

## USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA

**Nívia dos Santos Lima**

[nivialima10@hotmail.com](mailto:nivialima10@hotmail.com)

Departamento de Construção Civil e Transportes

**Carlos Herique Machado Junior**

**Luciano Rodrigues Ornelas de Lima**

**Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco**

[carlosmachadojr@gmail.com](mailto:carlosmachadojr@gmail.com)

[lucianolima@uerj.br](mailto:lucianolima@uerj.br)

[vellasco@uerj.br](mailto:vellasco@uerj.br)

Departamento de Estruturas e Fundações, Faculdade de Engenharia, UERJ

**José Guilherme Santos da Silva**

[jgss@uerj.br](mailto:jgss@uerj.br)

Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, UERJ

***Resumo.** O aço vem se mostrando, ao longo do tempo, como uma alternativa econômica e tecnicamente viável para diversos tipos de aplicações na indústria da construção, onde pode-se citar por exemplo, o reforço estrutural. O mercado de reforço e recuperação vem crescendo muito nos últimos anos associado à maior preocupação com a durabilidade das construções. É de se notar a expressiva quantidade de edificações que atualmente deparam-se com precárias condições de conservação e de segurança, tendo seu desempenho comprometido, quer por falta de manutenção ou idade de construção avançada. Esse crescimento também resulta da crescente necessidade de reaproveitamento das estruturas existentes para uma finalidade distinta da qual a mesma foi projetada inicialmente. O presente trabalho visa expor os diversos meios e proveitos do uso das estruturas de aço em reforço de estruturas de madeira, através de análises numéricas pelo método dos elementos finitos e modelagem computacional empregando o programa ANSYS. Executou-se um estudo de cinco modalidades de reforço estrutural em uma viga de madeira de seção transversal retangular no intuito de proceder na análise da eficiência de cada uma delas.*

***Palavras-chave:** Reforço Estrutural, Estruturas Metálicas, Método dos Elementos Finitos, Análise Numérica*

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente preocupação com a durabilidade das construções, à necessidade e oportunidade de se recuperar e reaproveitar espaços, sejam esses ociosos ou não, só têm impulsionado o mercado de reforço e recuperação nos últimos tempos.

Apenas quando é diagnosticada a patologia de uma estrutura, é que se determina se a mesma passará por recuperação, reforço, ou por ambos os processos.

É importante definir que reforço é uma intervenção no elemento estrutural onde o maior propósito é o aumento de sua capacidade de resistir às solicitações a que está submetida; sua necessidade pode ser em razão do aumento do carregamento ou mesmo na correção de falha do projeto.

Já a recuperação objetiva o restabelecimento da integridade física e eficiência da estrutura incluindo a vida útil inicial, evitando que se agravem os problemas que podem provocar desde sua inutilização até o colapso. Sendo assim, nem sempre o reforço é recomendado para elementos em estágio avançado de degeneração onde a recuperação faz-se necessária.

Estas intervenções devem visar a busca das melhores soluções para os problemas de perda de resistência, transporte, colocação em obra, operacionalidade em espaços reduzidos e de compatibilidade funcional e estética diante das estruturas existentes

Preferencialmente, as intervenções de reforço estrutural devem ser distinguíveis das estruturas existentes, de fácil inspeção, com características de pré-fabricação e facilmente reversíveis; não sendo aconselháveis soluções que dificultem a inspeção e manutenção, e que prevejam a interpenetração de materiais novos com os antigos, pois adulteram os materiais antigos impedindo assim a reversibilidade das soluções.

O aço desponta como um dos materiais dotados de excelente flexibilidade construtiva, resolvendo de modo satisfatório diversos problemas de reforço estrutural. As possibilidades oferecidas por este material permitem a execução de uma vasta gama de operações que vão desde o simples reforço de um elemento a sua completa reestruturação.

Observa-se, hoje em dia, que o aço está sendo cada vez mais utilizado na reabilitação, modernização e recuperação de edificações sobretudo das mais antigas. As vantagens estruturais e arquitetônicas do aço possibilitam a verificação de várias exigências construtivas, das quais pode-se citar: a pré-fabricação, a elevada resistência, a reversibilidade, as dimensões e peso reduzidos, a simplicidade de transporte, a facilidade de montagem em obra, a utilização em espaços reduzidos, a disponibilidade em diversas formas e dimensões, o tempo de execução reduzido e a ótima relação custo benefício.

Do ponto de vista estrutural, as estruturas de aço podem ser usadas em todos os níveis da reabilitação estrutural. O escoramento ou proteção da estrutura original representa a primeira etapa do processo de reforço, quando da intervenção estrutural, de forma a garantir a segurança provisória para a edificação e o público. Os andaimes em aço são normalmente usados para proteger e organizar a edificação sob intervenção. No caso de uma edificação que foi danificada devido a um abalo sísmico, por exemplo, uma estrutura de aço externa pode ser usada para garantir provisoriamente a segurança.

As operações de reforço podem ser subdivididas em: operações de melhorias simples, que envolvem uma variedade de trabalhos em elementos estruturais individuais de uma edificação a fim de se conseguir um nível mais elevado de segurança, mas sem modificar de forma significativa sua composição, e operações que levam a um sistema estrutural diferente do original, que fazem com que a estrutura suporte novas solicitações de projeto, isto é, adições verticais e/ou horizontais, e casos onde a mudança de uso envolve um aumento do carregamento original.

Independentemente de aspectos estruturais, operações de restauração são normalmente solicitadas, e dão origem a diferentes tipos de intervenções. Dentre os principais tipos de intervenções, pode-se citar:

- a) “*Gutting*”: consiste na demolição das estruturas internas de um edifício e de sua total ou parcial substituição por um outro tipo diferente. Pode ser necessária devido a modificação de uso do edifício exigindo modificações no modelo estrutural, como por exemplo, a troca de paredes estruturais por um pórtico estrutural. Isto é feito quando, devido a razões estruturais e/ou por motivos urbanísticos, torna-se necessário manter as fachadas originais de uma edificação, independente do que se faça no seu interior;
- b) Inserção (“*Insertion*”): compreende todas as intervenções necessárias para integrar a estrutura existente com a nova estrutura, ou elementos estruturais, introduzidos no interior sem alterar sua volumetria. As áreas internas adquirem assim novas características devido ao arranjo mais racional dos novos elementos estruturais que dotam a edificação de novos valores estilísticos. O exemplo mais comum é o de pisos adicionais, criados a fim de aumentar a área útil dentro da mesma edificação. Nestes casos, devido à necessidade de não se interferir na estrutura existente, o aço é o material mais apropriado e mais eficiente para ser usado, graças as suas características especiais: elevada resistência, baixo peso e versatilidade;
- c) Adição Vertical (“*Vertical Addition*”): Consiste em adicionar um ou mais andares acima da estrutura existente, tendo como resultado um aumento na volumetria total da edificação. Dependendo do tamanho e da altura desse acréscimo, é necessário verificar novamente a capacidade de carga da estrutura original, a fim de decidir pela execução ou não de um reforço estrutural. A necessidade de minimizar o peso da estrutura nova torna a utilização das estruturas de aço obrigatória. Um exemplo disto pode ser visto no Shopping da Gávea, no Rio de Janeiro (Figura 1), onde a empresa MEDABIL foi responsável pela execução de uma nova garagem na parte superior da edificação;



**Figura 1 – Adição vertical (Shopping da Gávea – RJ)**

- d) Adição Lateral (“*Lateral Addition*”): Este tipo de intervenção não é normalmente considerada como reforço, mas é muitas vezes usada para aumentar a funcionalidade

do ambiente. Em edifícios, ditos históricos, as estruturas de aço podem fazer uma combinação perfeita do antigo com o novo;

- e) Redução de Carga (“*Lightening*”): Ao contrário da Adição Vertical, pode incluir a demolição de um ou mais andares de uma edificação. Quando esta intervenção é requerida, isto ocorre devido a necessidade de limitar cargas envolvidas, a fim de reduzir a sobrecarga nas estruturas existentes. Sendo assim, a operação de *lightening* consiste em substituir assoalhos, telhados ou outros elementos estruturais por materiais mais leves. De fato, faz parte deste tipo de intervenção a substituição de pisos pesados, de madeira por perfis de aço, e lajes com fôrma metálica (deck metálico) conforme apresentado na Figura 2, bem como a total reformulação de telhados, usando treliças metálicas.



**Figura 2 – Troca de pisos por deck metálico**

## **2 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO**

Com o propósito de reproduzir o comportamento de uma viga reforçada com perfis metálicos trabalhando em conjunto com a viga original, foram elaborados modelos em elementos finitos de uma viga hipotética, dimensionada para um determinado carregamento, e em seguida reforçada de modo a resistir ao dobro do carregamento inicial. Simulando assim uma situação em que seria necessário um reaproveitamento de espaço para um fim distinto da concepção estrutural inicial.

Para o presente trabalho, adotou-se uma viga bi-apoiada de madeira, com 5m de extensão e seção retangular de 200 x 400mm, submetida a um carregamento linear de 25kN/m.

As propriedades consideradas para a viga de madeira (aroeira do sertão) foram:  $E=14895$  MPa,  $\nu = 0,3$  e  $\sigma_{adm} = 22,2$  MPa; e para o aço (ARBI - Alta Resistência e Baixa Liga) utilizado no reforço:  $E=200000$  MPa,  $\nu = 0,3$  e  $f_y = 345$  MPa.

O modelo desenvolvido no software Ansys versão 11.0 foi constituído de elementos sólidos com oito nós tendo três graus de liberdade por nó, sendo, translação nos eixos X, Y e Z (SOLID45 - Ansys Manual Reference).

Para a definição da malha apropriada, no intuito de realizar a calibragem do modelo, atribuiu-se diferentes números de divisões para cada dimensão da viga, obtendo assim os valores das tensões normais máximas e flechas, conforme descrito na tabela abaixo:

**Tabela 1 – Comparação entre as diferentes malhas**

Modelo	Número de divisões			Tensão Normal	Flecha
	X	Y	Z		
1	15	3	2	14,47	12,95
2	25	5	4	14,60	13,07
3	100	10	6	14,67	13,17
4	200	20	12	14,67	13,21

Os valores acima foram confrontados com os resultados teóricos obtidos pela metodologia clássica da Resistência dos Materiais e análise estrutural, conforme discriminado abaixo ressaltando-se que as tensões são expressas em MPa, forças em kN, momentos fletores em kN.m e comprimento em metros. Para o cálculo do momento fletor máximo, utilizou-se a eq. (1). O valor do cortante máximo foi obtido através da eq. (2). Já as máximas tensões normais e cisalhantes foram obtidas utilizando-se as eq. (3) e (4), respectivamente. E finalmente a flecha da viga foi obtida usando-se as eqs. (5) e (6).

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8} = \frac{25 \times 5^2}{8} = \mathbf{78,13 kNm} \quad M_{max} = \frac{ql^2}{8} = \frac{25 \cdot 5^2}{8} = 78,13 \text{ kN.m} \quad (1)$$

onde  $M_{max}$  é o momento fletor máximo,  $q$  é a carga distribuída ao longo da viga e  $l$  é o comprimento da viga.

$$V_{max} = \frac{q.l}{2} = \frac{25 \cdot 5}{2} = 62,5 \text{ kN} \quad V_{max} = \frac{ql}{2} = \frac{25 \times 5}{2} = \mathbf{62,50 kN} \quad (2)$$

onde  $V_{max}$  é o esforço cortante máximo.

$$\sigma_{max} = \frac{M.c}{I} = \frac{6.M}{b.h^2} = \frac{6 \cdot 78,13 \cdot 10^4}{200 \cdot 400^2} = 14,65 \text{ MPa} \quad \sigma_{max} = \frac{Mc}{I} = \frac{6M}{bh^2} = \frac{6 \times 78,13 \times 10^6}{200 \times 400^2} = \mathbf{14,65 MPa} \quad (3)$$

onde  $\sigma_{max}$  é a tensão normal máxima,  $M$  é o momento fletor máximo,  $c$  é a distância entre o eixo neutro e a borda mais comprimida ou tracionada,  $I$  é o momento de inércia em relação ao eixo da linha neutra,  $b$  é a largura e  $h$  é a altura da seção transversal.

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{It} = \frac{3V}{2b.h} = \frac{3 \cdot 62,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 200 \cdot 400} = 1,17 \text{ MPa} \quad \tau_{max} = \frac{VQ}{It} = \frac{3}{2} \frac{V}{bh} = \frac{3 \times 62,5 \times 10^3}{2 \times 200 \times 400} = \mathbf{1,17 MPa} \quad (4)$$

onde  $\tau_{max}$  é a tensão normal máxima,  $V$  é o esforço cortante máximo e  $t$  é a espessura da viga.

$$EI = E \frac{b.h^3}{12} = 14,895 \cdot \frac{200 \cdot 400^3}{12} = 15,89 \cdot 10^9 \text{ N.mm}^2 \quad EI = E \frac{bh^3}{12} = 14,895 \times 200 \times \frac{400^3}{12} = 15,888 \times 10^9 \text{ MPamm}^4 \quad (5)$$

$$\delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{L^4}{EI} \cdot q = \frac{5}{384} \cdot \frac{5000^4}{15,89 \cdot 10^9} \cdot 25 = 12,81 \text{ mm} \quad \delta = \frac{5}{384} \times \frac{L^4}{EI} \times q = \frac{5}{384} \times \frac{5.000^4}{15.888 \times 10^9} \times$$

$$25 = \mathbf{12,81 \text{ mm}} \quad (6)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade da madeira,  $L$  é o comprimento da viga e  $\delta$  a deflexão máxima da viga (flecha).

Comparando-se os resultados anteriores com os apresentados na Tabela 1, pode-se concluir que os modelos 3 e 4 foram os que apresentaram valores de tensões mais próximos dos valores teóricos, neste caso foi adotado o menos refinado, modelo 3, em função do menor tempo de processamento, dado que a diferença de precisão entre ambos é desprezível.

A partir do modelo adotado, optou-se pelo reforço de duas chapas de aço de 10mm de espessura acopladas em cada lado da viga, comparando-se mais uma vez os resultados com os teóricos calculados no intuito de ratificar o modelo criado para prosseguir na análise das vigas reforçadas. Para tal, calcula-se o parâmetro  $n$  pela eq. (7) de forma a obter os dados para a seção transformada tendo em vista os dois materiais constituintes da seção da viga. A largura a ser considerada para a viga é calculada através da eq. (8). A inércia transformada da seção pode ser calculada com o auxílio da eq. (9). E finalmente, com a utilização das eq. (10) e (11) obtêm-se as tensões normais máximas atuantes no aço e na madeira, respectivamente.

$$n = \frac{E_m}{E_a} = \frac{14898}{205000} = 0,072659 \quad n = \frac{E_M}{E_A} = \frac{14895}{205000} = 0,072659 \quad (7)$$

onde  $E_M$  e  $E_A$  são os módulos de elasticidade da madeira e do aço, respectivamente.

$$b_A = n \cdot b_m = 200 \cdot 0,072659 = 14,532 \text{ mm} \quad b_A = n b_M = 200 \times 0,072659 = 14,532 \text{ mm} \quad (8)$$

onde  $b_M$  é a base da seção de madeira e  $b_A$  a base da seção de madeira transformada em aço.

Cálculo do momento de inércia da seção transformada:

$$I = \frac{[(2 \cdot 10 + 14,532) \cdot 400^3]}{12} = 184169105,7 \text{ mm}^4$$

$$I = \frac{[(2 \times 10 + 14,532) \times 400^3]}{12} = 184.169.105,7 \text{ mm}^4 \quad (9)$$

Cálculo das tensões normais:

$$\sigma_a = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{78,13 \cdot 10^6 \cdot 200}{184169105,7} = 84,85 \text{ MPa} \quad \sigma_A = \frac{M c}{I} = \frac{78,13 \times 10^6 \times 200}{184.169.105,7} = 84,85 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$\sigma_m = n \cdot \sigma_a = 6,16 \text{ MPa} \quad \sigma_M = n \sigma_A = 6,16 \text{ MPa} \quad (11)$$

onde  $\sigma_m$  é a tensão normal máxima atuando na madeira e  $\sigma_a$  é a tensão normal atuando no aço.

Os resultados obtidos através do modelo numérico são apresentados na tabela a seguir. Comparando-se os valores encontrados, verifica-se que os resultados de tensões são compatíveis; portanto, o modelo escolhido é adequado.

**Tabela 3 – Tensões normais na madeira e no aço – teórico versus numérico**

-	Teórico	ANSYS
Tensão no aço	84,85	87,10
Tensão na madeira	6,16	6,33

A partir do modelo calibrado foram realizadas as análises da viga trabalhando em conjunto com cada uma das cinco modalidades de reforço, para diferentes espessuras de chapas ou perfis metálicos e para um carregamento equivalente ao dobro do carregamento inicial: 50 kN/m. Isso no intuito de que a carga suportada pela viga de madeira se mantenha ou seja menor que a inicial; e para que o esforço absorvido pelo aço do reforço não ultrapasse a tensão admissível e também para posterior estudo da eficiência de cada um.

### 3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A espessura adotada para cada caso em estudo deverá ser aquela que satisfaça a condição imposta de tensões e deformações com o menor consumo de aço. Ressalta-se aqui que as tensões cisalhantes não serão consideradas nas análises em função da incompatibilidade entre os resultados teóricos e os resultados obtidos nos modelos numéricos, devido à concentração de tensões próxima aos apoios. Esta concentração de tensões ocorre por causa do tipo de apoio adotado nos modelos.

#### 3.1 Reforço com duas chapas laterais

Este reforço consiste em duas chapas acopladas nas laterais da viga (mesmo tipo usado na calibragem). Foram analisadas chapas com espessuras de 5mm, 10mm, 15mm e 20mm. Na Figura 3 apresenta-se a distribuição de tensões normais na viga referentes a espessura de 10mm.

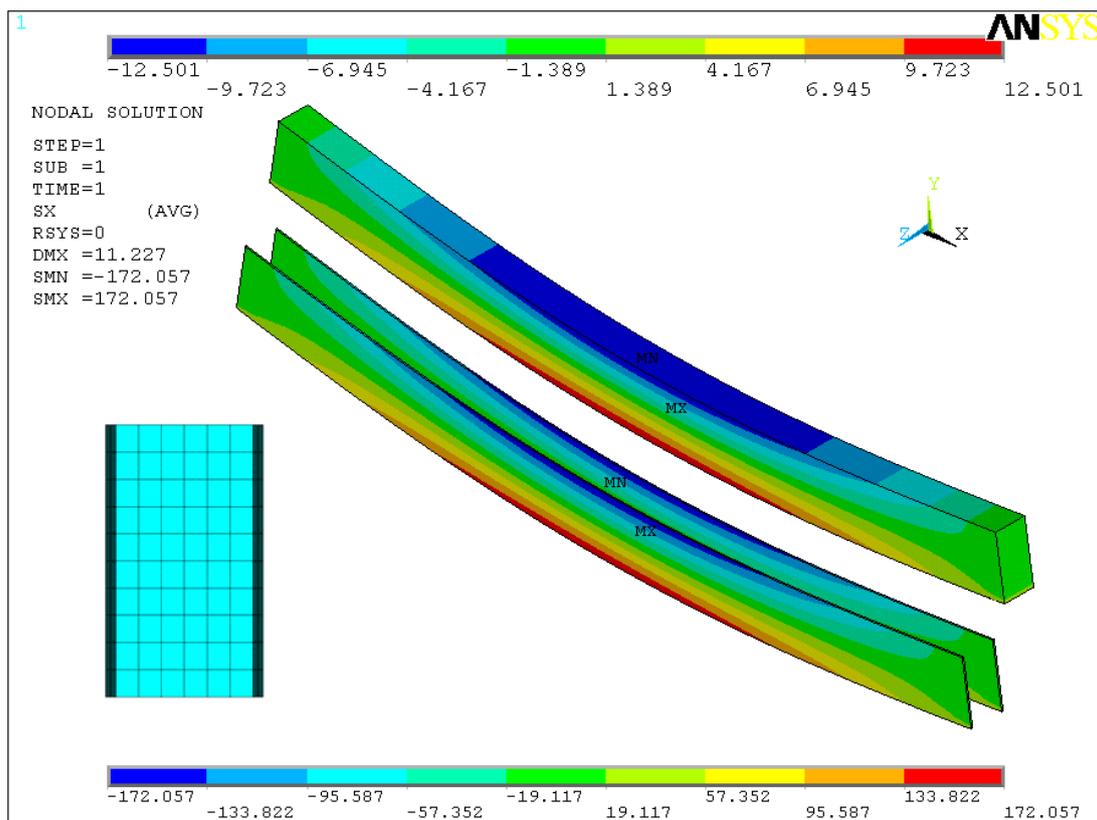


Figura 3 – Tensões normais na viga reforçada com chapas laterais

A tabela abaixo apresenta os valores das máximas tensões normais e cisalhantes atuantes na viga e no reforço de aço, tal como a deflexão máxima (flecha).

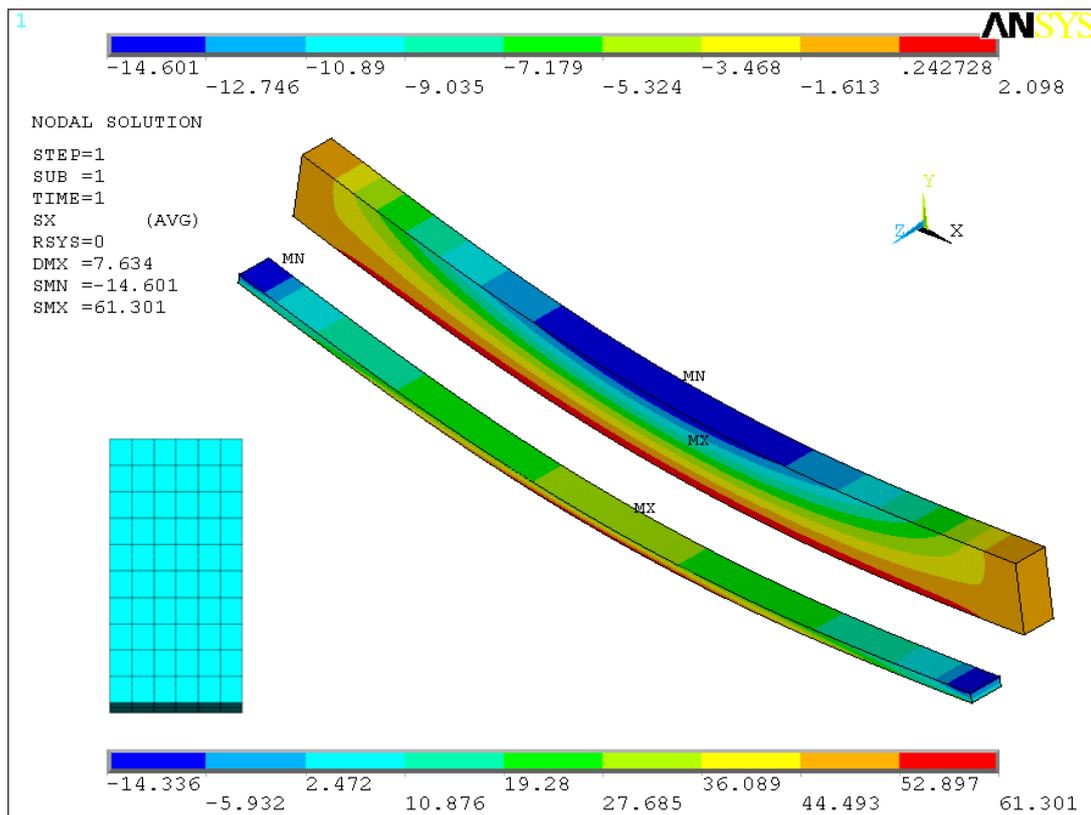
**Tabela 4 – Análise de viga reforçada com chapas laterais**

<b>Reforço com chapas laterais</b>					
	Espe <span>ssura da chapa de aço</span>	5	10	15	20
<b>Madeira</b>	Tensão de compressão máxima	-17,49	-12,50	-9,75	-8,02
	Tensão de tração máxima	17,49	12,50	9,75	8,02
	Tensão cisalhante máxima	2,53	1,81	1,41	1,16
<b>Reforço em aço</b>	Área da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	4.000	8000	12000	16.000
	Tensão de compressão máxima	-240,67	-172,06	-134,25	-110,31
	Tensão de tração máxima	240,67	172,06	134,25	110,31
	Tensão cisalhante máxima	34,75	24,86	19,41	15,95
	Consumo de aço (kg)	157,00	314,00	471,00	628,00
	Flecha (mm)	15,71	11,23	8,76	7,20

Para este caso em questão fica evidente que a espessura adotada será a de 10mm. Por questões de otimização poderia se testar uma espessura intermediária entre 5mm e 10mm até atingir a condição imposta.

### **3.2 Reforço com chapa na base**

Este tipo de reforço consiste em uma chapa acoplada na base da viga. Foram analisadas chapas com espessuras de 40mm, 45mm, 50mm e 55mm. Na Figura 4 apresenta-se a distribuição de tensões normais na viga referentes a espessura de 55mm.



**Figura 4 – Tensões normais na viga reforçada com chapa na base**  
A tabela abaixo apresenta os valores obtidos.

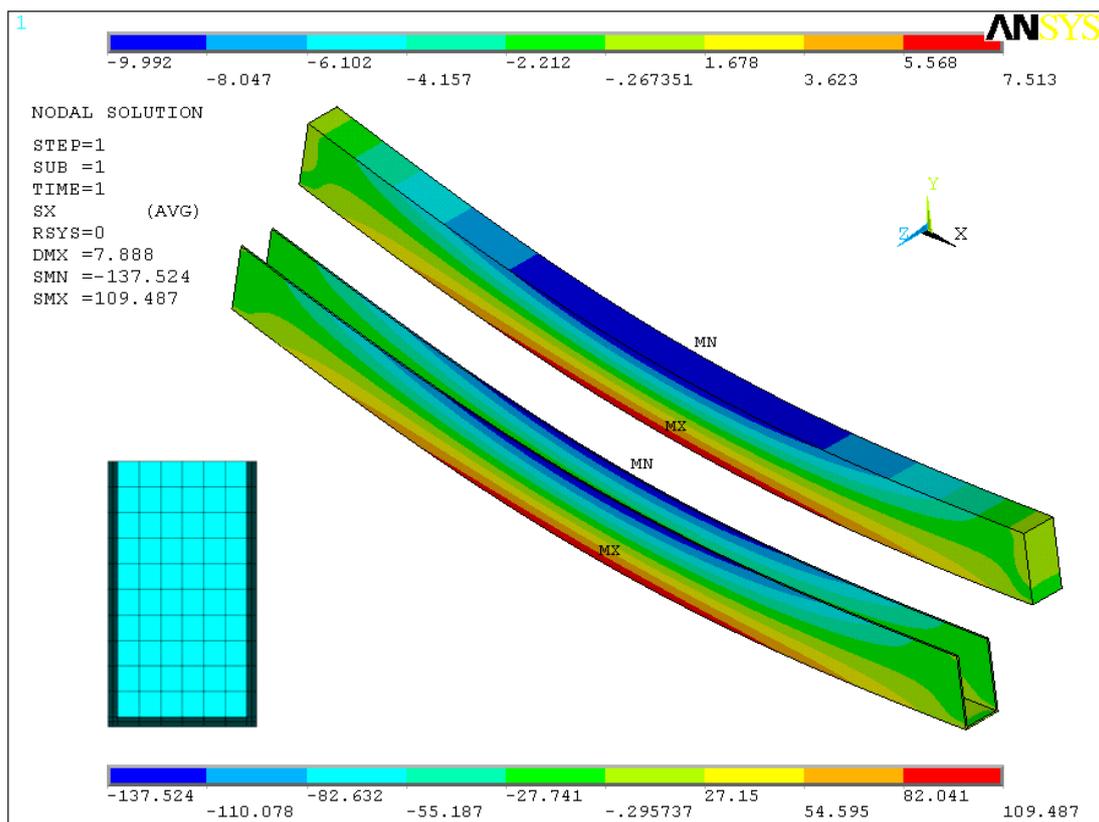
**Tabela 5 – Análise de viga reforçada com chapa na base**

		Reforço com chapa na base			
		40	45	50	55
	Espessura da chapa de aço				
Madeira	Tensão de compressão máxima	-15,65	-15,27	-14,92	-14,60
	Tensão de tração máxima	3,43	2,91	2,47	2,10
	Tensão cisalhante máxima	3,29	3,03	2,89	2,76
Reforço em aço	Área transversal (mm <sup>2</sup> )	8.000	9.000	10.000	11.000
	Tensão de compressão máxima	-16,62	-15,06	-14,72	-14,60
	Tensão de tração máxima	74,05	68,88	64,72	61,30
	Tensão cisalhante máxima	7,31	6,92	6,53	6,16
	Carga máxima (kg)	314,00	353,25	392,50	431,75
Flecha		8,70	8,30	7,94	7,63

Dentre as chapas analisadas a única que satisfaz a condição é aquela com espessura de 55mm. Pode-se perceber que esta espessura é muito grande representando uma desvantagem pois aumenta consideravelmente a altura da viga.

### 3.3 Reforço com perfil U

Este tipo de reforço consiste em um perfil U envolvendo por completo a base e as laterais da viga. Foram analisadas perfis com espessuras de 5mm, 10mm, 15mm e 20mm. Na Figura 5 apresenta-se a distribuição de tensões normais na viga referentes a espessura de 10mm.



**Figura 5 – Tensões normais na viga reforçada com perfil U**

A tabela abaixo apresenta os valores obtidos.

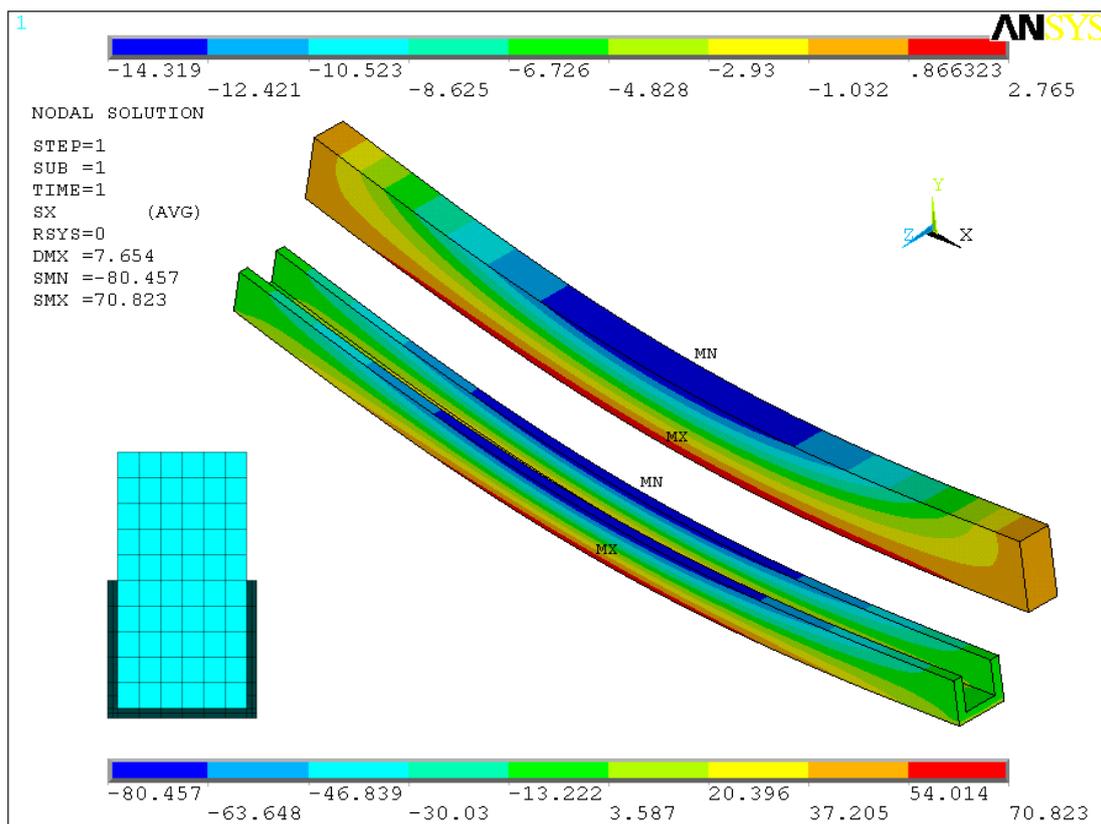
**Tabela 6 – Análise de viga reforçada com perfil U**

Reforço com perfil U					
	Espeçsura da chapa de aço	5	10	15	20
<b>Madeira</b>	Tensão de compressão máxima	-14,83	-9,99	-7,52	-6,02
	Tensão de tração máxima	12,17	7,51	5,34	4,09
	Tensão cisalhante máxima	3,76	3,18	2,64	2,22
<b>Reforço em aço</b>	Área da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	5.05	10.200	15.450	20.800
	Tensão de compressão máxima	-204,13	-137,52	-103,52	-82,79
	Tensão de tração máxima	172,23	109,49	80,25	63,33
	Tensão cisalhante máxima	42,90	33,90	26,69	21,85
	Consumo de aço (kg)	198,21	400,35	606,41	816,40
Flecha (mm)	12,15	7,89	5,81	4,57	

Percebe-se que dentre as espessuras analisadas, aquela que apresenta o menor consumo de aço é a de 10mm, entretanto, a exemplo do reforço com chapas laterais, poderia se testar espessuras intermediárias entre 5mm e 10mm até atingir a condição imposta.

### 3.4 Reforço com perfil U à parcial:

Tipo de reforço similar ao anterior, porém envolvendo apenas metade da altura da viga. Foram analisadas chapas com espessuras de 10mm, 20mm, 30mm e 55mm. Na Figura 3 apresenta-se a distribuição de tensões normais na viga.



**Figura 6 – Tensões normais na viga reforçada com perfil U parcial**

A tabela abaixo apresenta os valores obtidos.

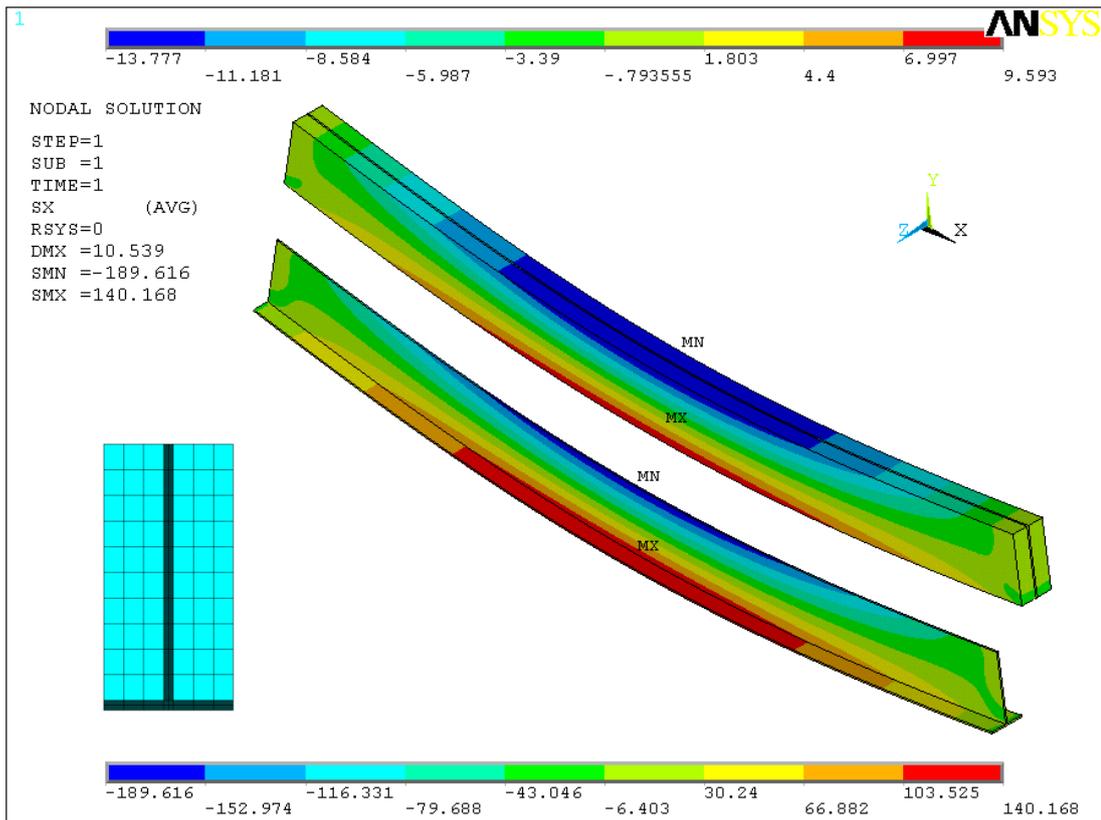
**Tabela 7 – Análise de viga reforçada com perfil U parcial**

<b>Reforço com perfil U parcial</b>					
	Espeçura da chapa de aço	10	30	45	55
<b>Madeira</b>	Tensão de compressão máxima	-20,95	-17,20	-15,37	-14,32
	Tensão de tração máxima	10,01	4,85	3,41	2,77
	Tensão cisalhante máxima	3,99	3,32	3,03	2,85
<b>Reforço em aço</b>	Área da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	6.200	19.800	31.050	39.050
	Tensão de compressão máxima	-76,19	-86,03	-83,30	-80,46
	Tensão de tração máxima	148,55	89,75	76,44	70,82
	Tensão cisalhante máxima	42,69	23,51	16,84	13,90
	Consumo de aço (kg)	243,35	777,15	1.218,71	1.532,71
Flecha (mm)	13,87	11,28	8,41	7,65	

Este reforço apresenta a mesma desvantagem do perfil com chapa na base: aumento considerável da altura da viga e também da largura.

### 3.5 Reforço com perfil T invertido

Este tipo de reforço requer um corte no meio da viga no sentido longitudinal, onde se encaixa a alma de um perfil T, cuja mesa se acopla na base da viga reforçada. Foram analisados perfis de alma e mesa com espessuras de 40mm, 45mm, 50mm e 55mm.



**Figura 7 – Tensões normais na viga reforçada com perfil T**

A tabela abaixo apresenta os valores obtidos.

**Tabela 8 – Análise de viga reforçada com perfil T**

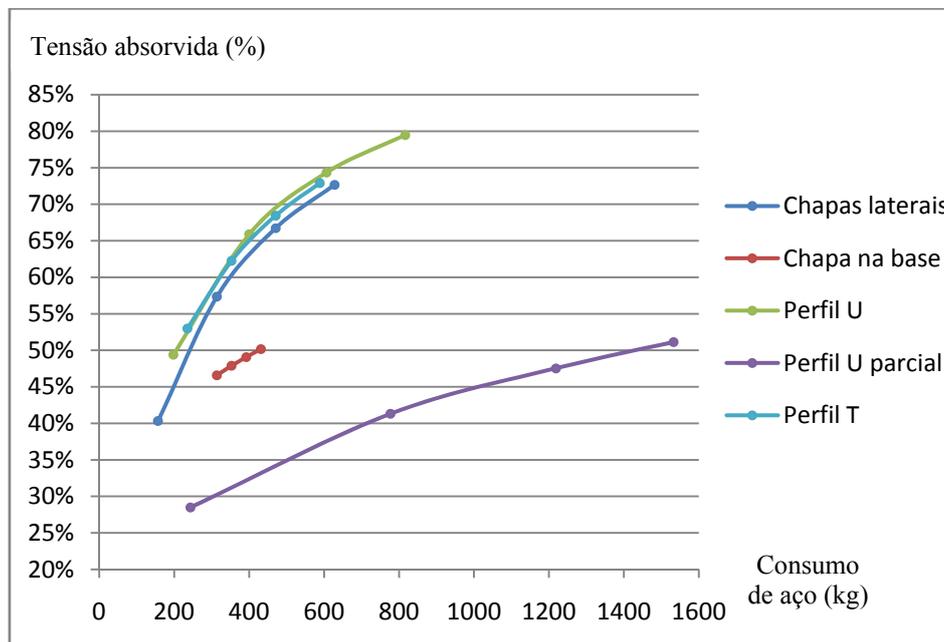
Reforço com perfil T					
	Es espessura da chapa de aço	10	15	20	25
<b>Madeira</b>	Tensão de compressão máxima	-13,78	-11,06	-9,25	-7,95
	Tensão de tração máxima	9,59	7,10	5,61	4,61
	Tensão cisalhante máxima	4,66	4,10	3,55	-3,06
<b>Reforço em aço</b>	Área da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	6.000	9.000	12.000	15.000
	Tensão de compressão máxima	-189,62	-152,21	-127,28	-109,34
	Tensão de tração máxima	140,17	107,25	87,49	74,31
	Tensão cisalhante máxima	49,53	40,63	33,94	-28,80
	Consumo de aço (kg)	235,50	353,25	471,00	588,75
Flecha (mm)		10,54	8,20	6,72	5,68

Fica evidente que a espessura de 10 mm é a adequada uma vez que satisfaz a condição das tensões e deformações. A partir de todos os resultados obtidos, calculou-se o percentual de tensão absorvida para cada tipo de reforço e espessura analisada, conforme a expressão a seguir:

$$\sigma_{absorv}(\%) = \left( 1 - \frac{\sigma_{max,mad}}{\sigma_{max,viga}} \right) \times 100 \quad (12)$$

$\sigma_M = n\sigma_A = 6,16MPa$  onde  $\sigma_{absorv}(\%)$  é o percentual da tensão normal absorvida pelo reforço,  $\sigma_{max,mad}$  é a tensão normal máxima que atua na madeira da viga reforçada e  $\sigma_{max,viga}$  é a

tensão normal máxima que atua na viga não reforçada, submetida ao mesmo carregamento. Os valores obtidos foram plotados no gráfico abaixo, onde as curvas indicam a eficiência de cada modalidade de reforço.



**Figura 8 – percentual de tensão absorvida versus consumo de aço**

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os tipos estudados, os reforços com perfil U, com perfil T invertido e com chapas nas laterais foram os que apresentaram melhores eficiências; uma vez que cobrem toda a altura da viga absorvendo com eficiência as tensões nas bordas superior e inferior, apresentando também inércia à flexão maior que os reforços com perfil U parcial e com chapa na base, e conseqüentemente maior rigidez. O gráfico mostra que o reforço com perfil U é o mais eficiente, apresentando uma sutil diferença em relação ao reforço com perfil T. Cabe salientar que este último apresenta grande desvantagem em termos de execução dado a necessidade de se realizar um corte longitudinal na viga. Os reforços com chapa na base e com perfil U parcial apresentaram as piores eficiências dentre os cinco tipos analisados, não sendo, portanto, adequados para este fim. Este resultado dá-se porque tais reforços cobrem parcialmente a altura da viga, absorvendo então apenas as tensões da parte inferior. No reforço com perfil U parcial, o aço que envolve as laterais da viga acaba por ser mal aproveitado, já que o mesmo encontra-se numa região próxima à linha neutra, onde as tensões são nulas, configurando assim uma grande desvantagem em relação ao reforço com chapa na base. Considerando-se as facilidades de execução, optar-se-á pela solução com chapas laterais.

#### *Agradecimentos*

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, a CAPES, ao CNPq e a FAPERJ, pelo apoio financeiro. Agradecimentos também são devidos ao LABCIV - Laboratório de Computação da Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ pelo suporte computacional.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, Inc. Theory Reference (version 11.0), 2007.

HIBBELER, Russel Charles. Resistência dos Materiais. 5ª edição

PFEIL, Walter. Estruturas de madeira: dimensionamento segundo as normas brasileiras - 3ª edição

TEIXEIRA CAMPOS, Luiz Eduardo. Técnicas de Recuperação e Reforço Estrutural com Estruturas de Aço. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UERJ.

CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço. <http://www.cbca-ibs.org.br/index.asp>  
Coletânea do Uso do Aço 1. Interface entre Perfis Estruturais Laminados e Sistemas Complementares. 3ª Edição. 2004. 63fls. GERDAU – Açominas

Revista Técnica. Reparo, reforço e recuperação de concreto. Edição 146, maio/2009.  
<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/146/imprime139046.asp>

Curso ESDE. The European Steel Design Education Programme (WG 16).  
<http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/wg16/toc.htm>