

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Introdução

A eficiência do sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono e o estabelecimento de critérios de dimensionamento requerem uma maior compreensão dos mecanismos de aderência que envolvem esse tipo de reforço. O dimensionamento do reforço e a resistência da ligação concreto-adesivo-compósito são definidores do comportamento estrutural do elemento a ser reforçado (ARAÚJO 2002, b).

Este capítulo apresenta de forma resumida o sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono (CFC) e seus constituintes, os parâmetros que influenciam a aderência do sistema concreto-CFC, uma formulação da equação diferencial da aderência entre o concreto e o CFC e alguns estudos teóricos e experimentais sobre a aderência entre o substrato de concreto e o CFC e ensaios utilizados para a sua determinação.

2.2.

Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono

Pesquisas iniciais sobre reforço de estruturas de concreto armado com adição de chapas metálicas coladas com resina epóxica foram realizadas na década de 60. Esta técnica, eficiente e de custo relativamente baixo, tem as desvantagens da corrosão do aço, da baixa resistência ao fogo e, em função do peso e tamanhos comerciais das chapas, da necessidade de escoras e dificuldade de manipulação.

Portanto, essas chapas foram substituídas pelos compósitos de fibra de carbono (CFC), pois esses materiais, quando comparados com o aço de construção, para elementos com dimensões geométricas iguais, possuem um quarto do peso, resistência à tração oito a dez vezes superior, e são mais finos, logo, são mais eficientes e econômicos, pois seu custo-benefício é maior.

O sistema de reforço com CFC é indicado para aplicações em vigas, lajes, paredes, silos, reservatórios, túneis e demais elementos estruturais que necessitam de acréscimo na capacidade de carga e que tenham flechas excessivas, etc.

Esses compósitos são apropriados para o reforço de estruturas de concreto armado devido ao alto desempenho das fibras de carbono, permitindo uma significativa redução nas dimensões dos elementos de reforço, além de sua elevada resistência à tração e módulo de elasticidade da ordem de grandeza do módulo de elasticidade do aço.

As características dessa técnica também incorporam algumas vantagens na execução, como o acréscimo insignificante na carga permanente e uma espessura mínima. A boa flexibilidade permite adaptação a várias formas, e a facilidade de aplicação traz economia de custos e redução nos tempos de paralisação, além de ser um material não corrosivo, o que garante durabilidade e nenhuma manutenção.

Segundo LIMA (2001), além destas vantagens, há algumas incertezas referentes ao desempenho do reforço em determinadas situações. De acordo com a literatura corrente, a mais perigosa para a sanidade do mesmo seria a exposição do adesivo a elevadas temperaturas, fato que pode ocasionar a degradação do compósito.

A Figura 2.1 ilustra algumas recuperações realizadas com a utilização de reforço com compósitos de fibra de carbono.



Figura 2.1 – Obras recuperadas utilizando reforço com CFC; Fonte: www.mbrace.com (2004).

2.2.1. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são constituídos de uma matriz termoplástica (adesivo) ou matriz com cura térmica (termofixos), fibras contínuas dispostas aleatoriamente ou em direções definidas, e apresentam as seguintes particularidades: a resistência da matriz é menor que a das fibras, sendo que essas devem resistir as cargas para obter-se um ganho maior na resistência do compósito (Figura 2.2). O inconveniente que deve ser realçado é a ruptura brusca das fibras. A função da matriz (adesivo) é manter as fibras orientadas aderidas ao substrato e transmitir as ações externas para as mesmas por meio de tensões tangenciais (tensões de aderência entre a matriz e as fibras).

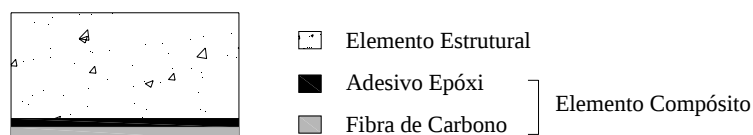


Figura 2.2 – Representação de um material compósito em reforço estrutural.

2.2.2. Compósitos de Fibras de Carbono

A técnica da colagem de laminados ou tecidos de materiais compósitos às estruturas é relativamente nova, surgiu no mercado por volta de 1980 e mostra-se atrativa face à sua facilidade de execução, manutenção das dimensões iniciais dos elementos, prazo e custos.

Dentre os compósitos mais utilizados e que apresentam maiores resultados como reforço em elementos de concreto armado estão os de fibra de carbono (CFC).

As fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros, como o poliacrilonitril, sendo suas características mecânicas diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica que inclui carbonização, grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono com diversas configurações de resistência e algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço. A produção dessas fibras exige exposição ao ar das fibras base, seguida de

processamento a altas temperaturas (da ordem de 1000°C a 1500°C para as fibras de carbono). Essa característica confere à fibra uma tensão admissível de tração da ordem de 3550 MPa para uma deformação específica de 1,5%.

As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez. O seu alto módulo de elasticidade e alta resistência dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos destas.

Esses compósitos apresentam uma curva tensão-deformação específica linear até a ruptura, caracterizando um comportamento de ruptura frágil, sem apresentar patamar de escoamento, ou seja, não possui um escoamento definido como o do aço estrutural (Figura 2.3).

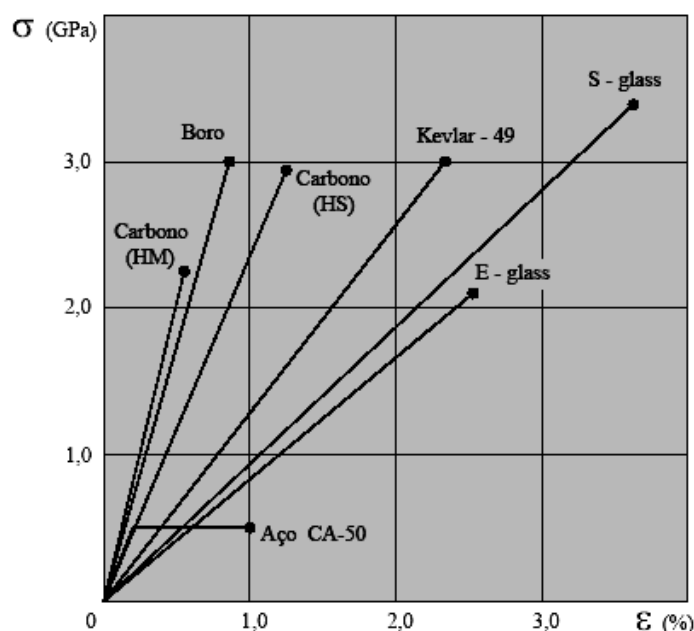


Figura 2.3 – Diagrama tensão-deformação específica, para diversos tipos de fibra; adaptada de ARAÚJO (2002 a).

Os CFC utilizados em reforço estrutural apresentam-se sob diversas formas, sendo que no momento são fabricados três tipos (BEBER et al. (2000)):

- **Chapas Pultrudadas**: são chapas de fibras de carbono de alta resistência, impregnadas com resina epóxi, que resultam em perfis contínuos que assumem diversas formas e que são colados à superfície do elemento estrutural (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Chapas pultrudadas; adaptada de LIMA (2001).

- Tecidos de fibra de carbono: são tecidos pré-impregnados (“prepreg”), previamente alinhados, com espessura similar a do papel de parede, colados à superfície com resina epóxi seguindo exatamente a curvatura do elemento permitindo sua aplicação em “cantos vivos” (Figura 2.5).

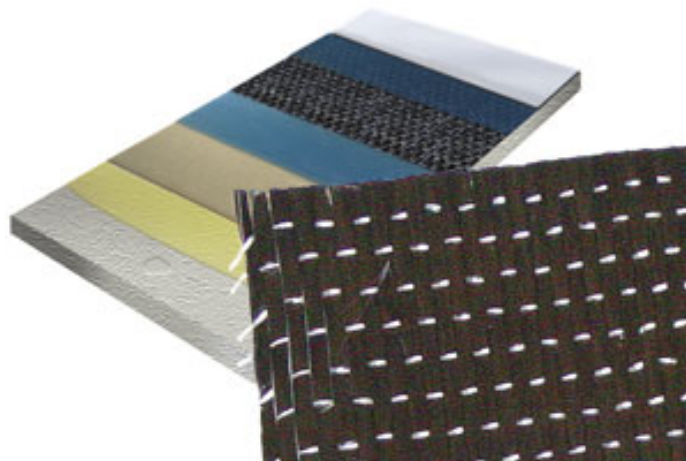


Figura 2.5 – Tecido de fibra de carbono; www.mbrace.com (2004).

- Fios de fibra de carbono: são enrolados sob tensão e consiste em filamentos colados na superfície do elemento estrutural (Figura 2.6).

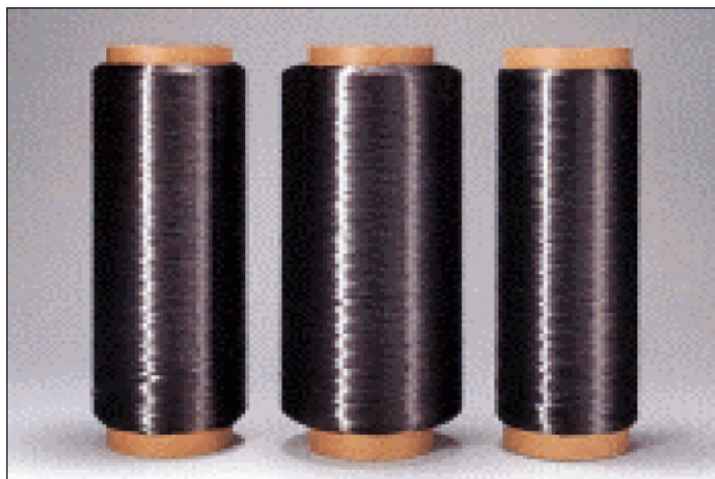


Figura 2.6 – Fios de fibra de carbono; adaptada de LIMA (2001).

A qualidade do produto e da resina a serem utilizados, a preparação cuidadosa da superfície que receberá o material e a execução correta da colagem no substrato de concreto, influem diretamente no bom desempenho dos reforços executados com CFC.

A larga aplicação desse material em diversos países da Europa, EUA, Japão e também no Brasil, vêm comprovando sua viabilidade técnica e comercial. O fator mais importante a ser considerado não seja o custo do material em si, mas o custo benefício da reabilitação de uma estrutura, considerando-se a expectativa de vida útil dessa reabilitação e o custo de outras alternativas.

2.2.3. Resinas Epóxi

As resinas epóxi (etoxileno) são as que contêm o grupo epoxílico e são derivadas da epícloridrina e bisfenol A. A primeira é proveniente de gases do petróleo e a segunda da condensação de fenol com acetona. Essas resinas começaram a ser produzidas em 1946.

As resinas epóxi de modo análogo ao cimento Portland, por si só não apresentam características físicas para utilização prática, devendo ser combinadas em sistemas com outros materiais. Para tanto, são utilizados catalisadores que contêm em suas moléculas hidrogênio ativo, que reage com as resinas gerando uma “formulação epóxi”.

Cada formulação epóxi possui propriedades físicas e químicas bem definidas. Dentre elas pode-se destacar a sua resistência à tração, variando de

30 MPa a 90 MPa, e à compressão variando de 120 MPa a 210 MPa, excelente adesão ao concreto, rompendo sempre por tração fora da área colada, com um intervalo de tempo, para adquirir resistência, variando de 30 minutos à 10 horas, sendo que a resistência máxima é obtida aos sete dias, e a retração inferior é inferior à do concreto (ARAÚJO (2002a).

As resinas epóxi possuem alongamento de 1,6% e módulo de elasticidade de 4,3 GPa.

A resina epóxi tem como finalidades atuar como adesivo, ou seja, fazer com que o material atinja sua resistência própria em uma hora, apresentando excelente resistência química, alta capacidade de liga e resistência final muito elevada; garantir a aderência do compósito ao substrato de concreto, transferindo as tensões tangenciais deste para o substrato, de modo a estabelecer a integridade do arranjo compósito-epóxi-concreto; atuar como selante, para uso com diversos materiais de construção, possuindo durabilidade e elasticidade muito maiores do que os materiais usuais (MACHADO (2004)).

Dentre as resinas sintéticas utilizadas na construção, tais como as resinas acrílicas, as de poliéster, as poliuretânicas, as resinas epóxi são as mais utilizadas em reforços e recuperações de estruturas de concreto, devido a uma série de vantagens que essas apresentam sobre as outras. Dentre as vantagens dessas resinas, enfatiza-se as suas excelentes propriedades de aderência, resistência e durabilidade, além da compatibilidade que esses materiais possuem com o concreto.

O epóxi puro, formado por resina e catalisador, é o material utilizado no reforço e recuperação de estruturas de concreto. Por ser um material isolante, influencia na estrutura dando a ela uma maior resistência à ruptura do conjunto compósito-concreto, uma vez que esses dois materiais apresentam coeficientes de dilatação térmica diferentes. A camada de epóxi não deve exceder a 3mm de espessura para que o seu endurecimento no interior da pasta não seja reduzido, prejudicando assim o reforço realizado. Na prática a sua espessura final fica no máximo em torno de 1 mm.

A escolha do tipo de adesivo é fundamental, pois o comportamento mecânico do reforço depende do mesmo.

2.3.

Aderência entre o Substrato de Concreto e o CFC

Este item apresenta os conceitos fundamentais, os parâmetros que influenciam a aderência, a formulação da equação diferencial da aderência entre o concreto e o CFC e alguns estudos teóricos e experimentais encontrados na literatura sobre a aderência entre o concreto e os compósitos de fibra de carbono, assim como os ensaios utilizados para a sua determinação.

2.3.1.

Conceitos Fundamentais

A aderência entre o compósito de fibra de carbono (CFC) e o concreto é fundamental para a efetivação do reforço estrutural de peças de concreto utilizando-se esse tipo de material, donde faz-se necessário um estudo mais aprofundado sobre este fenômeno.

A distribuição das tensões de aderência de um elemento estrutural submetido à flexão é influenciada pelas tensões normais perpendiculares à área de aderência, que são causadas por efeitos dos momentos fletores e pela transferência das forças nas fissuras existentes nas extremidades do compósito.

A distribuição geral das tensões tangenciais de aderência e da tensão normal ao longo do laminado de PRF colado ao concreto é mostrada na Figura 2.7.

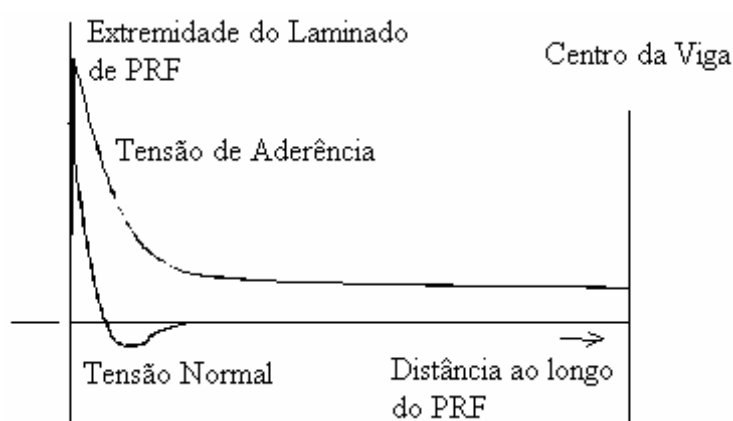


Figura 2.7 – Distribuições da tensão de aderência e tensão normal ao longo do comprimento do laminado de PRF; adaptada do ACI 440 F (2000).

Para níveis baixos de cargas as tensões de aderência estão principalmente concentradas na extremidade do reforço, mas com o aumento do carregamento estas se propagam ao longo deste.

A ação da aderência entre o concreto e o reforço pode ser caracterizada pela relação tensões de aderência x deslocamento, face ao fato de que as tensões de aderência são transferidas entre o concreto e o reforço face ao deslocamento entre esses dois materiais.

Os modelos e leis de aderência existentes fundamentam-se, em geral, em ensaios de corpos-de-prova com um ou dois laminados ou tiras coladas, tracionadas em conjunto com o corpo-de-prova (este também pode ser submetido à compressão), o que não reflete o verdadeiro comportamento do reforço colado externamente em elementos estruturais submetidos à flexão simples. Portanto, as leis de aderência x deslocamento 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.

Para a determinação e caracterização da aderência são utilizados diversos tipos de ensaios de aderência, dentre eles podem ser destacados os ensaios de tração-tração, ensaio de tração-compressão, ensaios de arrancamento (pull-off) e de torque realizados por KURIHARA et al. (2000), os quais serão analisados posteriormente.

Nos ensaios de tração pura a tensão de aderência tende a diminuir quando a área de aderência aumenta. Isso ocorre devido ao fato da tensão de aderência não ser distribuída ao longo de toda a área do comprimento de aderência, e sim na região da extremidade carregada do CFC, ou na fissura. Isto para comprimentos não maiores do que 100 mm. Em cada método de ensaio a ruptura ocorre na parte mais fraca do sistema, que pode ser o adesivo, o concreto, o CFC ou a combinação destes.

2.3.2.

Parâmetros que Influenciam a Aderência

Este item apresenta alguns parâmetros que influenciam as tensões de aderência entre o CFC e o concreto. Salienta-se que existem outros parâmetros influenciadores, mas só serão mencionados neste item os quatro descritos a seguir.

2.3.2.1.

Comprimento de Ancoragem do CFC

O CFC é considerado um material frágil e apresenta uma baixa ductilidade, com ruptura brusca sem apresentar patamar de escoamento, portanto, o uso de ancoragem entre o concreto e os CFC tem função importante em projetos de reforço (NAKABA et al. (2001)).

Analizando-se os comportamentos das deformações específicas e das cargas de ruptura, observa-se que a aderência é totalmente alcançada para comprimentos de aderência menores, mas resistem a cargas de rupturas menores.

Quando o comprimento de ancoragem aumenta, a força da ruptura tende a ser maior, e a tensão de aderência média diminui, sendo necessário confirmar a segurança do CFC, ou buscar um comprimento de aderência adequado para evitar a ruptura brusca do tipo frágil (CHAJES et al. (1996)).

Como a força de tração dos CFC é transferida ao concreto, não existe tensão de aderência entre as regiões descoladas. Isso significa que quando o comprimento de aderência excede a um comprimento crítico (igual ao comprimento de aderência efetivo) da ordem de 100 *mm*, a carga de fratura permanece constante (NAKABA et al. (2001)).

As Figuras 2.8 e 2.9, obtidas de resultados experimentais de CHAJES et al. (1996) ilustram o comportamento das tensões de aderência em função de comprimentos de aderência variáveis.

Observa-se que as tensões médias de aderência diminuem quando os comprimentos de aderência aumentam para qualquer tipo de CFC, devido ao fato de que para grandes comprimentos de aderência a tensão máxima de aderência não é atingida.

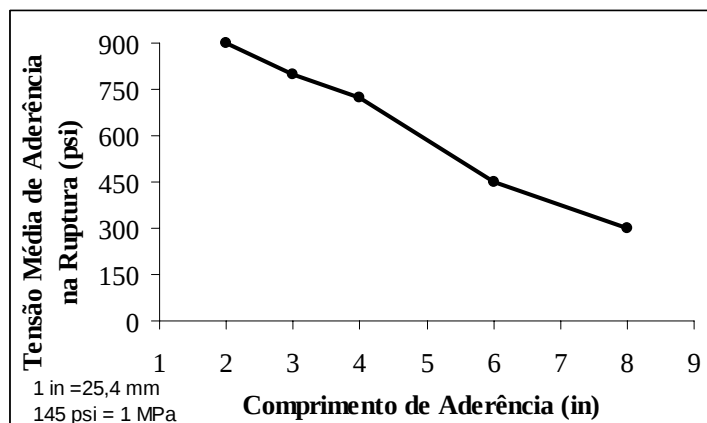


Figura 2.8 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).

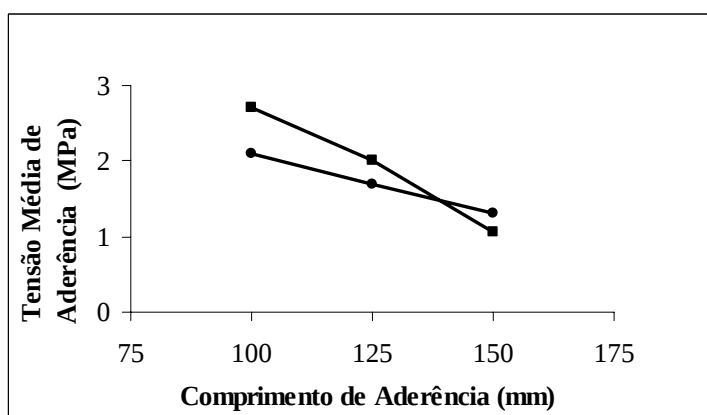


Figura 2.9 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

A Figura 2.10 mostra que para comprimentos de aderência menores as cargas de ruptura são menores, e a partir de um certo comprimento esta se torna constante.

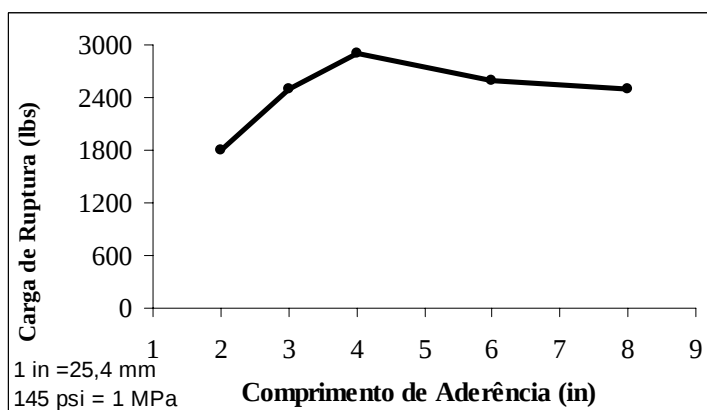


Figura 2.10 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).

2.3.2.2.

Resistência à Compressão do Concreto

As Figuras 2.11 e 2.12 ilustram gráficos tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto obtida em ensaios realizados por CHAJES et al. (1996) e ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001). Nestes gráficos, observa-se que as tensões de aderência aumentam quando a resistência à compressão do concreto aumen

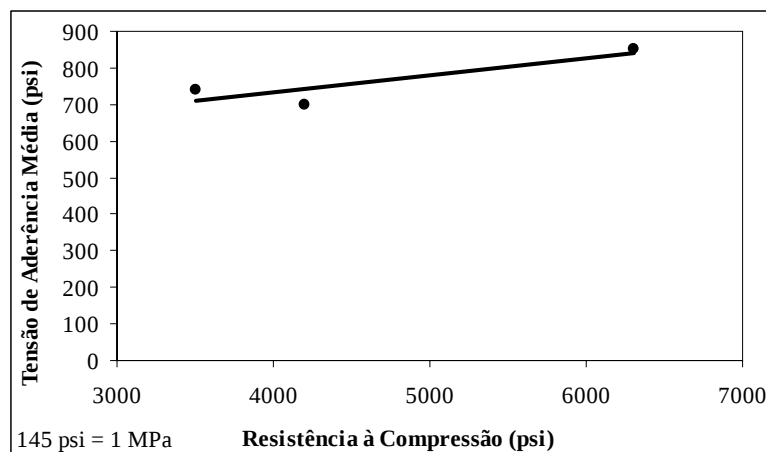


Figura 2.11 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de CHAJES et al. (1996).

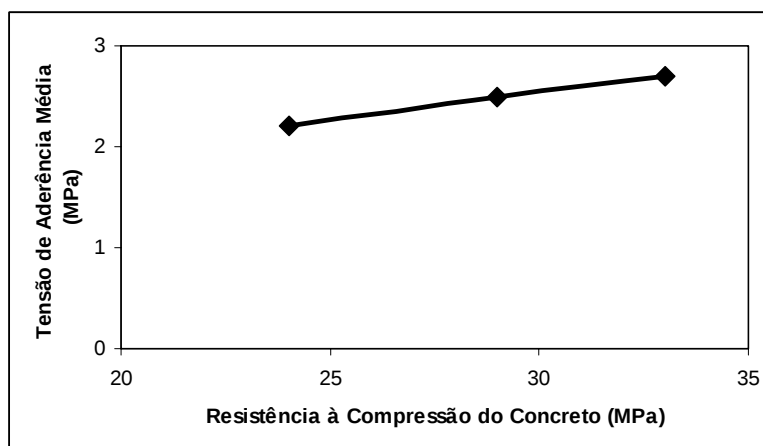


Figura 2.12 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

2.3.2.3.

Tipos de Adesivo e Tratamento da Superfície de Concreto

KURIHARA et al. (2000) realizaram experimentos com diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície de concreto para verificar a influência destes na aderência entre o concreto e o CFC. Os adesivos utilizados por esses autores

foram resina epóxi, argamassa de polímero de cimento modificado e argamassa de cimento e os tratamentos foram: sem tratamento, fragmentação, jato de ar e trituração.

Os resultados desses ensaios mostraram que existe uma excelente tensão de aderência entre a resina epóxi e o substrato de concreto, que é maior do que a tensão média obtidos para concretos de boa qualidade e resistência usual.

O desenvolvimento da tensão de aderência da resina epóxi é muito rápido quando comparado com a argamassa de polímero de cimento modificado, sendo necessário somente um dia para a tensão tangencial de aderência da resina epóxi exceder o valor da tensão tangencial de aderência do concreto. O rápido desenvolvimento da tensão tangencial de aderência é uma vantagem, pois elementos estruturais reforçadas podem ser liberados mais cedo para utilização.

Quando a argamassa de polímero de cimento modificado é usada como adesivo, os tipos de ruptura variam de rupturas de aderência na interface em idades menores até rupturas no concreto depois de três dias. A tensão tangencial de aderência aumenta com a idade da argamassa de polímero de cimento modificado.

O desenvolvimento da tensão tangencial de aderência para argamassa de polímero de cimento modificado, não é tão rápido quanto ao da resina epóxi, sendo necessários dez dias, e é menor que esse, e depende do grau de rugosidade da superfície. A argamassa de polímero de cimento modificado também possui uma elevada tensão tangencial de aderência, mas apresenta rupturas na interface.

Os corpos-de-prova colados com argamassa de cimento romperam na interface em 100% dos ensaios.

A argamassa de cimento possui valores relativamente menores para a tensão tangencial de aderência, donde ocorrem rupturas na interface. O desenvolvimento da tensão de aderência da argamassa de cimento é muito lento e pequeno.

A resistência do conjunto CFC – concreto depende da qualidade do concreto ao longo da superfície em que o compósito está colado, sendo que as propriedades dessa superfície não podem ser indicativos de resistência para toda a estrutura.

As superfícies tratadas com fragmentação possuem maior rugosidade, seguidas pela superfície tratada com jato de ar, trituração e sem tratamento.

Em geral, nos substratos tratados com jato de ar ou água, uma grande proporção de rupturas ocorre na interface.

A relação entre a rugosidade da superfície e a tensão tangencial de aderência obtida em corpos-de-prova, usando argamassa de cimento como adesivo, mostra que a relação entre a rugosidade da superfície e essa tensão é uma relação linear.

A influência da rugosidade do substrato de concreto na tensão tangencial de aderência é muito significativa quando se utiliza argamassa de cimento como adesivo. Existe uma relação linear entre a rugosidade da superfície do substrato de concreto e essa tensão na argamassa de cimento, sendo que quanto mais elevado for o grau de rugosidade da superfície, mais elevado é o valor deste parâmetro.

Para a argamassa de polímero de cimento modificado existem algumas influências da rugosidade na tensão de aderência. Para corpos-de-prova colados com resina epóxi, a influência da rugosidade nessa tensão não foi observada nos ensaios de KURIHARA et al. (2000), sendo que os mesmos não são conclusivos.

A Tabela 2.1 mostra os resultados obtidos por KURIHARA et al. (2000) para a tensão de aderência utilizando diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície.

Tabela 2.1 – Resultados para a tensão de aderência utilizando-se diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície; adaptada de KURIHARA et al. (2000).

<i>Adesivo</i>	<i>Idade do Adesivo (dias)</i>	<i>Tratamento da Superfície</i>	<i>$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)</i>
<i>Epóxi</i>	8	<i>Sem Tratamento</i>	3,96
		<i>Trituração</i>	4,55
		<i>Fragmentação</i>	5,08
		<i>Jato de Ar</i>	4,71
<i>Argamassa de Polímero de Cimento Modificado</i>	10	<i>Sem Tratamento</i>	4,29
		<i>Trituração</i>	6,13
		<i>Fragmentação</i>	5,33
		<i>Jato de Ar</i>	5,16
<i>Argamassa de Cimento</i>	24	<i>Sem Tratamento</i>	0,73
		<i>Trituração</i>	1,11
		<i>Fragmentação</i>	1,12
		<i>Jato de Ar</i>	1,45

Nota-se que corpos-de-prova colados com argamassa de polímero de cimento modificado e superfície tratada com fragmentação possuem maiores tensões de aderência.

CHAJES et al. (1996) utilizaram Sikadur 31, Sikadur 32, Tyrite e Fusor como adesivo e superfície sem tratamento, abrasão mecânica e trituração para

obter a rugosidade adequada para o recebimento do reforço e obtiveram os resultados mostrados nas Tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.2 – Resultados para diferentes tipos de adesivo; adaptada de CHAJES et al. (1996).

<i>Tipo do Adesivo</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Aderência na Ruptura (MPa)</i>
<i>Sikadur 31</i>	47,00	5,49
<i>Sikadur 32</i>	43,58	5,44
<i>Tyrite</i>	43,58	4,62
<i>Fusor</i>	43,58	5,43

Tabela 2.3 – Resultados para diferentes tipos de tratamento da superfície; adaptada de CHAJES et al. (1996).

<i>Preparação da Superfície</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)</i>	<i>Tensão Média de Aderência na Ruptura (MPa)</i>
<i>Superfície sem Tratamento</i>	36	4,37
<i>Trituração</i>	47	5,13
<i>Abrasão Mecânica</i>	47	5,49

Observa-se que as tensões médias de aderência são maiores para corpos-de-prova colados com Sikadur 31 e superfície tratada com abrasão mecânica.

A análise dos resultados dos ensaios realizados por CHAJES et al. (1996) e KURIHARA et al. (2000) concluíram que as tensões de aderência variam de acordo com os diversos tipos de adesivo usados para a colagem do CFC e com os variados tipos de tratamento da superfície para se obter uma rugosidade adequada para melhorar a aderência.

2.3.3.

Equação Diferencial da Aderência entre o Concreto e o CFC

A formulação teórica do comportamento da aderência CFC-concreto é fundamentada na deformação da camada de adesivo e no sistema mecânico de transferência de forças entre os três materiais, (Figura 2.13) (SÁNCHEZ et. al (2004)).

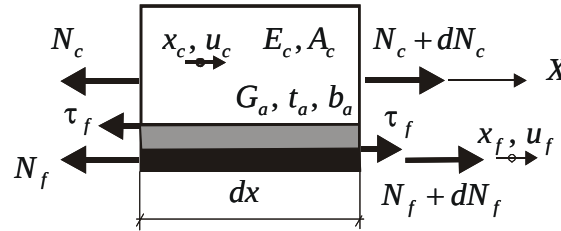


Figura 2.13 – Parâmetros geométricos e mecânicos para a análise da aderência entre o CFC e o substrato de concreto.

Definindo-se $n_f = \frac{E_f}{E_c}$ como a relação entre os módulos de elasticidade do CFC e do concreto, $\rho_f = \frac{A_f}{A_c}$ como a taxa geométrica da armadura de CFC, sendo A_f e A_c as áreas do CFC e do concreto, respectivamente e $A_f = t_f b_f$, onde b_f é a largura, e t_f a espessura do CFC.

As tensões tangenciais τ , denominadas de tensões de aderência, que produzem uma distorção γ no adesivo (Figura 2.14), surgem entre o adesivo de espessura t_a , com módulo de elasticidade transversal G_a e o CFC, e entre o adesivo e o substrato de concreto. Essas tensões tangenciais resultam em forças tangenciais nas interfaces desses elementos, as quais em conjunto com as forças normais (N) atuantes no CFC e no concreto permitem formular o equilíbrio do conjunto, seguindo-se para um trecho de comprimento elementar dx (Figura 2.14).

- equilíbrio na direção longitudinal:

$$dN_f = -dN_c \quad (2.1)$$

- equilíbrio no CFC:

$$dN_f = A_f d\sigma_f = t b_f dx \quad (2.2)$$

logo

$$\frac{dN_f}{dx} = tb_f \quad (2.3)$$

➤ equilíbrio no substrato de concreto:

$$dN_c = A_c d\sigma_c = -dN_f = -tb_f dx \quad (2.4)$$

$$\frac{dN_c}{dx} = -tb_f \quad (2.5)$$

Admitindo-se o regime de pequenas deformações tem-se para a análise da distorção no adesivo (Figura 2.14).

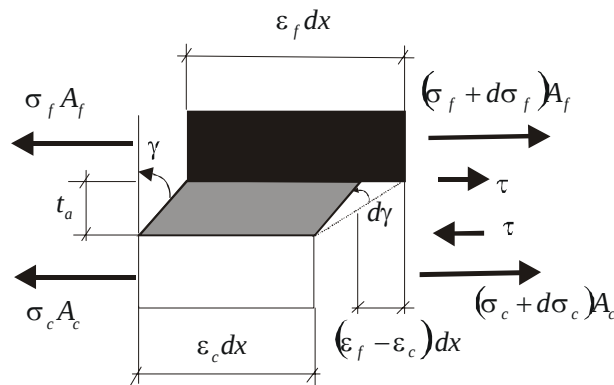


Figura 2.14 – Parâmetros para a análise da distorção do adesivo.

$$t_a d\gamma \cong (\varepsilon_f - \varepsilon_c) dx \quad (2.6)$$

Sendo $(\varepsilon_f - \varepsilon_c)$ representa a deformação específica relativa entre o CFC e o substrato de concreto, logo:

$$\frac{d\gamma}{dx} = \gamma' = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_c}{t_a} \quad (2.7)$$

Admitindo-se que os materiais tenham comportamento elástico e linear segue-se:

$$\gamma' = \frac{1}{t_a E_f} (\sigma_f - n_f \sigma_c) \quad (2.8)$$

Supondo-se que a função que representa a distorção seja contínua e possua pelo menos duas derivadas contínuas tem-se:

$$\gamma'' = \frac{1}{t_a E_f} \left(\frac{d\sigma_f}{dx} - n_f \frac{d\sigma_c}{dx} \right) \quad (2.9)$$

As equações 2.3 e 2.6 resultam numa equação diferencial de 2ª ordem, linear e homogênea:

$$\gamma'' - \frac{\tau b_f}{t_a E_f A_f} (1 - n_f \rho_f) = 0 \quad (2.10)$$

A equação 2.10 pode ser expressa em termos do deslocamento relativo entre o CFC e o substrato de concreto, definindo-se u_f e u_c como os deslocamentos do CFC e do substrato de concreto, respectivamente, tem-se:

$$s_f = u_f - u_c \quad (2.11)$$

Admitindo-se que esses deslocamentos sejam funções contínuas da variável x , e que possuam pelo menos duas derivadas contínuas, obtém-se:

$$\begin{cases} \varepsilon_f = \frac{du_f}{dx} = u_f' \\ \varepsilon_c = \frac{du_c}{dx} = u_c' \end{cases} \quad (2.12)$$

$$s_f' = u_f' - u_c' \quad (2.13)$$

Pela lei de Hooke tem-se:

$$\begin{cases} \frac{du_f}{dx} = u_f' = \frac{N_f}{E_f A_f} \\ \frac{du_c}{dx} = u_c' = \frac{N_c}{E_c A_c} \end{cases} \quad (2.14)$$

Sendo N_f e N_c as forças no CFC e no concreto, respectivamente, tem-se:

$$s_f' = \frac{N_f}{E_f A_f} - \frac{N_c}{E_c A_c} \quad (2.15)$$

A derivada em relação a x fornece:

$$s_f'' = \frac{1}{E_f A_f} \frac{dN_f}{dx} - \frac{1}{E_c A_c} \frac{dN_c}{dx} \quad (2.16)$$

Substituindo-se nessa equação as expressões 2.1 e 2.2 tem-se:

$$s_f'' - \left(\frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_c A_c} \right) b_f \tau = 0 \quad (2.17)$$

Resultando:

$$s_f'' - \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) b_f \tau = 0 \quad (2.18)$$

A tensão tangencial τ depende do deslocamento s_f , logo é plausível admiti-la como uma função $\tau(s_f) = f(s_f)$ que possa ser calibrada experimentalmente, donde:

$$s_f'' - \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) b_f f(s_f) = 0 \quad (2.19)$$

Essa equação diferencial de 2ª ordem, linear e homogênea, apresenta como soluções diversos tipos de funções $f(s_f)$. Essas funções são denominadas leis de aderência em termos de deslocamento, $\tau \times s$, e dependem do tipo de ensaio, (Figura 2.15).

- a) com tração no CFC e compressão no concreto (ensaios T-C);
- b) com tração no CFC e tração no concreto (ensaios T-T).

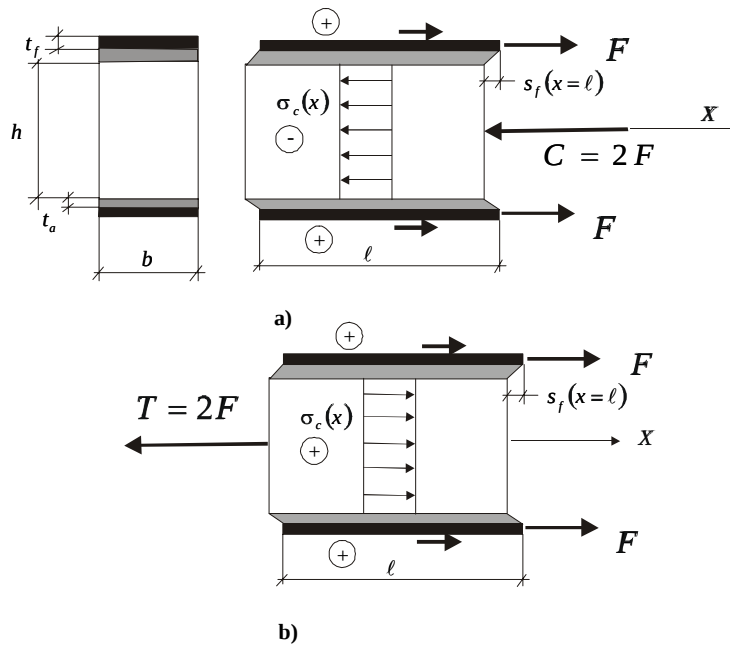


Figura 2.15 – Ensaio de aderência CFC-concreto: a) ensaio T-C; b) ensaio T-T.

2.3.3.1.

Lei $\tau \times s$ Bi-Linear

➤ Equação Diferencial em Termos dos Deslocamentos

A solução da equação 2.19 para uma lei de aderência bi-linear é efetuada admitindo-se o regime de pequenas deformações e os parâmetros mostrados na Figura 2.16.

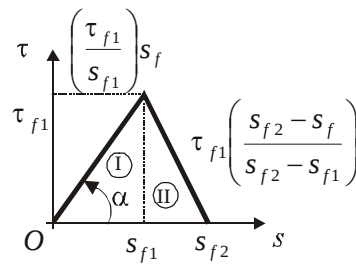


Figura 2.16 – Parâmetros para a análise do comportamento de uma lei bi-linear: diagrama $\tau \times s$;

➤ distorção do adesivo:

$$\operatorname{tg} \gamma_a = \frac{s_{f1}}{t_a} \cong \gamma_a \quad (2.20)$$

Região I: trecho elástico linear com tensões e deslocamentos crescentes (Figura 2.17).

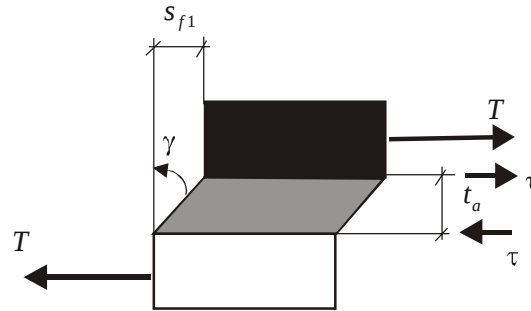


Figura 2.17 – Sistema mecânico para a Região I.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\tau_{f1}}{s_{f1}} = \frac{\gamma_a G_a}{s_{f1}} = \frac{G_a}{t_a} \quad (2.21)$$

$$\tau = \tau_{f1} \frac{s_f}{s_{f1}} = \frac{G_a}{t_a} s_f \quad (2.22)$$

onde G_a é o módulo de elasticidade transversal do adesivo.

Substituindo-se a equação 2.22 na equação 2.19 obtém-se a seguinte equação para a região I:

$$s_f'' - \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \frac{G_a b_f}{t_a} s_f = 0 \quad (2.23)$$

Definindo-se:

$$k^2 = \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \frac{G_a b_f}{t_a} \quad (2.24)$$

Resulta:

$$s_f'' - k^2 s_f = 0 \quad (2.25)$$

Sendo a solução geral dada por:

$$s_f(x) = A \cdot \sinh(kx) + B \cdot \cosh(kx) \quad (2.26)$$

Onde as constantes A e B serão determinadas por meio das condições de contorno, realçando-se que são dependentes do tipo de ensaio de aderência, T-T ou T-C.

Região II: Para o ponto de tensões máximas têm-se as coordenadas $(s_f = s_{f1}; \tau_{f1})$, as tensões tangenciais são decrescentes com o acréscimo dos deslocamentos (Figura 2.18), então:

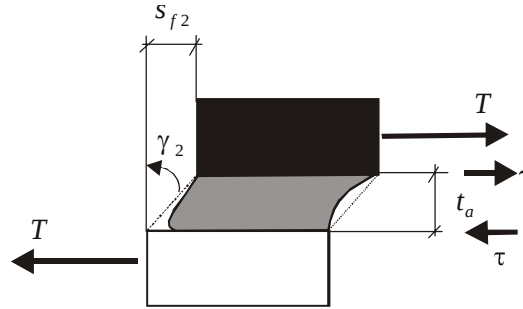


Figura 2.18 – Sistema mecânico para a Região II.

$$\tau = \tau_{f1} \left(\frac{s_{f2} - s_f}{s_{f2} - s_{f1}} \right) \quad (2.27)$$

2.3.3.1.1.

Ensaio de Aderência com Tração e Compressão

Região I: Para o ensaio de aderência com tração e compressão (Figura 2.15 (a)) tem-se as seguintes condições de contorno em cada face do corpo-de-prova:

$$x = 0 \quad \begin{cases} N_c = 0 \\ N_f = 0 \end{cases} \quad x = \ell \quad \begin{cases} N_c = -F \\ N_f = F \end{cases} \quad \text{em cada face} \quad (2.28)$$

Onde ℓ é o comprimento do corpo-de-prova, F é a força aplicada no CFC, e sabendo-se que:

$$s'_f(x) = A \cdot k \cosh(kx) + B \cdot k \sinh(kx) = \frac{N_f}{E_f A_f} - \frac{N_c}{E_c A_c} \quad (2.29)$$

Tem-se para $x = 0$:

$$s'_f(x=0) = 0 \quad \therefore \quad A = 0 \quad (2.30)$$

E para $x = \ell$ segue-se utilizando-se a equação 2.26

$$s_f(x = \ell) = B \cosh(k\ell) \quad (2.31)$$

$$B = \frac{s_f(x = \ell)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.32)$$

A solução geral da equação 2.26 é dada por:

$$s_f(x) = s_f(x = \ell) \cdot \frac{\cosh(kx)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.33)$$

A segunda condição de contorno fornece:

$$s'_f(x = \ell) = \frac{F}{E_f A_f} - \frac{(-F)}{E_c A_c} = F \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \quad (2.34)$$

$$s'_f(x = \ell) = s_f(x = \ell) \cdot k \cdot \frac{\sinh(k\ell)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.35)$$

Igualando-se essas duas equações segue-se:

$$F \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) = s_f(x = \ell) \cdot k \cdot \frac{\sinh(k\ell)}{\cosh(k\ell)} \quad (2.36)$$

Reescrevendo-se a equação 2.24 como:

$$\frac{k^2 t_a}{G_a b_f} = \left(\frac{1 + n_f \rho_f}{E_f A_f} \right) \quad (2.37)$$

Substituindo-se essa expressão na equação anterior obtém-se o deslocamento no extremo do CFC, dado por:

$$s_f(x = \ell) = \frac{F t_a}{G_a b_f} \cdot k \cdot \frac{\cosh(k\ell)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.38)$$

Substituindo-se a equação 2.38 na 2.33 tem-se:

$$s_f(x) = \frac{F t_a k}{G_a b_f} \cdot \frac{\cosh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.39)$$

Sabendo-se que $N_c = -N_f$, a expressão para as forças no CFC e no substrato de concreto é obtida considerando-se a equação 2.37 é:

$$s'_f(x) = \frac{N_f}{E_f A_f} (1 + n_f \rho_f) \quad (2.40)$$

O que leva a:

$$s'_f(x) = N_f \frac{k^2 t_a}{G_a b_f} \quad (2.41)$$

Derivando-se a equação 2.39 tem-se:

$$s'_f(x) = \frac{F t_a}{G_a b_f} \cdot k^2 \cdot \frac{\sinh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.42)$$

Que comparada com a expressão anterior resulta:

$$N_f(x) = -N_c(x) = F \cdot \frac{\sinh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.43)$$

Derivando-se a equação 2.43 e comparando-a com a equação 2.3, tem-se a lei de variação das tensões tangenciais ao longo da interface CFC-substrato de concreto:

$$\tau(x) = \frac{F k}{b_f} \cdot \frac{\cosh(kx)}{\sinh(k\ell)} \quad (2.44)$$

Região II: A reta que exprime o ramo descendente da relação $\tau \times s$, mostrado na Figura 2.16, é dada por:

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot [s_{f2} - s_{f,II}(x)] \quad (2.45)$$

sendo

$$\lambda^2 = \frac{s_{f1}}{s_{f2} - s_{f1}} \quad (2.46)$$

Com os parâmetros mostrados na Figura 2.19, tem-se para $x \geq x_p$, definindo-se x_p como a coordenada relativa ao trecho no qual o adesivo deforma-se em regime plástico, sendo a equação diferencial da aderência escrita como:

$$s_{f,II}'' - \left[\frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_c A_c} \right] b_f \cdot \tau_{II} = 0 \quad (2.47)$$

Substituindo-se nessa equação a equação 2.45:

$$s_{f,II}''(x) + k^2 \lambda^2 s_{f,II}(x) = k^2 \lambda^2 s_{f2} \quad (2.48)$$

Que é uma equação diferencial de 2ª ordem não-homogênea cuja solução é dada por:

$$s_{f,II}(x) = C \cdot \text{sen}(k\lambda x) + D \cdot \cos(k\lambda x) + s_{f2} \quad (2.49)$$

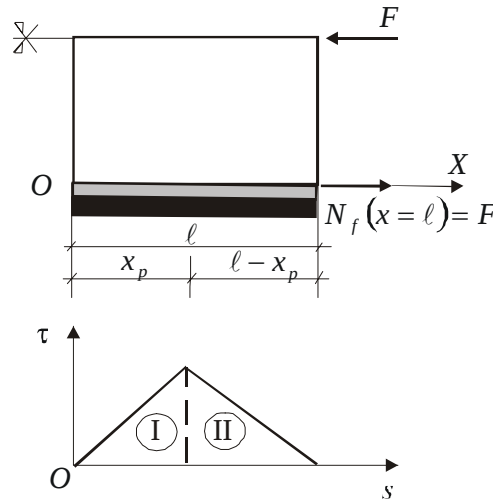


Figura 2.19 – Parâmetros para a análise da aderência na Região II para o ensaio de T-C.

As condições de contorno dessa equação, para o ensaio T-C, são:

$$\begin{cases} s_{f,II}(x = x_p) = s_{f1} \\ s'_{f,I}(x = x_p) = s'_{f,II}(x = x_p) \end{cases} \quad (2.50)$$

Onde os índices I e II referem-se às regiões situadas sob as retas que traduzem a lei $\tau \times s$ ((SÁNCHEZ et. al (2004))), seguindo-se:

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot (s_{f2} - s_{f1}) \cdot \left\{ \cos[k\lambda(x - x_p)] - \lambda \cdot \operatorname{tgh}(kx_p) \cdot \operatorname{sen}[k\lambda(x - x_p)] \right\} \quad (2.51)$$

2.3.3.1.2.

Ensaio de Aderência com Tração e Tração

Região I: As condições de contorno para esse caso são (Figura 2.15 (b)):

$$\begin{aligned} x = 0 & \begin{cases} N_c(x = 0) = F \\ N_f(x = 0) = 0 \end{cases} \\ x = \ell & \begin{cases} N_c(x = 0) = 0 \\ N_f(x = 0) = F \end{cases} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Donde segue-se:

$$s'_f(x) = Ak \cosh(kx) + Bk \sinh(kx) = \frac{N_f}{E_f A_f} - \frac{N_c}{E_c A_c} \quad (2.53)$$

Então

$$\tau = \frac{Fk}{b_f \sinh(k\ell)} \cdot \frac{\cosh(kx) + n_f \rho_f \{ \cosh[k(\ell - x)] \}}{1 + n_f \rho_f} \quad (2.54)$$

Região II:

Sabendo-se que:

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot [s_{f2} - s_{f,II}(x)] \text{ para } x \geq x_p \quad (2.55)$$

Representa o ramo descendente da relação $\tau \times s$, onde:

$$\lambda^2 = \frac{s_{f1}}{s_{f2} - s_{f1}} \quad (2.56)$$

$$s''_{f,II} - \left[\frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_c A_c} \right] \cdot b_f \tau_{II} = 0 \quad (2.57)$$

Então (SÁNCHEZ et. al, 2004):

$$\tau_{II}(x) = \frac{G_a \lambda^2}{t_a} \cdot \left[\frac{F}{E_c t_c b \lambda^3 k} \cdot \text{sen}(k \lambda x) + \frac{\tau_{f1} t_a}{G_a \lambda^2} \cdot \frac{\cos(k \lambda x)}{\cos(k \lambda x_p)} - \frac{F}{E_c t_c b \lambda^3 k} \cdot \text{tg}(k \lambda x_p) \cdot \cos(k \lambda x) \right] \quad (2.58)$$

2.3.4. Estudos sobre a Aderência

Neste item são apresentados alguns estudos sobre a aderência entre o concreto e o CFC, analisando-se alguns parâmetros que influenciam a aderência e alguns tipos de ensaios encontrados na literatura.

2.3.4.1. CHAJES et al. (1996)

CHAJES et al. (1996) apresentaram resultados de ensaios de aderência com corpos-de-prova cúbicos de concreto colados com chapa de material compósito, com enfoque na resistência do conjunto concreto-epóxi-chapa e na transferência de forças entre o concreto e a chapa.

Foram analisados os efeitos da preparação da superfície de concreto, o tipo de adesivo, a resistência à compressão do concreto sobre a resistência média do sistema.

Para a caracterização da transferência de forças entre o concreto e a chapa analisaram os efeitos de diversos comprimentos de aderência da chapa e foram utilizados os mesmos corpos-de-prova que foram utilizados para a obtenção da resistência do sistema concreto-CFC, sendo estes corpos-de-prova submetidos a cargas aumentadas continuamente até a ruptura destes.

Na maioria dos corpos-de-prova ensaiados por esses autores, a ruptura ocorre no concreto ao longo da superfície de aderência.

Considerando-se esses comportamentos, algumas premissas podem ser admitidas:

1. o mecanismo de ruptura está diretamente relacionado com a magnitude da deformação específica do concreto;
2. a deformação específica do concreto está diretamente relacionada com a deformação específica do compósito;

3. o comprimento de aderência do compósito é afetado pela largura, geometria e método de ensaio utilizado.

Segundo CHAJES et al. (1996), por meio das deformações específicas medidas, a força na chapa de material compósito é calculada usando-se o módulo de elasticidade e a área da seção transversal da chapa.

As tensões tangenciais médias de aderência foram calculadas para cada medida de deformação específica por meio da seguinte equação:

$$\tau = \frac{F_1 - F_2}{w\Delta L} \quad (2.59)$$

onde

F_1 e F_2 – forças no compósito para duas medidas de deformação específica;

w – largura do compósito;

ΔL – distância entre dois pontos nos quais foram obtidas as deformações específicas.

A força de aderência por unidade de comprimento R , entre duas medidas de deformação específica, é calculada por:

$$R = \tau w = \frac{F_1 - F_2}{\Delta L} \quad (2.60)$$

Fundamentada em representações idealizadas para o mecanismo de transferência de forças, a carga última T_u , do conjunto concreto-compósito, com um comprimento de aderência L_b , foi obtida por meio das equações:

$$T_u = RL_b \quad L_b < L_{jd} \quad (2.61)$$

$$T_u = RL_{jd} \quad L_b \geq L_{jd} \quad (2.62)$$

onde

L_{jd} – comprimento de aderência linear para o conjunto.

Segundo CHAJES et al. (1996) são necessários experimentos adicionais e trabalhos analíticos para o desenvolvimento da relação da aderência entre o conjunto concreto-compósito, que considere a influência dos efeitos da resistência variável do concreto, ductilidade do adesivo e propriedades do compósito.

2.3.4.2.**NEUBAUER e ROSTÁSY (1999)**

As formulações clássicas sobre a aderência concreto-CFC são, em geral, efetuadas e fundamentadas em leis de tensão de aderência x deslocamento, que às vezes são a própria essência da formulação proposta, obtendo-se relações entre a teoria e os experimentos para a tensão de aderência e para o comprimento de ancoragem do CFC.

A diferença básica entre as diversas formulações dessa natureza está na adoção de um tipo específico de lei $\tau \times s$, e no tipo de análise: elástica linear ou não linear. Alguns modelos adotam uma lei $\tau \times s$ que serve de fundamento para uma formulação que considera parâmetros energéticos, tal como a energia de fratura dos materiais.

Os modelos de aderência existentes, derivados de ensaios de aderência pura, são baseados nos mecanismos de fratura para a ruptura do concreto.

O modelo de aderência do reforço ao concreto a seguir analisado, idealizado por NEUBAUER e ROSTÁSY (1999), apresenta uma análise energética da aderência entre o substrato de concreto e o CFC e foi obtido originalmente para chapas de aço coladas. Esse modelo também é válido para os CFC, o que foi confirmado pelas análises dos resultados de ensaios de aderência em corpos-de-prova com lâminas traspassadas, sendo baseado nos mecanismos de fratura do concreto.

São válidas as seguintes premissas para esse modelo:

- i) a tensão de aderência é governada pela energia de fratura G_F ;
- ii) a tensão de aderência do compósito τ_ℓ , é dependente do deslocamento relativo s_ℓ na direção da força normal atuante no compósito.

O parâmetro G_F é independente de ℓ_t , que não deve exceder um certo valor $\ell_{t,máx}$.

Admitindo-se a resistência à tração da superfície de concreto f_{ct} , G_F pode ser expressa de acordo com a seguinte equação:

$$G_F = K_b^2 C_F f_{ct} \quad (2.63)$$

O fator $K_b > 1$ considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto, e usualmente não excede a $K_b = 1,3$. O fator C_F contém todos os efeitos secundários.

De acordo com NEUBAUER e ROSTÁSY (1999), os resultados de ensaios mostram que $\ell_{t,máx}$ não favorece o acréscimo da capacidade última de carga T_u , sendo a expressão para o carga última $T_{u,máx}$, dada por:

$$T_{u,máx} = b_\ell K_b \sqrt{2G_F E_\ell t_\ell} = 0,64 K_b b_\ell \sqrt{E_\ell t_\ell f_{ctm}} \quad (2.64)$$

Para a obtenção do comprimento de ancoragem $\ell_{t,máx}$, devido à $T_{u,máx}$, tem-se a seguinte equação:

$$\ell_{t,máx} = 2 \sqrt{\frac{2G_F E_\ell t_\ell}{\tau_{II}^2}} = \sqrt{\frac{E_\ell t_\ell}{2 f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (2.65)$$

Onde E_ℓ, t_ℓ, b_ℓ são o módulo de elasticidade, espessura e largura do CFC, respectivamente, e f_{ctm} é a resistência média à tração do concreto.

A energia de fratura de aderência no concreto é um misto do modo de fratura, constituído de componentes do modo I e do modo II (Teoria da Fratura). O modo I é produzido pelo deslocamento transversal devido à rugosidade das faces da fissura. O modo II resulta da direção da força de tração no CFC. Desse modo, um modelo simplificado para a aderência é admitido como um modo II puro, e G_F representa a energia de fratura total constituída pelos componentes do modo I e modo II.

Para um concreto com $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, $f_{ctm} = 1,8 \text{ MPa}$ e $K_b = 1,29$, NEUBAUER e ROSTÁSY (1999) obtiveram o seguinte valor para a energia total de fratura $G_F = 1,29^2 \times 0,202 \times 1,8 \times 10^3 = 605 \text{ J/m}^2$.

NEUBAUER e ROSTÁSY (1999), analisam o efeito das fissuras inclinadas devidas ao cortante sobre a resistência do conjunto concreto-CFC.

A energia total da fratura, denominada $G_{F,B}$, devida às fissuras inclinadas provenientes da ação da força cortante escreve-se:

$$G_{F,B} = G_{I,efet} + G_{II} \quad (2.66)$$

onde

$G_{I,efet}$ – energia efetiva relativa ao modo I de fratura;

G_{II} – energia relativa ao modo II de fratura.

A Figura 2.20 ilustra o comportamento da energia efetiva de fratura $G_{I,efet}$ do modo I.

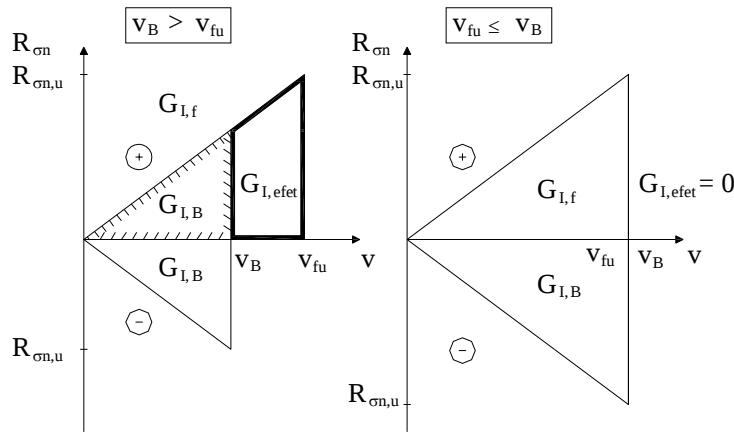


Figura 2.20 – Energia de fratura $G_{I,efet}$ do modo I; adaptada de NEUBAUER e ROSTÁSY (1999).

Para vigas a energia efetiva $G_{I,efet}$ é dada por:

$$G_{I,efet} = \pm \frac{4G_{II,efet}v^2}{W^2} \begin{cases} v_{efet} > 0; G_{I,efet} > 0 \\ v_{efet} \leq 0; G_{I,efet} = 0 \end{cases} \quad (2.67)$$

O deslocamento vertical efetivo v_{efet} é dado por:

$$v_{efet} = \frac{v_{fu}^2 - v_B^2}{v_{fu}} \quad (2.68)$$

Sendo v_{fu} a componente vertical última do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura no CFC e v_B a componente vertical do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura devido à ação da força cortante (Figura 2.20).

A componente G_{II} da energia de fratura total da fissura devido ao cortante é igual ao do ensaio de aderência, sendo obtida pela seguinte expressão:

$$G_{II} = \frac{\operatorname{tg}^2 \psi}{\operatorname{tg}^2 \psi + 1} G_F \quad (2.69)$$

A carga última $T_{u,máx}$, dada pela expressão 2.64, obtida por meio do ensaio de aderência, pode ser modificada pelo uso de $G_{F,B}$ (energia total da fratura), de acordo com a equação 2.66. A mesma consideração é válida para o comprimento de ancoragem $\ell_{t,máx}$ donde seguem-se:

$$T_{u,máx} = \alpha 0,64 K_b b_\ell \sqrt{E_\ell t_\ell f_{ctm}} \quad (N) \quad (2.70)$$

$$\ell_{t,máx} = \alpha \sqrt{\frac{E_\ell t_\ell}{2 f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (2.71)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{G_{F,B}}{G_F}} \quad (2.72)$$

➤ Tipos de Ruptura

Os resultados dos ensaios de aderência de NEUBAUER e ROSTÁSY (1999) mostraram uma predominância significativa de rupturas interlaminares dos compósitos. Nesses ensaios a ruptura ao longo de todo o comprimento de ancoragem prevalece. O principal problema das fraturas mecânicas é que a força transversal de tração do CFC excede à do concreto. A questão a ser resolvida é saber qual tipo de ruptura governa a aderência.

A ruptura interlaminar do compósito é um modo de fratura misto. Se o trajeto da fissura de aderência for mais saliente no compósito do que no concreto, a fissura irá torcer o compósito, e então se propagará num trajeto interlaminar.

Segundo NEUBAUER e ROSTÁSY (1999) a propagação da fissura no concreto é energeticamente mais evidente do que no compósito. A energia de fratura total num concreto de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ é $G_F = 605 \text{ J/m}^2$, menor do que no

compósito, donde a fratura interlaminar do compósito não é local, como tem sido confirmado por ensaios de aderência.

2.3.4.3. KURIHARA et al. (2000)

KURIHARA et al. (2000) desenvolveram dois tipos de ensaio para a obtenção das tensões de aderência entre o concreto e o reforço: ensaio de torque e ensaio de arrancamento.

Os dados resultantes desses dois ensaios permitiram analisar os tipos de ruptura, os efeitos dos diversos tipos de tratamento da superfície de concreto e dos tipos de adesivo sobre a tensão de aderência e da rugosidade da superfície de concreto.

➤ Ensaio de Torque

Os instrumentos do ensaio de torque e os corpos-de-prova estão ilustrados na Figura 2.21.

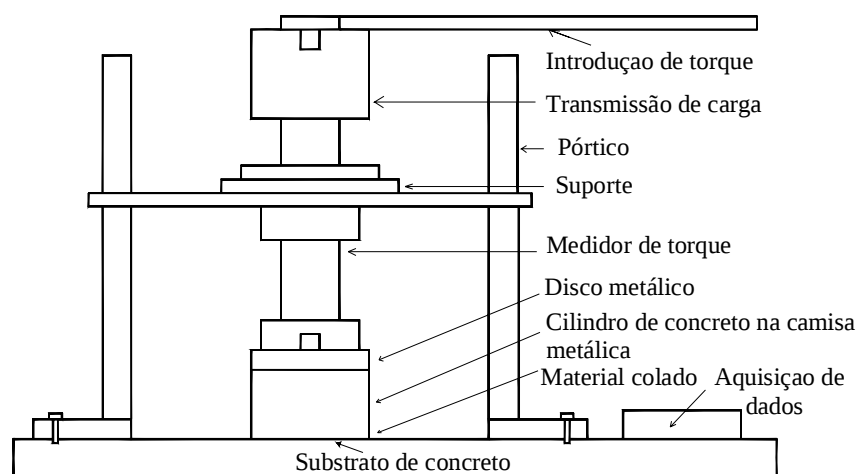


Figura 2.21 – Corpo-de-prova e equipamento para o ensaio de torque; adaptada de KURIHARA et al. (2000).

A concepção desse ensaio proposto é criar tensões puras de cisalhamento na interface dos corpos-de-prova por meios da aplicação de um torque. O torque aplicado aos corpos-de-prova é produzido por um disco metálico fixado ao topo de um cilindro de concreto. O torque é medido pela locação de um medidor no disco metálico, e os dados registrados são usados para gravar os diversos

momentos de torque, e um outro medidor fixado no cume registra o valor máximo desse momento.

Teoricamente as tensões de torção distribuídas ao longo da seção transversal do cilindro de concreto equilibram o momento de torque. A tensão de cisalhamento máxima ocorre na circunferência da seção transversal sendo expressa pela equação:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{16M_t}{\pi d^3} \quad (2.73)$$

onde

M_t – momento de torque;

d – diâmetro do núcleo parcial.

➤ Ensaio de Arrancamento (pull-off)

A maioria de ensaios utilizados para medir as tensões de aderência é realizada em laboratório, e somente o ensaio de arrancamento (pull-off) realizado por KURIHARA et al. (2000), que mede a tensão de aderência por tração, é usado no campo.

Os instrumentos utilizados para o ensaio de arrancamento são um disco de aço com uma sonda no centro, colado aos corpos-de-prova e fixado à sonda por um parafuso. A carga é aplicada pela rotação de uma manivela, que submete a sonda a uma força de tração por meio da pressão do óleo, antes da ruptura do corpo-de-prova ocorrer. A tensão de tração máxima é obtida pela divisão da força de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova.

Em cada método de ensaio a ruptura ocorre na parte mais fraca do sistema, que pode ser o adesivo, o cilindro de concreto, o substrato ou a combinação destes. Pelo exame do plano de ruptura efetua-se uma estimativa da porcentagem de fissuras que ocorreram na interface, no cilindro de concreto e no substrato. Se a ruptura ocorrer em outro local obtém-se o limite mínimo da tensão tangencial de aderência.

Neste ensaio foram medidas as rugosidades da superfície de concreto que foram obtidas por meio de um medidor de deslocamento a laser. O sensor gera continuamente um raio laser, e as variações de altura do perfil da superfície são medidas e registradas no computador em intervalos de 0,3 mm. Os dados são

obtidos em cinco diferentes locações em cada substrato. As expressões usadas para a rugosidade da superfície são R_z e R_a ; sendo R_z a diferença da altura média entre cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos do comprimento da amostra medida; R_a é a média do valor absoluto da variação da altura da superfície, e z_1 é a medida do nível médio da superfície.

Os substratos dos corpos-de-prova a serem ensaiados devem ter suas superfícies tratadas mecanicamente. Esses tratamentos mecânicos são: trituração, fragmentação e jato de ar.

Os substratos de concreto e os cilindros de concreto são ensaiados ao mesmo tempo. Após a cura, os substratos são tratados mecanicamente e depois recebem um jato de ar para limpá-los. O adesivo é usado para colar o disco de aço na superfície do topo dos cilindros de concreto (do lado em que os cilindros são fechados pelos tubos de aço).

Após o nivelamento dos substratos de concreto, obtêm-se as medidas da rugosidade da superfície usando-se o medidor de deslocamentos a laser. Os adesivos são aplicados em camadas muito finas sobre os substratos de concreto e nas bases dos cilindros. Os cilindros são então colados aos substratos de concreto. Os corpos-de-prova são curados até atingirem a idade desejada para serem ensaiados.

A Tabela 2.4 mostra os resultados de alguns valores relativos à rugosidade das superfícies, considerando-se o tipo de tratamento aplicado às mesmas (KURIHARA et al. (2000)).

As superfícies tratadas com fragmentação possuem maior rugosidade, seguida pela superfície tratada com jato de ar, trituração e sem tratamento.

Tabela 2.4 – Rugosidade da superfície dos substratos de concreto; adaptada de KURIHARA et al. (2000).

<i>Tratamento Mecânico da Superfície</i>	<i>R_a (mm)</i>	<i>R_z (mm)</i>
<i>Sem Tratamento</i>	0,025	0,056
<i>Trituração</i>	0,028	0,103
<i>Jato de Ar</i>	0,113	0,490
<i>Fragmentação</i>	0,288	1,640

2.3.4.4. NAKABA et al. (2001)

NAKABA et al. (2001) realizaram experimentos com corpos-de-prova reforçados com laminados de PRF utilizados para se obter diretamente as tensões de aderência do sistema concreto-compósito (Figura 2.22).

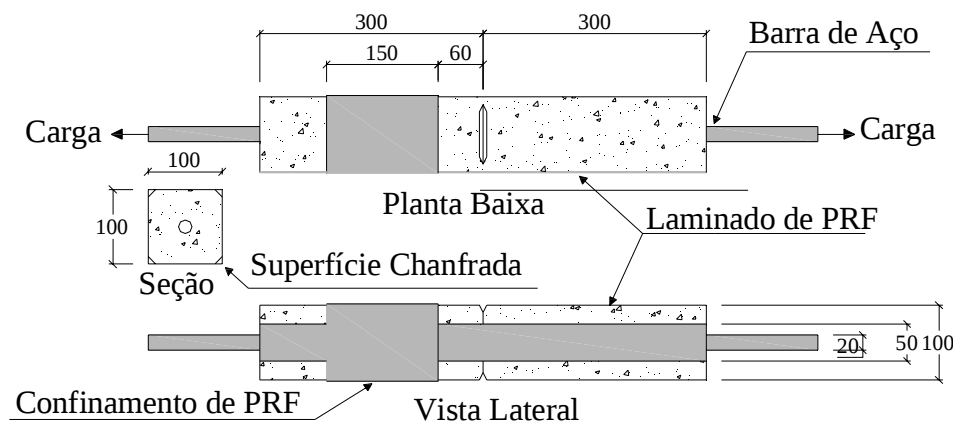


Figura 2.22 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA et al. (2001).

Os corpos-de-prova adotados por NAKABA et al. (2001) consistem em um bloco de concreto de dimensões $100 \times 100 \times 600 \text{ mm}$ com um chanfro no centro, duas barras de aço e laminados de polímeros reforçados com fibras (PRF).

O comprimento de ancoragem vinculado à aderência utilizado foi de 300 mm e a largura do laminado foi 50 mm para todos os corpos-de-prova ensaiados. As espessuras dos laminados variaram de $0,1$ a $0,4 \text{ mm}$ (Figura 2.22).

O sistema de reforço com laminados de PRF utilizado para este ensaio consiste em fibras impregnadas com resina epóxi, com uma preparação inicial do substrato de concreto utilizando-se “primer” e “putty” (argamassa muito fina de epóxi utilizada para remover as irregularidades da superfície de concreto).

Os laminados de PRF são colados nos dois lados opostos do corpo-de-prova, sendo que um dos lados foi reforçado com PRF confinado (Figura 2.22), admitindo-se a ocorrência de delaminação do laminado somente do lado oposto onde os extensômetros elétricos de resistência estão posicionados. Uma vez que a força de tração é transferida do PRF ao concreto, não existe tensão de aderência entre regiões descoladas.

As propriedades das fibras utilizadas foram obtidas pelo fabricante (Tabela 2.5). Para verificar a influência da qualidade do substrato. Foram confeccionados corpos-de-prova de concreto e de argamassa cujas resistências são mostradas na Tabela 2.6.

Tabela 2.5 – Propriedades das fibras; adaptado de NAKABA et al. (2001).

<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Espessura t_f, mm</i>	<i>Peso Unitário ρ, g/m²</i>	<i>Resistência à Tração f_t, MPa</i>	<i>Módulo de Elasticidade E_f, MPa</i>
Fibra de Carbono Padrão (FCP)	0,167	150/300	4200	261,1
Fibra de Carbono com Alta Rigidez (FCAR)	0,165	300	4400	425,1
Aramida	0,193	285	2800	124,5

Tabela 2.6 – Propriedades do concreto e da argamassa utilizados na confecção dos corpos-de-Prova; adaptada de NAKABA et al. (2001).

<i>Tipo de CP</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>Resistência ao Cisalhamento (MPa)</i>
Concreto (50 MPa)	57,6	3,25
Argamassa	47,1	4,65
Argamassa	50,9	4,08
Concreto (24 MPa)	23,8	1,98

Cada corpo-de-prova foi acoplado a uma máquina universal de ensaio e submetido a uma força de tração pura, causando cisalhamento direto nos laminados. A velocidade de aplicação do carregamento foi de 1 mm / min .

O deslocamento total e a largura da fissura no centro do corpo-de-prova foram medidos usando extensômetros elétricos de resistência (Figura 2.23). A distribuição da deformação específica foi obtida de 20 valores de deformação específica medidas em um lado do laminado (face do extensômetro) em intervalos de 15 mm , e uma medida no lado oposto, no centro do CP.

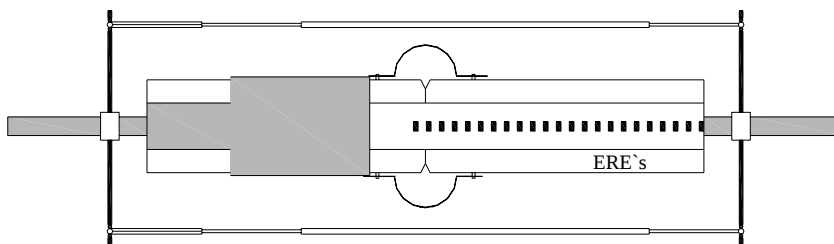


Figura 2.23 – Posicionamento dos ERE; adaptada de NAKABA et al. (2001).

Todos os corpos-de-prova foram supostamente submetidos a uma força de tração pura até a ruptura total do sistema, mas não é possível evitar o momento causado pela excentricidade entre o topo e a base quando os corpos-de-prova forem submetidos ao carregamento. Por isso, a carga máxima não será considerada igualmente distribuída nos dois laminados. A carga máxima na face onde ocorreu a ruptura foi calculada como: a carga máxima na face onde ocorreu a ruptura é obtida multiplicando-se a carga máxima pela deformação específica na face onde ocorreu a ruptura dividindo esse produto pela soma da deformação específica na face onde ocorreu a ruptura com a deformação específica na face onde não ocorreu a ruptura.

A Tabela 2.7 mostra a carga máxima, a carga última e os respectivos deslocamentos de todos os corpos-de-prova ensaiados, e os tipos de ruptura e a face onde eles ocorreram. A Tabela 2.8 mostra os resultados médios da carga máxima onde a ruptura ocorreu.

Tabela 2.7 - Resultados dos ensaios; adaptada de NAKABA et al. (2001).

<i>Corpos-de-prova</i>	<i>Tipos de Fibras</i>	<i>Carga Máxima (kN)</i>	<i>Deslocam. (mm)</i>	<i>Carga Última (kN)</i>	<i>Deslocam. (mm)</i>	<i>Tipos de Ruptura</i>
Concreto (50 MPa)	FCPAR	51,26	0,824	51,26	0,824	Fissura na face do extensômetro
	FCPMR	37,81	1,02	37,81	1,02	Ruptura
	FCPBR	24,39	2,78	23,87	2,981	Fissura na face do extensômetro
	FCAR	38,98	1,316	37,75	1,476	Ruptura fora da face do extensômetro
	FA	25,52	1,764	25,52	1,813	Fissura fora da face do extensômetro
Argamassa (50 MPa)	FCPAR	41,28	0,719	41,28	0,719	Fissura na face do extensômetro
	FCPMR	30,7	0,958	30,49	1,529	Fissura fora da face do extensômetro
	FCPBR	17,51	2,14	17,5	2,14	Fissura na face do extensômetro
	FCAR	33,12	1,41	33,12	1,41	Fissura na face do extensômetro e ruptura fora da face do extensômetro
	FA	25,51	2,597	25,14	2,665	Fissura na face do extensômetro
Concreto (24 MPa)	FCPMR	28,18	1,369	27,82	1,644	Fissura fora da face do extensômetro

Tabela 2.8 – Resultados experimentais para a carga máxima na face onde ocorreu a ruptura; adaptada de NAKABA et al. (2001).

<i>Corpos-de-Prova</i>	<i>Tipos de Fibra</i>	<i>Carga Máxima Experimental (kN)</i>	<i>Rigidez $t_f E_f$ (kN / mm)</i>	<i>Máximo da Tensão de Aderência Média (MPa)</i>	<i>Deslocam. (mm)</i>	<i>Carga Analítica (kN)</i>
Concreto (50 MPa)	FA	11,79	24,04	7,173	0,063	12,56
	FCAR	21,60	70,14	9,129	0,060	20,81
	FCPMR	16,35	43,60	7,494	0,072	16,68
	FCPAR	25,63	87,19	6,790	0,060	22,99
	FCPBR	11,48	21,80	7,328	0,072	11,99
Argamassa (50 MPa)	FA	12,43	24,04	6,497	0,066	12,35
	FCAR	16,37	70,14	7,710	0,046	20,41
	FCPMR	15,70	43,60	6,253	0,067	16,37
	FCPAR	22,29	87,19	6,834	0,063	22,51
	FCPBR	9,35	21,80	7,438	0,059	11,78
Concreto (24 MPa)	FCPMR	15,71	43,60	6,989	0,052	15,24

➤ Relação Tensão de Aderência Local x Deslocamento

NAKABA et al. (2001), formulou o estudo da aderência por meio de uma lei da tensão de aderência local x deslocamento obtida dos resultados de análises algébricas ou numéricas, que permite determinar um comprimento de aderência efetivo para o FRP.

Essa formulação consiste em obter a força de tração por meio da diferença entre a deformação específica da seção i , e a deformação específica relativa a seção $i-1$. A média da tensão de aderência da seção i , $\tau_{b,i}$ é calculada dividindo-se a diferença da força de tração pela área da superfície do laminado, donde:

$$\tau_{b,i} = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}) t_f E_f}{\Delta \ell_b} \quad (i = 2 \rightarrow 20) \quad (2.74)$$

onde

$\varepsilon_{f,i}, \varepsilon_{f,i-1}$ – deformação específica no tecido de PRF na seção “ i ” e na seção $i-1$, respectivamente;

t_f – espessura do tecido de PRF;

E_f – módulo de elasticidade do PRF;

$\Delta \ell_b$ – distância entre os pontos onde são obtidas as medidas.

O deslocamento s_i da seção i é a soma da diferença entre o alongamento da seção equivalente composta pelo concreto, resina epóxi e barra de aço da extremidade livre do laminado (ou da extremidade carregada do corpo-de-prova) para a seção i . Assume-se que o deslocamento relativo entre o concreto e o laminado na extremidade livre do laminado é nulo. O deslocamento é calculado usando-se as seguintes equações:

$$s_i = s_{i-1} + (\delta_{f,i} - \delta_{m,i}) \quad (i = 2 \rightarrow 20, s_i = 0) \quad (2.75)$$

$$\delta_{f,i} = \frac{\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}}{2} \cdot \Delta \ell_b + \varepsilon_{f,i-1} \cdot \Delta \ell_b \quad (2.76)$$

$$\delta_{m,i} = \frac{\varepsilon_{m,i-1} - \varepsilon_{m,i}}{2} \cdot \Delta \ell_b + \varepsilon_{m,i} \cdot \Delta \ell_b \quad (2.77)$$

$$\varepsilon_{m,i} = \frac{P_{m,i-1} - 2 \cdot \tau_{b,i} \cdot b \cdot \Delta \ell_b}{A_m E_m} \quad (2.78)$$

$$\varepsilon_{m,1} = \frac{P_{m,1}}{A_m E_m}, P_{m,1} = P_{carga} \quad (2.79)$$

onde

$\delta_{m,i}$ – deformação do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i ;

$\varepsilon_{m,i}$ – deformação específica do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i ;

$P_{m,i}$ – força aplicada do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i ;

b – largura do laminado;

P_{carga} – força de tração;

$A_m E_m$ – rigidez do conjunto concreto, epóxi e barra de aço.

Após a obtenção de todos os dados, é desenhado um gráfico tensão de aderência local x deslocamento para cada intervalo de medidas do extensômetro, para todos os corpos-de-prova. As curvas tendem para uma forma parabólica (Figura 2.24):

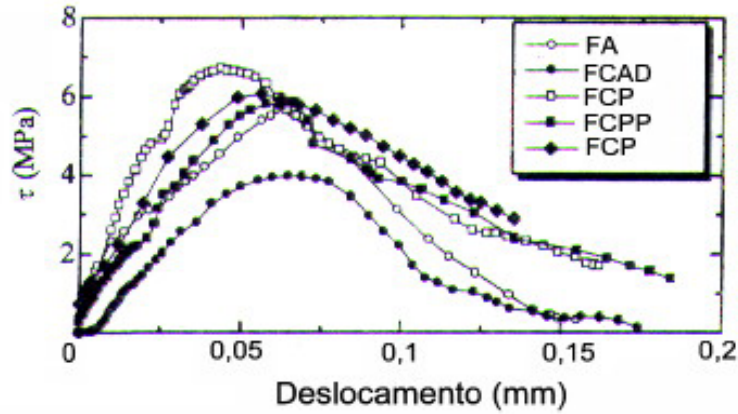


Figura 2.24 – Tensão de aderência x deslocamento; adaptada de NAKABA et al. (2001).

Apresenta-se um modelo que permite determinar a relação entre a tensão de aderência local x deslocamento, $\tau_b \times s$, seguindo-se:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,máx}} = \frac{s}{s_{máx}} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{máx}}\right)^n} \quad (2.80)$$

$\tau_{b,máx}$ – tensão de aderência local máxima em MPa ;

$s_{máx}$ – deslocamento relativo a $\tau_{b,máx}$, em mm .

Os parâmetros $n=3$, $\tau_{b,máx}$ e $s_{máx}$ são obtidos diretamente da relação experimental $\tau_b \times s$. O valor de n é calculado pelo método dos mínimos quadrados, usando-se uma relação $\tau_b \times s$ normalizada. A tensão de aderência local máxima varia no intervalo $5,6 \text{ MPa} \leq \tau_{b,máx} \leq 9,01 \text{ MPa}$, e o deslocamento no intervalo $0,052 \text{ mm} \leq s \leq 0,087 \text{ mm}$, donde se tem $n \cong 3$. Esses valores não têm uma relação definida para o PRF, e a tensão de aderência

$\tau_{b,máx}$ mostra uma tendência a aumentar quando a resistência a compressão do concreto aumenta (Figura 2.25):

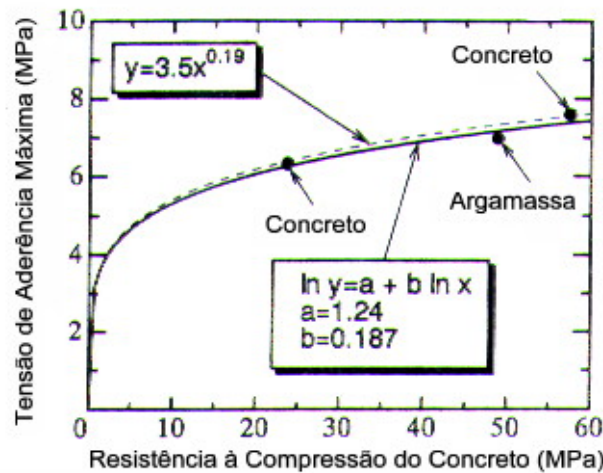


Figura 2.25 – Relação entre a tensão de aderência máxima e a resistência à compressão do concreto; adaptada de NAKABA et al. (2001).

A relação entre o valor máximo da tensão de aderência, entre o concreto e o compósito, e a tensão de aderência máxima entre o concreto e o compósito é dada por:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,máx}} = \frac{s}{s_{máx}} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{máx}}\right)^n} \quad (2.81)$$

$$\tau_{b,máx} = 3,5\sigma_B^{0,19} \quad (2.82)$$

onde

σ_B – resistência a compressão do concreto em *MPa* .

2.3.4.5. CHEN e TENG (2001)

CHEN e TENG (2001) propuseram um modelo de aderência pela combinação da análise da mecânica da fratura com dados experimentais e observaram que a relação tensão de aderência x deslocamento para chapas de PRF coladas ao concreto pode ser representada por uma relação triangular como mostra a Figura 2.26a.

Para a aderência entre o concreto e o PRF os valores típicos para o deslocamento são $\delta_1 = 0,02\text{ mm}$ para a tensão de aderência máxima e $\delta_f = 0,02\text{ mm}$ na ruptura. Um modelo em que a relação tensão de aderência x deslocamento diminui linearmente também pode ser utilizado (Figura 2.26b).

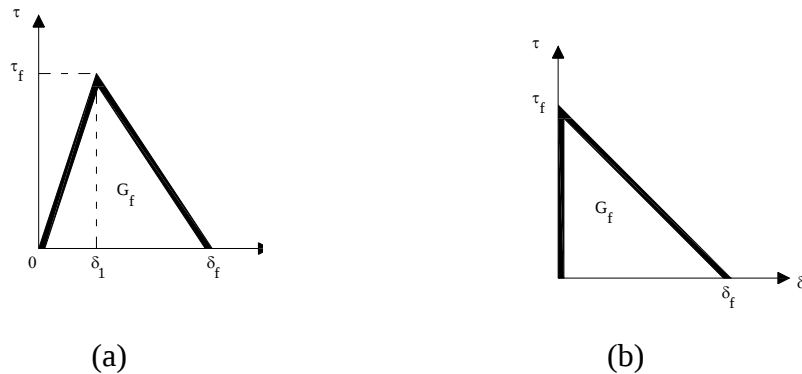


Figura 2.26 – Relação tensão de aderência – deslocamento: (a) triangular; (b) decréscimo linear; adaptada de YUN e WU apud CHEN e TENG (2001).

As deficiências dos modelos existentes indicam a necessidade do desenvolvimento de um novo modelo para projetos práticos de reforço de estruturas de concreto armado. Esse modelo deve ser capaz de avaliar as principais características da ação da resistência última da aderência e do comprimento de aderência efetivo. Esses dois parâmetros foram calculados usando-se a solução da Mecânica da Fratura Não Linear (MFNL), pelas seguintes equações:

$$P_u = \begin{cases} \frac{\tau_f b_p}{\lambda} & \text{se } L \geq L_e \\ \left(\frac{\tau_f b_p}{\lambda} \right) \text{sen}(\lambda L) & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (2.83)$$

onde

$$L_e = \frac{\pi}{2\lambda} \quad (2.84)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f}{\delta_f E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad (2.85)$$

Esses autores observaram que o coeficiente α_y da equação 2.85 é pequeno para considerações práticas. Esse termo é baseado na hipótese de que a distribuição de tensão em toda a seção transversal do elemento de concreto é uniforme, que também ocorre na chapa de PRF. Contudo, a razão entre a largura do compósito e a largura do elemento de concreto, $\frac{b_p}{b_c}$ tem um efeito significativo sobre a resistência última da aderência. Se a largura do compósito for menor do que a do elemento de concreto, a transferência de forças do compósito para o concreto leva a uma distribuição de tensões não uniforme ao longo da largura do elemento de concreto. Uma pequena largura do compósito b_p , comparada com a largura do elemento de concreto b_c , pode resultar em tensões tangenciais maiores no adesivo durante a ruptura, atribuídas à contribuição do concreto fora da área de aderência.

CHEN e TENG (2001) mostram que a resistência última da aderência é linearmente relacionada à β_p .

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{b_c}}} \quad (2.86)$$

As medidas das propriedades da tensão de aderência τ_f e do deslocamento δ_f são difíceis de serem determinadas na prática. É desejável que as propriedades da tensão de aderência e deslocamento sejam medidas simplesmente como a resistência do concreto.

Várias observações experimentais (CHAJES et al. (1996)) mostraram que a resistência última da aderência é proporcional a $\sqrt{f'_c}$, e que possui comportamento similar à resistência da aderência do reforço interno de aço (armadura). CHEN e TENG (2001) aproximaram τ_f pela resistência à tração do concreto que pode ser relacionada com a resistência à compressão sob uma expressão em termos de $\sqrt{f'_c}$. Portanto, o comprimento de aderência efetivo L_e da equação 2.84 é calculado aproximadamente por:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f'_c}}}, \quad \text{mm} \quad (2.87)$$

onde $E_p t_p$ é dado em $\text{MPa} \cdot \text{mm}$ e f'_c é dado em MPa .

Considerando-se as hipóteses relatadas anteriormente, esses autores propuseram um modelo simples da resistência última da aderência fundamentado nas equações 2.83, 2.84 e 2.85 e em dados experimentais:

$$P_u = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{f'_c} b_p L_e, \quad N \quad (2.88)$$

sendo

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen} \left[\frac{\pi L}{2L_e} \right] & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (2.89)$$

Os parâmetros β_p e L_e são definidos pelas expressões 2.86 e 2.87, respectivamente.

Para projetos de reforço, o conhecimento da tensão é mais importante do que a carga aplicada no CFC. Substituindo-se a expressão 2.87 e $\sigma_{db} = \frac{P_u}{b_p t_p}$ na expressão 2.88, tem-se a tensão de ruptura no compósito:

$$\sigma_{db} = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f'_c}}{t_p}} = 0,4 \beta_p \beta_L \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f_{cu}}}{t_p}} \quad (2.90)$$

Onde a resistência à compressão do concreto, utilizando-se corpos-de-prova cúbicos é $f_{cu} = 1,25 f'_c$, sendo f'_c a resistência obtida em corpos-de-prova cilíndricos.

A razão entre a tensão no compósito e a resistência à tração do CFC na ruptura é obtida por meio de:

$$\frac{\sigma_{db}}{f_p} = \frac{0,427 \beta_p \beta_L}{E_p \varepsilon_p} \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f'_c}}{t_p}} = \frac{0,427 \beta_p \beta_L}{\varepsilon_p} \sqrt{\frac{\sqrt{f'_c}}{E_p t_p}} \quad (2.91)$$

onde

ε_p – deformação específica última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento;

f_p – resistência última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento.

A equação proposta nesse modelo de aderência é recomendada para o uso em projetos. Sendo que o coeficiente na expressão 2.88, 0,427 é reduzido para 0,315. Logo a expressão 2.88 fica:

$$P_u = \frac{0,315\beta_p\beta_L\sqrt{f'_c}b_pL_e}{\gamma_b} = \frac{0,3\beta_p\beta_L\sqrt{f_{cu}}b_pL_e}{\gamma_b} \quad (2.92)$$

Seguindo-se para a tensão última no compósito para:

$$\sigma_{db} = \frac{0,315\beta_p\beta_L}{\gamma_b} \sqrt{\frac{E_p\sqrt{f'_c}}{t_p}} = \frac{0,3\beta_p\beta_L}{\gamma_b} \sqrt{\frac{E_p\sqrt{f_{cu}}}{t_p}} \quad (2.93)$$

➤ Ensaio Realizado por CHEN e TENG (2001)

Os corpos-de-prova utilizados neste ensaio são blocos retangulares de concreto, com uma ou duas chapas de CFC coladas nos dois lados opostos (Figura 2.27). As dimensões e resistência das chapas e dos blocos de concreto, o comprimento de ancoragem, a carga de ruptura aplicada e os tipos de ruptura estão mostrados nas Tabelas 2.9 e 2.10. Os dados referentes à tabela são obtidos de ensaios provenientes da literatura.

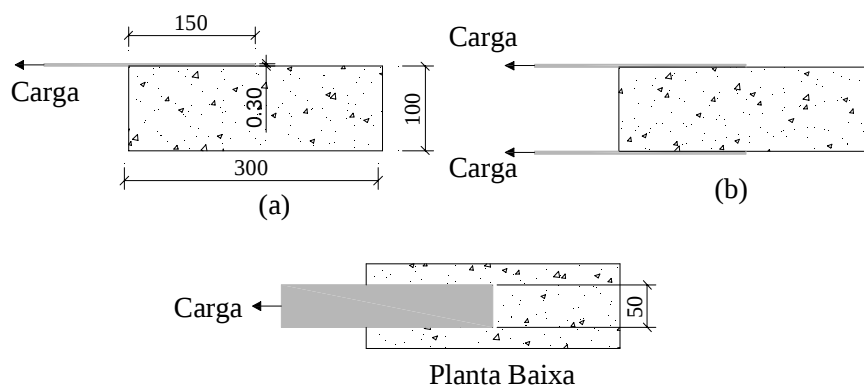


Figura 2.27 – Corpos-de-prova para o ensaio de aderência; (a) Com uma chapa colada; (b) com duas chapas coladas; adaptada de CHEN e TENG (2001).

Tabela 2.9 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG (2001).

Corpo-de-prova (n°)	Concreto			Chapa			
	Largura (b_c)	Espessura (t_c)	Resistência à Compressão (f'_c)	Tipo	Espessura (t_p)	Largura (b_p)	Comprimento de Ancoragem (L)
1	228,6	152,4	36,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
2	228,6	152,4	47,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
3	228,6	152,4	47,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
4	228,6	152,4	47,1	PRFG	1,016	25,4	76,2
5	100	100	40,8	FCP	0,11	50	75
6	100	100	40,8	FCP	0,11	50	150
7	100	100	43,3	FCP	0,11	50	300
8	100	100	43,3	FCP	0,165	50	75
9	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	100
10	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	200
11	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	300
12	200	200	44,7	PRFC	1,25	50	400

Tabela 2.10 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG, (2001).

Carga de Ruptura (N)	Tipo de Ruptura
8,462	Fratura do Concreto
9,931	Fratura do Concreto
10,638	Fratura do Concreto
10,638	Fratura do Concreto
5,8	Delaminação da Chapa
9,2	Delaminação da Chapa
11,95	Delaminação da Chapa
10	Delaminação da Chapa
17,3	Fratura do Concreto
27,5	Fratura do Concreto
35,1	Fratura do Concreto
26,9	Fratura do Concreto

2.3.4.6. ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001)

O estudo experimental de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001) pesquisa a ação da aderência do sistema CFC-epoxy-interface de concreto e os parâmetros que a influencia, tais como o comprimento de aderência, a resistência à compressão do concreto, o número de camadas e tipos de CFC.

Neste estudo, foram estudadas a força cortante última, a resistência média do conjunto, a tensão máxima de aderência na ruptura, a distribuição de deformação específica no CFC e os tipos de ruptura.

A Figura 2.28 ilustra o esquema dos ensaios realizados por estes autores.

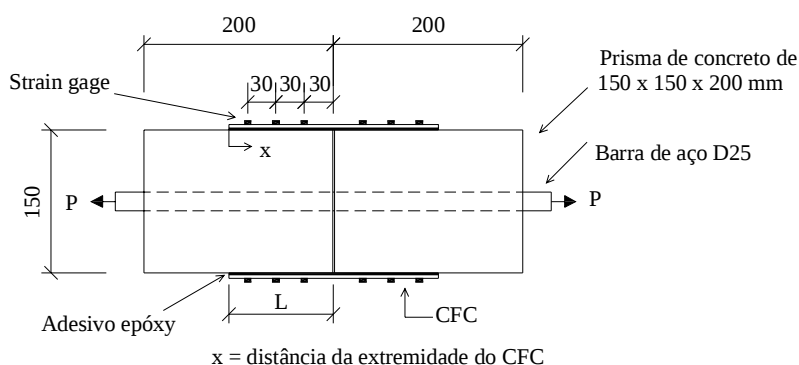


Figura 2.28 – Corpo-de-prova (medidas em mm); dos ensaios de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

Foram colocados nos corpo-de-prova duas lâminas de fibra de carbono de 100 mm de largura coladas nos lados opostos dos prismas (Figura 2.31). Foram utilizados dois tipos de CFC: tipo 1 (FTS – C1 – 30) e tipo 2 (FTS – C1 – 20), cujos números 20 e 30 significam o peso da fibra (em gramas) por metro quadrado.

A Tabela 2.11 mostra as variáveis experimentais do ensaio. Os prismas de concreto foram submetidos à tração direta, e o sistema CFC-concreto ao cisalhamento puro. Foram medidas deformações em diferentes posições do CFC na direção de aplicação da força durante o ensaio.

Tabela 2.11 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

<i>Corpo-de-Prova</i>	<i>Resistência à Compressão do Concreto (MPa)</i>	<i>Tipo de CFC / nº de camadas</i>	<i>Comprimento de Ancoragem (L) (mm)</i>
<i>CF – 1</i>	24	1/1	100
<i>CF – 2</i>	24,8	1/1	100
<i>CF – 3</i>	33,1	1/1	150
<i>CF – 4</i>	33,1	1/2	100
<i>CF – 5</i>	32,7	2/2	100
<i>CF – 6</i>	36,5	2/1	150
<i>CF – 7</i>	29,7	2/2	100

Os resultados experimentais obtidos por ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001) são mostrados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

<i>Corpo-de-Prova</i>	<i>Carga Última de Ruptura (kN)</i>	<i>Tensão Média de Aderência (MPa)</i>	<i>Tensão Máxima de Aderência (MPa)</i>
<i>CF – 1</i>	44,0	2,2	5,0
<i>CF – 2</i>	40,2	2,0	4,9
<i>CF – 3</i>	40,9	1,4	4,3
<i>CF – 4</i>	51,8	2,6	3,6
<i>CF – 5</i>	56,5	2,8	6,3
<i>CF – 6</i>	33,5	1,1	3,6
<i>CF – 7</i>	49,2	2,5	5,6

A tensão de aderência média e a tensão máxima de aderência do sistema CFC – concreto são calculadas segundo as seguintes equações:

$$\tau_{média} = \frac{P}{2bL} \quad (2.94)$$

$$\tau_{máx} = E_f t_f \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x} \quad (2.95)$$

onde

P – carga total de ruptura (N);

b – largura do CFC (mm);

L – comprimento de ancoragem do CFC (mm);

E_f – módulo de elasticidade do CFC (MPa);

t_f – espessura do CFC (*mm*);

$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x}$ – gradiente de deformação entre dois extensômetros consecutivos no CFC.

A resistência do conjunto CFC-concreto está relacionada com a resistência a compressão do concreto, e é dada pela expressão:

$$\tau_u = 0,25 \left(f'_c \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.96)$$

2.3.4.7. Outros Estudos

Os estudos a seguir transcritos constam em TENG et al. (2002), e tratam principalmente sobre o cálculo das tensões de aderência e do comprimento de ancoragem do CFC.

➤ Hiroguki e Wu

Hiroyuki e Wu conduziram vários experimentos com corpos-de-prova com duas chapas de fibras de carbono coladas em elementos de concreto, e obtiveram a seguinte relação entre o comprimento de aderência L e a tensão de aderência média durante a ruptura τ_u :

$$\tau_u = 5,88 L^{-0,699} \quad (2.97)$$

➤ Tanaka

$$\tau_u = 6,3 - \ln L \quad (2.98)$$

onde

L – comprimento de aderência dado em *mm* .

A capacidade de carga última P_u é dada pela multiplicação de τ_u pela largura b_p , e pelo comprimento L da área de aderência.

➤ Maeda

Maeda desenvolveu um modelo que considera a tensão última de aderência e o comprimento efetivo de aderência:

$$\tau_u = 110,2 \times 10^{-6} E_p t_p \quad (2.99)$$

$$L_{efet} = e^{6,13 - 0,580 E_p t_p} \quad (2.100)$$

Esse modelo é válido para $L > L_{efet}$, onde L_{efet} é o comprimento efetivo de aderência, com as unidades em mm e MPa , onde E_p , t_p são o módulo de elasticidade e espessura do CFC, respectivamente.

➤ Niedemeier e Blaschko

HOLZENKÄMPFEER (1994) desenvolveu uma formulação teórica-experimental fundamentada em conceitos da Mecânica da Fratura Não-Linear (MFNL), usando uma lei $\tau_b \times s$ bilinear para chapas de aço coladas com epóxi. A forma modificada por Niedemeier, Blaschko *apud* TENG et al. (2002) calcula a capacidade máxima de carga utilizando-se:

$$P_u = \begin{cases} 0,78b_p \sqrt{2G_f E_p t_p} & \text{para } L \geq L_e \\ 0,78b_p \sqrt{2G_f E_p t_p} \frac{L}{L_e} \left(2 - \frac{L}{L_e}\right) & \text{para } L < L_e \end{cases} \quad (2.101)$$

O comprimento efetivo de aderência L_{efet} , e a energia de fratura G_f são dados por:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{4 f_{ctm}}} \quad mm \quad (2.102)$$

$$G_f = c_f k_p^2 f_{ctm} \quad N.mm/mm^2 \quad (2.103)$$

Sendo $f_{ctm} (MPa)$ a tensão de tração média do concreto determinada pelo ensaio de arrancamento (*pull-off*), c_f é uma constante determinada por uma análise linear usando-se resultados de ensaios com duas chapas coladas, ou similar, k_p é o fator geométrico relacionado com a largura da chapa colada $b_p (mm)$ e a largura do elemento de concreto $b_c (mm)$, onde:

$$k_p = \sqrt{1,125 \frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / 400}} \quad (2.104)$$

➤ Täljsten

Por meio da análise da MFNL, Täljsten *apud* TENG et al. (2002) desenvolveu um modelo similar, onde:

$$P_u = \sqrt{\frac{2E_p t_p G_f}{1 + \alpha_t}} b_p \quad (2.105)$$

$$\alpha_t = \frac{E_p t_p}{E_c t_c} \quad (2.106)$$

sendo

E_c – módulo de elasticidade;

t_c – espessura do elemento de concreto.

➤ Yuan

Yuan e Wu e Yuan et al. *apud* TENG et al. (2002) estudaram a resistência de aderência entre o CFC e o concreto usando a Mecânica da Fratura Linear e Mecânica da Fratura Não-Linear. Esses autores propuseram uma equação que inclui o efeito das larguras da chapa e do elemento de concreto, sendo:

$$\alpha_y = \frac{b_p E_p t_p}{b_c E_c t_c} \quad (2.107)$$

A capacidade máxima de carga é expressa por:

$$P_u = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_2} \cdot \frac{\delta_f}{\delta_f - \delta_1} \text{sen} \lambda_2 a \quad (2.108)$$

Sendo a obtido pela resolução da equação:

$$\text{tg}[\lambda_1(L - a)] = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \text{tg} \lambda_2 a \quad (2.109)$$

$$\lambda_1^2 = \frac{\tau_f}{\delta_1 E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad \text{e} \quad \lambda_2^2 = \frac{\tau_f}{(\delta_f - \delta_1) E_p t_p} (1 + \alpha_y) \quad (2.110)$$

onde

τ_f – tensão máxima na curva tensão de aderência-deslocamento;

δ_1 – deslocamento;

δ_f – deslocamento máximo.

Define-se o comprimento efetivo de aderência como um valor correspondente à 97% da capacidade de carga se L for infinito:

$$L_e = a_0 + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{\lambda_1 + \lambda_2 \text{tg} \lambda_2 a_0}{\lambda_1 - \lambda_2 \text{tg} \lambda_2 a_0} \quad (2.111)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\lambda_2} \text{sen}^{-1} \left(0,97 \sqrt{\frac{\delta_f - \delta_1}{\delta_f}} \right) \quad (2.112)$$

➤ Van Gemert

Assumindo uma distribuição triangular da tensão de cisalhamento no comprimento de aderência total, Van Gemert *apud* TENG et al. (2002) propôs a seguinte fórmula para o cálculo da carga máxima:

$$P_u = 0,5b_p L f_{ctm} \quad (2.113)$$

A equação 2.113 pode ser utilizada para qualquer carga P maior do que a resistência à tração total do compósito. Essa premissa é conceitualmente

desnecessária, e contradiz o fato de que qualquer comprimento de aderência adicional não aumenta a capacidade máxima de carga.

Varastehpour e Hamelin *apud* TENG et al. (2002) admitem a seguinte expressão para a tensão de aderência média:

$$\tau_{méd} = \frac{\tau_{máx}^{descolamento}}{2} = \frac{2,7}{1 + k_1 \tan 33^\circ} \quad (2.114)$$

$$k_1 = t_p \sqrt[4]{\frac{k_a}{4E_p I_p}} \quad k_a = E_a \frac{b_a}{t_a} \quad (2.115)$$

onde

b_a – largura do CFC;

t_a – espessura do CFC;

E_a – módulo de elasticidade do CFC;

I_p – momento de inércia do CFC.

A Equação 2.115 é baseada em dados de ensaios experimentais limitados e não inclui a resistência do concreto, por isso sua aplicabilidade é limitada.

Kalifa et al. *apud* TENG et al. (2002) propuseram uma modificação no modelo de Maeda e incluíram o efeito da resistência do concreto, seguindo-se:

$$\tau_u = \frac{110,2}{10^6} \left(\frac{f'_c}{42} \right) E_p t_p \quad (2.116)$$

A Tabela 2.13 compara os resultados de ensaios de alguns desses modelos, onde observa-se que o modelo de NEUBAUER e RÓSTASY (1997) foi o que apresentou o menor valor para a tensão de aderência, mas possui um menor coeficiente de variação.

Tabela 2.13 – Razão entre as resistências de aderência experimentais e as calculadas; adaptada de CHAJES et al. (1996).

<i>Modelo</i>	<i>Chapas de PRF</i>		
	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação</i>
<i>Hiroguki e Wu (1997)</i>	2,87	0,95	33%
<i>Tanaka (1996)</i>	2,92	1,65	56%
<i>Van Gemert (1980)</i>	2,19	1,12	51%
<i>Chaallal et al. (1998)</i>	1,81	0,89	49%
<i>Kalifa et al. (1998)</i>	1,07	0,24	23%
<i>Neubauer e Róstasy (1997)</i>	0,82	0,15	18%