e, muitas vezes, quando de sua utilização, constatam-se desempenhos pouco satisfatórios. Parte considerável desses materiais são lançados no mercado sem o devido conhecimento de suas propriedades químicas e mecânicas e sem mencionar os testes realizados para avaliação de aderência, sobre a qual sequer existe um método de ensaio padrão aceito internacionalmente.

FAGURY & LIBÓRIO (2002) comentaram que um dos problemas relacionados à tecnologia dos concretos estruturais consiste na interação entre concretos com cimento Portland executados em diferentes idades e com diferentes

composições e resistências. A interação pode ser causada desde a necessidade de um reforço/recuperação de uma peça estrutural ou parte desta quando afetada por alguma patologia associada à deterioração do concreto e/ou armadura, até a retomada de uma concretagem durante a execução de uma estrutura ou sua continuidade depois de determinado tempo, por suspensão temporária das atividades. CLÍMACO (1989) ressalta que reparos de concretos que envolvam a adição de um novo material a um antigo, para que se restaure o caráter monolítico da estrutura, é necessário que a interface entre os materiais seja capaz de transmitir significativas tensões quando a peça for solicitada.

FAGURY & LIBÓRIO (2002) destacaram que este tipo de problema de aderência pode ser agravado quando o planejamento de retomada da concretagem não é bem executado, pois pode-se ter a deposição de outras substâncias prejudiciais na superfície, como por exemplo óleos, dificultando o tratamento.

GARCIA (1999) observou que muitas vezes existem deficiências de cura, ocorrência de carbonatação, segregações dos materiais, concentração de pasta de cimento Portland excessivamente porosa, ocasionada pela elevada relação água/cimento quando da execução da etapa antecedente, causada pelo fenômeno da exsudação.

Essas ocorrências interferem na continuidade da execução da estrutura, caso tratamentos adequados nas regiões de sua continuidade não sejam executadas, sendo que, muitas vezes, esses processos são relegados aos pedreiros envolvidos no processo.

Em decorrência dessa situação, a ligação *concreto novo versus concreto antigo* fica prejudicada, pois, nesse local se dará o ponto mais frágil da ligação, que é a zona de interface ou zona de transição, de acordo com FAGURY & LIBÓRIO (2002).

Logo, uma boa aderência entre o material de reparo e o substrato de concreto é uma das exigências básicas requeridas para peças reparadas.

Neste sentido, um programa experimental foi conduzido de forma a avaliar a resistência de aderência existente entre a superfície de contato de concretos com diferentes idades.

A metodologia de ensaio teve como objetivo analisar a resistência de aderência em vigas de concreto não armadas reforçadas na zona tracionada com concreto convencional e de média resistência. O ensaio adotado foi o de flexão a quatro pontos, avaliando-se a região submetida à flexão pura. As variáveis envolvidas no projeto foram a superfície de contato e o tipo de material de reparo.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado o assunto desta tese. É retratado o histórico da recuperação estrutural, a motivação e o objetivo deste trabalho.

De forma geral, o primeiro capítulo explica a necessidade de manutenção das estruturas de concreto. Em determinados casos, cujo problema patológico já foi diagnosticado, deve-se realizar a recuperação ou reforço estrutural. No processo de recuperação/reforço, o tipo de material utilizado e o preparo da superfície são parâmetros predominantes para se corrigir a patologia.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do fenômeno de aderência. Também são apresentados conceitos e parâmetros que influenciam a mesma.

Apresenta-se também uma comparação entre a abordagem dada ao estudo da aderência aço-concreto e concreto-concreto, além da perda da mesma, que culmina, na maioria dos casos, com a ruptura parcial ou total da estrutura. Em ambos os casos, a perda de aderência está associada à fraca camada que se estabelece entre os dois materiais. Esta camada, chamada de zona de transição, deve ser melhorada a fim de se possibilitar uma melhor transmissão de esforços entre os diferentes materiais. Para tal, melhora-se a superfície de contato (tratamento superficial) como uma forma de atenuar os efeitos da zona de transição. Neste mesmo capítulo, são descritas algumas técnicas e materiais usuais no reparo de estruturas de concreto que retratam a propriedade de aderência.

Na revisão bibliográfica as variáveis de projeto são descritas. Abordam-se os parâmetros estudados no trabalho, assim como o tipo de ensaio de aderência realizado.

No capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido. São discriminados os materiais utilizados como substrato e reparo, a metodologia e a instrumentação empregadas.

No capítulo quatro os resultados dos ensaios são mostrados e também é feita a análise dos resultados.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios, as justificativas para tais resultados e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estudo da aderência

Durante a revisão bibliográfica pôde-se constatar vários trabalhos abordando o assunto direta e indiretamente. Consegue-se dividir o tema em duas principais categorias: trabalhos que analisaram a aderência entre aço e o concreto e trabalhos que avaliaram a aderência entre diferentes concretos. Apesar do primeiro tema não ser o real objetivo desta tese, torna-se importante o seu conhecimento, pois aborda a força de aderência existente entre estes dois materiais e ressalta a importância desta propriedade. De certa forma, há uma grande familiaridade entre os dois principais temas, pois na aderência aço-concreto existem três fases distintas, assim como na aderência concreto-concreto. No primeiro tem-se a fase aço, a fase concreto e a zona de transição entre eles. Analogamente, no segundo tem-se as fases concreto antigo, concreto novo e a zona de transição entre eles. Fica caracterizado em ambos assuntos que a zona de transição é a fase mais fraca e que melhorando-se as propriedades de aderência, permite-se uma melhor transmissão de esforços entre as fases distintas. A seguir, estas idéias serão abordadas, destacando-se a resistência de aderência, definições e fatores que a influenciam.

2.1.1 Aderência aço-concreto

BARBOSA (2001) desenvolveu um trabalho onde avaliava o comportamento da aderência aço-concreto para barras circulares e quadradas de fabricação nacional empregando concretos de diferentes classes de resistência. A razão da existência do concreto armado fundamenta-se na ação solidária entre armadura e concreto, cujo efeito só é possível devido à aderência entre os dois materiais, uma vez que para absorver os esforços solicitantes, os dois materiais atuam em conjunto. Essa “ligação” ou aderência entre armadura e concreto, manifestada por tensões de cisalhamento na superfície de

contato dos dois materiais, é o principal fator do bom desempenho do concreto armado, sendo essa uma das razões básicas pela qual tal material composto é considerado uma solução viável e com boas características como material de construção. O comportamento da aderência entre a barra de armadura e o concreto a ela circunvizinho tem importância decisiva com relação à capacidade de carga das estruturas de concreto armado. TAVARES (2000) desenvolveu um trabalho experimental de vigas de concreto com protensão mista e protensão interna onde foi analisada a influência da variação da aderência aço-concreto na flexão. BARBOSA (1998) realizou um trabalho experimental e numérico em concreto armado de elevado desempenho (C.A.E.D.) com adição de microssílica e armaduras de aço de elevado desempenho, direcionando o estudo para aderência entre concreto e barra de aço e fissuração de vigas solicitadas à flexão.

2.1.2 Aderência concreto-concreto

MORGAN (1996) comentou que a resistência de aderência entre materiais de reparo e substratos de concreto é de vital importância. Explicando este fenômeno, MEHTA & MONTEIRO (1994) relataram que a principal causa de adesão entre os produtos de hidratação dos materiais de reparo e os substratos de concreto são as forças intermoleculares (forças de Van der Waals).

Alguns autores como TAVARES (2000), BARBOSA (2001), BARBOSA (1998) e DÉSIR (1998) realizaram suas pesquisas tendo como objetivo a aderência aço-concreto. Relataram alguns conceitos sobre a aderência. Pode-se destacar três tipos de aderência que atuam conjuntamente:

a) Aderência por adesão química

É a ligação físico-química que se origina na interface concreto antigo-concreto novo, durante as reações de hidratação do cimento, ou seja, é a ação de “colagem” originada da adesão ou de forças capilares. A pasta de cimento do concreto novo penetra nas ranhuras do antigo, possibilitando esta ligação.

O efeito de adesão depende da rugosidade e da limpeza da superfície de contato dos materiais. Esta parcela de aderência, isoladamente, não é suficiente para uma boa ligação, sendo destruída devido a pequenos deslocamentos ou baixas solicitações.

b) Aderência por atrito

É a aderência proveniente da força de atrito existente entre os dois tipos de concretos envolvidos. A resistência por atrito manifesta-se depois de rompida a adesão, desde que existam pressões transversais ao novo concreto em virtude de tensões de compressão transversais devido a cargas externas, retração ou expansão do mesmo concreto.

c) Aderência mecânica

É a interação mecânica entre os dois concretos em contato, decorrente da presença de saliências na superfície do concreto base. Essas funcionam como peças de apoio, mobilizando as tensões de compressão no concreto.

Por meio de intertravamento mecânico entre concreto novo e substrato de concreto, formam-se “consoles de concreto” na zona de transição que são solicitados ao cisalhamento e à compressão, antes que haja o deslizamento relativo entre os materiais, como se pode observar na Figura 2.1 (EMMONS & VAYSBURD, 1996). É o tipo de ligação mais efetiva e confiável, pois contribui de maneira fundamental para a solidarização dos dois materiais.

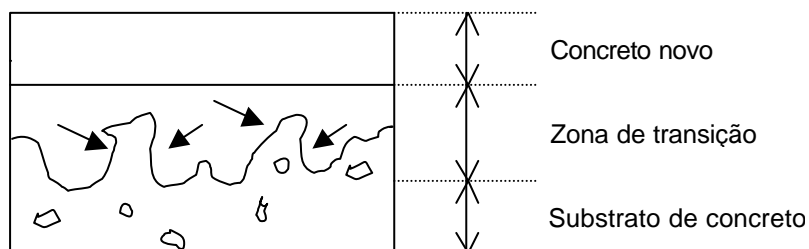


Figura 2.1 – “Consoles de Concreto” (EMMONS & VAYSBURD, 1996)

Como TAVARES (2000) e BARBOSA (2001) ressaltaram, não é possível determinar cada parcela de aderência isoladamente. Esta separação citada acima é simplesmente esquemática. Além disso, há outros fatores que influenciam a aderência, como a retração e a fissuração do concreto, bem como pela transferência “parcial”, nas regiões entre fissuras, da tensão ao longo da estrutura. Desta forma, por meio de ensaios determina-se valores médios globais de aderência.

GARCIA & CLÍMACO (2001) comentaram que o reparo de estruturas de concreto envolve, freqüentemente, a adição de material novo, quando é necessário remover parte do concreto danificado e recompô-lo. A obtenção de um reparo monolítico bem sucedido depende das condições do concreto antigo que deve ter resistência adequada e solidez para receber o reparo. A seleção adequada de um

sistema de reparo deve atender diferentes especificações, mas, em geral, deve atender aos seguintes requisitos básicos: ter durabilidade igual ou superior ao material original, fornecer proteção à armadura, se possível com elevação da alcalinidade na região circundante, criando barreiras contra o ingresso de agentes agressivos, ser dimensionalmente estável e permitir boa adesão entre os materiais. Os sistemas para reparo de estruturas de concreto podem ser agrupados em três categorias, conforme a composição dos materiais empregados: a) materiais à base de cimento, convencionais ou não; b) materiais com aglomerante orgânico à base de polímeros termorrígidos; c) materiais com aglomerantes mistos formados por cimento portland e polímeros termoplásticos. Os sistemas à base de cimento, em sua maioria, contêm aditivos com a finalidade de melhorar suas propriedades, como retração, exudação, tempo de pega, consistência etc. Segundo ANDRADE (1992) os sistemas de reparo com base orgânica são muito variados em composição, sendo os mais comuns os materiais à base de resinas epóxi, poliéster, poliuretano, acrílica e outros.

GARCIA & CLÍMACO (2001) apresentaram os resultados de um programa experimental para avaliar o desempenho de diversos sistemas utilizados em reparos estruturais utilizando concreto moldado *"in loco"*. Foi empregado o teste de compressão-cisalhamento do prisma reconstituído com junta diagonal (*slant shear test*) e diversas formas de preparação da interface concreto antigo e novo (reparo).

Os prismas foram reparados com concreto similar ao original e com argamassa com adição de sílica ativa. Em ambos os casos, as camadas adesivas de argamassa epóxi e argamassa comum de cimento e areia apresentaram contribuições efetivas no aumento da resistência de aderência. A argamassa comum, além de se tratar de um tratamento convencional e econômico, teve a vantagem adicional de se restabelecer a alcalinidade na região afetada. Alguns sistemas comercializados como adesivos a base de epoxi mostraram não influenciar ou mesmo ter um desempenho prejudicial à resistência de aderência.

Uma boa adesão entre o concreto e o material de reparo é de vital importância para a aplicação e o resultado dos reparos em concreto, segundo AUSTIN *et al.* (1999). A resistência e a integridade da aderência dependem não apenas das características físico-químicas dos componentes, mas também do acabamento envolvido, como as superfícies lisas ou rugosas. A resistência de aderência depende do estado de tensão caracterizado na interface dos materiais, o qual é influenciado por fatores como rugosidade e cargas atuantes.

GY *et al.* (2001) avaliaram que muitas propriedades do concreto reparado/reforçado são controladas pela zona de transição entre o antigo e novo concreto. Segundo MEHTA &

MONTEIRO (1994), a zona de transição representa a região interfacial entre as partículas dos materiais. A zona de transição é geralmente a parte mais fraca em comparação com os outros componentes envolvidos, e conseqüentemente, exerce uma forte influência no seu comportamento mecânico. SILVA & LIBÓRIO (2002) citaram que a zona de transição é a região mais frágil dos concretos e argamassas. A microestrutura na zona de transição é caracterizada pela alta porosidade, composta de poros relativamente grandes e, muitas vezes, contendo grandes cristais de hidróxido de cálcio. A elevada porosidade da zona de transição reduz a durabilidade dos materiais à base de cimento, uma vez que forma caminhos de percolação no interior da pasta de cimento, permitindo a entrada e movimento de agentes agressivos. GY *et al.* (2001) também relataram que a zona de transição entre concretos novo e velho é geralmente porosa e rica em grandes cristais. Isto é devido ao concreto ser um material hidrófilo que conduz a um efeito de parede e produz um fluxo forte de água na direção do concreto velho e, então, induz um aumento local da relação água-cimento. Também foi discutido que a resistência de aderência é menor quando se emprega aglomerantes de cimento, já que existe um grande número de microfissuras e grandes cristais na zona de transição, fazendo com que a interface concreto novo-velho se descole devido a retração por secagem do cimento.

BASTOS & CINCOTTO (2000) mostraram que a retração em compósitos à base de cimento é um tema importante, ligado diretamente à ocorrência de fenômenos patológicos nas construções. Inerente às condições de interação de um compósito recém-fabricado com o meio a que está exposto na obra e à própria hidratação do cimento, a retração pode ser controlada para que ocorra em nível compatível, por exemplo, com a resistência mecânica do concreto de um elemento estrutural em determinada idade. O objetivo deste controle é evitar a fissuração que compromete a estética e a durabilidade da estrutura, sendo necessário entender como ocorre a retração. TSCHEGG *et al.* (2000) relataram que a parte exposta ao ambiente é uma região crítica entre o contato de concretos novos com velhos. Nestas localizações, acontecem contrações devido à retração do concreto novo ou devido às tensões resultantes do gradiente de temperatura que causa uma concentração local de forças perpendiculares à interface.

RAO & PRASAD (2002) descreveram que o mecanismo de transferência de carga no concreto depende do grau de interação entre essas fases, resistência da pasta de cimento, características do agregado e forças de coesão na interface. A contribuição do agregado graúdo na transferência da tensão em concretos de alta resistência é muito importante. A formação de microfissuras e sua propagação na interface é significativamente influenciada pela resistência de aderência e rigidez à fratura. PROKOPSKI & HALBINIAK (2000) relataram que materiais cimentícios apresentam defeitos microestruturais e descontinuidades, causando concentração de tensão sob carregamento em vários pontos

no volume destes materiais. Os parâmetros mecânicos do concreto são influenciados pelas propriedades individuais dos componentes, bem como da interação entre eles. A adesão entre agregado e pasta de cimento por meio da zona de transição é um outro fator que governa a resistência do concreto.

JIANG (1999) mostrou que a zona de transição entre o agregado e a pasta controla algumas propriedades importantes do concreto e que o uso de cinza volante no concreto faz com que a zona fique mais densa e uniforme. O autor investigou a zona de interface e a resistência de aderência entre os agregados e a pasta com elevado volume de cinza volante, concluindo que quanto maior a resistência da pasta, maior a resistência de aderência.

A zona de transição não é peculiar apenas nas superfícies dos agregados, mas também está presente em outras interfaces de compósitos à base de materiais cimentícios, tais como a região da interface aço-concreto, concreto-concreto e argamassa-substrato. Assim, a zona interfacial entre concretos de diferentes idades ou de etapas diferentes de concretagem, representa a região mais fraca de uma peça reparada/reforçada. A zona de transição entre agregado graúdo e pasta em concretos convencionais tem sido estudado em várias pesquisas. No entanto, existe pouca informação sobre a avaliação da zona de transição entre concretos novos e antigos. Algumas propriedades principais, como porosidade e composição química da zona de transição entre concretos novo e velho, com o emprego de diferentes aglomerantes, foram estudados por GY *et al.* (2001) usando microscópio eletrônico de varredura eletrônico, além de investigar a resistência de aderência. Os resultados mostraram que o aglomerante é um fator importante, afetando a morfologia, forma e tamanho, mineralogia e a microestrutura da zona de transição no concreto reparado/reforçado, afetando significativamente a resistência de aderência.

De acordo com CAO & CHUNG (2001) o reparo de estruturas de concreto geralmente envolve a ligação de um concreto novo a um velho. A qualidade da aderência, em geral, é limitada em parte devido à retração por secagem do novo concreto. Esta degradação pode ocorrer durante cargas estáticas ou cíclicas e, em particular, cargas cíclicas podem levar a fadiga. Esta degradação foi analisada por meio da monitoração da resistência elétrica de contato da aderência na interface dos materiais durante um carregamento cíclico. Empregou-se uma pasta de cimento Portland, sem agregado graúdo, como substrato e preparou-se um reparo com este mesmo material após 28 dias da moldagem do substrato. Não houve tratamento superficial e a pasta de cimento foi vibrada a fim de facilitar a compactação e diminuir a quantidade de bolhas de ar. O objetivo do trabalho foi estudar a evolução do dano à aderência entre os concretos velho e novo durante carregamento cíclico.

Uma brusca diminuição na resistência, devido à perda de aderência, levou a um método não destrutivo de monitorar a qualidade da aderência em tempo real durante carregamento dinâmico. A degradação devido à fadiga causou uma diminuição na resistência de aderência. Isto ocorreu em uma pequena fração durante a existência da fadiga. A perda da aderência foi acompanhada por uma elevada diminuição da resistência como se pode observar na Figura 2.2.

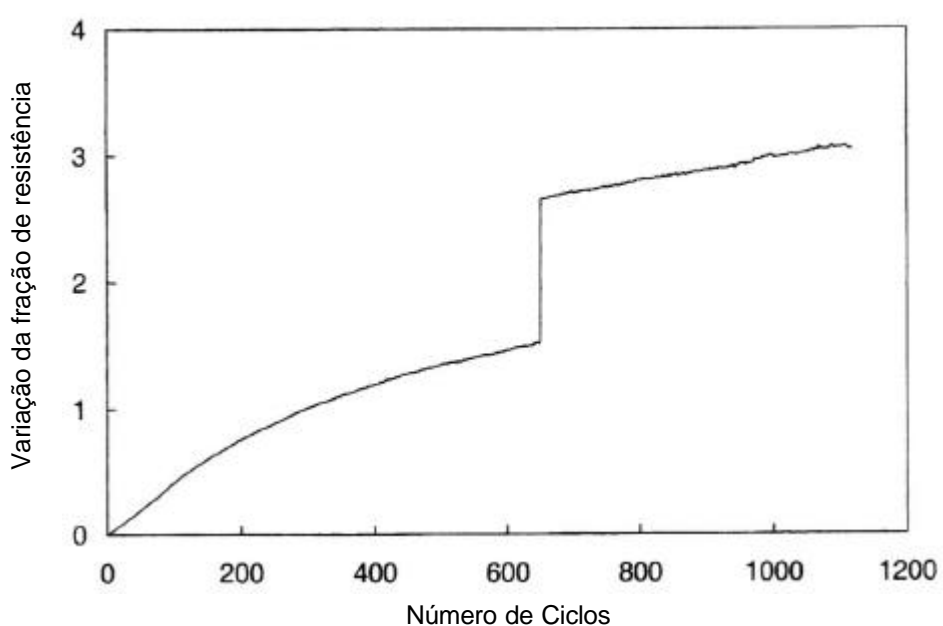


Figura 2.2 – Variação da fração de resistência de contato versus número de ciclos (CAO & CHUNG, 2001)

CLÍMACO (1989) relatou que uma boa aderência ao concreto original ou substrato é condição indispensável a qualquer reparo estrutural bem sucedido. Após ter estudado os fatores envolvidos e os métodos de teste da aderência entre concretos novo e antigo, apresentou um programa experimental que utilizou o teste de compressão-cisalhamento do prisma reconstituído com junta diagonal. Os resultados indicaram que o teste é empregado com sucesso na avaliação da aderência do concreto novo ao velho, dependendo de uma combinação adequada do ângulo da junta diagonal, dimensões dos corpos de prova e preparação da superfície de concreto da junta.

MORENO JR. & SELMO (2002) apresentaram uma revisão dos métodos de ensaio para avaliação da aderência de sistemas de reparo localizados e discutiram em mais detalhes dois métodos aplicados a uma argamassa de reparo dosada em

laboratório. A diferença entre os ensaios residiu no tipo de esforço que foi aplicado à interface material de reparo/substrato de concreto. No primeiro, denominado resistência de aderência à tração direta foi aplicada uma carga de tração perpendicular à superfície do concreto e, no segundo método, denominado de resistência de aderência ao cisalhamento por flexão, os esforços aplicados foram de cisalhamento puro em grande parte da interface material de reparo/substrato, com solicitação do material de reparo à tração.

FAGURY & LIBÓRIO (2002) descreveram que a ligação entre concretos com cimento Portland de diferentes idades, composições e resistências, é um dos problemas da tecnologia dos concretos estruturais. A continuidade desta ligação é prejudicada por uma diversidade de fatores que implicam desde a retomada de uma concretagem (junta fria), até a recuperação de estruturas de concreto deterioradas. Sob esse ponto de vista, foi apresentado um trabalho que analisou o comportamento de um sistema de reparos aplicados à recuperação de estruturas, ligações concretos velhos versus concretos novos (caso das ampliações) e continuidades de concretagens. Com a finalidade de melhorar a zona de transição, utilizou-se como sistema de reparo, concretos de elevado desempenho, após prévio tratamento da interface (concreto velho), por meio de desgaste superficial e imprimação com pastas de cimento de elevado desempenho.

SILVA & LIBÓRIO (2002) apresentaram em seu trabalho uma avaliação da aderência de argamassa de revestimento em substratos de concreto, utilizando-se chapiscos e pastas com adições de sílica ativa da casca de arroz, como tratamento da zona de interface argamassa versus substrato. A falta ou perda de aderência dos revestimentos de argamassa pode causar prejuízos a habitabilidade e ao conforto, além de comprometer a estética da edificação e exigências dos usuários. Como forma de aumentar o nível da qualidade dos revestimentos de argamassa é necessário suprir deficiências neste subsistema da construção civil, no que diz respeito à aderência entre os revestimentos e substratos. As estruturas de concreto, quando vão receber revestimento de argamassa, necessariamente precisam de um preparo da base com chapisco para que, aumentando-se a rugosidade, possa-se melhorar a resistência de aderência à tração. O chapisco, além de produzir uma superfície bastante rugosa sobre a base, aumenta também a área de adesão, principalmente em área de baixa porosidade, tais como superfícies de concreto.

Um caso comum de reparo ou reforço estrutural onde a qualidade da aderência entre concreto pré-existente e o de reparo/reforço é fundamental, é o do encamisamento de pilares. CARRAZEDO (2002) realizou uma análise experimental

que teve como objetivo observar o mecanismo de confinamento no comportamento de pilares de concreto armado reforçados por encamisamento com compósitos de fibras de carbono. Os ensaios foram de compressão axial centrada. Procurou-se analisar experimentalmente a influência da taxa de armadura transversal e do número de camadas de reforço em pilares de seção transversal circular. Foram ensaiados também pilares de seção transversal quadrada reforçados com a mesma técnica, a fim de verificar a influência da alteração da forma da seção transversal. Fizeram parte também da análise experimental os ensaios realizados para caracterização dos materiais, ensaios de verificação do efeito da aderência e ensaios piloto. Os ensaios piloto foram realizados em uma fase inicial da pesquisa, com o objetivo de verificar a adequação dos procedimentos adotados para ensaio. Quanto aos ensaios de verificação do efeito da aderência, foram ensaiados 4 corpos de prova cilíndricos de concreto de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Após a cura do concreto (sete dias) preparou-se a superfície utilizando um disco de aço para lixamento, seguido de um jato de ar para limpeza. Preparada a superfície, aplicou-se a resina epóxi e procedeu-se à colagem dos tecidos unidirecionais de fibras de carbono. Utilizou-se um concreto com 34 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Os corpos de prova reforçados (modelos 1, 2, 3 e 4) receberam a aplicação de uma camada de reforço com fibra de carbono. As características de cada modelo foram:

Modelo 1: preparado com lixamento da superfície;

Modelo 2: sem lixamento da superfície;

Modelo 3: utilizou-se um filme plástico sobre o concreto para eliminar totalmente a aderência da resina com o concreto;

Modelo 4: corpo de prova de referência, sem reforço.

Na Figura 2.3 estão indicados os diagramas tensão-deformação dos quatro modelos supra citados.

Notou-se que a influência do lixamento não foi significativa, já que os modelos 1 e 2 se comportaram de forma praticamente idêntica. No modelo 3, no entanto, a falta total de aderência provocou uma queda na resistência de 8% em relação ao modelo 1.

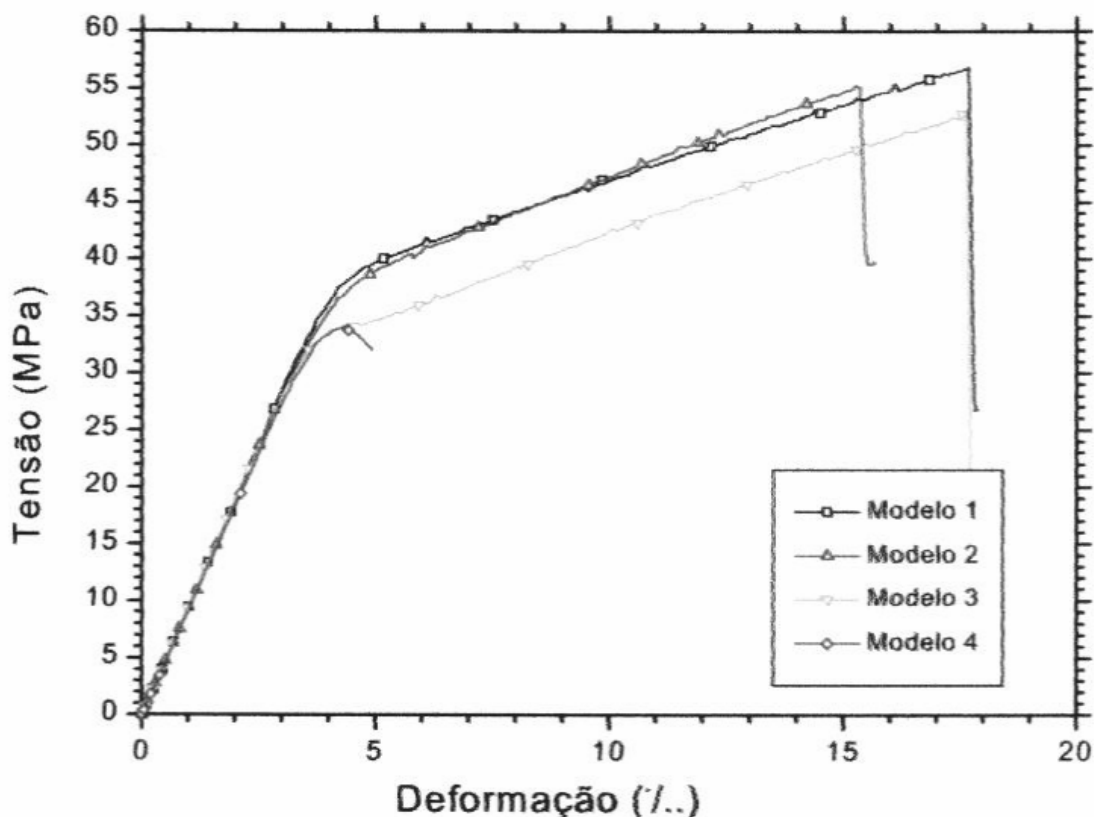


Figura 2.3 – Diagramas tensão-deformação com diferentes aderências (CARRAZEDO, 2002)

A aderência permitiu um ganho de resistência do concreto próximo da tensão crítica, ou seja, houve um prolongamento do trecho inicial da curva tensão-deformação do concreto não confinado. No caso da ausência de aderência houve um atraso no ganho de resistência do concreto até o ponto em que a microfissuração acabou mobilizando o efeito de confinamento. Os pilares piloto foram confeccionados com lixamento superficial do concreto. No entanto, para os pilares definitivos, dispensou-se o lixamento dos modelos, tendo em vista os resultados satisfatórios obtidos em corpos de prova encamisados sem preparo da superfície, na fase de verificação da influência da aderência.

A associação de elementos pré-moldados com concreto moldado no local é uma das aplicações mais comuns da pré-moldagem. Este tipo de associação, que recebe a denominação de peça composta, tem sido utilizada com sucesso em construções de pontes e pavimentos de edifícios, apresentando inúmeras vantagens em relação à construção unicamente em concreto moldado no local ou em elementos pré-moldados. Para garantir a colaboração do concreto moldado no local na seção resistente das peças compostas submetidas à flexão é necessário garantir a transferência, integral ou parcial, das tensões de cisalhamento horizontais pela interface entre o concreto pré-moldado e o concreto moldado

no local. A avaliação da resistência ao cisalhamento horizontal ou simplesmente, resistência de aderência depende de vários fatores, dentre os quais destacam-se: a rugosidade da superfície de contato, a quantidade de armadura transversal à ligação (peças armadas) e a resistência do concreto. Apesar deste tema ter sido bastante estudado por diversos pesquisadores, ainda restam diversas dúvidas sobre a distribuição de tensões na interface de peças compostas. Neste sentido, ARAÚJO & DEBS (2001) realizaram um trabalho onde foi abordado o cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em vigas compostas. Apresentaram modelos analíticos e empíricos empregados na avaliação da resistência ao cisalhamento na interface entre duas superfícies de concreto atravessadas por armadura. Esses modelos foram utilizados para avaliar a resistência ao cisalhamento da interface de vigas compostas disponíveis na literatura. Observou-se boa aproximação entre os modelos analíticos e os modelos empíricos, obtidos de ensaios de cisalhamento direto, com os resultados experimentais de vigas compostas.

RIPPER & SOUZA (1998) retratou que a perda de aderência é um efeito que pode ter conseqüências ruinosas para a estrutura e pode ocorrer entre dois concretos de diferentes idades, na interface de duas concretagens ou entre barras de aço das armaduras e concreto. A perda de aderência entre dois concretos de idades diferentes ocorre quando, a superfície entre concreto antigo e novo estiver suja, quando houver um espaço de tempo muito grande entre duas concretagens consecutivas e a superfície de contato (junta de concretagem) não tiver sido convenientemente preparada, ou quando surgirem trincas importantes no elemento estrutural. É comentado também que a perda de aderência entre concreto e aço ocorre por causa da corrosão do aço, corrosão do concreto (dissolução dos agentes ligantes), assentamento plástico do concreto, dilatação ou retração excessiva das armaduras e aplicação, nas barras de aço, de produtos inibidores da corrosão.

SABBATINI (1986) em seu estudo sobre patologias em revestimentos de argamassa, as classifica, segundo sua origem, como aderência insuficiente, inadequada capacidade de acomodação plástica (quando endurecida) e deficiente resistência mecânica. A perda de aderência é definida como um processo em que ocorrem falhas ou rupturas na interface das camadas que constituem o revestimento, ou na interface com a base ou substrato, quando as tensões ultrapassam a capacidade de aderência das ligações. CINCOTTO (1983) descreveu outro problema de perda da aderência que ocorre ao longo do tempo, afetando o revestimento. É o caso da corrosão da armadura de concreto, cujo acúmulo do produto de corrosão na interface pode provocar o deslocamento do revestimento.

QUEIRÓZ (1999) mostrou que o comportamento de vigas com pouca e sem armadura de flexão, que deve servir de base para a determinação da armadura mínima, têm sido alvo de alguns estudos experimentais e teóricos. Apesar disto, ainda não se encontraram bem definidas as influências de diversos parâmetros nesse comportamento. Para as vigas sem armadura, os principais parâmetros influentes são, além do carregamento, os que caracterizam a geometria da viga, esbelteza, largura e altura, e do concreto, resistência e tenacidade. Para as estruturas com armadura, deve-se considerar a influência da taxa, cobertura e aderência.

AURICH & CAMPOS (2002) relataram que, tradicionalmente, o estudo das estruturas de concreto armado é baseado na análise de peças estruturais em laboratório. Para completar este tipo de análise, modelos de elementos finitos têm sido utilizados para simular o funcionamento destas estruturas. Estas simulações permitem uma clara avaliação do comportamento estrutural. Um tópico que tem sido abordado é a ligação do concreto com elementos de reforço, sejam estes internos, na forma de barras de armadura, ou externos, como chapas de aço ou lâminas poliméricas reforçadas com fibras. O estudo desenvolvido adquiriu um papel decisivo nas situações em que o deslizamento entre concreto e elemento de reforço corresponde ao modo de ruptura da estrutura, como em situações de falha de ancoragem das barras de armadura e quando ocorre separação das chapas ou lâminas de reforço de elementos estruturais. Foi apresentado também um modelo para a representação da ligação entre concreto e elementos adjacentes (barras de armadura e chapas ou lâminas de reforço) para análises por meio do método de elementos finitos. O modelo considerou a degradação da aderência pela introdução de graus de liberdade para os deslocamentos relativos entre os materiais. Foram apresentadas comparações entre resultados numéricos e experimentais de vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono. O principal objetivo foi a modelagem da armadura e do reforço em peças de concreto armado, por meio de um modelo de aderência entre concreto e material adjacente. A armadura foi introduzida no modelo como uma linha de material mais rígido dentro do elemento de concreto. A consideração da degradação da aderência foi realizada por meio de um modelo onde os efeitos da aderência imperfeita foram incluídos pela introdução de graus de liberdade para os deslocamentos relativos entre os materiais.

Em reparo estrutural, a ligação dos materiais é um dos aspectos mais críticos. A ligação de dois materiais com propriedades mecânicas diferentes propicia o desenvolvimento de tensões de tração e a formação de fissuras na interface ou próximo dela, causando a perda de aderência entre os materiais. Para que o projetista possa garantir o sucesso do reparo é necessário maior conhecimento do desempenho dos produtos de reparo e das compatibilidades físicas ou mecânicas

com o substrato de concreto. Neste âmbito, SOUZA & APPLETON (2001) desenvolveram um estudo experimental sobre o comportamento estrutural de vigas e pilares reparados com dois tipos de sistemas disponíveis no mercado: uma argamassa de base cimentícia e outra modificada por polímeros. Foram avaliadas as resistências à compressão e à tração, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a retração e a resistência de aderência dos materiais envolvidos.

2.1.3 Aderência fibra de carbono-concreto

BEBER (1999) desenvolveu um programa experimental para avaliar o comportamento de vigas de concreto armado, reforçadas à flexão e ao cisalhamento, empregando compósitos de fibra de carbono. Ressaltou em sua conclusão que alguns aspectos dos compósitos como projeto, detalhamento e garantia da integridade da ligação concreto-reforço, precisam ainda ser melhor compreendidos. Outro aspecto importante foi que os resultados das cargas de ruptura das vigas confirmaram o excelente desempenho dos compósitos de fibra de carbono no reforço à flexão de vigas de concreto armado. Contudo, observou-se que, além dos modos de ruptura à flexão (verificado nas vigas de controle), outras falhas prematuras ocorreram na interface concreto/reforço. Essas falhas de aderência ocorreram em diferentes posições da ligação concreto/reforço e, em alguns casos, a separação do reforço ocorreu na interface adesivo/concreto. Entretanto, o arrancamento da camada de concreto, junto à armadura longitudinal, tem se caracterizado como o modo de ruptura prematuro mais freqüente. O início desta falha é devido à alta concentração de tensões na interface concreto/reforço, junto à extremidade do reforço. A aderência é necessária para transferir as forças do concreto para o compósito de fibra de carbono, portanto, os modos de ruptura associados à falta de aderência devem ser verificados. A falha da aderência implica na perda completa da ação conjunta entre o reforço e o concreto, comprometendo a estabilidade do elemento estrutural.

A aderência entre compósito de fibra de carbono (CFC) e substrato de concreto também foi avaliada por SANCHEZ & MENEGHEL (2002), que abordaram dois tipos de ruptura: a ruptura do substrato e a ruptura interlaminar do compósito. As diversas formulações teóricas encontradas na literatura são, em geral, fundamentadas em ensaios de arrancamento de tiras de compósitos fixadas ao

corpo de prova de concreto, o que não reflete a realidade da peça fissurada quando submetida à flexão simples, onde a concentração de tensões junto às fissuras e nos extremos do compósito levam a um comportamento mecânico diferente do obtido nos ensaios de laboratório. As leis tensão de aderência versus deslocamento relativo do compósito, fundamentadas em resultados de ensaios, buscam representar esse fenômeno, o qual por sua complexidade dificulta a elaboração de um modelo teórico consistente, visto a dificuldade de se padronizar um ensaio que represente a realidade física do elemento estrutural fissurado. O trabalho do autor analisou uma formulação energética para quantificar a aderência entre o substrato e CFC, visando obter um comprimento de ancoragem adequado para o reforço da peça de concreto estrutural.

2.2 Técnicas de reparos

Quando se fala sobre aderência, intuitivamente associa-se a existência de dois ou mais materiais “colados” ou interligados. Dentro do ramo da Engenharia de Estruturas a área de reforço ou reparo estrutural, cujo presente trabalho está inserido, retrata o comportamento de peças constituídas por diferentes tipos de materiais. Para isso, algumas técnicas foram desenvolvidas e ainda continuam sendo aprimoradas para garantir à peça estrutural um comportamento monolítico. Apesar de se abordar o assunto como um reforço e/ou uma recuperação, há uma distinção entre ambos. SOUZA (1990), baseado em critérios estabelecidos internacionalmente, lembra que, a recuperação, a substituição e o reforço, são chamados de intervenções, sendo que, a recuperação, caracteriza-se pelo restabelecimento das características mecânicas iniciais; a substituição, pela demolição e a reconstrução de elementos muito danificados; e o reforço, pela instalação de características mecânicas maiores do que as iniciais.

Pretende-se agora ressaltar algumas técnicas e materiais já desenvolvidos e utilizados no reparo de estruturas de concreto que envolvam a propriedade de aderência.

TEIXEIRA JR. (1994) realizou uma revisão da recuperação estrutural. O trabalho relatou que o projeto de recuperação é indicado quando se deseja reabilitar estruturas danificadas e envolve uma análise cuidadosa do estado da estrutura. A partir desta análise se concluirá sobre a sua viabilidade técnica e econômica.

Para a avaliação das condições de uma estrutura, deve-se obter o maior número de dados possíveis, plantas e memórias de cálculo, mapeamento e abertura das fissuras, resultados de ensaios dos materiais, resultados obtidos em provas de carga etc.

Critérios técnicos como margens de segurança, técnicas, materiais e tempo disponível, assim como a relação custo/benefício da obra e a importância histórica da estrutura são aspectos a considerar no planejamento da recuperação da estrutura.

As informações sobre as características residuais de rigidez e resistência da estrutura são fundamentais na tomada de decisão sobre o tipo de intervenção, e pré e pós-análise da estrutura.

Na fase construtiva são necessárias a supervisão e execução por pessoal especializado, além do controle de qualidade por meio de ensaios.

2.2.1 Materiais e técnicas empregadas nas intervenções

Em geral, nos trabalhos de recuperação ou reparação, recorre-se ao tratamento das superfícies e das fissuras; à adição localizada de concreto e/ou armaduras e à proteção destes materiais.

2.2.1.1 Materiais

O concreto é um material que resiste bem à tensões de compressão. Sua resistência à tração é pequena e pouco confiável, pois, antes mesmo da atuação do carregamento previsto, o concreto apresenta fissuras na interface entre agregado e argamassa e no interior da argamassa. Assim, em geral, as armaduras são empregadas para resistir às tensões de tração existentes.

No interior do concreto a armadura fica protegida contra a corrosão devido ao fato do concreto ser um meio alcalino (pH da ordem de 12,5). Mesmo quando o concreto apresenta uma fissuração moderada esta proteção persiste, o que faz com que as estruturas de concreto armado, em geral, apresentem uma grande durabilidade quando expostas ao meio ambiente.

Nos casos em que essa proteção fica comprometida, facilitando a corrosão das armaduras e nos casos de danos gerais, que levem à necessidade de se reparar a estrutura, procura-se sempre utilizar materiais de reparo que consigam promover a monoliticidade da mesma após a intervenção.

Estes materiais devem apresentar maior durabilidade, baixa permeabilidade, boa resistência, maior proteção para o aço, garantia de boa aderência ao concreto e ao aço, boa trabalhabilidade e propriedades compatíveis com as do concreto e do aço (como coeficiente

de dilatação térmica aproximadamente iguais, permitindo aos materiais uma dilatação térmica sem destruição da aderência entre eles).

2.2.1.2 Técnicas de reforço e/ou recuperação

a) Medidas iniciais

Quando uma estrutura se apresenta danificada, eventualmente necessita-se proceder a retirada parcial ou total das sobrecargas. Recorre-se ainda à demolição parcial da estrutura e/ou escoramento, por meio de perfis metálicos ou troncos de madeira, com auxílio de macacos hidráulicos. Este escoramento levará a uma mudança do sistema estático da estrutura, devendo, portanto, ser bem planejado.

b) Tratamentos superficiais

PLUM (1990) classifica os tratamentos superficiais em: estruturais, quando ocorre perda de resistência por parte dos materiais, ou cosméticos, quando não há danos graves que levem a perdas de resistência pela estrutura. As aplicações cosméticas ou não estruturais são subdivididas de acordo com sua finalidade, como: aumentar a resistência à abrasão, diminuir a permeabilidade, melhorar a aparência etc.

Em geral, a argamassa, o concreto comum ou especial, à base de ligantes hidráulicos e/ou produtos sintéticos, ou concreto projetado, podem ser empregados nas reconstituições das camadas superficiais.

Pinturas e/ou aplicação de membranas, geralmente constituídas por polímeros, são utilizadas nos tratamentos de impermeabilização do concreto.

c) Tratamento das fissuras

De acordo com o *Comité Euro-Internacional du Béton* – CEB (1983) e FORES (1978), a principal finalidade do tratamento das fissuras consiste na proteção contra a penetração de agentes agressivos no concreto, visando também restaurar o monolitismo da estrutura. A abertura de fissura a partir da qual seria necessária uma intervenção é assunto controverso. Estabelecido este limite, o preenchimento eficiente destas fissuras fica ainda condicionado à utilização de equipamentos adequados.

O tratamento das fissuras é feito por meio de injeção, por gravidade, por pressão ou por vácuo, de nata de cimento e aditivos; resinas epóxi, acrílicas, poliéstericas ou

poliuretânicas. Estando as fissuras muito abertas, há necessidade de adicionar agregados (areia ou brita número 0) a estes produtos, para que os fenômenos da retração e da fluência sejam reduzidos.

d) Incorporação de perfis metálicos

Segundo HELENE (1986) a incorporação de perfis metálicos é utilizada nos reforços para esforços de flexão ou cisalhamento. Esta técnica consiste em se empregar estruturas de aço leves ligadas aos elementos de concreto da estrutura.

Estes perfis de aço são ligados aos elementos por meio de parafusos ou rebites pré-aquecidos e soldados. Estes perfis podem ser rejuntados com argamassa de baixa retração ou graute para homogeneizar a transmissão das tensões das partes em contato. O elemento todo pode ser encamisado com argamassa ou concreto projetado, com o emprego de armaduras de pele.

A adição destes componentes poderá ocasionar um aumento significativo da carga permanente da estrutura, assim como, um aumento da rigidez da estrutura. O problema é garantir a transmissão de esforços entre a peça existente e o perfil metálico, por meio da aderência entre os mesmos. Isto leva à necessidade de uma nova análise da estrutura como um todo para a quantificação do efeito desta adição no comportamento global da estrutura.

e) Encamisamento com concreto ou argamassa

SOUZA (1990), ALEXANDRE *et al.* (1988) e CLÍMACO (1989) mostraram que devido à simplicidade de execução e aos materiais empregados, este processo é bastante utilizado nos trabalhos de reforço e/ou recuperação. Entretanto, freqüentemente não são tomadas as medidas necessárias ao seu bom funcionamento, o que leva a resultados insatisfatórios. O principal problema é a mudança de volume que, devido à retração, prejudica a aderência e leva à fissuração e à separação entre concreto novo e antigo.

Para melhorar a aderência e controlar a retração, o CEB (1983) recomenda:

- 1) Remover o concreto deteriorado ou desintegrado com ponteiro ou talhadeira;
- 2) Promover uma superfície rugosa e remover, quando necessário, o concreto que envolve as armaduras, eliminando somente o concreto deteriorado;
- 3) Remover a ferrugem das armaduras e óleos do concreto;
- 4) Eliminar o pó utilizando água sob pressão;
- 5) Saturar o concreto antigo por, pelo menos, seis horas antes de aplicar o concreto novo;

- 6) Evitar bolhas de ar aplicando o concreto com uma maior fluidez e a partir de um mesmo lado da fôrma;
- 7) Promover a cura de todas as superfícies com umedecimento sucessivo ou pelo cobrimento com materiais (trapo, papel, areia ou membranas especiais) úmidos, por dez dias, no mínimo;
- 8) Usar concreto de melhor qualidade, com resistência característica de, no mínimo, 5 MPa a mais que a do concreto existente;
- 9) Reduzir a quantidade de água com o uso de plastificantes.

Recomenda-se ainda que o concreto ou a argamassa utilizados tenham resistência mecânica, módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação compatíveis com o do concreto existente. Diversos tipos de aditivos podem ser empregados, dando origem a vários tipos de concretos e argamassas, tais como concretos e argamassas modificados por polímeros ou à base de ligantes sintéticos.

f) Encamisamento com concreto projetado

CLÍMACO (1989) e SOUZA (1990) mostraram que os principais fatores que levam à ampla utilização deste processo nos trabalhos de reforço ou recuperação de estruturas de concreto são:

- 1) A boa aderência entre o concreto utilizado (com agregados miúdos), o concreto antigo e o aço, que assegura uma completa interação entre as três partes, gerando um comportamento praticamente monolítico;
- 2) A alta compactação e a baixa relação água/cimento asseguram as características de resistência do concreto;
- 3) A facilidade de aplicação em qualquer tipo de superfície (vertical, inclinada ou invertida) com um mínimo de fôrmas.

Se houver a necessidade de se adicionar nova armadura, esta deve ser fixada adequadamente para evitar que mude de posição durante a projeção do concreto.

A resistência à compressão, a ductilidade e a resistência ao choque do concreto projetado podem ser aumentadas em 50%, ou até 100%, adicionando-se 5% do peso do concreto em fibras de aço. Para evitar a corrosão das fibras, utiliza-se aço galvanizado ou cobre-se a superfície com uma camada de concreto comum.

Para garantir um perfeito envolvimento da armadura, o operador deve controlar a distância entre bico da pistola e superfície, limitando-a entre 60 a 150 cm, além de controlar o ângulo de incidência do jato.

O jateamento do concreto pode ser feito por via seca, quando a água, sob pressão, é adicionada no instante em que o cimento e os agregados secos passam pela pistola, ou por via úmida, quando o cimento, os agregados e a água são previamente misturados e transportados sob pressão até a pistola, onde o ar é injetado para o lançamento.

O processo por via úmida tem a desvantagem de não permitir a suspensão e retomada do serviço após o início dos trabalhos, porém oferece a vantagem de se adequar ao lançamento de misturas que contenham agregados leves e porosos, possibilitar a utilização de comprimentos de mangueira mais extensos e, conseqüentemente, facilitar o deslocamento do operador para áreas distantes do equipamento de mistura.

A maior desvantagem do concreto projetado por via seca estaria na dificuldade do operador em controlar a quantidade da água utilizada na mistura, podendo haver uma variação desta quantidade nos concretos de diferentes regiões. Isto não ocorre no concreto projetado pré-misturado, tendo como conseqüência uma perda menor por reflexão.

É indicado, além de uma cura bem feita, o uso de armadura de pele, para evitar problemas de fissuração decorrentes da retração.

Após a aspersão do concreto, pode ser projetada uma camada fina de argamassa, objetivando a obtenção de uma textura adequada da superfície para que seja feito o acabamento.

As regras para o preparo da superfície para o recebimento do concreto projetado são as mesmas do caso anterior. Este processo, devido ao custo dos equipamentos, controle dos materiais e da sua aplicação, torna-se viável somente para grandes áreas de concreto, tais como superfícies de concreto danificadas por agentes agressivos ou por incêndio.

g) Colagem de chapas de aço

Autores como BRESSON (1977), SWAMY *et al.* (1989) e THEILLOUT (1990) mostraram que esta técnica de reforço e/ou recuperação consiste na colagem de chapas de aço na superfície das estruturas de concreto armado, com colas epóxicas. O principal requisito para que esta técnica propicie bons resultados é uma perfeita aderência, tanto entre resina e concreto, quanto entre resina e aço, o que demanda tratamentos superficiais especiais para os materiais empregados, além de condições climáticas favoráveis durante a fase de colagem.

O tratamento das superfícies de aço e concreto envolve alguns procedimentos básicos que são:

- 1) Após a escarificação, realizada de maneira que não se dificulte a aderência da chapa de aço ao concreto, é feita a remoção dos pedaços soltos de concreto, de gorduras ou óleo com escova de aço, e de poeira com jato de areia e ar;
- 2) As chapas de aço são mergulhadas em soluções ácidas, para a remoção de escaras e oxidações e, após a secagem, é aplicado tricloroetano, substância capaz de dissolver a graxa e o óleo da chapa.

Segundo o CEB (1983), uma técnica alternativa é utilizar chapas de aço fixadas ao concreto por meio de chumbadores, com posterior injeção de resina entre aço e concreto, eliminando assim a probabilidade da formação de bolhas de ar na camada de resina. SOUZA (1990) menciona que esta técnica requer o domínio completo pelos operários, que devem ser bem treinados e especializados, a fim de se garantir o alto nível de qualidade necessário. A superfície do concreto deve ter resistência suficiente para transmitir os esforços de cisalhamento atuantes na ligação, a resistência da chapa não deve ser totalmente explorada e, para se evitar a descolagem da chapa na região de ancoragem, deve-se utilizar chumbadores metálicos ou estender a chapa até regiões onde ela não seja necessária.

Considerando que estas recomendações sejam seguidas, SOUZA (1990), retrata que, os elementos de concreto reforçados com chapas de aço coladas, comportam-se, no estado limite último, como peças comuns armadas com barras de aço e, em serviço, apresentam um comportamento melhor que o das estruturas tradicionais.

As principais desvantagens deste método são: a impossibilidade de se visualizar o processo de fissuração da região sob a chapa de aço, não permitindo que sejam detectadas possíveis deteriorações por corrosão na face interna, causadas por eventual penetração de umidade entre a chapa e a cola; e a tendência de descolamento dos bordos devido à concentração de tensões nesta região.

2.3 Determinação das variáveis de projeto

Antes de se realizar a etapa do projeto referente aos ensaios, fez-se necessário a análise dos parâmetros envolvidos na dissertação. Os principais parâmetros são a resistência característica do concreto (f_{ck}) e o tipo de superfície de contato entre o substrato

e o reparo. São apontados também os principais tipos de ensaios existentes relativos à aderência.

2.3.1 Definição das variáveis

2.3.1.1 Preparação da superfície

O tipo de superfície do substrato tem uma significativa influência na resistência de aderência, de acordo com GY *et al.* (2001). WITTMANN & MULLER (1994) constataram que existem muitas técnicas para o preparo de substratos de concreto, tais como jato de areia, martelo de prego, desgaste manual, jato de água, escarificação com martetele; a fim de se obter uma superfície específica, baseada em investigações preliminares, mas que não foram capazes de avaliar a medida necessária da rugosidade dos substratos reparados. O mesmo autor notou que esses métodos mecânicos de preparo do substrato apenas aumentaram as macrorugosidades, no entanto o aumento da superfície real foi limitada. Pode-se entender por superfície real a superfície que limita o material e o separa do meio que o envolve. Seguindo esta linha, XIONG *et al.* (2003) desenvolveu uma pesquisa de comparação experimental da influência da remoção do substrato de concreto aplicando-se ácido clorídrico, na resistência de aderência entre o substrato de concreto e os materiais de reparo. Os resultados mostraram que o substrato de concreto que sofreu um ataque de solução de ácido clorídrico com uma concentração apropriada por um período de tempo determinado, resultou em um significativo aumento do número de poros (10-50 μm), microfissuras e redução nas partículas pequenas de areia, principalmente havendo um notável aumento na microrugosidade do substrato de concreto. Como resultado, a resistência de aderência entre o substrato e o material de reparo teve uma perceptível melhora.

ABU-TAIR *et al.* (2000), mostraram que a deterioração do concreto geralmente começa pela superfície e se propaga pelo seu interior. O concreto deteriorado deve ser removido e reparado com um novo material, o que leva a uma estrutura composta concreto-material reparado. Para assegurar uma total interação estrutural entre os concretos, faz-se necessário uma boa aderência entre eles. A própria aderência depende de que se consiga uma superfície limpa e áspera, de forma que se estude os efeitos da rugosidade da superfície sobre a aderência entre material de reparo e substrato de concreto. Não há nenhuma norma para se medir a rugosidade da superfície do concreto. Os referidos autores observaram cinco diferentes superfícies reparadas por três tipos de materiais para avaliar o

efeito da rugosidade sobre a aderência entre material de reparo e substrato de concreto. Os tipos de superfícies foram: lisa, preparada com tiro de agulha, manualmente por cinzel, manualmente por escova de arame e fraturada. Os tipos de materiais de reparo foram uma resina epoxídica, um material cimentício modificado e um concreto de cimento Portland comum. Os resultados mostraram que o método de preparo da superfície feito manualmente por cinzel foi o que garantiu uma maior resistência de aderência e, de forma geral, o concreto de cimento comum foi o material de reparo que melhor se aderiu às superfícies, particularmente nas amostras onde o material foi prensado.

CLÍMACO (1975) relatou que a propriedade de aderência pode ser melhorada por meio da remoção da fraca camada na interface e do tratamento da superfície, tornando-a rugosa. KAMADA *et al.* (1998) e KAMADA & LI (2000) estudaram a influência da preparação da superfície sobre o mecanismo de aderência e relataram que, em geral, a preparação do substrato de concreto é considerado essencial para se conseguir um reparo durável.

Preparo do substrato pode ser entendido como o conjunto dos procedimentos efetuados antes da limpeza superficial e da aplicação propriamente dita dos materiais e produtos de correção, ou seja, são tratamentos prévios da superfície dos componentes estruturais. Ressalta-se que os procedimentos de preparação e limpeza do substrato são tão importantes que autores como HELENE (1992) e RIPPER & SOUZA (1998) os consideram responsáveis por 50% do sucesso da recuperação ou reforço. Pode-se observar os procedimentos de preparo do substrato na Tabela 2.1 e sua adequação de acordo com o tipo de superfície (HELENE, 1992).

Tabela 2.1 - Procedimentos de preparo do substrato (HELENE, 1992)

Procedimento mais adequado para preparo da superfície		
Procedimento	Concreto com superfície	
	Seca	Úmida
Escarificação manual	Adequado	Adequado
Disco de desbaste	Aceitável	Adequado
Escarificação mecânica	Adequado	Adequado
Demolição	Adequado	Adequado
Lixamento manual	Inadequado	Aceitável
Lixamento elétrico	Adequado	Aceitável
Escovamento manual	Adequado	Aceitável
Pistola de agulha	Inadequado	Inadequado

Jato de areia	Adequado	Adequado
Disco de corte	Aceitável	Adequado
Queima controlada	Adequado	Inadequado
Remoção de óleo e graxa	Inadequado	Adequado
Máquina de desbaste	Aceitável	Adequado

Após o tratamento superficial, deve-se limpar a superfície para que se evite materiais que não o substrato e o material de reparo. Neste sentido, HELENE (1992) define que a limpeza da superfície pode ser entendida como o conjunto dos procedimentos efetuados instantes antes da aplicação propriamente dita dos materiais de reparo. Os procedimentos de limpeza comumente utilizados podem ser observados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Procedimentos de limpeza do substrato (HELENE, 1992)

Procedimento mais adequado para limpeza da superfície		
	Concreto com superfície	
Procedimento	Seca	Úmida
Jato de água fria	Inadequado	Adequado
Jato de água quente	Inadequado	Adequado
Vapor	Inadequado	Adequado
Soluções ácidas	Inadequado	Aceitável
Soluções alcalinas	Inadequado	Adequado
Jato de ar comprimido	Adequado	Aceitável
Solventes voláteis	Adequado	Adequado
Saturação com água	Inadequado	Inadequado
Aspiração a vácuo	Adequado	Inadequado

RIPPER & SOUZA (1998) mostraram em seu trabalho que, tanto a correta escolha da tecnologia a adotar, quanto o tipo de intervenção superficial, em função da patologia

existente ou do tipo do trabalho que se pretende realizar, assim como também a execução da tarefa, são fatores fundamentais na qualidade final que será obtida, quer no aspecto estético, quer na garantia de potencialização da máxima aderência entre o material existente e o de reparo e/ou reforço, quer ainda na diminuição da capacidade resistente do concreto da peça estrutural em questão.

De acordo com CLÍMACO (1975), para a avaliação de técnicas de reparo estrutural, a interface deve simular a textura usual, ou seja, áspera, com o agregado exposto. O uso de superfícies obtidas por corte não parece adequado por serem exageradamente lisas e não representarem efetivamente situações reais de reparo, ou, até mesmo, o caso de juntas de concreto pré-moldado. Dessa forma, tal teste pode fornecer resultados desfavoráveis para determinado tipo de tratamento da junta e, condenar esse tratamento sem que corresponda à realidade, já que a superfície de teste não representa uma situação real.

Pode-se apontar diversas formas de preparo da superfície do substrato.

Muitas destas já foram mencionadas na revisão bibliográfica. A fim de enriquecer o assunto pode-se exemplificar como alguns autores procederam em suas pesquisas.

MORENO & SELMO (2002) adotaram superfícies dos substratos de concreto jateadas com areia fina passante em peneira 0,6 mm, o suficiente apenas para retirar a nata de cimento e expor a sua estrutura porosa e pequena parte das partículas do agregado graúdo. Esse procedimento foi adotado para promover um aumento da rugosidade do substrato de concreto e representar melhor os substratos de obra usualmente reparados, que são, no mínimo, apicoados.

GARCIA (1998) adotou em todos sistemas de reparo junta com superfície escarificada mecanicamente e totalmente seca. A escarificação mecânica foi feita com escova de aço adaptada a uma furadeira elétrica, até expor o agregado graúdo, a uma profundidade de 5 a 10mm.

FAGURY & LÍBORIO (2002) realizaram um tratamento superficial na face rompida do concreto velho com o objetivo de melhorar a aderência com o concreto de reparo. Tal tratamento foi baseado na escarificação manual da superfície de contato, para que os agregados estivessem livres de camadas de pasta e superfície carbonatada, aumentando assim a contribuição da aderência mecânica. O procedimento de escarificar foi realizado radialmente, das arestas para o centro, evitando golpes que pudessem danificar as bordas. Outra observação interessante foi a escolha (por meio de ensaios complementares) do ferramental mais adequado: as talhadeiras com cortes mais finos proporcionaram melhor resultado, pois tinham menor área de impacto. À medida que se fez esse tratamento, foi retirando-se todo o material solto, mal compactado e segregado até que se atingisse um concreto de boa qualidade, obtendo-se assim uma superfície rugosa e coesa, propiciando boas condições de aderência.

Um outro tipo de tratamento superficial, não observado muito na prática, é o ataque ácido. XIONG *et al.* (2003) como relatado no capítulo anterior, removeu a superfície do substrato de concreto aplicando-se ácido clorídrico e aumentando assim a micro rugosidade do mesmo.

Deve-se escolher o tipo de tratamento de forma que se tenha o resultado esperado. RIPPER & SOUZA (1998) relataram, por meio de ensaios de arrancamento (“pull-out”), que para um mesmo conjunto de concreto existente e material de reposição e, definindo-se hipótese de ruptura na interface, em função do tratamento dado à superfície existente, observaram que: a) 3 em 8 ensaios para superfícies apenas submetidas a jato de areia apresentam ruptura na interface; b) 5 em 16 ensaios para superfícies apicoadas e depois submetidas a jato de areia apresentaram ruptura na interface, mas com uma força de arrancamento inferior em 54% à obtida com tratamento apenas com jato de areia. Assim concluíram que, comparativamente, a superfície fica melhor preparada na segunda situação, porém mais susceptível de possibilitar a ocorrência de microfissuras na interface, responsáveis pela ruptura sob esforços mais baixos.

Segundo CLÍMACO (1990), não é difícil definir um padrão razoável para escarificação das superfícies de teste. Na classificação para tratamento de superfícies proposta pelo ACI-303 (1997), a profundidade de tratamento definida como “média” para jato de areia (suficiente para expor de forma geral o agregado graúdo, com profundidade máxima de exposição de aproximadamente 6 mm) parece realista e bastante fácil de se obter com escarificação manual ou mecânica, principalmente se feita logo após a desfôrma do corpo de prova. Obviamente, o máximo diâmetro do agregado pode ser especificado para cada situação particular.

O comitê ACI-303 (1997) possui as seguintes caracterizações:

“Brush” – remove a matriz de cimento e expõe o agregado fino;

“Light” – suficiente para expor o agregado fino com exposição casual do agregado graúdo;

“Medium” – expõe de forma geral o agregado graúdo;

“Heavy” – expõe o agregado graúdo até um terço de seu diâmetro.

Assim sendo, definiu-se dois tipos de superfície cuja dissertação aborda: superfície natural e superfície escarificada.

A superfície natural foi aquela que antes do lançamento do novo concreto foi apenas limpa por jato de água. E a superfície escarificada foi aquela que antes do lançamento do novo concreto foi desgastada mecanicamente até expor o agregado graúdo. Após a exposição do agregado, utilizou-se um jato de água para limpeza da superfície,

proporcionando um tratamento caracterizado como “medium” pelo ACI-303 (1997). No entanto não foi utilizado jato de areia no tratamento superficial.

Quanto à limpeza da superfície, adotou-se o procedimento de jato de água fria, que tem como vantagem a limpeza do substrato ao mesmo tempo em que o umedece, atendendo as considerações de ANDRADE (1997) que aprecia a existência de 4 condições na variação higrométrica de um agregado graúdo. São elas: seco em estufa, seco ao ar, saturado com superfícies secas e úmida. Para efeito de dosagem, caracterização de propriedades e fabricação de concreto, o agregado deve ser considerado na condição saturado superfície seca (sss), que é a condição em que não absorve nem libera água livre em sua superfície, a qual pode alterar a quantidade de água de amassamento do concreto. Pode-se conseguir esta situação por imersão do corpo de prova ou na prática, essa situação pode ser considerada por molhagem intensa, a qual foi utilizada nesta dissertação.

2.3.1.2 Resistência do concreto

Um concreto é definido, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), como um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água. O concreto é constituído basicamente de cimento, água e agregados, sendo que hoje em dia, já se considera um quarto componente, os aditivos.

Pode-se classificá-lo segundo sua resistência em três grupos:

Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;

Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 MPa;

Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa;

O concreto é um dos materiais mais adequados para resistir à compressão, assim sua especificação se faz por meio da resistência à compressão do material. Sendo a resistência do concreto função do processo de hidratação do cimento, o qual é relativamente lento, tradicionalmente as especificações e ensaios de resistência do concreto são baseados em corpos de prova curados em condições específicas de temperatura e umidade por um período de 28 dias, de acordo com BAUER (2000).

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), por meio de observações do comportamento elasto-plástico, o concreto é um material complexo e muitas características não seguem as leis de mistura de dois componentes. Por exemplo, sob carga de compressão, tanto o agregado como a pasta, testados separadamente, rompem elasticamente, enquanto que o concreto mostra um comportamento inelástico antes da fratura. A resistência do concreto porém é, em geral, mais baixa do que as resistências individuais dos dois componentes. Estas anomalias no comportamento do concreto são explicadas com base na sua estrutura, na qual a zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento tem um papel muito importante.

A resistência de peças estruturais de concreto sem armadura cujos esforços não sejam meramente de caráter compressivo é limitada a capacidade de resistência à tração do mesmo. De acordo com QUEIRÓZ (1999) o momento de fissuração depende da resistência à tração do concreto, que é maior para concretos de maior resistência. Segundo CARRASQUILLO *et al.* (1981), a resistência à tração e à compressão é reduzida devido à retração do concreto e esta redução é maior para concretos de alta resistência. Também foi reportado que a resistência à tração do concreto é mais afetada pela mudança nas condições de cura do que a resistência à compressão. QUEIRÓZ (1999) apontou que, em relação à retração do concreto, sabe-se que é maior para vigas de maior dimensão, devido ao maior calor de hidratação e há menor eficiência da cura ao atingir o concreto do núcleo do elemento, resultando em uma menor resistência à tração.

A partir da mecânica da fratura, RUIZ & PLANAS (1994), PLANAS *et al.* (1995) e RUIZ (1996), chegaram à conclusão de que o valor do momento crítico (ruptura da peça estrutural) de vigas de concreto com armadura não é igual ao de vigas sem armaduras, uma vez que, na primeira, deve-se considerar a influência da taxa de armadura, do cobrimento e das características de aderência da mesma e, na segunda, considera-se principalmente a resistência à tração do concreto.

De acordo com GUARDA & LIMA (2000) as propriedades do concreto que mais afetam os valores dos deslocamentos são as resistências à compressão, à tração e o módulo de elasticidade. De um modo geral, o aumento do f_{ck} acarreta uma redução dos deslocamentos finais, diminuídos tanto com o aumento do módulo de elasticidade e, conseqüentemente, da rigidez do elemento, quanto com a melhoria da resistência à tração na flexão, retardando o início da fissuração. Cabe comentar, entretanto, que a redução dos deslocamentos não tem a mesma proporção do aumento da resistência do concreto à compressão e também que, se esse aumento for obtido a partir de um consumo muito elevado de cimento, os benefícios decorrentes da resistência mais alta podem até ser anulados pelo aumento da retração química.

A seguir é abordado a resistência à compressão, principal característica do concreto, a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

2.3.1.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante do concreto, pois fornece uma estimativa do desempenho do concreto no que diz respeito à resistência mecânica e, indiretamente, a sua durabilidade.

Essa resistência é obtida por meio da aplicação de carregamento em corpos de prova cilíndricos ou cúbicos de diferentes tamanhos, dependendo da normalização de cada país. No Brasil, a resistência à compressão do concreto é obtida por meio do ensaio padronizado pela NBR 5739/80, a partir de corpos de prova cilíndricos de 150mm x 300mm. Quando se trata de altas resistências, o uso destes corpos de prova geram dificuldades pela necessidade de grande capacidade da máquina de ensaio. A solução utilizada é a redução das dimensões dos corpos de prova, adotando-se 100mm x 200mm, mantendo-se a relação de duas vezes entre a altura e o diâmetro da base e, respeitando ainda, a exigência de que o diâmetro do corpo de prova seja maior que quatro vezes o diâmetro máximo do agregado.

Os corpos de prova menores, em geral, apresentam maior resistência quando comparados aos maiores. LIMA (1997) observou uma relação de 0,96 entre resistências médias em corpos de prova cilíndricos de 150mm x 300mm e de 100mm x 200mm. METHA & MONTEIRO (1994) e SHAH & AHMAD (1994) indicaram que essa correlação é em torno de 5%. CARRASQUILLO *et al.* (1981) indicaram correlação de 10%. BORGES *et al.* (1999) avaliaram a influência do tamanho do corpo de prova na curva *tensão versus deformação* do concreto submetido à compressão uniaxial e concluíram que há uma redução da ductilidade pós-pico com o aumento do tamanho do corpo de prova, devido à deformações localizadas.

Nos trabalhos de BARBOSA (2001) e TAVARES (2000) comenta-se que a resistência de aderência é influenciada pela resistência à compressão do concreto e, de um modo geral, quanto maior a resistência mecânica do concreto maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço-concreto.

É importante comentar que apesar do presente trabalho não ser relacionado ao estudo da aderência aço-concreto, há uma relação entre a resistência à compressão e resistência de aderência. Pode-se basear no fato da resistência de aderência ser comandada pela resistência à tração do concreto que, por sua vez, está diretamente relacionada com a resistência à compressão. Logo, um aumento da resistência à compressão, resulta em um aumento na resistência da aderência devido a densificação e a diminuição da espessura da zona de transição entre os materiais de contato.

No presente trabalho seguiu-se os procedimentos da NBR 5739/80. No entanto, utilizou-se corpos de prova cilíndricos de 100mm x 200mm para todas as amostras dos materiais empregados.

2.3.1.2.2. Resistência à tração

A resistência à tração do concreto pode ser obtida por três maneiras diferentes:

- 1) Resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova cilíndrico de concreto. O ensaio de compressão diametral (*splitting test*), proposto pelo brasileiro Lobo Carneiro e desenvolvido no Japão, é o mais utilizado para avaliar a resistência à tração; é de fácil execução e fornece resultados mais uniformes do que os outros ensaios de tração. Outra grande vantagem é poder utilizar os corpos de prova do mesmo formato e tamanho que na compressão axial;
- 2) Resistência à tração na flexão, onde se aplica uma carga concentrada em um prisma padronizado de concreto de 150mm x 150mm x 500mm. A carga pode ser aplicada no centro do vão ou com duas forças aplicadas nas seções transversais nos terços, determinando-se a tensão teórica máxima de tração atingida nas fibras inferiores;
- 3) Resistência à tração direta, que fornece os menores resultados entre os ensaios de tração, principalmente devido à dificuldade de se conseguir uma excentricidade nula na aplicação da força de tração, acarretando uma pequena flexão. É um ensaio de difícil execução, mas é considerado o ensaio padrão.

MEHTA & MONTEIRO (1994) mencionam que as resistências à tração e à flexão típicas do concreto são da ordem de 10 a 15% da resistência à compressão. A diferença atribui-se à estrutura heterogênea e complexa do concreto.

A resistência à tração apresenta uma relação com a resistência à compressão. Em geral aumentando-se a resistência à compressão, a resistência à tração também aumenta. VANDERLEI & GIONGO (1999) fizeram uma revisão das relações existentes entre resistência característica à tração (f_{ctk}) e a resistência característica à compressão (f_{ck}) do concreto.

- 1) A NBR 6118 (1978), que ainda não foi ajustada para incorporar concretos de alta resistência, sugere que na ausência de resultados experimentais a resistência característica à tração seja calculada por:

$$\begin{aligned} f_{ctk} &= f_{ck} / 10 && \text{para } f_{ck} \leq 18 \text{ MPa} && (1) \\ f_{ctk} &= 0,06 f_{ck} + 0,7 \text{ MPa} && \text{para } f_{ck} > 18 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Estas expressões fornecem o valor estimado para resistência à tração direta do concreto em função da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (f_{ck}) de dimensões 150mm x 300mm.

A resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova ($f_{ctk,sp}$) é estimada em cerca de 10% maior que os resultados obtidos através do ensaio por tração direta. Logo a expressão para resistência a tração na compressão diametral do concreto pode ser expressa pela Equação 2.

$$f_{ctk,sp} = 0,06 f_{ck} + 0,7 \text{ MPa} \quad \text{para } f_{ck} > 18 \text{ MPa} \quad (2)$$

- 2) A Revisão da NB-1 (1999) indica que a resistência à tração direta média pode ser estimada pela Equação 3, para concretos com resistência característica à compressão (f_{ck}) menor que 50 MPa.

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck})^2} \quad (3)$$

Segundo a Revisão da NB-1 (1999) a resistência característica à tração na compressão diametral é adotada como 10% maior, resultando a Equação 4:

$$f_{ctmsp} = 0,33 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck})^2} \quad (4)$$

- 3) O Código Modelo – MC90 CEB-FIP (1991), indica que para concreto com resistência à compressão (f_{ck}) entre 12 MPa e 80 MPa, em corpos de prova cilíndricos de 150mm x 300mm, a Equação 5 estima a resistência característica à tração direta do concreto.

$$f_{ctk} = 0,30 f_{ck}^{2/3} \quad (MPa) \quad (5)$$

Adaptando a expressão do CEB-FIP (1991) para estimar a resistência à tração na compressão diametral de corpos de prova cilíndricos e mantendo-se o mesmo aumento de 10% tem-se:

$$f_{ctk,sp} = 0,33 f_{ck}^{2/3} \quad (MPa) \quad (6)$$

- 4) A Norma norueguesa NS 3473E (1992) determina a Equação 7 para estimar a resistência característica à tração direta do concreto com resistência à compressão entre 20 MPa e 94 MPa, indicando um valor nominal máximo para a resistência à tração de 4 MPa.

$$f_{ctk} = 0,30 f_{ck}^{0,6} \quad (MPa) \quad (7)$$

A Equação 7 está relacionada com a resistência característica à compressão (f_{ck}) obtida em ensaios de corpos de prova cúbicos de 100mm de aresta. Logo, segundo o CEB-FIP (1991), transformando os parâmetros da Equação 7 para resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de 150mm x 300mm ($f_{ck} / 0,86$) e obtendo a resistência à tração na compressão diametral aumentando em 10% temos ($f_{ctk,sp} = 1,1 \cdot f_{ctk}$):

$$f_{ctk,sp} = 0,36 f_{ck}^{0,6} \quad (MPa) \quad (8)$$

- 5) CARRASQUILLO *et al.* (1981), baseando-se em resultados de ensaios à compressão diametral em corpos de prova cilíndricos, propôs para resistência à tração na compressão diametral do concreto ($f_{ctk,sp}$) com resistência a compressão (f_{ck}) variando de 21 MPa a 83 MPa, a Equação 9:

$$f_{ctm,sp} = 0,54 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (MPa) \quad (9)$$

onde a resistência à compressão do concreto é medida em corpos de prova cilíndricos de 100mm x 200mm.

Serão ensaiados corpos de prova cilíndricos de 100mm x 200mm à compressão uniaxial e também à compressão diametral, ou tração indireta. Mesmo contando com valores experimentais, as equações teóricas acima descritas foram usadas para comparação com os valores experimentais.

2.3.1.2.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal (E) é definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante no ensaio de corpos de prova de concreto sob compressão axial. Este parâmetro resulta na inclinação da curva *tensão - deformação* do concreto em um ponto e, de acordo com o ponto escolhido, tem-se valor diferente para o módulo de elasticidade. Em vista disso, são mais utilizados dois tipos de módulo: o tangente, ou inicial, e o secante.

O módulo de elasticidade tangencial inicial (E_{ci}) é obtido por meio da inclinação da reta tangente na origem da curva *tensão - deformação* do concreto, e só é utilizada para cálculos em que o nível de carregamento é baixo e não acarreta formação de fissuras. O módulo secante (E_c) é obtido por meio da inclinação da reta que liga a origem ao ponto da curva que corresponde a 40% da tensão de ruptura e é de grande importância para o cálculo dos elementos estruturais. Em geral, o valor do módulo secante varia de 80 a 90% do valor tangente na origem ($E_c = 0,9 E_{ci}$).

O módulo de elasticidade à compressão do concreto, varia de 14×10^3 a 40×10^3 MPa. O significado do limite de elasticidade em projeto estrutural é devido ao fato dele representar a deformação elástica máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente.

Para se medir o módulo de elasticidade experimentalmente é necessário um equipamento que registre simultaneamente a deformação, no mesmo sentido de aplicação da carga axial e a extensão diametral do corpo de prova cilíndrico durante os ensaios de compressão. No entanto, na falta de determinação experimental, a previsão do módulo de deformação pode ser feita segundo as normas técnicas resumidas na tabela 3.3, descrita por FREITAS *et al.* (2000).

Neste trabalho o módulo de elasticidade não foi determinado experimentalmente. Este é um importante parâmetro ao se fazer a análise teórica da flexão de barras constituídas por diferentes materiais. Desta forma utilizou-se a fórmula proposta pela NBR 6118/00 apresentada na Tabela 2.3 que melhor se adequou à situação.

AUTOR	EXPRESSÃO	OBSERVAÇÕES
CARRASQUILLO et al [8]	$E_c = 3320\sqrt{f_{cm}} + 6900$	E_c = módulo secante 21 MPa < f_{cm} < 83 MPa
SHIH et al [16]	$E_c = 4660\sqrt{f_{cm}} - 1370$	E_c = módulo secante 21 MPa < f_{cm} < 83 MPa
ACI 318 -R95 [1]	$E_c = 4734\sqrt{f'_c}$	E_c = módulo secante para $0,45f'_c$ $f_{cm} = f'_c + 7$, para $f'_c < 21$ MPa $f_{cm} = f'_c + 8$, para $21 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 34$ MPa $f_{cm} = f'_c + 10$, para $f'_c > 34$ MPa
CEB-FIP MC 90	$E_{ci} = \delta_E E_{c0} \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$	E_{ci} = módulo tangente na idade de 28 dias δ_E é função do tipo de agregado (0,7 a 1,2) $E_{c0} = 21500$ MPa ; $f_{ck} \leq 80$ MPa
EC2-99	$E_{cm} = 9500(f_{ck} + 8)^{1/3}$	E_{cm} = módulo secante para $0,40 f_{ck}$ $f_{ck} \leq 90$ MPa
NBR 6118-78	$E_c = 6600\sqrt{f_{cm}}$	E_c = módulo tangente
Projeto de Revisão NBR 6118-00	$E_c = 5600\sqrt{f_{ck}}$	E_c = módulo tangente; $j \geq 7$ dias

2.3.2 Métodos para avaliação da aderência

Existem vários métodos de ensaio para avaliar a resistência de aderência em argamassas e concretos aplicados a substratos porosos. A principal diferença diz respeito ao tipo de esforço que é aplicado na interface entre os dois materiais. Neste item são descritos resumidamente os métodos mais importantes, segundo PAREEK *et al.* (1995), CLÍMACO (1990), GARCIA (1998), MORENO & SELMO (2002), CHEN *et al.* (1995).

2.3.2.1. Resistência de aderência à tração direta

O ensaio de resistência de aderência à tração direta consiste na aplicação de uma carga de tração perpendicular à superfície de contato entre o material de reparo e o substrato.

Existem algumas configurações distintas para a realização deste ensaio, como mostradas na Figura 2.4. O método de ensaio mais usual é o apresentado na Figura 2.4-c, que é normalizado pela NF P 18-853 (1986), no qual a argamassa é aplicada sobre a superfície de uma placa de concreto e os corpos de prova são cortados com uma serra tipo copo, formando cilindros.

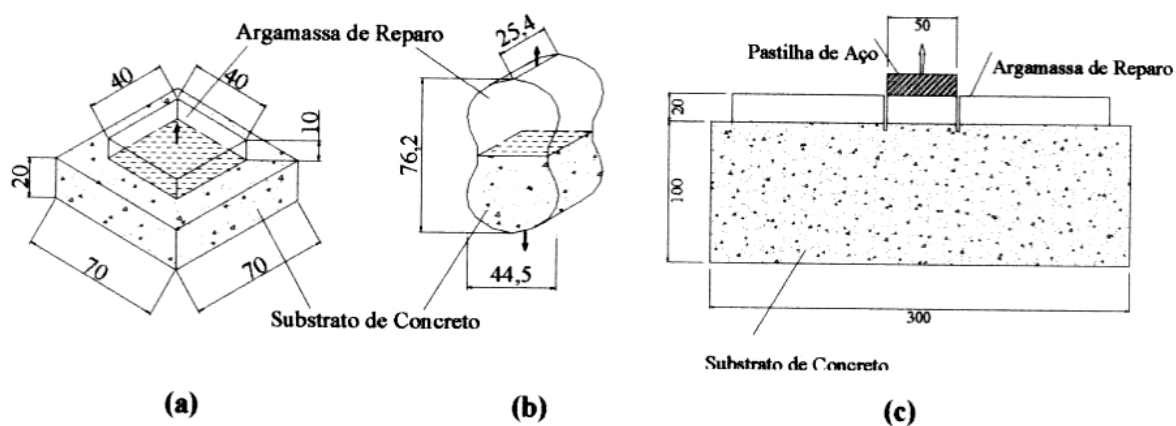


Figura 2.4 – Configurações do ensaio de resistência de aderência à tração direta. Desenho sem escala. Dimensões em mm.

2.3.2.2. Resistência de aderência à tração na flexão

Nesse ensaio o carregamento é concentrado e realizado pelo cutelo central superior, com o corpo de prova apoiado conforme Figura 2.5. Os corpos de prova são mistos e formados, metade pelo substrato de concreto, metade pelo material de reparo.

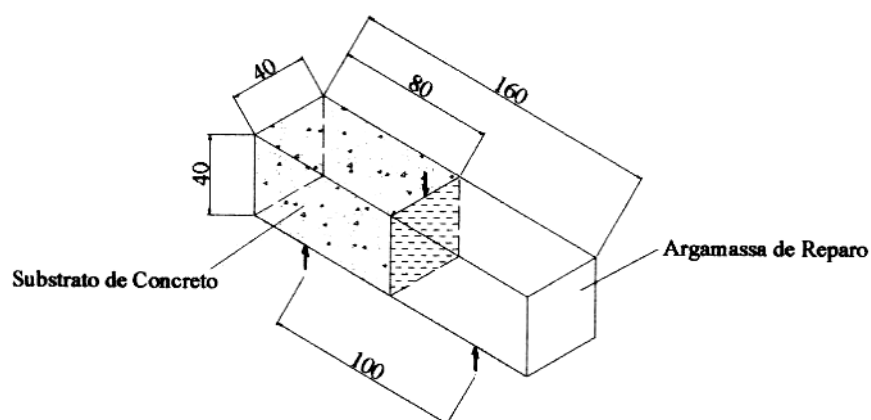


Figura 2.5 - Configuração do ensaio de resistência de aderência à tração na flexão. Desenho sem escala. Dimensões em mm.

2.3.2.3. Resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão

O ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão no sentido longitudinal do corpo de prova misto, como mostra a Figura 2.6. O carregamento gera uma tensão de cisalhamento oblíqua proporcional ao ângulo de inclinação da superfície de aderência, de 30°. O corpo de prova também pode ter formato cilíndrico, com 100 mm de altura total, 50 mm de diâmetro e o mesmo ângulo de inclinação de 30°.

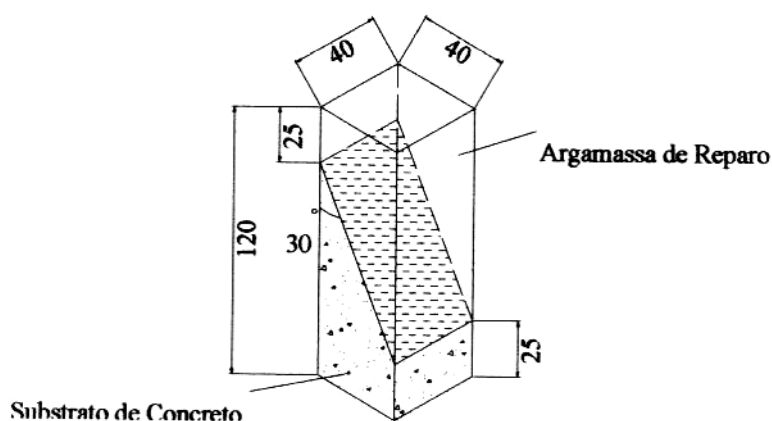


Figura 2.6 - Configuração prismática do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão. Desenho sem escala. Dimensões em mm.

2.3.2.4. Resistência de aderência ao cisalhamento direto

A configuração do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto é a mesma do ensaio de resistência à tração na flexão (item 2.3.2.2). No entanto, os esforços são alterados nesse ensaio em função da forma de aplicação do carregamento, como pode ser visto na Figura 2.7.

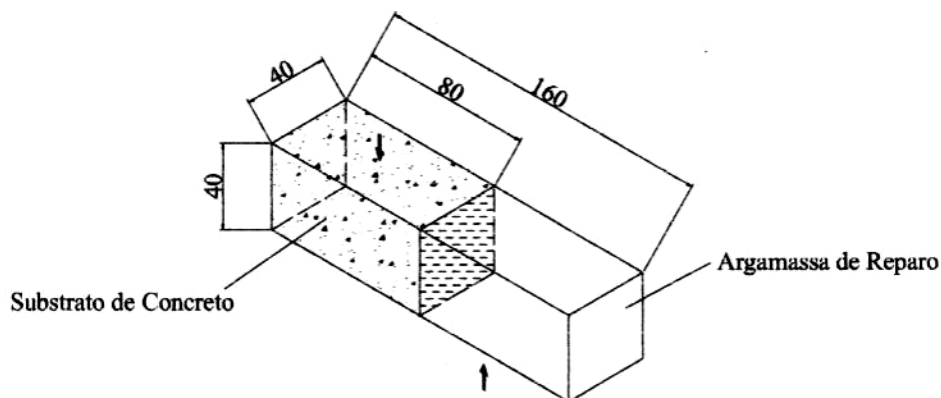


Figura 2.7 - Configuração do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento direto. Desenho sem escala. Dimensões em mm.

Nesse caso não são produzidas tensões de compressão ou de tração na interface argamassa/substrato, gerando apenas tensões de cisalhamento. A tensão máxima de cisalhamento pode ser calculada pela carga máxima de ruptura dividida pela área da seção transversal do corpo de prova.

2.3.2.5. Resistência de aderência ao cisalhamento na flexão

Neste método de ensaio, a argamassa de reparo é aplicada a um substrato de concreto prismático que possui uma entalhe em forma trapezoidal, conforme a configuração apresentada na Figura 2.8. Esse ensaio é normalizado pela NF P 18-851 (1986).

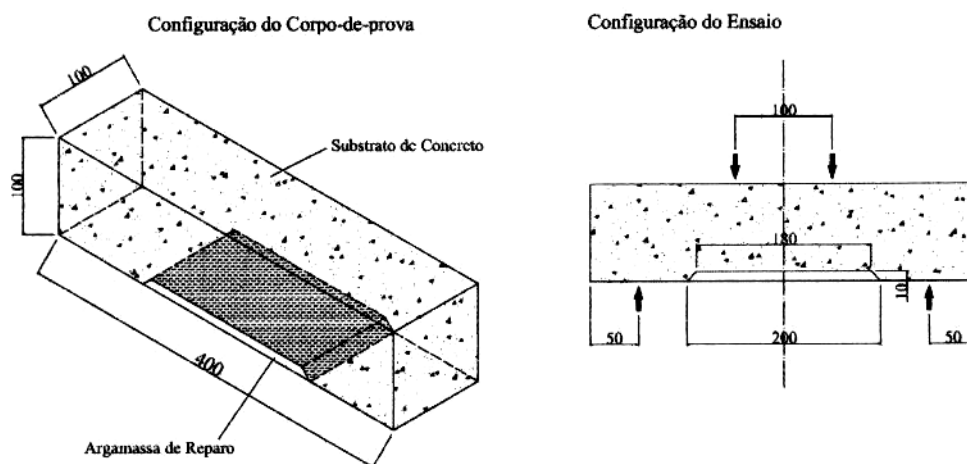


Figura 2.8 - Configuração do corpo de prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (NF P 18-851, 1986). Desenho sem escala. Dimensões em mm.

O ensaio é realizado pela aplicação da carga por meio de dois cutelos superiores distantes 100 mm, com o corpo de prova reconstituído voltado com a argamassa para baixo.

Na interface entre a superfície de concreto horizontal e o reparo, o esforço gerado pelo carregamento é de cisalhamento puro, enquanto nas duas faces inclinadas da interface, os esforços de cisalhamento e de tração são combinados. Outras configurações possíveis são as propostas por ROBINS & AUSTIN (1995), como mostrada a Figura 2.9.

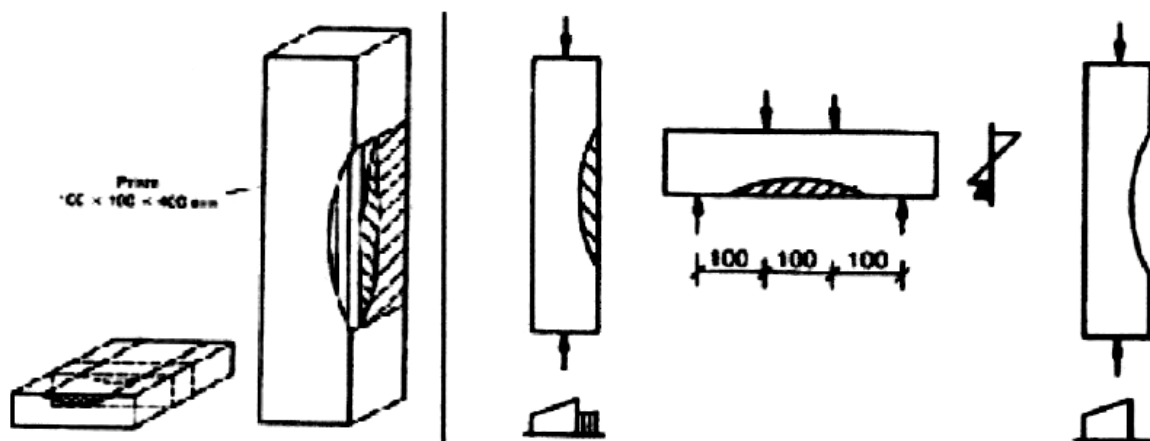


Figura 2.9 - Configuração do corpo de prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão e à compressão (ROBINS & AUSTIN, 1995). Desenho sem escala. Dimensões em mm.

O carregamento na flexão é o mesmo da NF P 18-851 (1986), no entanto, os autores propuseram ainda a realização do ensaio com o carregamento de corpos de prova à compressão, com a carga aplicada no sentido longitudinal da peça reconstituída. Outra diferença básica está na forma do entalhe, que passa a ter o perfil em arco, no lugar da forma trapezoidal.

CLÍMACO (1990) propôs o ensaio de compressão-cisalhamento do prisma reconstituído com junta diagonal ilustrado na Figura 2.10.

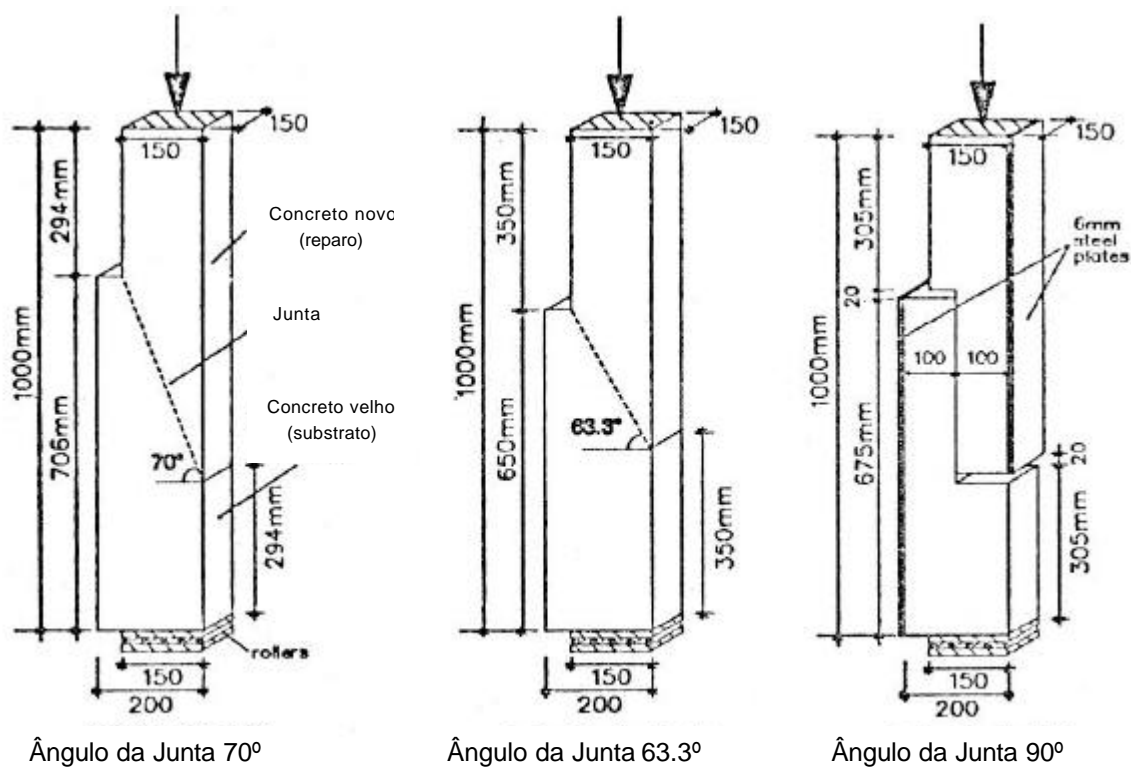


Figura 2.10 – Ensaio de compressão-cisalhamento (CLÍMACO, 1990)

O ensaio consiste na compressão axial de um corpo de prova prismático composto, com a junta fazendo determinado ângulo com a direção da carga. 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. GARCIA (1998) seguiu o mesmo ensaio, variando o ângulo de contato entre as superfícies e adotando-se corpos de prova menores.

CHEN *et al.* (1995) adotou uma outra configuração para o ensaio de cisalhamento direto como pode ser observado na Figura 2.11. O ensaio é constituído de um tipo de material B, prensado por um outro tipo de material A, em forma de sanduíche.

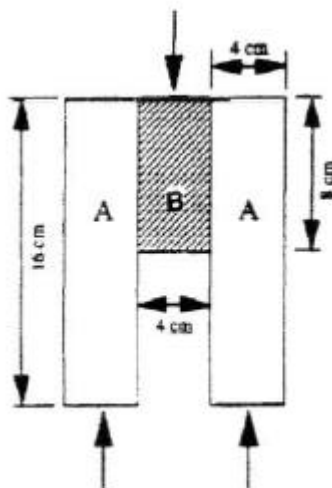


Figura 2.11 – Ensaio sanduíche (CHEN *et al.*, 1995)

Foi adotado nesse trabalho o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão, aproveitando-se da configuração do entalhe no substrato para receber o material de reparo pela norma NF P 18-851 (1986) e as normas adotadas foram a NBR 5738 (1994) para moldagem e cura de corpos de prova prismáticos de concreto e a NBR 12142 (1991) para determinação da resistência à tração na flexão.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental teve como objetivo estudar a resistência de aderência entre concretos de diferentes idades em vigas de concreto, analisando-se apenas a região de momento fletor constante.

Foram moldadas 35 vigas, as quais foram submetidas a duas cargas concentradas simétricas visando verificar a correlação entre o tipo de superfície de contato e a variação da resistência característica do material de reparo com a resistência de aderência nas regiões de flexão pura.

O carregamento das vigas foi suspenso quando ocorreu a ruptura das mesmas. O monitoramento das deformações no concreto foi feito por meio de extensômetro mecânico móvel (Tensotast) e as flechas também foram acompanhadas por meio de extensômetro mecânico.

3.1 Materiais

Serão mostradas aqui as principais características dos materiais que foram utilizados para confecção dos corpos de prova.

3.1.1 Agregado miúdo

Foi usada na confecção do concreto, areia média, lavada e peneirada. Suas propriedades físicas estão na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas da areia

Diâmetro máximo	2,36 mm
Módulo de finura	3,06 %
Peso específico aparente	1,58 g/cm ³
Peso específico absoluto	2,62 g/cm ³

3.1.2 Agregado graúdo

Foi usado como agregado graúdo brita gnaisse. Houve a necessidade de se trabalhar com dois diâmetros máximos: de 19,0 mm para o concreto do substrato denominado brita 1 e 4,5 mm para o concreto de reparo denominado brita 0. As características obtidas dos ensaios físicos para os dois tipos de brita estão relacionadas nas Tabelas 3.2 e 3.3:

Tabela 3.2 – Propriedades físicas da brita 1

Diâmetro máximo	19,0 mm
Módulo de finura	7,01 %
Peso específico aparente	1,54 g/cm ³
Peso específico absoluto	2,66 g/cm ³

Tabela 3.3 – Propriedades físicas da brita 0

Diâmetro máximo	4,75 mm
Módulo de finura	5,33 %
Peso específico aparente	1,66 g/cm ³
Peso específico absoluto	2,74 g/cm ³

Pode-se observar as curvas granulométricas dos agregados na Figura 3.1.

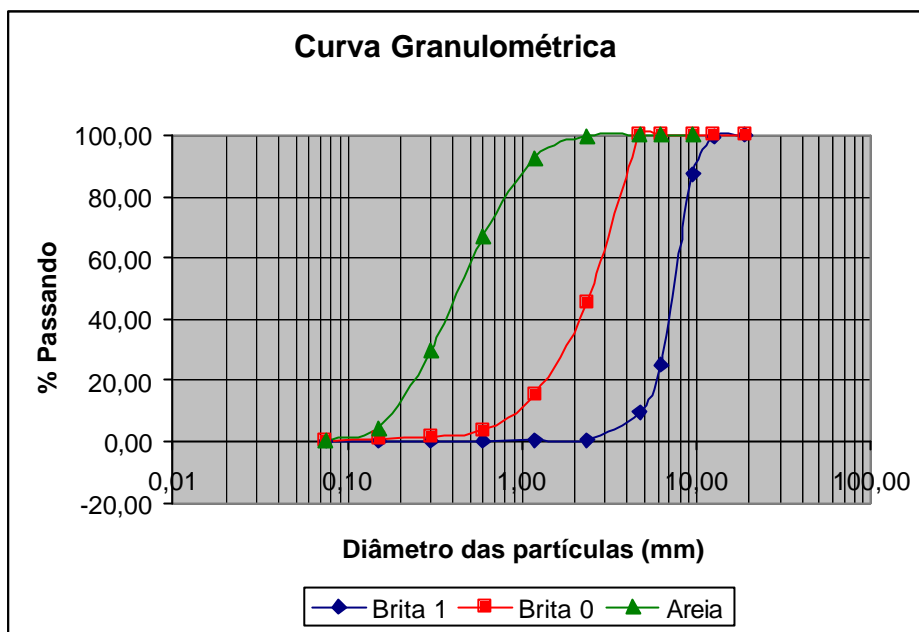


Figura 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados

3.1.3 Cimento

Na confecção do concreto convencional foi empregado o cimento Portland CP II E 32, marca Votoran. As propriedades físicas do cimento são relacionadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Propriedades físicas do cimento

Peso específico	2,99 g/cm ³
Finura do cimento (Blaine)	3183,47 cm ² /g
Índice de finura	1,38 %
Tempo de pega (início / fim)	1 / 3,2 h

3.1.4 Concreto

Para confecção das vigas de referência de concreto denominadas VR1, VR2, VR3, VR4 e VR5 foi utilizado um traço, em massa, na proporção de 1:1,7:3,3 (cimento, areia e brita de gnaiss com diâmetro máximo de 19 mm) e uma relação água/cimento de 0,60, visando atingir um f_{ck} de 18 MPa (Tabela 3.5). As vigas que

receberam o reparo, denominadas de substrato possuem a mesma composição das vigas de referência.

O material de reparo utilizado também foi o concreto. Empregou-se três tipos de concreto, variando a sua resistência característica (f_{ck}): reforço com concreto de 18, 25 e 32 MPa. Para o concreto de 18 MPa utilizou-se uma dosagem proporcional ao das vigas de referência, diminuindo-se apenas o diâmetro máximo dos agregados (de 19 mm para 4,75 mm). O traço, em massa, adotado foi na proporção 1:1,55:3,1 e uma relação de água/cimento de 0,60. Na confecção do concreto do material de reparo de 25 MPa foi adotado o traço, em massa, na proporção 1:1,1:2,55 (cimento, areia, brita de gnaiss com diâmetro máximo de 4,5 mm) e uma relação água/cimento de 0,51. Por último, o concreto de 32 MPa foi confeccionado com o traço, em massa, de 1:0,7:2,05 e uma relação água/cimento de 0,43. A Tabela 3.6 permite visualizar todos estes dados. O concreto de maior resistência apresenta, em geral, menor porosidade e, conseqüentemente, tem uma composição diferente daquela do substrato. Segundo DECTER & KEELEY (1997), a baixa porosidade do material de reparo é necessária, pois a área a ser preenchida por este material estará mais vulnerável a ataques.

O cálculo dos traços segundo a NBR 6118 (1978) são mostrados no Anexo A.

Tabela 3.5 – Composição do concreto das vigas de referência e do substrato

Material	Composição/m ³
Brita	1220 Kg
Areia	629 Kg
Água	222 Kg
Cimento	370 Kg

Tabela 3.6 – Composição dos concretos de reparo

Concreto de Reparo	18 / 25 / 32
Material	Composição/m ³
Brita	1113 / 1090 / 1250 Kg
Areia	557 / 470 / 426 Kg
Água	216 / 217 / 262 Kg
Cimento	359 / 427 / 609 Kg

Para cada conjunto de vigas concretadas foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 x 200 mm para a determinação da resistência à

compressão do concreto de acordo com a NBR 5739/80. Para a determinação da resistência à tração pelo ensaio de compressão diametral de acordo com a norma NBR 7222/82 foram moldados também 5 corpos de prova de 100 x 200 mm para todas as vigas. A moldagem dos 10 corpos de prova pode ser visualizada na Figura 3.2.

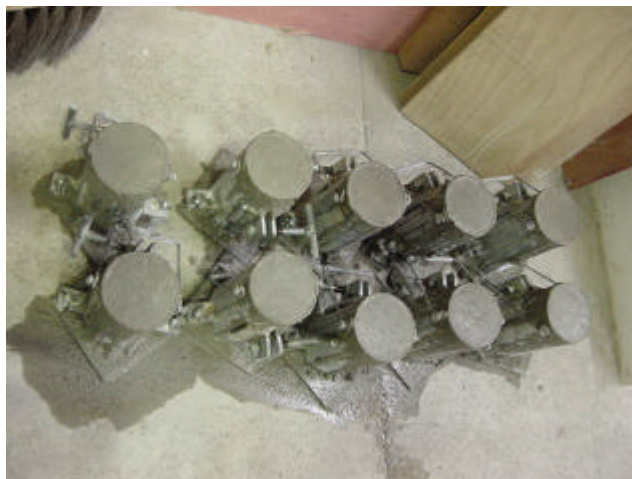


Figura 3.2 – Concretagem dos corpos de prova cilíndricos

3.2 Confeccões das fôrmas e moldagem das vigas

Para a confecção das fôrmas foi empregado compensado naval de 14 mm de espessura por 220 cm x 110 cm de dimensão. Foram confeccionados dois módulos de formas com capacidade para moldar 12 vigas e um terceiro módulo com capacidade para 6, perfazendo um total de 30 fôrmas com (150X150X1000) mm de dimensão. As fôrmas são mostradas na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Confecção das fôrmas

Todos os componentes das fôrmas foram ligados por meio de parafusos, tendo as laterais móveis e a parte entre uma viga e outra fixa, para facilitar o processo de desmoldagem. Com este mesmo fim, as fôrmas foram untadas com desmoldante da marca Sika. Foi utilizada massa de modelar nas junções para que a fôrma fosse completamente vedada.

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados de acordo com a NBR 5738/94. As vigas foram moldadas seguindo a mesma norma. No entanto, como o volume de concreto era maior, o concreto foi lançado manualmente e vibrado com vibrador de imersão de 15mm de diâmetro até que a maior parte do ar do interior da massa de concreto fosse expulso. A concretagem dos corpos de prova prismáticos é mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Concretagem dos corpos de prova prismáticos

Nos primeiros dois dias, as vigas foram curadas com molhagem intensa e aplicação de sacos plásticos na superfície exposta ao ar. Os corpos de prova foram desmoldados

após 48 horas de sua moldagem e colocados em tanques com água saturada de cal até os 28 dias de idade, quando as vigas foram retiradas e deixadas ao ar livre juntamente com os corpos de prova cilíndricos. A Figura 3.5 mostra as vigas no tanque de cura.

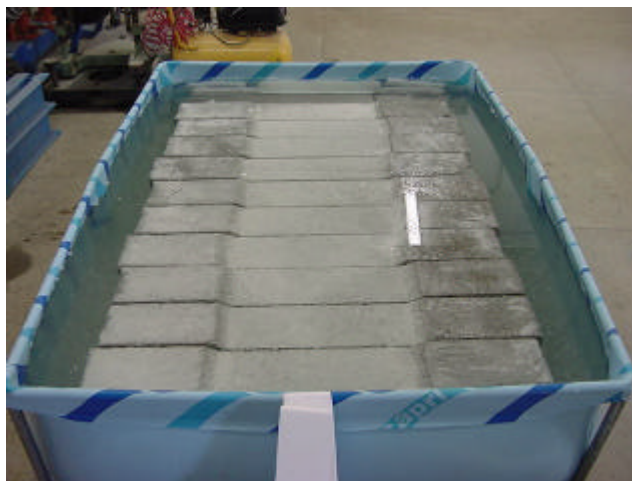


Figura 3.5 – Vigas posicionadas no tanque de cura

Todos estes cuidados, associados às corretas técnicas de concretagem e cura, permitiram obter vigas livres de nichos e problemas de retração.

Os valores médios dos resultados dos ensaios dos corpos de prova de concreto, os quais foram realizados no mesmo dia que os ensaios das vigas, correspondendo a uma idade de 28 dias, encontram-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Valores médios dos ensaios de compressão diametral e uniaxial

Material	Quantidade de Corpos de Prova	f_c (MPa) (100x200) mm	f_{ct} (MPa) (100x200) mm	D. P.*	C. V.*	Descrição
18	05	26,8	2,6	1,3	0,05	Substrato
18	05	24,8	2,2	1,2	0,05	Reparo
25	05	32,2	2,8	0,8	0,03	Reparo
32	05	39,5	2,7	1,9	0,05	Reparo

*D. P. = Desvio padrão; C. V. = Coeficiente de variação

3.3 Descrição das vigas

3.3.1 Carregamento e esforços solicitantes

Todas as vigas tinham como dimensões:

- Comprimento = 500mm
- Altura = 150mm
- Largura = 150mm
- Distância entre apoios = 450mm

O carregamento foi realizado por meio de duas cargas concentradas iguais aplicadas distando 150mm uma da outra e 75mm dos apoios conforme o ensaio da American Society for Testing and Materials - ASTM C 78. Com este carregamento as vigas tiveram um esforço cortante constante na região dos apoios até o ponto de aplicação da carga com valor (módulo) igual à carga aplicada, e um momento fletor máximo constante na região central das vigas com valor de 7,5 vezes o valor da carga aplicada.

As vigas foram somente analisadas na região entre as cargas, onde ocorre a situação de flexão pura.

3.3.2 Esforços resistentes

Neste item foram analisadas as tensões e deformações prováveis que ocorreriam nas peças para que, mediante os dados teóricos, fosse possível a definição de um equipamento capaz de registrar estas variáveis e aproveitar ao máximo os equipamentos já existentes no laboratório.

Analisaram-se as vigas na fase plástica de deformação. Na realidade, houve quatro situações distintas de análise: vigas de referência, vigas reparadas com f_{ck} de 18 MPa e vigas reforçadas com f_{ck} de 25 e 32 MPa.

3.4 Instrumentação

O objetivo principal da análise experimental de estruturas consiste na implementação de um esquema de ensaio que permita a geração e aquisição de dados relacionados ao comportamento estrutural de um determinado elemento. Além disso, a qualidade e a relevância de um experimento em escala real consiste

na obtenção de informações suficientes para descrever o comportamento estrutural (resposta estrutural) e que estas informações sejam obtidas de forma criteriosa.

Não existe ensaio direto para a avaliação da aderência entre duas superfícies de concreto, mesmo porque qualquer instrumentação da superfície de contato modifica as condições de aderência. Neste trabalho, a definição do sistema de medição foi um dos aspectos mais difíceis por várias razões:

- 1) Deveria ser um instrumento que permitisse a leitura de todos os pontos, sem estar fixo no corpo de prova;
- 2) Deveria possibilitar a leitura dos pontos em uma mesma posição do operador;
- 3) Os pontos deveriam estar equidistantes uns dos outros para todas as vigas;
- 4) Para o sistema de medição dos pontos (chapas de alumínio) o aparelho deveria ter um mesmo ponto de leitura para cada par de chapas;
- 5) O sistema de medição dos pontos não deveria se alterar com o uso do aparelho empregado;
- 6) E, obviamente, deveria ser um equipamento de alta precisão para a coleta dos dados.

Neste item são mostrados o tipo, localização e finalidade dos instrumentos de medição utilizados nas vigas.

3.4.1 Tensotast

Foi utilizado um Tensotast para a medição de deformações em diferentes níveis (pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6) do concreto na região de momento máximo. Os pontos de medição são mostrados na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Posicionamento dos pontos de medição das deformações (1 ao 6)

O Tensotast é um extensômetro mecânico de base móvel. Foi utilizado um Tensotast com multiposições. Nestes casos, foram empregados, para o posicionamento do medidor, fixadores para os pontos de medição. A Figura 3.7 mostra o Tensotast e seus respectivos gabaritos. O gabarito possibilita a variação da distância entre os pontos de leitura de 50, 100 e 150mm. A distância de 100mm foi empregada. Quanto aos fixadores, foram utilizadas chapas de alumínio chatas de 1/8" com 10mm de largura coladas com Sikadur nos pontos determinados. A precisão do Tensotast é de 0,001mm.



Figura 3.7 – Tensotast e seus gabaritos

3.4.2 Extensômetro mecânico

As flechas apresentadas pelas vigas foram medidas por meio de extensômetro mecânico com uma constante de precisão igual a 0,002 mm localizado nas seções do meio do vão das mesmas. A Figura 3.8 mostra o posicionamento do extensômetro. O extensômetro estava fixado a uma cantoneira afastada da mesa da prensa para evitar alguma interferência na leitura das medidas das flechas.



Figura 3.8 – Posicionamento do extensômetro mecânico

3.5 Montagem e procedimento do ensaio

Serão apresentados aqui os principais aspectos relacionados aos ensaios realizados nas vigas.

3.5.1 Montagem

Para a realização dos ensaios de quatro pontos para os corpos de prova prismáticos foi utilizado uma prensa Versatest hidráulica de 25 toneladas. O referido ensaio teve uma velocidade constante de carga de 0,05 kN/s até a carga de ruptura. As leituras dos deslocamentos em pontos determinados foram realizados a cada 1,00 kN de carregamento.

Os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados em duas prensas devido à capacidade de carga das mesmas. Foram ensaiados 10 corpos de prova com f_{ck} de 18 Mpa na Versatest e os 5 corpos de prova com f_{ck} de 25 Mpa mais os 5 com f_{ck} de 32 Mpa foram ensaiados numa prensa Soiltest hidráulica de 200 toneladas.

Após a montagem da instrumentação, as vigas reparadas foram colocadas e alinhadas sobre os apoios da prensa para a realização do ensaio.

3.5.2 Procedimento do ensaio

O fluxograma da Figura 3.9 nos possibilita a visualização de todas etapas da metodologia dos ensaios.

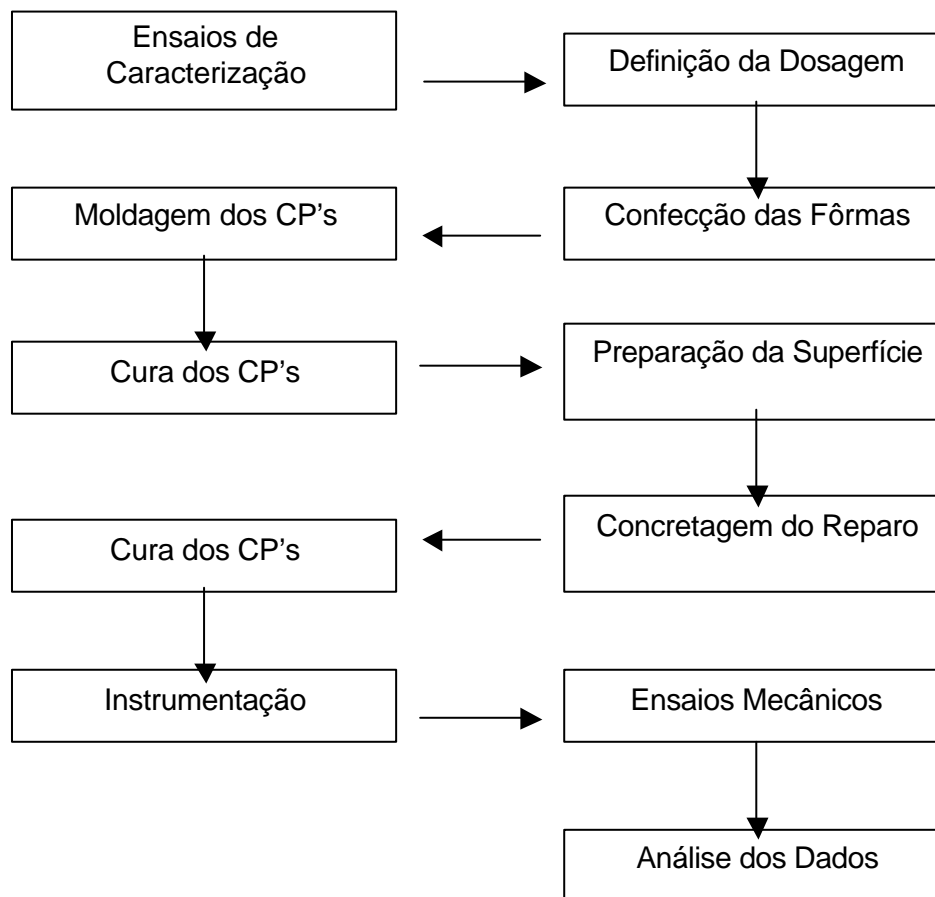


Figura 3.9 - Fluxograma da metodologia dos ensaios

A primeira etapa do procedimento foi a definição dos materiais e suas respectivas características. Para tal foram realizados ensaios de massa específica do cimento e agregados, granulometria dos agregados e consistência do concreto, denominados de ensaios de caracterização. A Figura 3.10 mostra um dos materiais caracterizados e os aparelhos empregados para tal. Os resultados já foram descritos do item 3.1.1 ao 3.1.3.



Figura 3.10 – Caracterização do agregado graúdo

Após a caracterização dos materiais, definiu-se a dosagem dos materiais utilizados como substrato e também como reparo. O resumo dos traços foi descrito no item 3.1.4.

Na seqüência, teve-se a confecção das fôrmas e preparação dos moldes de isopor que foram colados no fundo das mesmas para que após a concretagem fosse configurado o entalhe. A Figura 3.11 ilustra as fôrmas com os moldes de isopor.

O entalhe ficou com uma altura de 30 mm definido a partir do critério do diâmetro máximo do agregado para concretagem de elementos armados apresentado por SÜSSEKIND (1979). De acordo com MORENO JR & SELMO (2002) normalmente, as profundidades dos reparos estruturais localizados, mesmo que seja apenas uma proteção simples de um elemento de concreto, devem ser superiores a 20 mm.

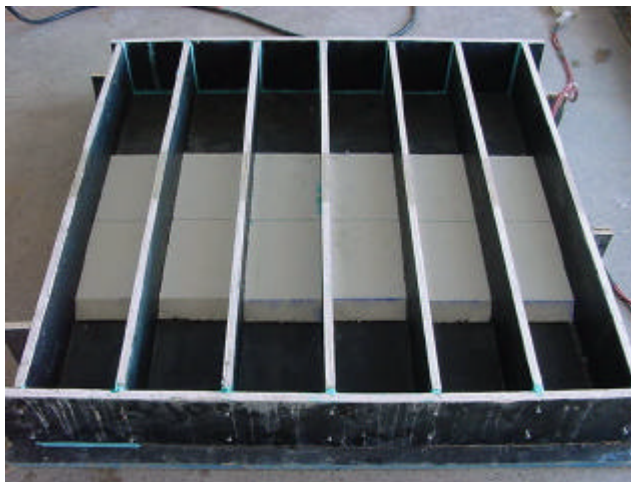


Figura 3.11 – Fôrmas com os moldes de isopor

Uma vez pronta a fôrmas, a mistura do concreto foi executada mecanicamente em betoneira de 145 litros por volta de 10 minutos. Os materiais foram lançados à betoneira na seguinte ordem: 50% da brita, toda água, todo cimento, 50% da areia, 50% restante da brita e 50% restante da areia.

O concreto foi lançado manualmente por meio de colher de pedreiro nas fôrmas e vibrado mecanicamente com vibrador. Nesta etapa apenas o concreto empregado como substrato (f_{ck} de 18 MPa) foi moldado, sendo todas 30 vigas concretadas em um mesmo dia. As 5 vigas de referência – vigas monolíticas sem entalhe, foram moldadas após a desfôrma dessas primeiras 30 vigas. Também os corpos de prova cilíndricos eram moldados simultaneamente. A Figura 3.4 retrata a concretagem das vigas.

Os corpos de prova prismáticos só foram desmoldados após 48 h. A maioria das normas retrata a desfôrma após 24 h de concretagem, que era intenção inicial. No entanto, o atrito lateral entre a viga e a fôrma impossibilitou a retirada das vigas como se havia planejado, que era abrindo-se as abas laterais e escorregando com as vigas da fôrma. A forma encontrada foi utilizando um pé de cabra para deslocar as vigas. Em seguida colocou-se os corpos de prova em tanque para cura como mostrado na Figura 3.5.

Os corpos de prova foram retirados dos tanques após 28 dias. Durante um período de 90 dias as vigas foram armazenadas em ambiente desprotegido, sofrendo as intempéries do ambiente. Após este período a superfície recebeu o tratamento superficial antes de se acrescentar a camada de reparo. O tratamento superficial adotado foi o escarificado e o natural. Para se obter a escarificação “medium” utilizou-se um marteleto manualmente. Na Figura 3.12 é possível perceber a diferença entre as duas superfícies. As duas superfícies foram limpas com jato de água.

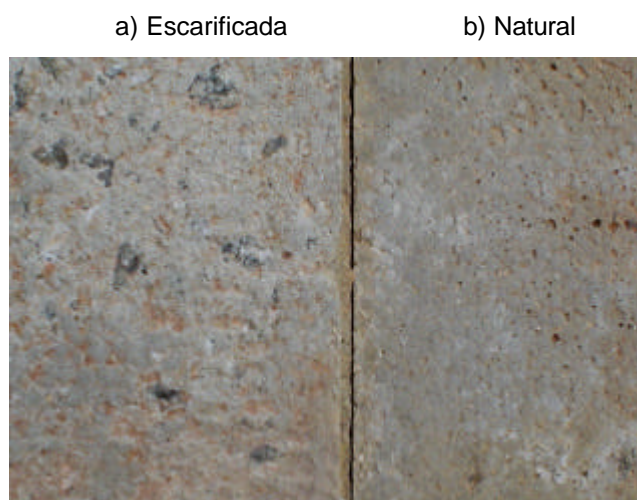


Figura 3.12 – Tipos de tratamento superficial: escarificada versus natural

Para se definir qual o tipo de tratamento superficial receberia cada viga, dividiu-se as 30 vigas em 3 lotes distintos. O primeiro lote foi definido como as vigas que receberiam a recuperação com f_{ck} de 18 MPa. O lote 1 era composto pelas vigas 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25 e 28, onde as vigas ímpares foram escarificadas e as pares tiveram sua superfície do tipo natural. O segundo lote foi definido como as vigas que receberiam o reforço com f_{ck} de 25 MPa. O lote 2 foi composto pelas vigas 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26 e 29, cujo tratamento superficial seguiu o mesmo critério anterior. O terceiro e último lote foi definido como as vigas que receberiam o reforço com f_{ck} de 32 MPa. E as vigas que compuseram o lote 3 foram 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 e 30. O mesmo critério de tratamento superficial foi adotado. A Tabela 3.8 mostra um resumo desta situação.

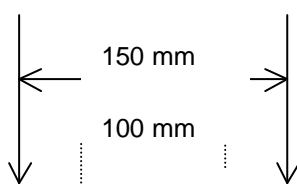
Tabela 3.8 – Tipos de reparos e tratamento superficial

Material do Substrato	Tipo de Reparo	Tipo de Superfície	Número de corpos de prova	Nomenclatura
-----------------------	----------------	--------------------	---------------------------	--------------

f_{ck} de 18 MPa	f_{ck} de 18 MPa	Natural	05	CN 18
f_{ck} de 18 MPa	f_{ck} de 18 MPa	Escarificada	05	CE 18
f_{ck} de 18 MPa	f_{ck} de 25 MPa	Natural	05	CN 25
f_{ck} de 18 MPa	f_{ck} de 25 MPa	Escarificada	05	CE 25
f_{ck} de 18 MPa	f_{ck} de 32 MPa	Natural	05	CN 32
f_{ck} de 18 MPa	f_{ck} de 32 MPa	Escarificada	05	CE 32

Uma vez tratada a superfície, as vigas foram recolocadas em suas fôrmas iniciais para o acréscimo da camada de reparo. Desta vez a concretagem se processou em três etapas diferentes, de acordo com os três diferentes traços, levando 1 dia para a execução de cada uma. A desfôrma e a cura foram realizadas da mesma maneira anteriormente descrita: 48 h para o desmolde das mesmas e mais 28 dias para cura do material de reparo. Após a cura, iniciou-se a instrumentação.

A instrumentação das vigas reparadas e de referência foi posicionada de acordo com a Figura 3.13. As medidas de deslocamento foram obtidas em relação ao meio do vão, onde foram coladas chapas finas de alumínio medindo as distâncias iniciais e finais de cada par de chapas em cada etapa de carregamento. Estas chapas estavam distanciadas a cada 22 mm no sentido transversal à viga e 100 mm no sentido longitudinal da mesma.



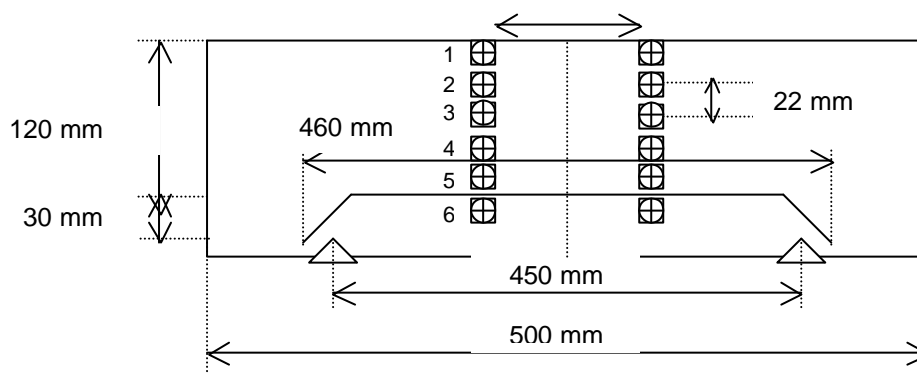


Figura 3.13 – Posicionamento da instrumentação

Após a instrumentação, os corpos de prova foram devidamente posicionados e ensaiados. Os ensaios mecânicos realizados foram o de compressão uniaxial e diametral para os corpos de prova (CP) cilíndricos e o de flexão a quatro pontos para os corpos de prova prismáticos. As Figuras 3.14 a 3.17 mostram os ensaios mecânicos e a coleta de dados empregando-se o Tensotast.



Figura 3.14 – Ensaio mecânico de compressão uniaxial para os corpos de prova cilíndricos

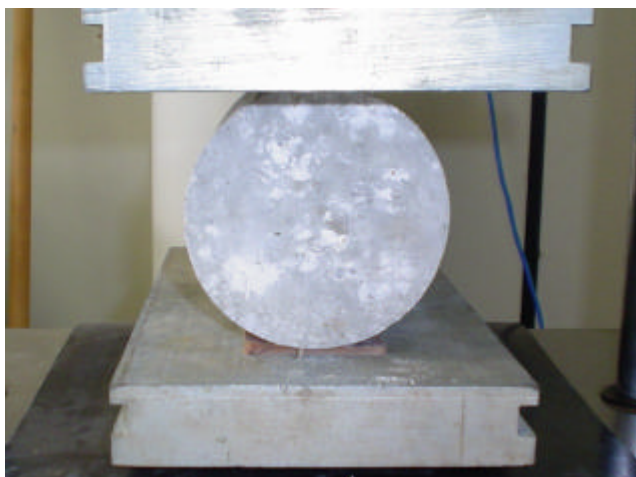


Figura 3.15 – Ensaio mecânico de compressão diametral para os corpos de prova cilíndricos

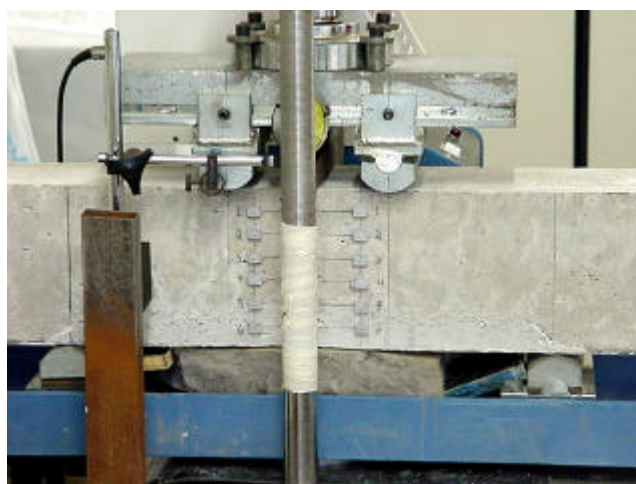


Figura 3.16 – Ensaio mecânico de tração na flexão para os corpos de prova prismáticos



Figura 3.17 – Coleta de dados para os corpos de prova prismáticos

Os resultados dos ensaios mecânicos dos corpos prismáticos podem ser observados no próximo capítulo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a análise, procurou-se correlacionar os parâmetros que direta ou indiretamente governam o fenômeno de aderência.

É importante ressaltar que qualquer peça apresenta um comportamento global que, em geral, é estudado por meio da curva carga-deslocamento e um comportamento local que reflete mais a lei de comportamento dos materiais envolvidos e, por isso, é considerado por meio do estudo das deformações locais. Neste sentido, a seguir, apresentam-se os seguintes tipos de análise:

- Influência do tipo de tratamento para uma mesma resistência característica;
- Relação carga de ruptura na flexão versus tipo de tratamento para as diferentes resistências;
- O deslocamento relativo na superfície de reparo;

Como foram consideradas 5 vigas por lotes de ensaios, foi necessário adotar um tratamento estatístico para ponderar as discrepâncias intrínsecas de todo o programa experimental, especificamente quando os parâmetros foram avaliados indiretamente. O tratamento estatístico que se aplicou a todos os corpos de prova para os diversos ensaios mecânicos foi curva de Gauss.

4.1 Influência do tipo de tratamento na deformada da viga

Para facilitar a interpretação dos dados, consideraram-se, primeiro, os parâmetros que podem ser avaliados em função do comportamento global. Para isso, utilizam-se as curvas carga versus flechas das vigas.

As Figuras 4.1 a 4.3 demonstram a influência do tipo de tratamento para uma mesma resistência característica no comportamento das vigas.

Na Figura 4.1, comparou-se a média das vigas de referência (Média Referência 18) constituídas por concreto de 18 MPa com as médias das vigas recuperadas com concreto de 18 MPa. Analogamente, nas Figuras 4.2 e 4.3, compararam-se as médias das vigas constituídas por um mesmo tipo de concreto de reparo (25 e 32 MPa), variando-se o tipo de tratamento superficial: Superfície Escarificada (CE) x Superfície Natural (CN).

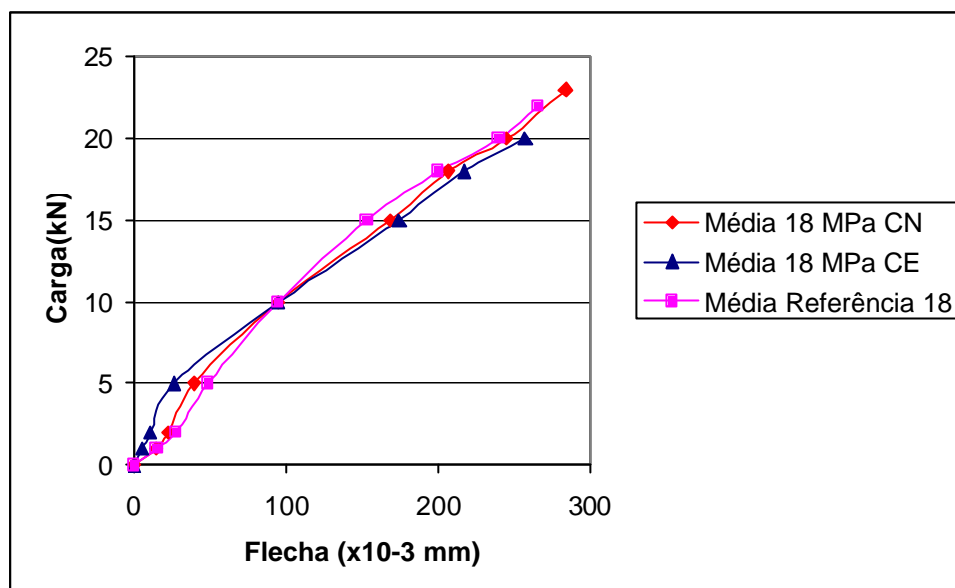


Figura 4.1 – Flechas para $f_{ck} = 18$ MPa

Em relação à Figura 4.1, pode-se constatar que não houve mudança significativa no comportamento das vigas reparadas com concreto de $f_{ck} = 18$ MPa. Em termos de recuperação, o objetivo foi alcançado, uma vez que o comportamento de ambas as curvas são bem semelhantes.

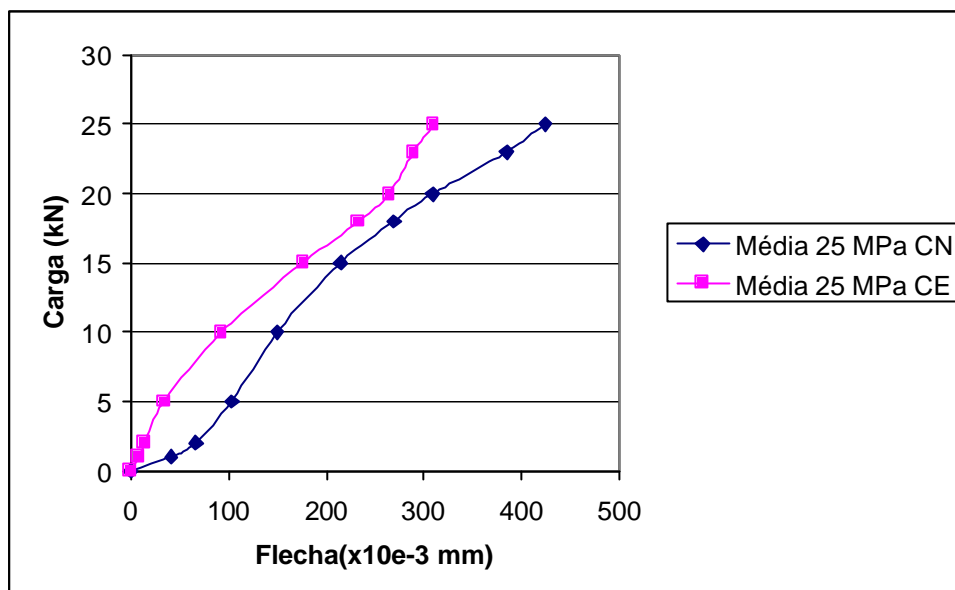


Figura 4.2 – Flechas para $f_{ck} = 25$ MPa

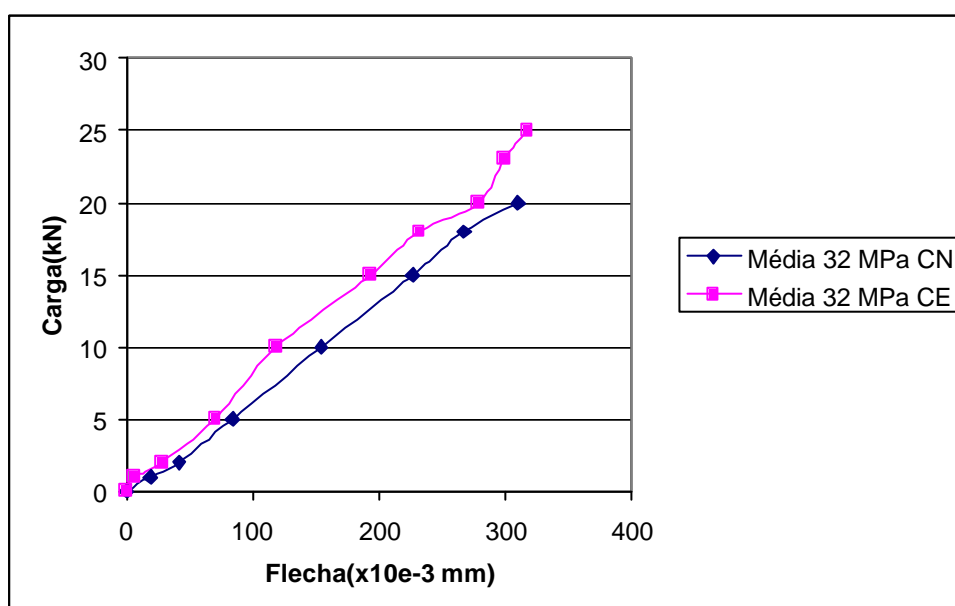


Figura 4.3 – Flechas para $f_{ck} = 32$ MPa

Quanto às Figuras 4.2 e 4.3 pode-se observar que houve uma mudança significativa no comportamento entre as vigas escarificadas e naturais. Apesar de lidar com valores de deslocamento muito baixo, este resultado merece uma certa análise. Aparentemente a superfície natural parece precisar de uma carga de acomodação depois do qual mostra uma certa recuperação da rigidez. Como o material não pode melhorar suas características iniciais, parece ocorrer uma acomodação até a engrenagem na superfície. Também se verifica que as vigas CE, em geral, fletam menos.

4.2 Relação carga de ruptura na flexão versus tipo de tratamento para as diferentes resistências

A Figura 4.4 mostra a variação da resistência à flexão versus a variação do tipo de f_{ck} adotado como reparo. Os valores médios das cargas máximas encontram-se também na Figura 4.4. Na Tabela 4.1 são mostrados o desvio padrão e o coeficiente de variação para os dados da Figura 4.4.

A resistência à flexão é expressa em termos do módulo de ruptura, que é a máxima tensão na ruptura, calculada pela fórmula de flexão na configuração do ensaio de quatro pontos (Equação 10):

$$R = PL/bd^2 \quad (10)$$

onde “R” é o módulo de ruptura, “P” a carga máxima, “L” é o comprimento do vão livre, “b” a largura do corpo de prova, e “d” a altura do corpo de prova. É importante ressaltar que esta fórmula somente é válida se a ruptura na superfície tracionada estiver entre as cargas.

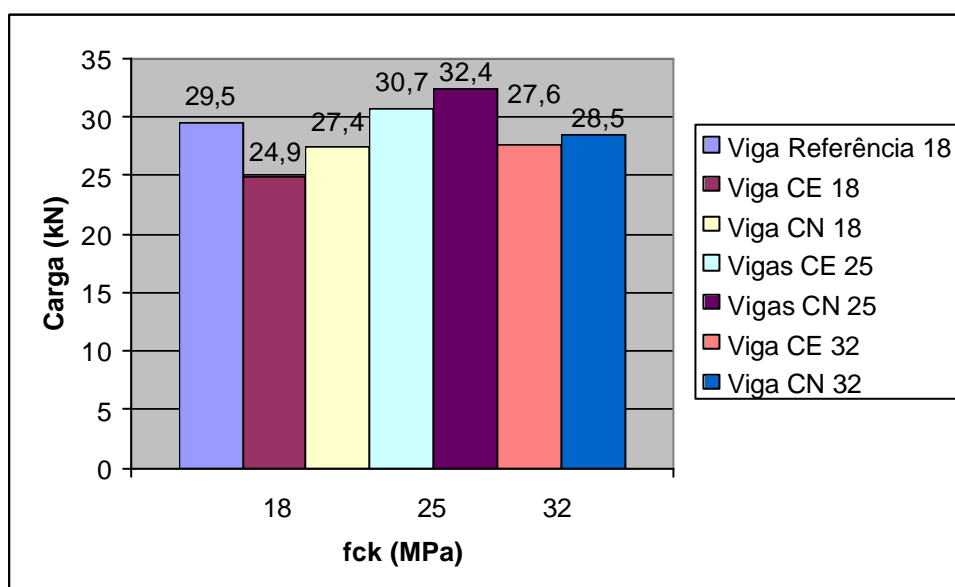


Figura 4.4 – Variação da resistência à tração na flexão em função da variação do f_{ck}

Tabela 4.1 – Desvio padrão e coeficiente de variação da resistência à tração na flexão

	Ref.* 18	CE 18	CN 18	CE 25	CN 25	CE 32	CN 32
D. P.*	2,4	1,6	2,4	2,3	7,1	1,9	5,0
C. V.*	0,08	0,06	0,09	0,07	0,22	0,07	0,18

*D. P. = Desvio padrão; C. V. = Coeficiente de variação; Ref. = referência

Os valores da Figura 4.4 refletem o padrão de resposta esperado. De fato, a influência do tipo de superfície é mais marcante perto da ruptura. Esta superfície de descontinuidade é mais propícia à deformação plástica do que o concreto são. Por isso, as vigas de referência apresentam cargas de ruptura mais altas. Entretanto, também é importante notar que para os três tipos de resistências, o tipo de tratamento CE mostrou menor deflexão do que o CN, corroborando com a análise feita no item anterior.

4.3 Deslocamento relativo na superfície de reparo

Neste item analisou-se a deformação dos pontos 5 e 6 em relação ao carregamento.

Os pontos 5 e 6 foram escolhidos por estarem mais próximos à interface. O posicionamento dos mesmos já foi mostrado na instrumentação, sendo que o ponto 6 se encontra na região de reparo e o ponto 5 no substrato (Figura 3.13).

As Figuras 4.5 a 4.10 mostram a deformação dos referidos pontos para as vigas que sofreram reforço e/ou reparo.

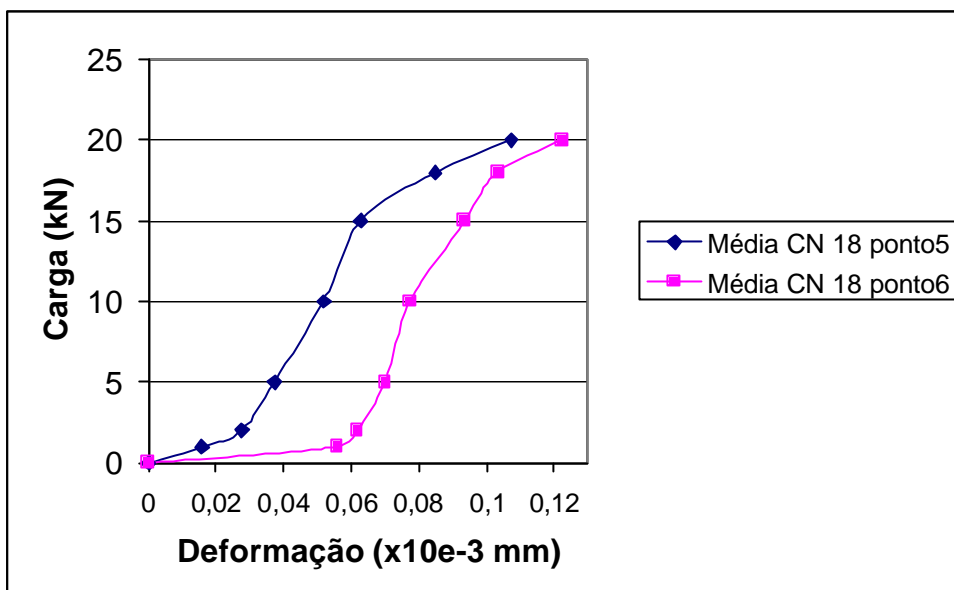


Figura 4.5 – Diagrama carga-deformação para a viga CN 18 nos pontos 5 e 6

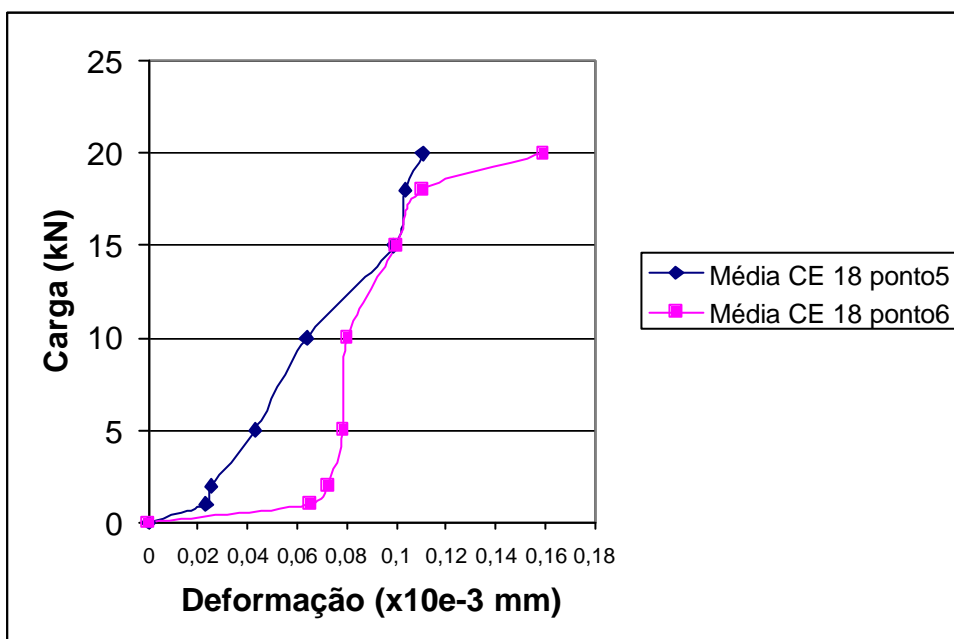


Figura 4.6 – Diagrama carga-deformação para a viga CE 18 nos pontos 5 e 6

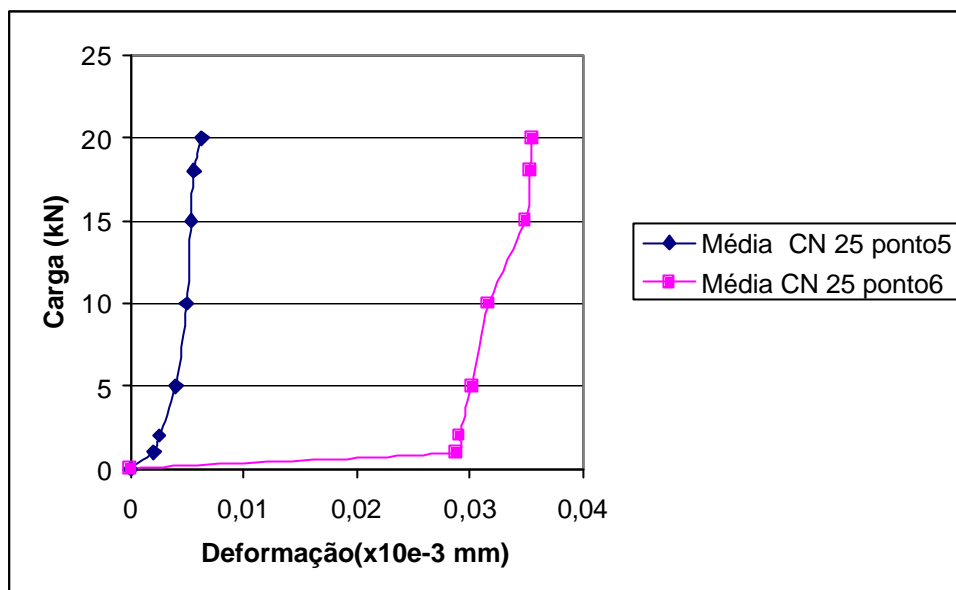
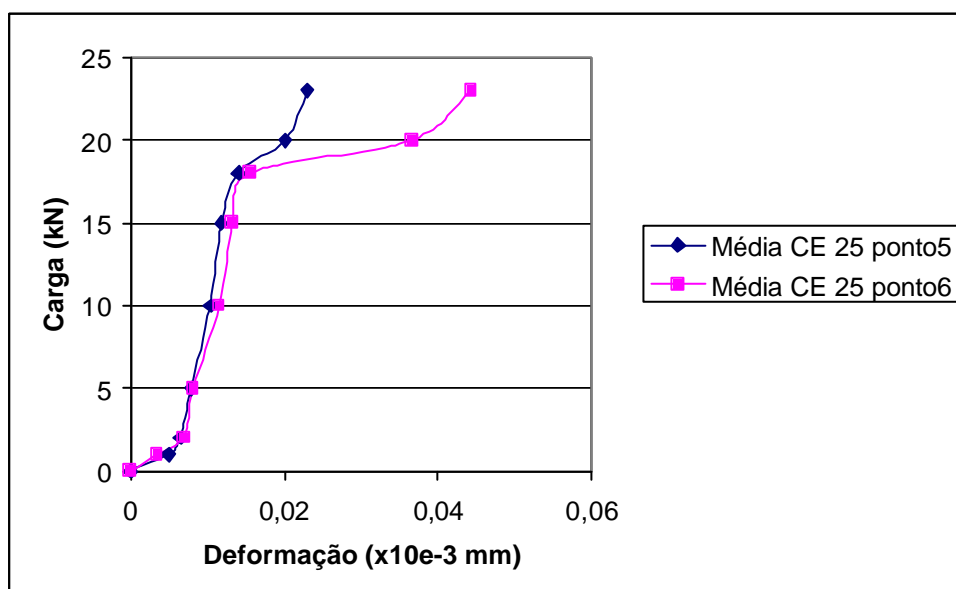


Figura 4.7 – Diagrama carga-deformação para a viga CN 25 nos pontos 5 e 6



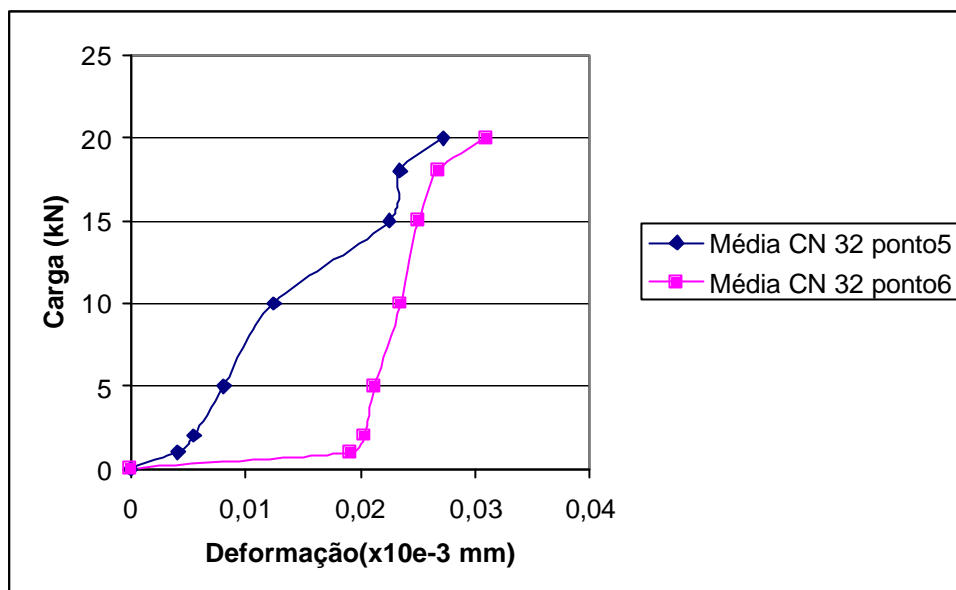


Figura 4.9 – Diagrama carga-deformação para a viga CN 32 nos pontos 5 e 6

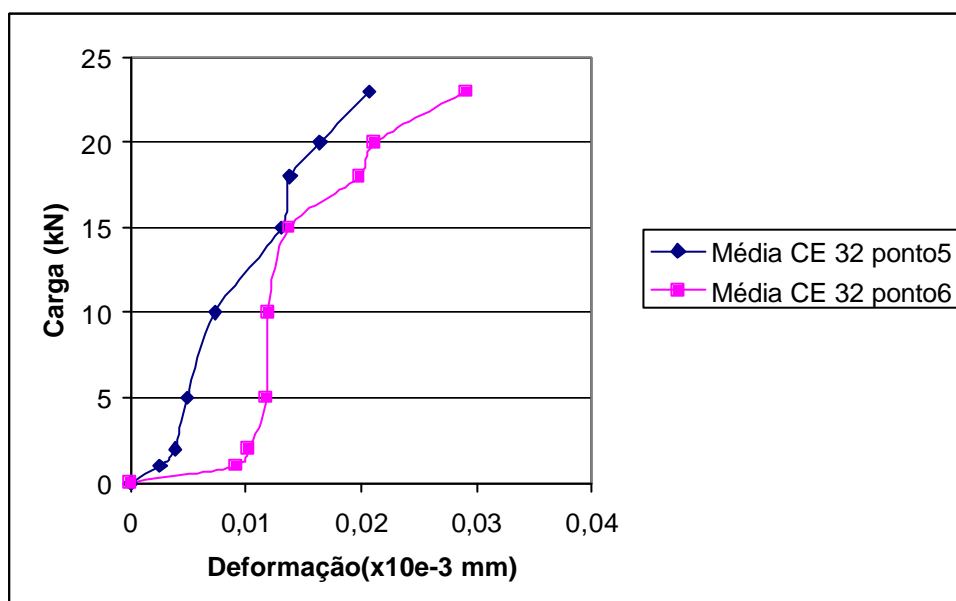


Figura 4.10 – Diagrama carga-deformação para a viga CE 32 nos pontos 5 e 6

Como era de se esperar as deformações no ponto 6 foram maiores do que no ponto 5. De forma geral, pode-se observar uma acomodação dos pontos até a carga de 5 kN, sendo mais acentuada para as superfícies do tipo CN. Pode-se constatar que quanto maior a resistência do reparo menor foi a diferença de deformação entre os pontos, para o caso CE. Quanto aos casos CN, a diferença de deformação entre os pontos é maior do que os casos CE, o que pode evidenciar um menor travamento entre as superfícies.

4.4 Influência do tipo de tratamento no reparo da viga

Considerando-se os parâmetros avaliados em função do comportamento global e utilizando as curvas carga-flecha das vigas, pode-se observar nas Figuras 4.11 e 4.12 a eficiência do reparo e/ou reforço das vigas.

Na Figura 4.11, comparou-se a média das vigas de referência (Média Referência 18) com as médias das vigas reparadas e/ou reforçadas com os três tipos de concreto para a superfície do tipo CN. Analogamente, na Figura 4.12, comparou-se os mesmos parâmetros anteriores, variando-se somente o tipo de superfície (tipo CE).

Pode-se comentar que de acordo com a Figura 4.11, as vigas do tipo CN 18 tiveram um comportamento parecido com a da viga de referência, o que caracteriza uma recuperação estrutural. Quanto as curvas CN 32 e CN 25, houve um aumento da flecha para um mesmo carregamento, caracterizando um escorregamento da interface entre o materiais e tendo uma maior resistência final, visto que a resistência última à tração da peça (abertura e propagação de fissuras) aumentou, o que pode ser entendido como um reforço estrutural.

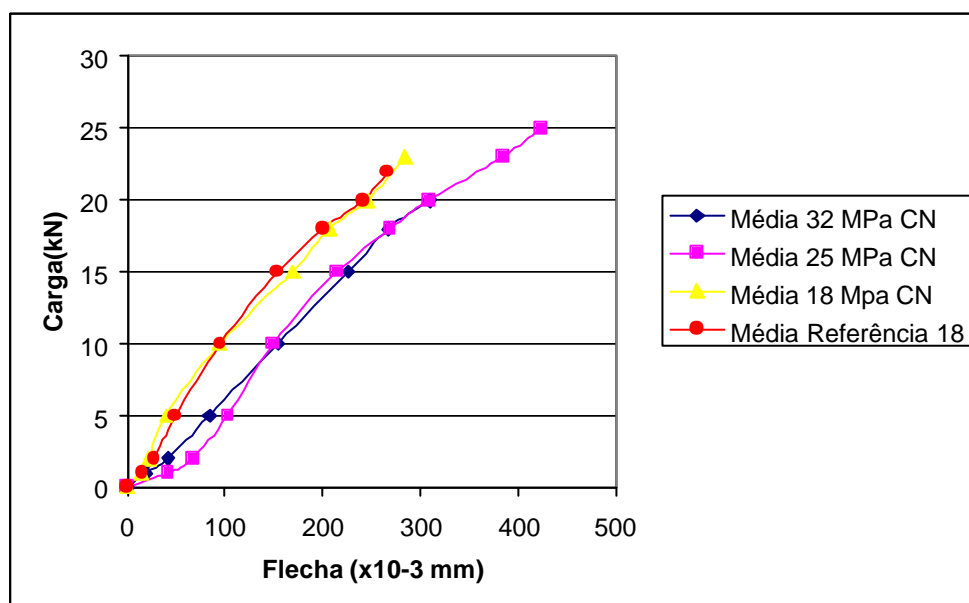


Figura 4.11 – Deformação experimental das vigas 18-32 CN

Pode-se ressaltar que pela Figura 4.12, as vigas do tipo CE 18 e CE 25 tiveram um comportamento parecido com a da viga de referência, o que caracteriza uma recuperação estrutural. No caso da viga CE 25 distancia-se do objetivo que era o reforço. E a curva CE 32, houve um aumento da flecha, quando se esperaria justamente o contrário, caracterizando um rompimento das ranhuras do tratamento superficial e um pior sistema de reforço.

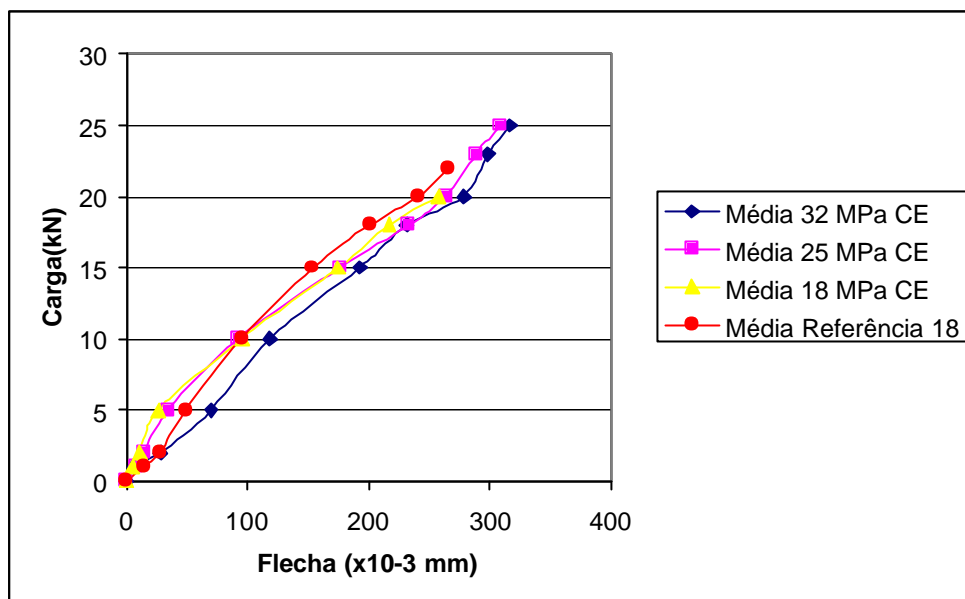


Figura 4.12 – Deformação experimental das vigas 18-32 CE

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O fenômeno da aderência entre materiais cimentícios é muito complexo devido à heterogeneidade natural dos substratos de concreto e os materiais de reparo.

Desta investigação, pode-se comentar que a aderência concreto-concreto é eficiente em termos qualitativos, considerando a forma com que foi acrescentado o material de reparo. Torna-se uma alternativa de baixo custo e com uma técnica empregada relativamente simples se comparada à interação entre materiais sob mesmas condições, onde se emprega epóxi.

O sistema proposto é uma alternativa a outros existentes, apresentando-se como ótima opção aos reparos e recuperações estruturais, ligações concreto novo-concreto velho e retomada de concretagens.

Os dois parâmetros analisados influenciam diretamente a resistência de aderência. Quando se avalia as vigas não armadas rompidas à flexão, a resistência última é função da resistência à tração que está diretamente relacionada com o módulo de elasticidade, dependente do f_{ck} do material.

A partir dos resultados de ensaios de caracterização dos materiais e ensaios mecânicos dos corpos de provas, pôde-se enumerar as seguintes conclusões:

1) Quanto à tração na flexão em relação ao tipo de tratamento superficial

No que diz respeito à tração, a curva carga-flecha mostrou claramente o papel positivo da escarificação. De fato, na grande maioria dos casos, as vigas tipo CE se mostraram mais rígidas do que a CN para uma mesma resistência de reparo e as deformações na altura da seção confirmam este fato, já que os CN exibem maior diferença de deformação entre os pontos 5 e 6 do que os CE.

2) Quanto às resistências à compressão uniaxial e diametral

Ao analisar a relação f_{ct} / f_c se observou uma variação de 8 a 10% em relação aos concretos de 18 (substrato e reparo) e 25 MPa, enquanto que os de 32 MPa ficaram em torno de 7%. Em relação aos f_{ct} dos materiais, constatou-se um aumento de 13% do concreto 18 do substrato em relação ao concreto 18 do reparo. Tem-se um aumento de 9% entre o concreto 25 de reparo e o 18 do substrato e um aumento de 7% entre o concreto 32 e o 18 do substrato. Se analisarmos as médias das cargas de ruptura para os 4 tipos de vigas ensaiadas veremos que a máxima tensão na ruptura está diretamente relacionada com f_{ct} .

3) Quanto ao tipo de tratamento em função da deformada da viga

As vigas CN 18 e CE 18 apresentaram um comportamento bem parecido com a viga monolítica, o que pode ser explicado devido as resistências à compressão e à tração serem bem próximas dos dois materiais, ficando a diferença basicamente por conta do tipo de tratamento da superfície. Nos outros dois casos, as vigas CE fletam menos que as CN devido ao travamento entre as superfícies de contato.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho avaliou a resistência de aderência empregando-se apenas um tipo de método de ensaio: flexão a quatro pontos. Sugerem-se estudos da aderência empregando-se os mesmos materiais e variando-se os tipos de ensaios, correlacionando os resultados obtidos.

O material utilizado na pesquisa foi o concreto. Por se tratar de um material heterogêneo, muita das características observadas a nível macroscópico só podem ser entendidas considerando sua estrutura microscópica. Sugerem-se análises microscópicas entre a superfície de contato dos materiais, assim como análises dos próprios materiais envolvidos.

Do ponto de vista da diminuição do gasto de energia e da conservação de recursos naturais, o concreto pode ser utilizado para reciclar restos industriais, substituindo o material cimentante ou os agregados. Neste sentido, pode-se empregar algum destes materiais na composição do concreto de reparo e estudar suas propriedades de aderência.

Os materiais empregados como reforço eram concretos sem nenhum tipo de aditivo. Poderia-se acrescentar algum tipo de aditivo que melhorasse as propriedades do material de reparo, como redução da porosidade e maior trabalhabilidade.

Há vários tipos de tratamentos superficiais, cada um empregado para um ou mais tipos de situações de reparo e/ou reforço. O tratamento superficial bem definido proporciona um melhor resultado de aderência. No entanto, o tratamento impróprio atua de forma negativo, pois provoca um aumento de microfissuras na superfície. Neste sentido, sugere que se estude a variação do tipo de tratamento superficial, tentando estabelecer um limite no qual o tratamento será benéfico e, no caso de se empregar mais de um tipo de tratamento em conjunto, verificar a melhor composição deles.

BIBLIOGRAFIA

ABU-TAIR, A. I., LAVERY, D., NADJAI, A., RIGDEN, S. R., AHMED, T. M. A. **A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening.** Construction and Building Materials, V. 14, 2000, pp. 171-176.

ALEXANDRE, A. L. C.; CARAVELLO, F.; REIS, M. S. C.; CORREIA S. B. **Comprovação Experimental do Comportamento Resistente de Vigas de Concreto Armado com Reforço Estrutural** Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Rio de Janeiro, 1988.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI COMMITTEE 303. **Standard specification for cast-in-place architectural concrete.** ACI Manual of Concrete Practice, 1997, Detroit.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo, Editora Pini, 1992. 104p.

- ANDRADE, W. P.. **Concretos : Ensaio e Propriedades**. Equipe de Furnas, Laboratório de Concreto, Ed. Pini, São Paulo, 1997.
- ARAÚJO, D. L.; DEBS, M. K. E. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em vigas submetidas à flexão**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 17, 2001 pp. 1-27, 2001.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits destinés aux applications superficielles sur béton durci. – Essai d'adhérence par traction après thermiques sur éprouvette sciée – AFNOR NF P18-853**, 1986.
- ASTM C-78. **Test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)**. American Society For Testing and Materials, Philadelphia, 1984. 5 p.
- AURICH, M., CAMPOS, A. F. **Estudo da ligação entre elementos de reforço e peças de concreto armado utilizando o método dos elementos finitos**. CD-ROM dos Anais do 44º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2002.
- AUSTIN, S., ROBINS, P. PAN, Y. **Shear bond testing of concrete repairs**. Cement and Concrete Research, V. 29, 1999, pp. 1067-1076.
- BARBOSA, M. P. **Uma contribuição experimental e numérica sobre estruturas de concreto armado de elevado desempenho: estudo da aderência-ancoragem e do comportamento de vigas fletidas**. Tese de Livre Docência, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 1998, 174 p.
- BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2001, 203 p.
- BASTOS, P. K. X., CINCOTTO, M. A. **Retração de compósitos à base de cimento**. Publicação IBRACON. Anais. São Paulo, 2000

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**, 5 ed. ver. atual. – V. 1 – Rio de Janeiro, Ed. LTC, 2000.

BEBER, A. J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, CPGEC, 1999, 145 p.

BORGES, J. U. A., BITTENCOURT, T. N., SHAH, S. P. **Influência do tamanho do corpo de prova na curva tensão-deformação do concreto submetido à compressão uniaxial**. IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo, SP. ,1999.

BRESSON, J. **The use of plated concrete** Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, N° 349, France, 1977.

CAO, J., CHUNG, D. D. L. **Degradation of the bond between old and new mortar under cyclic shear loading, monitored by contact electrical resistance measurement**. Cement and Concrete Research, V. 31, 2001, pp 1647-1651.

CARRASQUILLO, P. M.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. **Properties of high strength concrete subject to short-term loads**. ACI Materials Journal, 1981, p. 171-181.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono**. Tese de Mestrado – São Carlos – SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002, 173 p.

CEB 162 **Assesment on concrete structures and design procedures for upgrading** Comité Euro-Internacional du Béton, Lausanne, 1983, 288 p.

CEB-FIP MODEL CODE 1990. **Bulletin d'information**. Comité Euro-International du Béton, Paris, n° 203-205, 1991.

- CHEN, P., FU, X., CHUNG, D. D. L. **Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the new concrete.** Cement and Concrete Research, V. 25, No 3, 1995, pp 491-496.
- CINCOTTO, M. A. **Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações.** IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 1983.
- CLÍMACO, J. C. T. S. **Resistência ao esforço cortante em vigas curtas de concreto leve, sem armadura transversal.** Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1975, 131 p.
- CLÍMACO, J. C. T. S. **Repair of structural concrete involving the addition of new concrete.** Tese de Doutorado, The Polytechnic of Central London, 1990, 239 p.
- CLÍMACO, J. C. T. S. **Avaliação da resistência de aderência entre concretos de diferentes idades,** IBRACON - Reunião anual de 1989. Anais. São Paulo, 1989.
- CLÍMACO, J. C. T. S.; NEPOMUCENO, A. A. **Parâmetros para uma metodologia de manutenção de estruturas de concreto.** In: 36º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - REIBRAC-IBRACON. Porto Alegre, 1994. Anais. Porto Alegre, 1994.
- DECTER, M. H., KEELEY, C. **Durable concrete repair – importance of the compatibility and low shrinkage.** Construction and Building Materials, V. 11, Nº 5-6., 1997.
- DÉSIR, J. M. **Interface aço-concreto: reformulando os modelos constitutivo e numérico.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1998, 111 p.
- EMMONS P. H., VAYSBURD A. M. **System concept in design and construction of durable concrete repairs.** Construction and Building Materials, V. 10, Nº 1, 1996, pp. 69-75.

FAGURY, S. C., LIBÓRIO J. B. L. **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**, CD-ROM dos Anais do 44º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2002.

FORES, G. T. **Groupe de Travail des Formulateurs de Résines synthétiques dans les domaines du Bâtiment et des Travaux Publics** Annales de l'ITBTP, série TGC/nº 366, 1978, p. 41.

FREITAS, L. B., JÚDICE, F. M. S., CARNEIRO, L. A. V., EVANGELISTA, A. C. J., SHEHATA, L. C. D. **Avaliação do módulo de elasticidade de concretos de alto desempenho com diferentes idades**. CD-ROM dos Anais do 43º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2001.

GARCIA, S. R. A. **Avaliação da resistência de aderência de sistemas de reparo a estruturas de concreto**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB, 1998, 159p.

GARCIA, S. R. A., CLÍMACO, J. C. T. S. **“Eficiência da aderência de materiais de reparo para estruturas de concreto”**, CD-ROM dos Anais do 43º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2001.

GUARDA, M. C. C., LIMA, J. S. **Verificação dos deslocamentos em elementos fletidos – um panorama da nova NBR 6118**. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo, SP, 2000.

GY, L., XIE H., XIONG G. J. **Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders**. Cement & Concrete Composites, V. 23, 2001, pp. 381-387.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. IPT, Ed. PINI, São Paulo, Brasil, 1º Edição, 1986.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª ed., São Paulo: Editora Pini, 1992.

- JIANG, L. **The interfacial zone and bond strength between aggregates and cement pastes incorporating high volumes of fly ash.** Cement & Concrete Composites, V. 21, 1999, pp. 313-316.
- KAMADA, T., KUNIEDA, M., KURIHARA, N., NISHIDA, Y., ROKUGO, K. **Evaluation of roughness of joint concrete surface and bond properties.** Fracture Mechanics of Concrete Structures, 1998, pp. 1645-1654.
- KAMADA, T. LI, V. C. **The effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system.** Cement & Concrete Composites, V. 22, 2000, pp. 423-431.
- KAY, T., WYATT, B. **European standards for protection and repair.** Concrete. Set. 1997.
- LICHTENSTEIN, N. B., **Patologia das construções: procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1985, 191 p.
- LIMA, F. B. **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos – SP, 1997.
- MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais** - Ed. Pini, 1 Edição, São Paulo, Brasil, 1994.
- MORENO JR. R., SELMO, S. M. S. **Reparos localizados superficiais em estruturas de concreto – Análise da aderência segundo métodos de ensaio distintos,** CD-ROM dos Anais do 44º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2002.
- MORGAN, D. R. **Compatibility of concrete repair materials and systems.** Construction and Building Materials, V. 10, Nº 01, 1996, pp. 57-67.

NBR 5738. Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1994.

NBR 5739 Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1980.

NBR 7222 Argamassa e concretos – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1982.

NBR 6118 Projeto e execução de obras de concreto armado Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1978.

NBR 12142 Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1991.

NB-1. Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1999.

PAREEK, S. N., OHAMA, Y., DEMURA, K. Evaluation method for adhesion test results of bonded mortars to concrete substrates by square optimization. ACI Materials Journal, V. 92, No 4, 1995.

PLANAS, J. RUIZ, G. ELICES, M. Fracture of lightly reinforced concrete beams: theory and experiments. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 1995, pp. 1179-1188.

PLUM, D. R. The behaviour of polymer materials in concrete repair, and factors influencing selection. The Structural Engineer, V. 68, nº 17, London, U. K., 1990.

PROKOPSKI, G., HALBINIAK, J. Interfacial transition zone in cementitious materials. Cement and Concrete Research, V. 30, 2000, pp 579-583.

- QUEIRÓZ, R. R. **Taxa de armadura mínima de flexão e de cortante em vigas de concreto armado**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1999, 213 p.
- RAO, G. A., PRASAD, B. K. R. **Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength**. Cement and Concrete Research, V. 32, 2002, pp 253-257.
- RIPPER, T., SOUZA, V. C. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª ed., São Paulo: Editora Pini, 1998.
- ROBINS, P. J.; AUSTIN, S. A. **A unified failure envelope from the evaluation of concrete repair bond tests**. Magazine of concrete research. Loughborough University of Technology, UK. V.47, n.170, 1995, pp.57-68.
- RUIZ, G. PLANAS, J. **Propagación de una fisura cohesiva en vigas de hormigón débilmente armadas: modelo de la longitud efectiva de anclaje**. Anales de Mecánica de la fracture, V 11, 1994, pp 506-513.
- RUIZ, G. **El efecto de escala en vigas de hormigón débilmente armadas: y su repercusión en los criterios de proyecto**. Tese de Doutorado, Universidade Politécnica de Madri, Espanha, 1996, pp 152.
- SABBATINI, F. H. **Patologia das argamassas de revestimento – aspectos físicos**. III Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, São Paulo, 1986.
- SABBATINI, F. H. **Tecnologia de produção de revestimentos**. Notas de aula da disciplina PCC 816. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- SANCHEZ, E. MENEGHEL, J. M. **Estudo da aderência compósito de fibra de carbono-concreto em vigas reforçadas à flexão**. CD-ROM dos Anais do 44º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2002.
- SHAH, S. P., AHMAD, S. H. **High performance concrete and applications**. Edward Arnold, 402 p., London, 1994.

SILVA, V. S., LIBÓRIO, J. B. L. **Estudo da aderência de argamassas de revestimentos e chapiscos em estruturas de concreto armado.** CD-ROM dos Anais do 44º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2002.

SITTER, W. R. **Costs for service life optimization. The “law of fives”.** CEB-RILEM. Durability of concrete structures. Proceedings of the international workshop held in Copenhagen on 18-20 May 1983. Copenhagen, 1984.

SOUZA, R. H. F. **Análise do comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão e ao esforço transversal.** Tese, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 1990, 326 p.

SOUZA, R. H. F., APPLETON, J. **A influência das propriedades físicas e mecânicas dos sistemas de reparação no comportamento estrutural de vigas de concreto armado reparadas,** CD-ROM dos Anais do 43º IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2001.

SWAMY, R. N., JONES, R. CHARIF, A. **The effect of external plate reinforcement on the strengthening of structurally damaged R. C. beams.** The Structural Engineer, V. 67, nº 3, London, U. K., 1989, pp. 45-54.

TAVARES, M. E. N. **Estudo experimental de vigas de concreto protendido - influência da variação da aderência aço-concreto na flexão.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2000, 249 p.

TEIXEIRA JR, S. V. **Reparos de vigas de concreto armado em cisalhamento.** Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1994, 131 p.

THEILLOUT, J. N. **Le renforcement des structures par la technique de Tôles Collées – étude du fonctionnement.** Bulletin de liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées, nº 169, França, 1990, pp. 91-107.

- TSCHEGG, E. K., INGRUBER, M., SURBERG, C. H., MUNGER, F. **Factors influencing fracture behavior of old-new concrete bonds**. ACI Materials Journal, V. 97, No 4, 2000.
- SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto armado**. Ed. Globo, Vol. 01, 5 Ed., Rio de Janeiro, 1979, 376p.
- VANDERLEI, R. D., GIONGO, J. S. **Análise de características mecânicas do concreto de alta resistência**. IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo, SP, 1999.
- WITTMANN, F. H., MULLER, T. **Adherence and fracture energy**. Workshop on Adherence of Young on Old Concrete, Switzerland, 1994, pp. 97-106.
- XIONG, G., CUI, Y., CHEN, L., JIANG, H. **Influence of hydrochloric acid etching on bond strength between concrete substrate and repair materials**. Cement & Concrete Composites, V. 25, 2003, pp. 1-5.

ANEXO A

As vigas foram divididas em quatro grupos, segundo a resistência característica (f_{ck}) à compressão do concreto:

Adotou-se para os quatro grupos o traço, em massa, calculado pela NBR 6118.

Concreto com $f_{ck} = 18$ MPa (substrato)

$$f_{cj28} = 24,6 \text{ MPa}$$

a) Relação água/cimento: $X = 0,6$

b) Relação cimento/agregado em peso: $1 : M$

$$\text{areia + brita} : M = X/A - 1 = 5$$

onde $A = 10,0$ % (vibração mecânica moderada)

c) Traço (cimento : areia : agregado graúdo)

$$1 : A : B$$

$$\text{Brita} : B = k(M + 1) = 3,3$$

$$\text{Areia} : A = M - B = 1,7$$

onde $K = 0,55$ (vibração moderada e $D_{m\acute{a}x} = 19,0$ mm)

O traço final é : $1:1,7:3,3:0,6$

O consumo por m^3 (Kg) = $370:629:1220:222$

Analogamente para os outros traços, tem-se:

1) Concreto $f_{ck} = 18$ MPa (reforço)

$$f_{cj28} = 24,6 \text{ Mpa}$$

O traço final é : $1:1,55:3,1:0,6$

O consumo por m^3 (Kg) = $359:557:1113:216$

2) Concreto $f_{ck} = 25$ MPa (reforço)

$$f_{cj28} = 31,6 \text{ MPa}$$

O traço final é : $1:1,1:2,55:0,51$

O consumo por m^3 (Kg) = $359:395:916:183$

3) Concreto $f_{ck} = 32$ MPa (reforço)

$$f_{cj28} = 38,6 \text{ MPa}$$

O traço final é : 1:0,7:2,05:0,43

O consumo por m³ (Kg) = 359:251:736:154