

Application of Heat-Activated Films as a new generation of adhesives used for bonding Fiber Reinforced Polymers to concrete

Utilização de Filmes Termo-Ativados como adesivos de nova geração para colagem de Polímeros Reforçados com Fibras ao concreto

M. R. GARCEZ ^a
mrgarcez@hotmail.com

U. C. M. QUININO ^b
uziel_quinino@yahoo.com.br

L. C. P. SILVA FILHO ^c
lcarlos@ppgec.ufrgs.br

U. MEIER ^d
urs.meier@empa.ch

Abstract

The application of FRP for post-strengthening of concrete structures induces the use of elevated temperatures to minimize the curing time of the adhesive. The replacement of traditional adhesives by Heat-Activated Films (HAF), with higher glass transition temperatures (T_g), is an interesting prospect, and has been motivating studies regarding the viability of applying termo-activated adhesives. For this study, notched beams post-strengthened with CFRP bonded with two types of heat-activated films (epoxy and phenolic based) and one classical adhesive were tested in bending at EMPA (Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research). To verify the stress redistribution on the notched beams, a computational model, which divides the structure in solid elements, was implemented. The analysis of the behavior of the concrete-laminate interface demonstrates that numerical models are an efficient tool to supplement and explain experimental data.

Keywords: CFRP, heat-activated films, epoxy resin, phenolic resin, concrete.

Resumo

A aplicação de PRF no reforço de estruturas de concreto pode requerer a utilização de elevadas temperaturas para minimizar o tempo de cura dos adesivos. A possibilidade de substituição dos adesivos tradicionais utilizados na colagem de laminados de PRF por Filmes Termo-Ativados (FTA), que apresentam temperaturas de transição vítrea (T_g) mais elevadas que a dos adesivos tradicionais, vem estimulando o desenvolvimento de estudos acerca da sua viabilidade de aplicação. Para o presente estudo, testes em vigas de concreto entalhadas, reforçadas com laminados de PRFC, foram realizados no EMPA (Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research), analisando o comportamento de dois FTA, baseados em resinas termofixas fenólica e epoxídica. Visando verificar a redistribuição de tensões nos elementos estudados, um modelo computacional foi implementado. Os resultados da análise do comportamento da interface concreto-laminação demonstram que os modelos numéricos são ferramentas eficazes para complementar e explicar os dados obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: PRFC, filmes termo-ativados, resina epóxi, resina fenólica, concreto.

^a Professor Dr., Federal University of Pampa, Reseracher at LEME (Portuguese acronym of the Laboratory of Testing and Structural Modeling), Federal University of Rio Grande do Sul, mrgarcez@hotmail.com, Brazil

^b Professor MSc., University of Vale dos Sinos, Researcher at LEME, Federal University of Rio Grande do Sul, uziel_quinino@yahoo.com.br

^c Professor PhD., Professor at Federal University of Rio Grande do Sul and Researcher at LEME, lcarlos66@gmail.com, Brazil

^d Professor Dr. Honoris Causa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research – EMPA, urs.meier@empa.ch, Überlandstrasse 129, CH-8600, Dübendorf - Switzerland

1. Introdução

O interesse em superar algumas limitações apresentadas por materiais convencionais como o aço e o concreto quando aplicados no reforço de estruturas de concreto armado fomentou estudos sobre materiais alternativos nas últimas décadas do século XX. Alguns materiais poliméricos, que já vinham sendo usados de maneira intensa na indústria da aviação, começaram então a despertar interesse. Estes materiais poliméricos, quando estruturados com fibras, permitiam a formação de compósitos com grande resistência à tração e baixo peso, bastante adequados para uso como reforço estrutural.

Em meados da década de 80, a substituição das chapas de aço por Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) começou a ser discutida e investigada por pesquisadores europeus. Naquela época as fibras de carbono foram eleitas como a alternativa mais eficiente para o reforço de matrizes poliméricas, com fins de reforço estrutural, devido à sua natureza não corrosiva, baixo peso, elevado módulo de elasticidade e elevada resistência à tração. Desde então, numerosas aplicações surgiram, principalmente na Europa, no Canadá, Japão e nos Estados Unidos. Hoje em dia o número de aplicações dos PRF no reforço de estruturas de concreto está crescendo em todo o mundo, inclusive no Brasil.

Em geral, o reforço à flexão com PRF é feito através da colagem de tecidos ou laminados de fibra na face tracionada dos elementos estruturais, sendo a colagem realizada através da aplicação de resina epoxi a temperatura ambiente, com a cura completa ocorrendo em cerca de 7 dias.

Desde as primeiras aplicações dos PRF em estruturas reais, muitos avanços aconteceram, entre eles, a investigação da possibilidade de aplicação de protensão nos tecidos e laminados de fibra, como forma de melhor utilizar a resistência à tração deste material. Em alguns sistemas para aplicação de protensão no laminados de fibra, como no desenvolvido por Meier et al. [1], é conveniente que o tempo de cura das resinas seja diminuído, o que contribui para a diminuição do tempo de utilização do equipamento necessário à aplicação da força de protensão nos laminados de fibra. Uma forma de diminuir o tempo de cura das resinas é a realização da

cura a uma temperatura mais elevada que a ambiente, já que a elevação da temperatura aumenta a velocidade das reações químicas responsáveis pela cura do adesivo. Em alguns casos, pode ser necessária a utilização de temperaturas em torno de 100°C para que sejam atingidos tempos de cura pequenos, de cerca de 2 ou 3 horas.

A questão, nestes casos, é que se a temperatura aplicada não pode atingir a temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas epoxi, que é de cerca de 60°C, sob pena de danificar o adesivo. Neste sentido, a possibilidade de substituição dos adesivos tradicionais utilizados na colagem de laminados de PRF por Filmes Termo-Ativados (FTA), que apresentam T_g mais elevadas que a dos adesivos tradicionais, vem estimulando o desenvolvimento de estudos acerca da sua viabilidade de aplicação.

Para averiguar a eficiência desta técnica foram realizados testes do tipo flexão a três pontos, em vigas de concreto entalhadas reforçadas com laminados de PRFC, utilizando a infra-estrutura do EMPA (Dübendorf -Suíça), um dos centros mais avançados do mundo no estudo de compósitos para reforço estrutural à base de fibras carbono. A análise experimental foi realizada com dois tipos de filmes termo-ativados, baseados em resinas termofixas do tipo fenólica e epoxídica, sendo também empregado, como referência, um adesivo termofixo de base epóxi comumente utilizado neste tipo de reforço.

Adicionalmente, com o intuito de verificar como ocorre a redistribuição de tensões nos elementos estudados, foi realizada uma implementação numérica do problema utilizando o programa ANSYS. O modelo computacional em elementos finitos discretiza a estrutura em elementos sólidos, e permite que se observe com muitos detalhes o efeito da associação entre o concreto e os laminados na região de interface.

2. O Reforço de Estruturas com Laminados de PRFC Protendidos e a Possibilidade de Utilização de FTA

Laminados de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) começaram a ser estudados e desenvolvidos na década

Figura 1 - Equipamento de protensão desenvolvido por Meier et al. (1): (a) Posicionamento do equipamento na viga; (b) Formas de protender o PRF

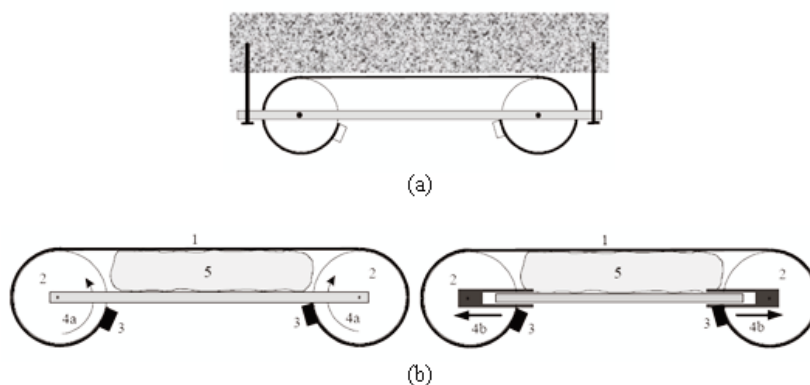
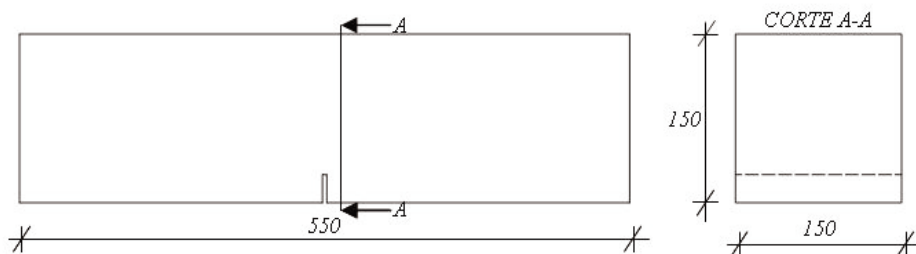


Figura 2 – Geometria das vigas de concreto entalhadas



de 80. Muitos avanços ocorreram desde as primeiras aplicações no reforço de estruturas de concreto armado. Ainda hoje, todavia, são buscadas alternativas para otimizar o sistema, através de estratégias que resultem numa redução de custos e melhor aproveitamento da capacidade mecânica dos elementos de reforço.

A colagem de laminados protendidos ao concreto pode ser considerada como um dos principais avanços acontecidos nos últimos anos, uma vez que implica em um comportamento estrutural mais rígido, com fissuras aparecendo em estágios mais avançados de carregamento e com aberturas menores. Além disso, segundo Meier et al. [1], com a aplicação dos laminados protendidos, o mesmo nível de resistência no reforço pode ser obtido com emprego de seções menores de laminados. Esta otimização proporciona uma economia significativa de materiais, visto que a resistência à tração dos laminados é mais bem utilizada.

Meier et al. [1] introduziram um novo conceito de protensão para laminados de PRF, desenvolvido no EMPA, na Suíça. Neste método, primeiro, é realizada a protensão do laminado e, em seguida, o laminado é posicionado na viga que receberá o reforço. Como as operações para prender e protender os laminados são relativamente complicadas, devido à anisotropia do PRF, um equipamento especial para realização da protensão do laminado, mostrado esquematicamente na Figura [1], foi desenvolvido. O laminado (1) é enrolado nas rodas metálicas (2) e preso nas duas extremidades (3), como mostra a Figura [1] (b). O laminado pode ser protendido pela rotação (4a) ou pelo afastamento (4b) das rodas metálicas. Como pode ser observado na Figura [1] (a), o equipamento de protensão fica fixado à viga até a cura completa do adesivo. Durante a cura do adesivo, o laminado é mantido em contato com a viga através de um colchão de ar (5) posicionado entre o laminado e a barra metálica que une as duas rodas metálicas do equipamento de protensão.

Na aplicação dos laminados protendidos, o adesivo geralmente é curado a uma temperatura mais elevada que a ambiente, diminuindo assim o tempo de cura e, conseqüentemente, o tempo de intervenção na estrutura e de utilização do equipamento de protensão, o que resulta numa diminuição considerável no custo do reforço.

A aplicação de elevadas temperaturas para cura dos adesivos está limitada pela temperatura de transição vítrea (T_g) destes materiais, que não pode ser ultrapassada. Segundo Callister [2], os adesivos de base epóxi utilizados para estas aplicações geralmente necessitam ser aplicados em temperaturas inferiores a 60°C, o

que limita a possibilidade de estimular termicamente a cura.

Diante desta limitação, tem sido aventada a possibilidade de substituir os adesivos de base epóxi, tradicionalmente utilizados na colagem de laminados de PRF, por filmes termo-ativados, que apresentam T_g mais elevadas.

Esta possibilidade mobilizou diversos estudos voltados para a análise da viabilidade de emprego dos filmes termo-ativados, que já vêm sendo utilizados, com bons resultados e há muitos anos, na indústria da aviação.

Procurando contribuir para o desenvolvimento da técnica de reforço pela colagem de laminados de PRF protendidos, este trabalho investiga o desempenho de vigas reforçadas com laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) colados com dois tipos de FTA, sendo uma investigação inicial, na tentativa de diminuir os tempos de utilização dos equipamentos necessários à aplicação de protensão nos laminados.

3. Materiais e Programa Experimental

3.1 Vigas de Concreto

A confecção e os ensaios das vigas de concreto entalhadas reforçadas com PRFC colados com filmes termo-ativados foram realizados no EMPA, na Suíça.

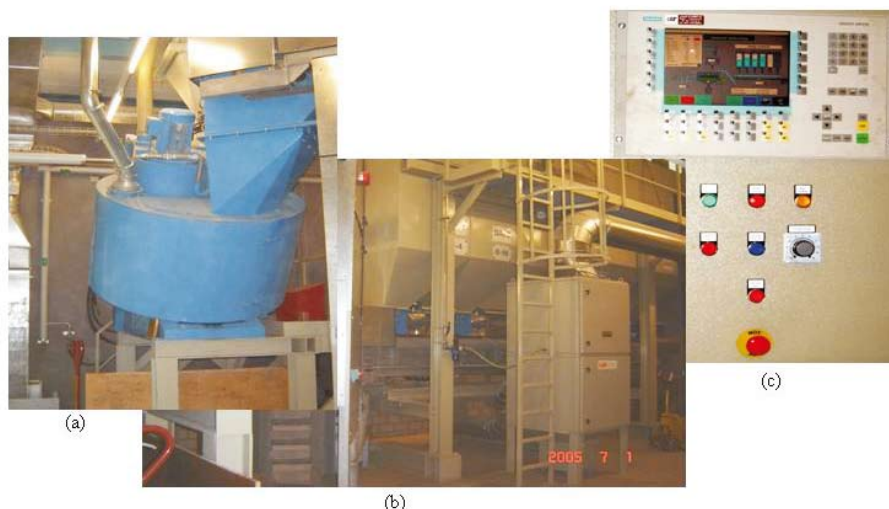
As características geométricas das vigas de concreto entalhadas foram determinadas a partir das recomendações do RILEM TC 162-TDF [3]. As vigas de concreto entalhadas foram construídas com seção transversal quadrada 150x150mm e com 550mm de comprimento. Os entalhes foram executados com profundidade de 25mm e espessura não superior a 5mm, com tolerância de ± 1 mm, como indicado na Figura [2].

O entalhe simula a existência de uma grande fissura no concreto, forçando a ruptura do elemento nesta região, já que as outras fissuras que aparecem com o incremento do carregamento possuem dimensões bem menores e não influenciam significativamente o comportamento do elemento.

3.2 Concreto

Para a produção do concreto utilizado nas vigas de concreto entalhadas foram utilizados agregados graúdos e miúdos disponíveis no EMPA (seixo rolado e areia média) e cimento tipo Portland CEM I 42,5, que tem na sua composição: 95% de clínquer, 5% de cons-

Figura 3 – Misturador automático utilizado na produção do concreto: (a) Betoneira que recebe a mistura; (b) Silos para armazenagem dos materiais; (c) Painel de controle do equipamento



tituintes adicionais minoritários e sulfato de cálcio para regular a pega, que corresponde ao Cimento Portland Comum brasileiro, CP I.

A dosagem do concreto resultou no traço mostrado na Tabela [1], que emprega relação a/c de 0,44, para obter um concreto classe B 35/45 (resistência à compressão expressa em MPa). O concreto foi produzido em um misturador automático, mostrado na Figura [3], programado por computador para adicionar a quantidade especificada de cada material.

A moldagem das vigas foi realizada com auxílio de fôrmas de aço reguláveis, cujas dimensões foram corrigidas com a utilização de placas de isopor, como pode ser visto na Figura [4]. O adensamento do concreto foi realizado de forma mecânica, através da utilização de um vibrador de imersão.

As vigas foram desmoldadas 24 horas após a concretagem e foram mantidas em câmara úmida a 20°C e 95% de umidade rela-

tiva até completarem 28 dias. Para caracterizar as propriedades do concreto, foram moldados dois corpos-de-prova cúbicos com aresta de 150mm. Estes corpos-de-prova de controle também foram mantidos em câmara úmida até a idade de 28 dias, quando foram ensaiados à compressão, resultando numa resistência média de 33MPa.

Também aos 28 dias, as vigas foram retiradas da câmara úmida para execução dos entalhes, efetuados com auxílio da máquina de corte mostrada na Figura [5].

Segundo as recomendações do RILEM TC 162-TDF [3], as vigas deveriam voltar para a câmara úmida por um período mínimo de três dias e serem retiradas três dias antes da realização dos en-

Figura 4 – Fôrmas de aço utilizadas na concretagem das vigas entalhadas

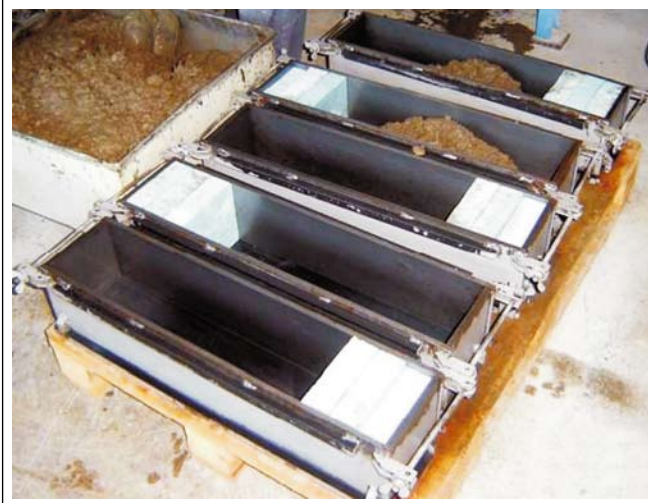


Tabela 1 – Consumo de materiais por m³

Material	Proporção	Consumo (kg/m ³)
Cimento	1	325
Agregado	0...4 mm	1.870
	4...8 mm	0.940
	8...16 mm	0.990
	16...32 mm	2.050
Água	0,440	145
Aditivo 1	0,6%	1.950
Aditivo 2	0,1%	0.325

saios. Entretanto, devido à necessidade de aplicação de elevadas temperaturas para a cura dos filmes termo-ativados, decidiu-se diminuir a umidade das vigas antes da aplicação do reforço, para

evitar problemas de colagem. Assim, passados três dias da execução dos entalhes, as vigas foram retiradas da câmara úmida e depositadas em um ambiente com 3,5% de umidade relativa por três dias.

Figura 5 – Máquina utilizada para executar os entalhes



3.3 Filmes Termo-Ativados

Uma característica marcante dos materiais poliméricos em geral, segundo Callister [2] é que suas propriedades mecânicas são muito sensíveis à taxa de deformação, à natureza química do ambiente e à temperatura. Desta forma, as propriedades térmicas de um polímero são freqüentemente especificadas fazendo referência à sua Temperatura de Transição Vítrea (T_g).

Quando um polímero está submetido a uma temperatura abaixo da T_g as moléculas têm muito pouca mobilidade. Quando a mesma é alcançada, podem ocorrer drásticas mudanças na estrutura e nas propriedades, especialmente em polímeros amorfos. A T_g pode, portanto, ser considerada uma das propriedades mais importantes dos materiais poliméricos, pois a dureza, volume, resistência, alongamento percentual na ruptura e módulo de elasticidade do material são significativamente alteradas quando a temperatura se aproxima da T_g .

Segundo o FIB [4], é importante observar que a T_g pode variar com o tempo, em função de parâmetros ambientais, como a taxa de variação da temperatura e a umidade. A absorção de água pela resina pode diminuir a T_g , enquanto a aplicação de elevadas temperaturas pode aumentar o valor da T_g , uma vez que atua como uma pós-cura do material. Recomenda-se, de forma geral, quando se utiliza um PRF, que a T_g não seja ultrapassada, sob pena de se colocar em risco a segurança do sistema.

Os adesivos utilizados na colagem de PRF em estruturas de concreto apresentam, em geral, T_g em torno de 60°C, podendo chegar a 100°C em adesivos do tipo Long Pot Life.

Uma alternativa ao uso dos adesivos tradicionais consiste no emprego de filmes termo-ativados, que são fitas adesivas que polimerizam quando expostos à temperatura, o que possibilita a realização de cura a elevadas temperaturas, em torno de 120°C a 250°C. A principal vantagem, neste caso, é que a ação da temperatura diminui consideravelmente o tempo de cura do adesivo nas estruturas reforçadas com PRF.

Os dois tipos de filmes termo-ativados utilizados nesta pesquisa

Figura 6 – FTA utilizados na pesquisa: (a) HAF 8400; (b) ACG VTA™ 260



(a)



(b)

Tabela 2 – Características dos FTA, fornecidas pelos fabricantes

Características	HAF 8400	ACG VTA™260
Resina do adesivo	Resina fenólica	Resina epóxi
Resistência à tração (MPa)	> 12	-
Espessura	0,25mm	0,36mm
Largura	38mm	1100mm
Temperatura de armazenagem	Ambiente	-18°C
Tempo e temperatura recomendados para cura	120°C - 250°C	65°C a 85°C – 16 horas
	4 seg – 30 min	80°C a 90°C – 5 horas
		100°C a 110°C – 2 horas 120°C – 1 hora

foram o HAF 8400 fabricado pela TESA AG [5] e o ACG VTA™ 260 fabricado pela Advanced Composites Group [6]. Ambos são resinas termofixas, porém o HAF 8400 é do tipo fenólica e o ACG VTA™ 260 é do tipo epóxi. As características dos dois filmes encontram-se na Tabela [2]. Os dois filmes termo-ativados utilizados podem ser observados na Figura [6].

3.4 Polímeros Reforçados com fibras de Carbono

O sistema PRF laminado utilizado no reforço das vigas de concreto entalhadas foi o Sika® Carbodur [7], composto pelo laminado de fibra de carbono Carbodur S 512 e pelo adesivo Sikadur®-30. As características do sistema de reforço encontram-se na Tabela [3].

Tabela 3 – Características do sistema PRF, fornecidas pelo fabricante

	Laminado Carbodur S 512
Espessura (mm)	1,2
Largura (mm)	50
Resistência à tração (MPa)	2,800
Deformação última (%)	17
Módulo de elasticidade (MPa)	165,000
Temperatura máxima (°C)	500
	Resina Sikadur®-30
Componentes	3 Parte A : 1 Parte B
Pot life a 35°C (min)	40
Tempo em aberto a 35°C (min)	30
Tg (°C)	62
Módulo de elasticidade (MPa)	12,800

3.5 Matriz Experimental

Os testes foram realizados em oito vigas de concreto entalhadas, sendo que seis vigas foram reforçadas com PRFC e duas não receberam reforço. Das vigas reforçadas, duas receberam o sistema Sika® Carbodur, com o adesivo Sikadur®-30, e serviram como parâmetro para comparação com as vigas reforçadas com laminados colados com os filmes termo-ativados.

Os testes com o filme termo-ativado do tipo ACG VTA™ 260 foram realizados em duas vigas que receberam duas camadas de filme termo-ativado curado a 100°C por duas horas. Com o filme termo-ativado do tipo HAF 8400 os testes foram realizados em duas vigas que receberam três camadas de filme termo-ativado curado a 120°C por 30 minutos.

A matriz experimental e a denominação de cada viga podem ser observadas na Tabela [4].

3.6 Execução dos Reforços

A aplicação do sistema de reforço Sika® Carbodur requer a preparação da superfície de concreto, da mesma forma os sistemas curados in situ do tipo dry fabric. Além da preparação da superfície do concreto é indispensável que a superfície do laminado também esteja isenta de pó, graxas e contaminantes.

No sistema Sika® Carbodur, após a preparação da superfície, aplica-se o adesivo Sikadur®-30 diretamente sobre a superfície de concreto e no laminado Carbodur S 512, previamente cortado nas dimensões do reforço. O laminado Carbodur S 512 utilizado nos reforços possui seção transversal 1,2mm x 50mm e foi cortado com 500mm de comprimento.

A espessura do adesivo aplicado no concreto deve ser de 1mm. No laminado, a espessura deve ser de 2mm no centro chegando a 1mm nas extremidades.

Após a aplicação do adesivo, o laminado é posicionado na viga de concreto e certa pressão deve ser aplicada para a retirada do ar existente entre o laminado e o substrato de concreto. A retirada do ar incorporado pode ser realizada com um rolo de borracha. Este processo termina quando for percebido que certa quantidade de adesivo escorreu nas bordas do laminado. Placas de aço são então posicionadas para manter o sistema sob pressão até a cura completa do adesivo.

Tabela 4 – Matriz experimental

Denominação das vigas	Tipo de filme termo-ativado	Número de camadas	Temperatura de cura (°C)	Tempo de cura (h)
VT_01 VT_02	-	-	-	-
VSIKA_01 VSIKA_02	-	-	35	168
VACG_01 VACG_02	ACG VTA™260	2	100	2
VTESA_01 VTESA_02	HAF 8400	3	120	0.5

Figura 7 – Viga de concreto entalhada reforçada com o sistema Sika® Carbodur



As vigas de concreto entalhadas foram reforçadas com uma camada de laminado de 50mm de largura, posicionada na face entalhada, como mostra a Figura [7].

A aplicação do laminado Carbodur S 512, colado à superfície de concreto com filme termo-ativado, como nos outros sistemas, requer a preparação das superfícies do concreto e do laminado.

Após a preparação das superfícies do concreto e do laminado, aplica-se o número de camadas requeridas de filme termo-ativado, como uma fita adesiva.

Como a cura do filme termo-ativado é realizada a elevadas temperaturas, o que é considerado uma de suas principais características, as vigas de concreto entalhadas reforçadas com PRFC foram posicionadas em uma prensa com um sistema de aquecimento, como mostra a Figura [8], que aplicou a temperatura necessária à cura do adesivo.

3.7 Procedimento de Ensaio

Antes da execução dos ensaios as vigas entalhadas reforçadas com PRF foram instrumentadas com um LVDT localizado na pren-

Figura 8 – Prensa utilizada na cura dos adesivos

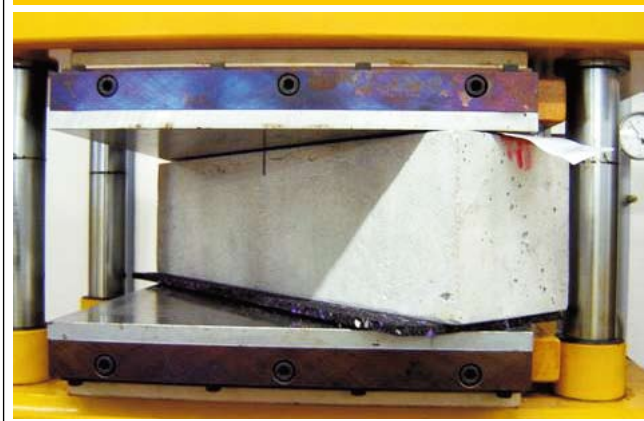
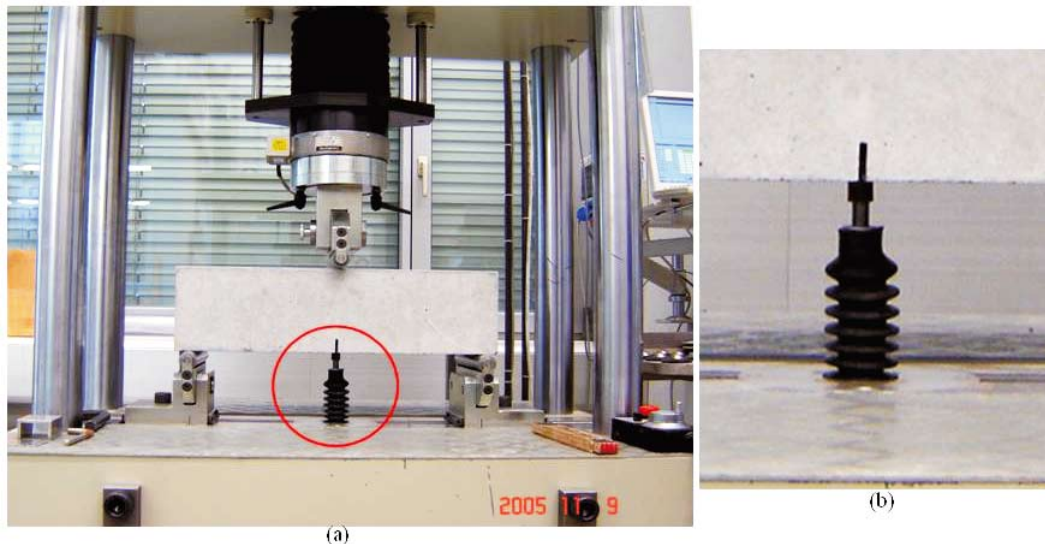


Figura 9 – Esquema de ensaio: (a) Ensaio de flexão em três pontos; (b) Detalhe do LVDT



sa servo-controlada com capacidade de 160kN que foi utilizada para aplicação de carga, conforme pode ser observado na Figura [9]. Os dados obtidos através da instrumentação, no centro do vão das vigas, logo abaixo do entalhe, servirão para o traçado dos diagramas carga-deslocamento das vigas. Adicionalmente, os dados obtidos através da instrumentação serão utilizados em conjunto com os obtidos através de simulação numérica, para melhor entender o comportamento do conjunto concreto-filme termotivado-laminado e verificando assim a possibilidade de aplicação em reforços estruturais.

Os ensaios das 8 vigas de concreto entalhadas foram realizados no EMPA, na Suíça.

A carga foi aplicada em um esquema de ensaio de flexão em três pontos: viga simplesmente apoiada e aplicação de uma carga vertical no centro do vão, como pode ser observado na Figura [9]. A aplicação da carga foi realizada por uma célula de carga e a cada

incremento de carga eram armazenados no sistema de aquisição de dados os valores dos deslocamentos verticais no centro do vão.

4. Simulação Numérica

Com o intuito de verificar a redistribuição de tensões nas vigas experimentais, adotou-se uma investigação numérica baseada numa análise por meio do método dos elementos finitos. A modelagem foi realizada a partir uma viga de concreto entalhada e reforçada com PRFC, como descrito nos item 2 deste texto. Devido à simplicidade de geometria da viga e de suas condições de contorno, adotou-se a discretização de todo o sólido, conforme as especificações do procedimento experimental.

Para criar o modelo em elementos finitos, utilizou-se o programa ANSYS, que é um programa que utiliza o Método dos Elementos

Figura 10 – Elemento Solid 65

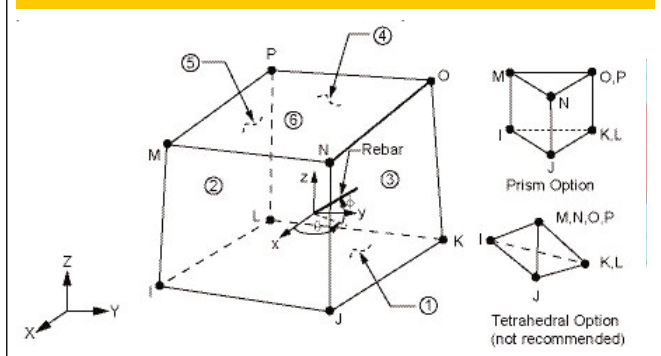
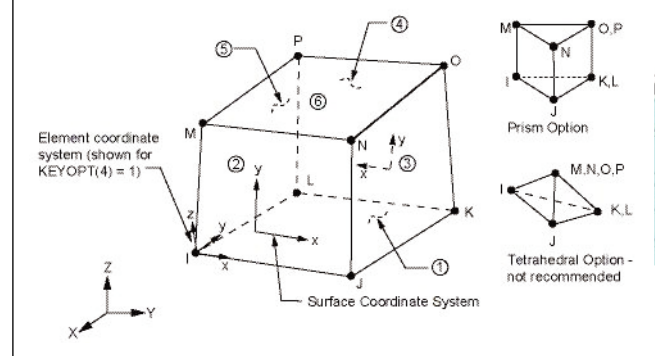


Figura 11 – Elemento Solid 45



Finitos (MEF) para analisar estruturas, determinando seu comportamento sob determinadas condições de operação. Há várias maneiras de se realizar uma modelagem numérica através do ANSYS, sendo que uma delas é por meio da Graphical User Interface (GUI), que foi adotada para modelar o protótipo experimental neste trabalho.

Para que se efetue uma análise numérica utilizando o MEF é necessário que se definam alguns parâmetros como a geometria da estrutura a ser simulada, o tipo de carregamento e as vinculações da estrutura analisada, o número de nós em que foi dividido o domínio, o tipo de elemento finito que será empregado na discretização, o número de elementos utilizados, e, finalmente, os modelos de comportamento de cada material, bem como suas características, que devem ser semelhantes às aplicadas nos ensaios experimentais.

A geometria da estrutura simulada pode ser observada na Figura [2]. As vigas de concreto entalhadas foram construídas com seção transversal 150mm x 150mm e 550mm de comprimento com entalhe de 50mm. Os entalhes foram executados com profundidade de 25mm e espessura não superior a 5mm com tolerância de ± 1 mm. Foram utilizados laminados de PRFC de seção transversal 1,2mm x 50mm e 500mm de comprimento no reforço das vigas de concreto entalhadas. As espessuras de adesivos utilizadas foram 2mm para o adesivo Sikadur®-30, 0,75mm para o HAF 8400 (3camadas) e 0,72mm (2 camadas) para o ACG VTA™ 260.

4.1 Tipos de Elementos

O elemento tipo SOLID65 foi usado para modelar o concreto. Este elemento possui oito nós com três graus de liberdade em cada

nó – translações nas direções nodais x, y e z. Além disso, o SOLID65 é capaz de simular deformações plásticas, fissuração em três direções ortogonais e até mesmo representar a ruptura por esmagamento. Vale ressaltar que esta possibilidade está relacionada intrinsecamente ao elemento. Um esquema do elemento é mostrado na Figura [10].

O elemento tipo SOLID45 foi usado para representar o laminado de fibra de carbono e o adesivo. Este elemento tem oito nós com três graus de liberdade em cada nó – translações nas direções nodais x, y e z. A geometria e as localizações dos nós deste elemento são mostrados na Figura [11].

4.2 Propriedades dos materiais

Para definir as características do modelo é necessário fixar os parâmetros e as propriedades de todos os materiais envolvidos na análise. Desta forma, a Tabela [5] mostra os modelos de materiais empregados na presente análise.

O material 1 refere-se ao elemento Solid65. Este elemento requer propriedades de material isotrópico linear e multilinear para caracterização do concreto. O material com parâmetros multilinear usa o critério de Von Mises para definir o critério de fraturamento. Em se tratando do concreto, faz-se necessário que o usuário implemente as características da curva tensão vs deformação do mesmo, obedecendo sempre à lei de Hooke para o primeiro ponto. O parâmetro E_x é o Módulo de Elasticidade do material.

Os materiais 2 e 3 referem-se ao elemento do tipo Solid45, usados para o FRPC e os adesivos, respectivamente. Estes elementos são modelados com propriedades de materiais tipo isotrópico e

Tabela 5 – Modelos de materiais para a calibração do modelo

Material N°	Tipo de Elemento	Propriedades do Material						
		Isotrópico Linear		Isotrópico Multilinear			Constantes do Modelo	
1	Solid65 concreto	E_x (N/mm ²)	35.000	Ponto	σ (N/mm ²)	ϵ	ShrCf-Op ¹	0,30
		Poisson	0,35	01	12,25	0,00035	ShrCf-Cf ²	1,00
				02	21,00	0,00060	Un TensSt ₃	3,50
				03	52,50	0,00150		
				04	70,00	0,00200		
				05	87,00	0,00250		
2	Solid45 laminado de fibra de carbono	Isotrópico Multilinear						
		E_x (N/mm ²)	16.5000					
		Poisson	0,25					
3	Solid45 FTA	Isotrópico Multilinear ACG VTA™ 260		Isotrópico Multilinear HAF 8400		Isotrópico Multilinear Sikadur®-30		
		E_x (N/mm ²)	2,800	E_x (N/mm ²)	300	E_x (N/mm ²)	12,800	
		Poisson	0,30	Poisson	0,475	Poisson	0,250	

¹ coeficiente de transferência de cisalhamento para uma trinca aberta; ² coeficiente de transferência de cisalhamento para uma trinca fechada; ³ tensão de fissuração uniaxial

Figura 12 - Malha de elementos finitos

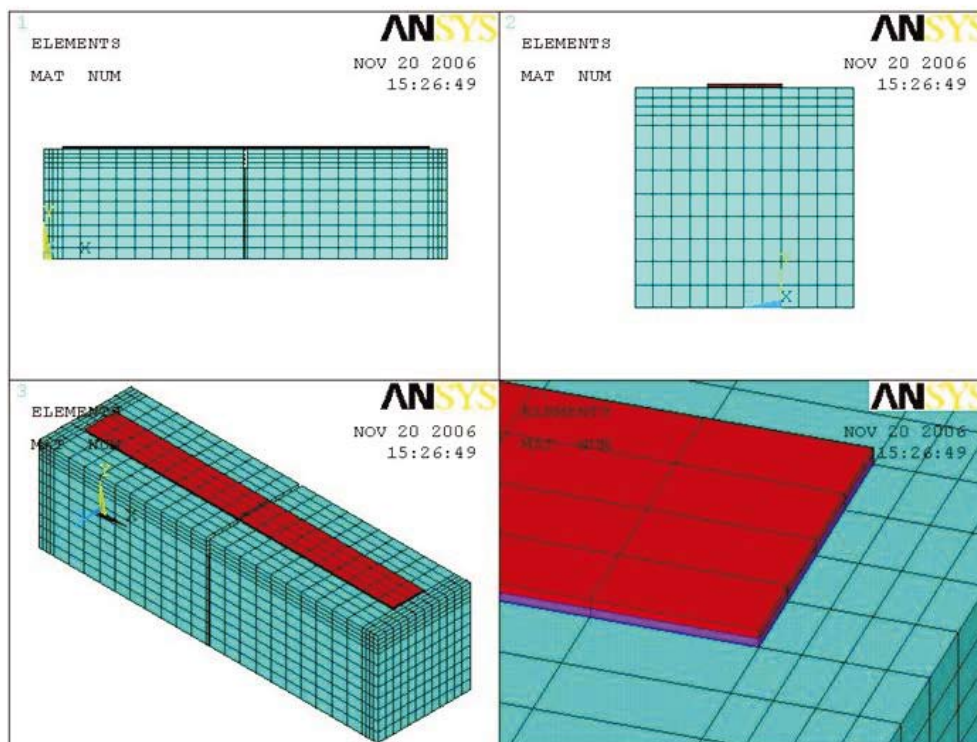
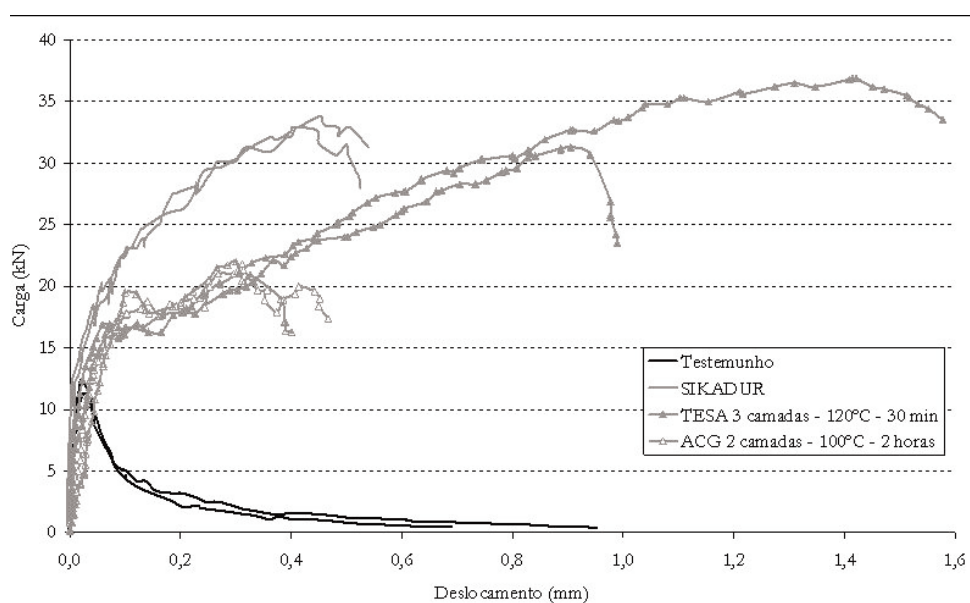


Figura 13 - Resultados experimentais dos deslocamentos verticais no centro do vão



linear, onde os respectivos valores de Módulo de Elasticidade e o Coeficiente de Poisson são suficientes.

4.3 Modelagem e Malha

A viga, os adesivos e o reforço são modelados a partir da criação de volumes. As dimensões obedecem os valores dos protótipos experimentais.

Para obter bons resultados, adotou-se a metodologia da geração de uma malha retangular e estruturada. A Figura [12] mostra a discretização do domínio em 3D, uma malha de elementos finitos, que contém 4.400 elementos e 5.422 nós. A vista em perspectiva mostra o detalhe do laminado e do adesivo, posicionados ao longo do eixo longitudinal da viga.

4.4 Condições de contorno

As condições de contorno são necessárias na modelagem numérica para restringir o deslocamento (deslocamento de corpo rígido) e obter uma solução única a partir de uma dada solicitação. Neste trabalho, as condições de contorno englobam o tipo de carregamento aplicado e as vinculações da estrutura. Para simular o ensaio de flexão em três pontos, a viga foi considerada simplesmente apoiada, com um vínculo do primeiro gênero

e um vínculo do segundo gênero e recebeu uma carga vertical no centro do vão.

4.5 Tipo de análise

Para atender o propósito inicial desta simulação, foi realizada uma análise do tipo estática não linear das vigas reforçadas, considerando incrementos de pequenos deslocamentos como controle da análise. A análise numérica consistiu em verificar as condições das vigas até o carregamento que causou a ruptura experimental, ou seja, $P = 29,4$ kN para as vigas em que foi utilizado o adesivo Sikadur®-30, $P = 8,8$ kN para as vigas em que foi utilizado o adesivo ACG VTA™ 260 e $P = 26,82$ kN para as vigas em que foi utilizado o adesivo HAF 8400. Vale ressaltar que na obtenção dos resultados o método de análise de Newton-Raphson foi adotado para computar a resposta não-linear do problema, ou seja, a aplicação do carregamento até o processo de ruptura da peça foi feita de maneira incremental, conforme o requerido pelo procedimento de Newton-Raphson. Depois de cada incremento de carga, era verificado se o processo obedecia a convergência entre cada passo.

Desta forma, foi possível obter a simulação do comportamento dos materiais com análise das tensões atuantes na estrutura quando submetida ao carregamento que causou a ruptura experimental.

Figura 14 – Resultados da simulação com ANSYS para o adesivo Sikadur®-30: (a) σ_1 ; (b) σ_2 ; (c) σ_3 ; (d) τ_{xz}

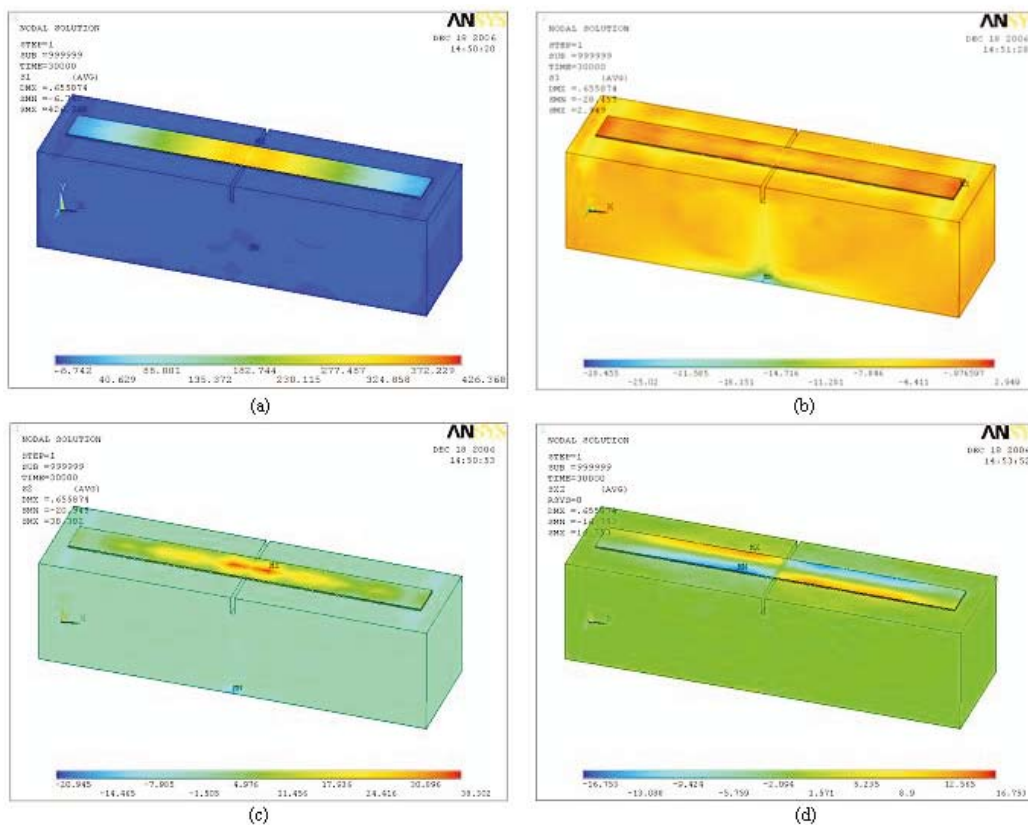
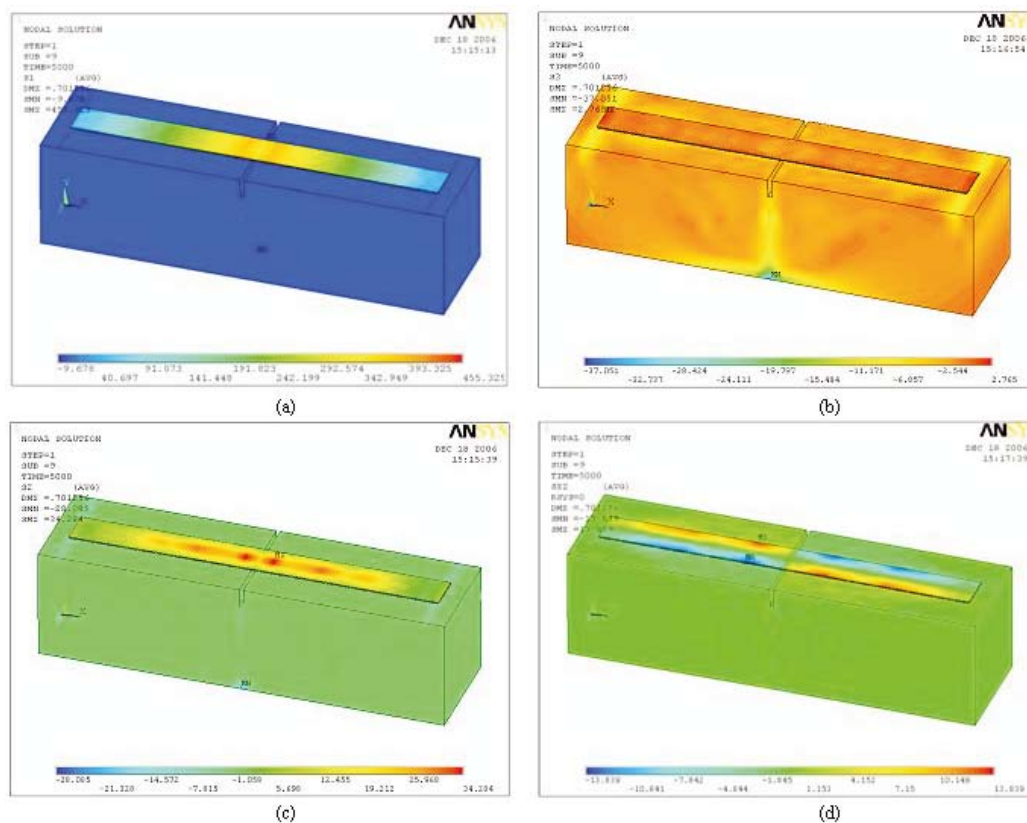


Figura 15 – Resultados da simulação com ANSYS para o adesivo ACG VTA™ 260: (a) σ_1 ; (b) σ_2 ; (c) σ_3 ; (d) τ_{xz}



5. Discussão dos Resultados

A Figura [13] mostra os resultados experimentais dos deslocamentos verticais obtidos através dos ensaios de flexão em três pontos realizados nas oito vigas de concreto entalhadas.

As curvas referentes às vigas testemunho mostram, claramente, o comportamento de uma viga de concreto que não recebeu armadura interna, a qual perde sua capacidade de carga após um pico de carregamento, que representa o esgotamento da capacidade resistente à tração do concreto. Observa-se que houve uma mudança de comportamento na curva carga x deslocamento vertical nas vigas que receberam reforço, com relação às viga testemunho. As vigas reforçadas apresentaram picos de carga mais elevados e comportamentos diferenciados após o pico de carregamento.

As vigas que receberam reforço colado com o adesivo Sikadur®-30 suportaram um carregamento máximo de cerca de 33kN, correspondente a um deslocamento vertical de cerca de 0,4mm, e romperam por descolamento do reforço tão logo o pico de carga foi atingido.

As vigas reforçadas que receberam adesivos do tipo FTA mostraram um pico de carga mais elevado que as vigas testemunho, cuja carga máxima atingiu cerca de 12kN. O carregamento máximo atingido pelas vigas que receberam o adesivo Sikadur®-30 só foi atingido pelas vigas que receberam o HAF 8400, com um deslocamento vertical de cerca de 1mm. O pico de carga das vi-

gas reforçadas com o adesivo ACG VTA™ 260 se mostrou mais elevado que o das que receberam o adesivo HAF 8400, porém, após o pico de carga, houve pouco deslocamento vertical antes da ruptura. A carga máxima suportada pela viga que recebeu o adesivo ACG VTA™ 260 foi cerca de 22kN para um deslocamento de aproximadamente 0,3mm. Em todas as vigas reforçadas com FTA a ruptura ocorreu por descolamento do reforço, da mesma forma que nas vigas reforçadas com o sistema de reforço clássico Sika® Carbodur, que utiliza o adesivo Sikadur®-30.

O comportamento carga x deslocamento vertical das vigas que receberam adesivo Sikadur®-30 se mostrou mais rígido e sem o pico de carga, diferente do das que receberam FTA. Entretanto a ruptura destas vigas ocorreu de forma brusca com um deslocamento vertical inferior aos das que receberam adesivos do tipo FTA.

Observa-se nos resultados experimentais que o comportamento das vigas que receberam o adesivo HAF 8400 se mostrou mais dúctil em relação às outras vigas, o que condiz com seu módulo de elasticidade, que é inferior ao das demais.

As Figuras [14], [15] e [16] mostram as tensões principais, σ_1 , σ_2 e σ_3 e a tensão de cisalhamento τ_{xz} , respectivamente para as vigas que receberam os adesivos Sikadur®-30, submetidas a um carregamento $P = 29,4$ kN, ACG VTA™ 260, submetidas a um carregamento $P = 28,8$ kN e HAF 8400, submetidas a um carregamento $P = 26,82$ kN.

Figura 16 – Resultados da simulação com ANSYS para o adesivo HAF 8400: (a) σ_1 ; (b) σ_2 ; (c) σ_3 ; (d) τ_{xz}

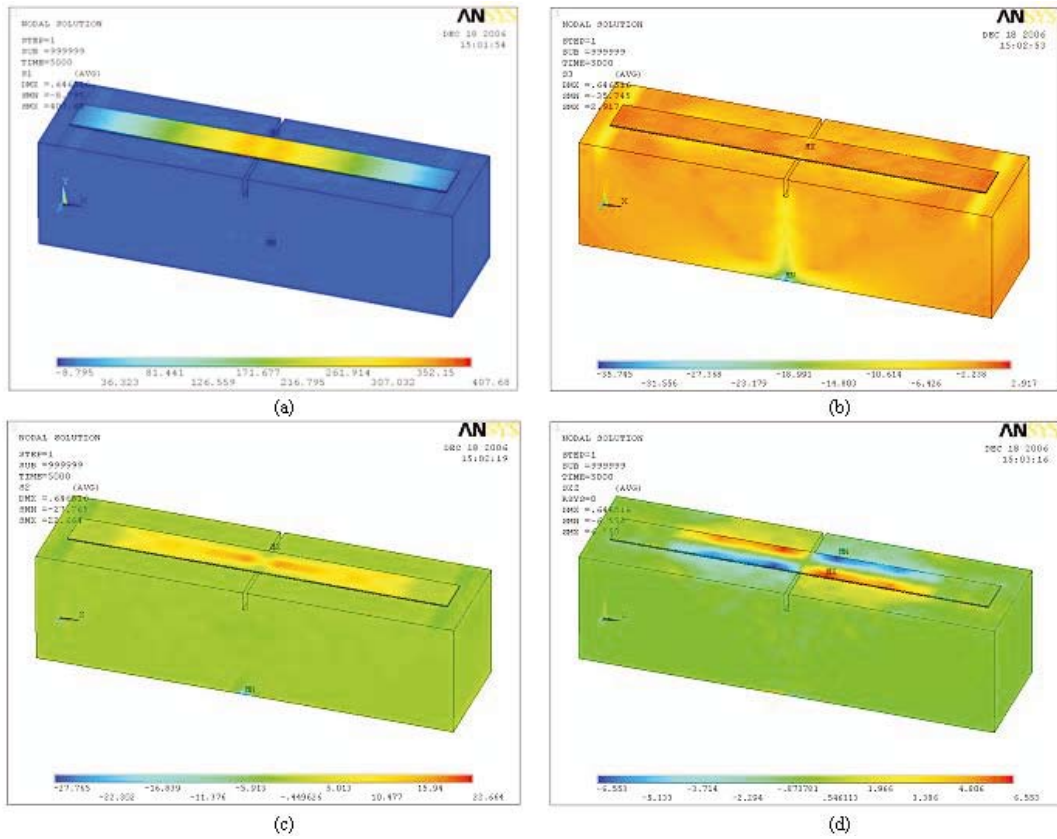
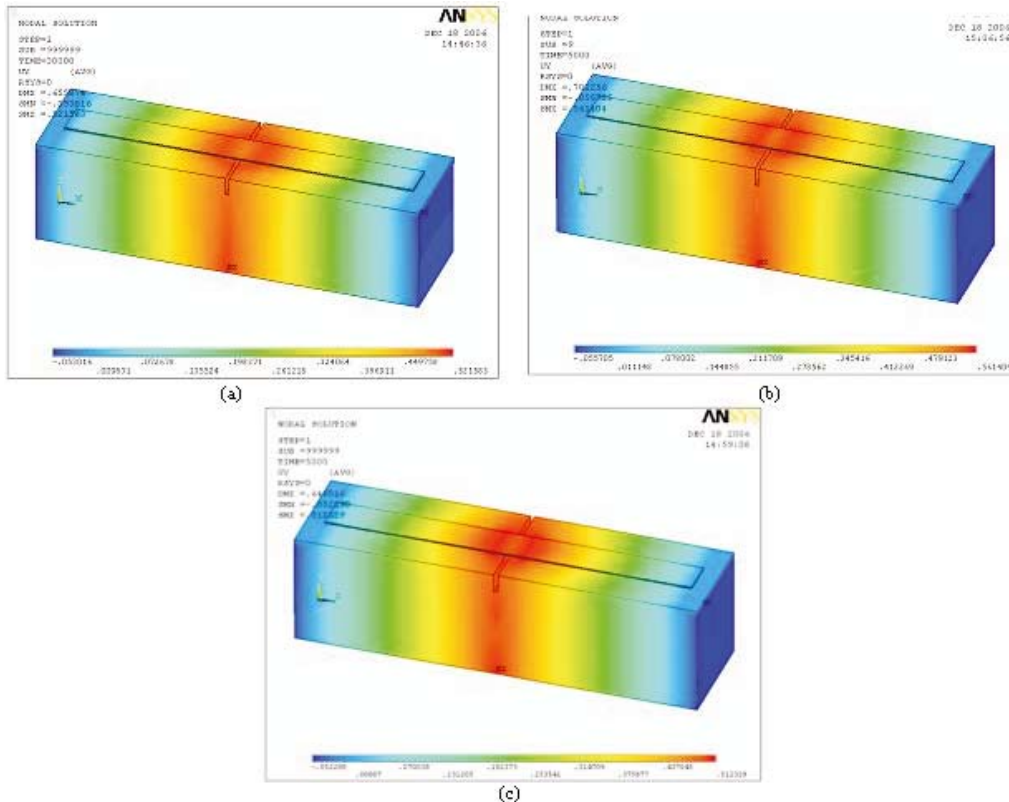


Figura 17 – Resultados dos deslocamentos verticais no centro do vão obtidos através da simulação com ANSYS: (a) Adesivo Sikadur®-30; (b) Adesivo ACG VTA™ 260; (c) Adesivo HAF 8400.



Analisando as tensões na direção principal 2 observa-se que houve uma maior concentração de tensões na região central da viga para o adesivo de maior módulo de elasticidade (Sikadur®-30). Estas tensões se mostraram mais distribuídas ao longo do laminado nas vigas que receberam os FTA e têm menor intensidade quanto menor o módulo do adesivo.

Nas simulações das tensões de cisalhamento no plano XZ, plano onde estão presentes as ligações concreto-adesivo e adesivo-laminado, observa-se uma maior capacidade de absorção de esforços quando o adesivo possui uma maior rigidez. As rupturas que acontecem por concentração de tensões de cisalhamento nas interfaces concreto-adesivo e adesivo-laminado, nas extremidades do elemento reforçado, é um dos pontos fracos dos reforços colados externamente às estruturas de concreto.

De posse dos resultados obtidos a partir da simulação para os adesivos Sikadur®-30, ACG VTA™ 260 e HAF 8400, mostrados na Figura [17], é possível verificar a presença das tensões principais e de cisalhamento no laminado e na região central da viga.

Os resultados da simulação numérica não mostram diferenças significativas no comportamento das vigas reforçadas com os diferentes tipos de adesivos, que ocorrem principalmente devido à diferença de rigidez dos adesivos testados.

6. Conclusões

Os resultados experimentais obtidos com a realização dos ensaios se mostraram muito promissores, indicando que a utilização dos FTA como adesivos para colagem de PRF a estruturas de concreto pode ser uma alternativa tecnicamente viável.

Embora os resultados experimentais mostrem que as vigas reforçadas que receberam o adesivo Sikadur®-30 apresentaram comportamento mais rígido que as demais, a utilização dos FTA apresentam outras vantagens interessantes como a possibilidade de diminuição do tempo de cura do adesivo com a aplicação de elevadas temperaturas.

Testes adicionais, que permitam identificar o comportamento dos FTA ao longo do tempo, bem como testes de fadiga, ainda são necessários e estão sendo desenvolvidos no EMPA.

No futuro, adesivos que permitam a aplicação de sistemas PRF pretendidos com mais rapidez, ou seja, com menor tempo de cura, serão fundamentais para utilização nos equipamentos automatizados desenvolvidos atualmente para aplicação da protensão nos laminados.

7. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer os órgãos financiadores CAPES e CNPq pelo apoio financeiro fundamental à realização da pesquisa. Da mesma forma, gostariam de agradecer aos laboratoristas do EMPA, pelo auxílio na execução do programa experimental, e, principalmente, ao Prof. Urs Meier, pela cooperação e oportunidade de realização dos programa experimental nas dependências do EMPA.

8. Referências bibliográficas

- [01] MEIER, U., STÖCKLIN, I., TERRASI, G. P. Making better use of the strength of advanced materials in structural engineering. In: FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong, 2001, Anais. [CD-ROM]

- [02] CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering - An Introduction, United States of America: WILEY, 2003. 820p.
- [03] RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: RILEM TC 162-TDF, Bagneux, 2002.
- [04] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. Design and Use of Externally Bonded FRP Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures. Lausanne, FIB, 2001, Progress Report – Fédération Internationale du Béton.
- [05] ADVANCED COMPOSITES GROUP. Data Catalogue, 2005. [CD-ROM]
- [06] TESA. Fitas fílmicas termo-ativadas. www.tesatape.com.br, acesso em novembro de 2005.
- [07] SIKA. Sika® Carbodur – Sistema de reforço com lâminas de fibra de carbono. www.sika.com.br, acesso em abril de 2005.