



## **Projeto Final de Graduação em Engenharia Civil**

### **Utilização de Estruturas de Aço na Recuperação de Estruturas de Madeira**

**Autor: Douglas Rodriguez Brasil**

Orientador: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Co-orientador: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Julho de 2008

# **Utilização de Estruturas de Aço na Recuperação de Estruturas de Madeira**

**Douglas Rodriguez Brasil**

Projeto Final apresentado a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil. Ênfase: Estruturas.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Luciano R. O. de Lima, DSc – Presidente (Orientador)**  
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

---

**Prof. Pedro C. G. da S. Vellasco, PhD (Co-Orientador)**  
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

---

**Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc**  
Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Julho de 2008.

BRASIL, DOUGLAS RODRIGUEZ

Técnicas de Recuperação e Reforço Estrutural com Estruturas de Aço [Rio de Janeiro] 2006.

xxii , 85 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Graduação, Faculdade de Engenharia Civil - Área de Concentração: Estruturas, 2008.)

v, 85 f. : il. ; 30 cm

Projeto Final - Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ

1. Introdução
2. Modelos de Reforços Estruturais [1]
3. Modelo Numérico
4. Análise de Resultados
5. Considerações Finais

I. FEN/UERJ II. Título (série)

A Deus, por ter iluminado meu caminho ao longo de todos estes anos, aos meus pais Carmen Brasil e Marco Brasil, pelo amor, carinho e incentivo ao meu trabalho.

## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores, Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima e Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco por toda a ajuda e amizade fortalecida durante a realização deste trabalho.

A todos os queridos amigos que Deus colocou em minha vida e que foram imprescindíveis na conquista desse objetivo. Agradeço especialmente ao André TENCHINI e Jonathan Gonzalez por terem sido para mim além de grandes irmãos, exemplos de força e determinação.

Aos professores do corpo docente da UERJ pelo conhecimento transmitido durante os cursos ministrados.

A Érica Ferreira, pelo amor, pelo carinho e pela compreensão nos momentos difíceis e de fraqueza.

Aos colegas de curso de Engenharia Civil da UERJ, Juliane, Wendel, Walter, Tatiana e Claudio pela ajuda nos momentos de dificuldade durante o curso.

## Resumo

Brasil, Douglas Rodriguez; Lima, Luciano Rodrigues Ornelas (Orientador). **Utilização de Estruturas de Aço na Recuperação de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 2008. 85p. Projeto Final da Faculdade de Engenharia Civil; Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

É provável, que num futuro breve, as atividades da indústria da construção sejam dedicadas em grande parte ao reforço, restauro, reutilização e recuperação de diversos edifícios que, construídos em épocas por vezes não muito distantes, encontram-se hoje em precárias condições de conservação e de segurança. Restauração envolve a realização de uma série de operações necessárias na estrutura de uma edificação a fim de restabelecer sua eficiência estrutural original, antes de ocorrer o colapso. Por outro lado, reforço estrutural representa melhorar o desempenho estrutural a fim de permitir que a edificação atenda às novas exigências funcionais, como por exemplo, novo tipo de carregamento. A necessidade de se realizar trabalhos de reparação e reforço estrutural em edifícios urbanos está diretamente relacionada com a oportunidade e a necessidade de se recuperar espaços e volumes não mais utilizados, impedindo a sua completa degradação, possibilitando assim, uma nova utilização. Este trabalho tem como finalidade principal apresentar as diversas possibilidades e vantagens do uso das estruturas de aço em reforço de estruturas de madeira existentes, fazendo-se uma análise de maior eficiência através do programa de modelagem computacional baseado no método dos elementos finitos, Ansys. Foi realizado um estudo com cinco tipos diferentes de reforços estruturais em uma viga de madeira sendo estes: uma chapa inferior, duas chapas laterais, um perfil T, um perfil U e um perfil U até a metade da altura da viga. As vantagens estruturais e arquitetônicas do aço possibilitam a verificação de várias exigências construtivas, das quais se pode 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.

## Palavras-chave

Recuperação Estrutural, Reforço Estrutural, Estruturas de Aço, Edificações Históricas, Manutenção de Edificações.

# Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>14</b>
1.1. Considerações Iniciais .....	14
1.2. Objetivos .....	16
1.3. Escopo.....	17
<b>2. Modelos de Reforços Estruturais [1] .....</b>	<b>18</b>
2.1. Introdução .....	18
2.2. Tipos de Intervenções .....	19
2.3. Serviços Provisórios.....	24
2.3.1. Estabilização de Elementos Verticais .....	24
<b>2.4. Sistemas de Reparo e Reforço .....</b>	<b>27</b>
2.4.1. Reforço de Estruturas de Alvenaria .....	28
2.4.2. Estruturas de Madeira .....	30
2.4.3. Estruturas de Concreto Armado.....	32
2.4.4. Ferro fundido e estruturas de aço .....	35
<b>2.5. Conexão da estrutura nova com a fachada.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6. Exemplos Práticos .....</b>	<b>39</b>
<b>3. Modelo Numérico.....</b>	<b>49</b>
3.1. Modelo Experimental [6].....	49
3.2. Modelo Numérico Desenvolvido.....	50
<b>4. Análise de Resultados .....</b>	<b>52</b>
4.1. Modelo Padrão.....	52
4.2. Reforço com Perfil T .....	54
4.3. Reforço com Perfil U metade .....	57
4.4. Reforço com Perfil U .....	60
4.5. Reforço com chapa inferior.....	62
4.6. Reforço com Duas Chapas Laterais.....	64

<b>5. Considerações Finais.....</b>	<b>68</b>
<b>5.1. Conclusões .....</b>	<b>68</b>
<b>5.2. Reforço estrutural mais adequado.....</b>	<b>69</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>70</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Fachada que restou de prédio da Rua do Teatro nº 15 [2] .....	15
Figura 1.2 – Palacete Bragança ocupado por diversas famílias [2].....	15
Figura 1.3 – Localização da viga não estrutural de tapamento em concreto armado e seus escombros após o colapso .....	16
Figura 2.1 – Exemplo de “Gutting” (Lisboa - Portugal) .....	19
Figura 2.2 – Criação de piso adicional (TRT, Rio de Janeiro) .....	20
Figura 2.3 – Adição vertical (Shopping da Gávea – RJ)[1].....	21
Figura 2.4 – Acréscimo lateral em edificação tombada (TRT, Rio de Janeiro) [1] .....	21
Figura 2.5 – Troca de pisos por <i>deck</i> metálico .....	22
Figura 2.6 – Reforço de lajes de concreto armado .....	23
Figura 2.7 – Sistema de fixação de fachadas .....	25
Figura 2.8 – Escoramento de fachadas para criação de subsolo.....	25
Figura 2.9 – Sistema de fixação externo de fachadas .....	26
Figura 2.10 – Sistema de fixação interno de fachadas .....	27
Figura 2.11 – Amarração de fachadas [1].....	28
Figura 2.12 – Inserção de pilares para contenção de paredes de alvenaria [1].....	29
Figura 2.13 – Contraventamento em “X” de parede de alvenaria existente .....	30
Figura 2.14 – Reforço de estrutura em alvenaria em forma de arco .....	30
Figura 2.15 – Reforço de pisos de madeira com perfis de aço .....	31
Figura 2.16 – Reforço de pisos de madeira (Gávea Golf Club – RJ) [1] .....	32
Figura 2.17 – Reforço de Estruturas de Concreto .....	33
Figura 2.18 – Reforço de lajes de concreto .....	33
Figura 2.19 – Reforço de lajes cogumelo .....	34
Figura 2.20 – Contraventamento em “X” .....	34
Figura 2.21 – Tipos de contraventamento .....	35
Figura 2.22 – Tipos de reforço em estruturas metálicas.....	36
Figura 2.23 – Fixação da estrutura nova à fachada existente .....	37
Figura 2.24 – Instalação de colunas antes da demolição com contraventamento provisório .....	38
Figura 2.25 – Demolição interna após a instalação parcial da nova estrutura .....	38
Figura 2.26 – Retomada do processo construtivo .....	39
Figura 2.27 – Biblioteca Nacional antes e depois da última restauração .....	40
Figura 2.28 – Detalhes da corrosão na estrutura.....	41
Figura 2.29 – Coliseu de Roma [1].....	41
Figura 2.30 – Estrutura do elevador do Coliseu de Roma [1].....	42
Figura 2.31 – Passarela (Roma) [1] .....	42
Figura 2.32 – Conversão de fábrica em um Ginásio em Canto, Itália .....	43
Figura 2.33 – Depósito de locomotivas transformado em centro de convenções .....	43

Figura 2.34 – Forro do Telhado (Igreja de N <sup>a</sup> Sr <sup>a</sup> do Carmo) [8] .....	44
Figura 2.35 – Forro do Telhado (Igreja de N <sup>a</sup> Sr <sup>a</sup> do Carmo) [8] .....	44
Figura 2.36 – Estrutura de Aço do Telhado (Igreja de N <sup>a</sup> Sr <sup>a</sup> do Carmo) [8].....	44
Figura 2.37 – Vista Geral da Ponte 25 de Abril [4].....	45
Figura 2.38 – Detalhes da ampliação da ponte 25 de Abril, Lisboa .....	45
Figura 2.39 – Reforço de piso de madeira [1].....	46
Figura 2.40 – Vista geral da Viga W410 Instalada [1].....	47
Figura 2.41 – Viga W410 instalada e sendo soldada [1] .....	47
Figura 2.42 – Detalhe da emenda da viga [1].....	47
Figura 2.43 – Vista geral da edificação [1].....	48
Figura 2.44 – Detalhe da montagem da estrutura [1] .....	48
Figura 3.1 – Casa Bernardo Guimarães .....	49
Figura 3.2 – Corte da edificação .....	49
Figura 3.3 – Geometria do Elemento SOLID64 .....	50
Figura 3.4 – Malha dos modelos e seção transversal .....	51
Figura 4.1 –Malha padrão com carregamento distribuído e seção transversal.....	52
Figura 4.2 –Deformada e Tensão Normal (MPa).....	53
Figura 4.3 –Tensão Cisalhante (MPa) .....	53
Figura 4.4 –Deformada da estrutura com reforço T.....	55
Figura 4.5 –Tensão normal (MPa) na madeira .....	55
Figura 4.6 –Tensão normal (MPa) no aço .....	56
Figura 4.7 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira.....	56
Figura 4.8 –Tensão cisalhante (MPa) no aço .....	57
Figura 4.9 –Deformada da estrutura com seção U metade.....	57
Figura 4.10 –Tensão normal (MPa) na madeira .....	58
Figura 4.11 –Tensão normal (MPa) no aço .....	58
Figura 4.12 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira .....	59
Figura 4.13 –Tensão cisalhante (MPa) no aço .....	59
Figura 4.14 –Deformada da estrutura e seção do perfil U.....	60
Figura 4.15 –Tensão normal (MPa) na madeira .....	60
Figura 4.16 –Tensão normal (MPa) no aço .....	61
Figura 4.17 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira.....	61
Figura 4.18 –Tensão cisalhante (MPa) no aço .....	62
Figura 4.19 –Deformada da estrutura e seção da chapa inferior .....	62
Figura 4.20 –Tensão normal (MPa) na madeira .....	63
Figura 4.21 –Tensão normal (MPa) no aço .....	63
Figura 4.22 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira.....	64
Figura 4.23 –Tensão cisalhante (MPa) no aço .....	64
Figura 4.24 –Deformada da estrutura e seção da chapa lateral.....	65
Figura 4.25 –Tensão normal (MPa) na madeira .....	65

Figura 4.26 –Tensão normal no aço .....	66
Figura 4.27 –Tensão cisalhante na madeira.....	66
Figura 4.28 –Tensão cisalhante no aço .....	67

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Estudo do número de divisões das malhas .....	50
Tabela 4.1 – Análise dos modelos para escolha da melhor malha .....	54
Tabela 5.1 – Resultados obtidos pelo Ansys para escolha do melhor reforço.....	69

## **Lista de Abreviaturas**

ESDEP	The European Steel Design Education Programme
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
FAOP	Fundação de Arte de Ouro Preto

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações Iniciais

Dentre as diversas atividades da indústria da construção civil, as que estão relacionadas com a recuperação de edifícios surgem como uma das mais interessantes do ponto de vista cultural e de preservação do patrimônio. É provável, que num futuro não muito longínquo, as atividades da indústria da construção sejam dedicadas em larga escala ao reforço, restauro, reutilização e recuperação de diversos edifícios que, construídos em épocas por vezes não muito distantes, encontram-se hoje em precárias condições de conservação e segurança.

A restauração envolve a realização de uma série de operações necessárias na estrutura de uma edificação a fim de restabelecer sua eficiência estrutural original, antes de ocorrer o dano. Por outro lado, reforço estrutural representa melhorar o desempenho estrutural a fim de permitir que a edificação atenda às novas exigências funcionais, como por exemplo, um novo tipo de carregamento ou a condições ambientais provocadas pela modificação da área de abalos sísmicos.

Em 1983, através de uma iniciativa pioneira de revitalização e preservação do Centro do Rio de Janeiro, foi criado o Corredor Cultural. Este corredor abrange as áreas entre o Campo de Santana, Praça Tiradentes, Lapa, Largo de São Francisco e Praça XV, passando pelas ruas da Carioca, do Passeio, do Lavradio, Primeiro de Março e São José. Dentro dessa área de preservação existem inúmeras edificações em precário estado de conservação. Dentre estas edificações a que aparenta estar em pior estado encontra-se na rua do Teatro nº15 (Figura 1.1), onde só restou a fachada frontal de pé, enquanto seu interior se transformou num estacionamento. O Palacete Bragança localizado no bairro da Lapa é outro exemplo de total abandono conforme pode ser visualizado na Figura 1.2. Nesta edificação, hoje em dia, moram diversas famílias de baixa renda sem a menor infraestrutura. O prédio da faculdade de Direito da UFRJ, na Praça da República, também representa um exemplo do descaso das autoridades. Todavia, não é só no Corredor Cultural que as edificações se encontram em péssimas condições de conservação. Saindo desta região, a situação é ainda pior. Existem prédios na Avenida Gomes Freire, na Rua do Senado e na Rua dos Inválidos, regiões limites do corredor, que estão completamente deteriorados.

Um exemplo não muito distante do que pode ser causado pela falta de manutenção de estruturas existentes diz respeito ao acidente ocorrido na UERJ em janeiro de 2006. Neste acidente, uma viga não estrutural de tapamento em concreto armado entrou em colapso caindo do 12º andar causando enormes transtornos, inclusive a interdição do campus por duas semanas. A Figura 1.3 apresenta a posição deste elemento estrutural juntamente com os escombros após sua ruína.



Figura 1.1 – Fachada que restou de prédio da Rua do Teatro nº 15 [2]



Figura 1.2 – Palacete Bragança ocupado por diversas famílias [2]



**Figura 1.3 – Localização da viga não estrutural de tapamento em concreto armado e seus escombros após o colapso**

A necessidade de se realizar trabalhos de reparação e reforço estrutural em edifícios urbanos está diretamente relacionada com a oportunidade e a necessidade de se recuperar espaços e volumes não utilizados, impedindo a sua completa degradação, possibilitando assim, uma nova utilização.

Estas intervenções devem usar todas as possibilidades proporcionadas pelos modernos sistemas de reparação e de reforço estrutural, visando encontrar as 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.

Geralmente, as intervenções de reforço estrutural devem possuir um caracter distinto e autônomo, sendo capazes de se evidenciar diante das estruturas existentes. Do ponto de vista operacional, estas intervenções de reforço devem ser baseadas em sistemas estruturais estaticamente autônomos, de fácil inspeção, com características de pré-fabricação e facilmente reversíveis. Em particular, são desaconselháveis soluções que dificultem a inspeção e manutenção da estrutura, principalmente as soluções técnicas que prevejam a interpenetração de materiais novos com antigos, adulterando os materiais antigos e impedindo a reversibilidade das soluções.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho tem como finalidade principal apresentar as diversas possibilidades e vantagens do uso das estruturas de aço em reformas, restaurações e reforço de estruturas de madeira com a apresentação de valores experimentais obtidos através de modelos gerados pelo programa computacional de elementos finitos, Ansys.

Nas várias formas em que é comercializado - perfis laminados, perfis soldados seções tubulares, e na vasta gama de características geométricas e mecânicas existentes - o aço surge como um dos materiais dotados de excelente flexibilidade construtiva, capaz de resolver de um modo satisfatório os problemas do reforço estrutural.

As possibilidades oferecidas por este material são tantas, que permitem a execução de uma ampla gama de operações que vão desde o simples reforço de um elemento até a sua completa reestruturação.

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.

### **1.3. Escopo**

Este projeto desenvolveu um trabalho de pesquisa sobre o uso de estruturas de aço na reforma de uma edificação, tombadas pelo IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional), que apresentava perda da capacidade de carga de suas vigas de madeira.

Este primeiro capítulo apresenta uma pequena introdução de forma a situar o leitor dentro do problema de recuperação e reabilitação de estruturas antigas através da utilização de estruturas de aço.

O segundo capítulo apresenta uma seqüência de modelos de reforços estruturais abordando as principais etapas a serem realizadas durante uma recuperação de uma edificação antiga além de citar diversos exemplos de cada uma destas etapas.

Já o capítulo três apresenta considerações relativas a criação e aperfeiçoamento de um modelo estrutural desenvolvido por meio do programa Ansys.

No capítulo quatro são apresentados cinco tipos de reforços estruturais em uma viga de madeira em termos de deformações, tensões normais e tensões cisalhantes, sendo o primeiro, através de um perfil T. O segundo, utilizou-se um perfil U até a metade da altura da viga. O terceiro, optou-se pela utilização de um perfil U. No quarto, admite-se uma chapa colocada na parte inferior da viga. Finalmente, o quinto, que consiste na colocação de duas chapas laterais na viga.

O capítulo cinco apresenta as principais conclusões do presente trabalho, apresentando o melhor modelo de reforço estrutural em viga de madeira fornecido pelo programa Ansys, e por fim, o anexo A que apresenta os APDLs, dos modelos desenvolvidos.

## **2. Modelos de Reforços Estruturais [1]**

### **2.1. Introdução**

Tendo em vista que na literatura técnica na área de engenharia civil existem poucas publicações a respeito da reabilitação de estruturas utilizando-se estruturas de aço, este capítulo apresenta diversas citações do material disponibilizado pelo ESDEP - The European Steel Design Education Programme [9].

Observa-se, hoje em dia, que o aço está sendo cada vez mais utilizado na reabilitação, modernização e recuperação de edificações antigas. Os antigos edifícios de alvenaria, danificados, muitas vezes, pelo tempo de uso, e pelas intempéries, requerem sua reabilitação funcional que passa pela sua recuperação estrutural. Isto também acontece nas edificações mais novas devido ao mau estado de conservação e manutenção. Dentre as principais vantagens da utilização de estruturas de aço na reabilitação de estruturas pode-se citar a resistência, a leveza e a facilidade de montagem que estas proporcionam. Estas vantagens são levadas em consideração, principalmente, devido a importância arquitetônica e histórica da edificação em questão.

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.

Restaurar envolve a realização de uma série de operações necessárias na estrutura de uma edificação a fim de restabelecer sua eficiência estrutural original, antes de ocorrer o dano.

Reforçar representa melhorar o desempenho estrutural a fim de permitir que a edificação atenda às novas exigências funcionais, como por exemplo, novo tipo de carregamento ou a condições ambientais provocadas, por exemplo, pela modificação da área de abalos sísmicos.

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 as 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 aumento do carregamento original.

Independentemente de aspectos estruturais, operações de restauração são normalmente solicitadas, e dão origem a diferentes tipos de intervenções:

## 2.2. Tipos de Intervenções

**“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 (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Exemplo de “Gutting” (Lisboa - Portugal)

**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 conforme apresentado na Figura 2.2. 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.



**Figura 2.2 – Criação de piso adicional (TRT, Rio de Janeiro)**

**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 2.3), onde a empresa **MEDABIL** foi responsável pela execução de uma nova garagem na parte superior da edificação.



Figura 2.3 – Adição vertical (Shopping da Gávea – RJ)[1]

**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 (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Acréscimo lateral em edificação tombada (TRT, Rio de Janeiro) [1]

**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, fazem 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 2.5, bem como a total reformulação de telhados, usando treliças metálicas.

Após a análise de vários tipos de intervenção estrutural, nota-se que a escolha do aço está baseada, principalmente, em seu elevado desempenho mecânico, e, principalmente, na flexibilidade do sistema construtivo.

Quando a edificação a sofrer intervenção for de interesse histórico, sua restauração representa uma operação mais delicada, e o uso de estruturas de aço tem suas vantagens. As operações de restauração são fundamentadas na conservação de edificações pré-existentes além de atender às novas solicitações, assegurando seu funcionamento adequado. Essas operações devem ter características modernas, ser claramente distinguíveis, e reversíveis, através do uso de tecnologias e materiais que podem ser a qualquer tempo removidos sem danificar a estrutura existente.



**Figura 2.5 – Troca de pisos por *deck* metálico**

Uma aplicação lógica destes princípios mostra sem dúvida nenhuma, que o aço, com suas características e sua tecnologia, tem as vantagens necessárias para ser um material moderno, com características de reversibilidade, proporcionando uma perfeita harmonia entre os materiais do passado além de dar forma a sistemas estruturais integrados.

O uso de vigas de aço com enrijecedores é muito eficaz para reforçar estruturas de concreto armado abaladas por terremotos (Figura 2.6). Eles permitem o uso de paredes compartilhadas com gradeados de aço, que tem dupla finalidade: aumentar a resistência da estrutura a esforços horizontais e ao mesmo tempo, equilibrar a distribuição da rigidez interna com relação ao centro de massa além de minimizar os efeitos torsionais de vibração.



**Figura 2.6 – Reforço de lajes de concreto armado**

Observando-se as estruturas dos telhados de edifícios construídos em concreto armado nota-se que a maioria destas estruturas são constituídas por treliças de madeira, que se deterioram devido ao contato direto com agentes atmosféricos. Uma solução para esse problema pode ser alcançada, substituindo-se a estrutura antiga por treliças de aço. Esse método é também muito usado em telhados de igrejas. Para casos onde a igreja está localizada em área de incidência de terremotos, é também aconselhável o uso de uma malha de aço abaixo da treliça a fim de obter um diafragma horizontal, que forneça uma ligação rígida no topo das paredes. Quando a edificação é considerada como irrecuperável devido aos danos causados, uma estrutura nova para o telhado pode ser feita, completamente independente da estrutura existente. Em seções posteriores deste capítulo serão apresentados alguns exemplos de reabilitação de telhados.

Diversas atividades de restauração, de reabilitação e de extensão usando estruturas metálicas, podem ser encontradas pelo mundo inteiro, principalmente na Europa, em construções industriais antigas, que foram transformadas em apartamentos ou em escritórios. Edifícios tombados foram inteiramente restaurados, mantendo-se as fachadas originais e substituindo completamente os seus interiores por uma estrutura de aço. Estruturas autoportantes também foram utilizadas em monumentos históricos fornecendo uma completa integração aos valores estilísticos modernos. Este recurso está se tornando cada vez mais comum em restaurações de museus. Muitas igrejas antigas foram cobertas pelos sistemas de estruturas de aço, compostos por treliças e telhas trapezoidais.

É inquestionável que o aumento do uso do aço como material apropriado para a recuperação e reforço estrutural é um fato recente nas atividades de restauração. Este tipo

de atividade ainda não é pautado em nenhuma regra específica, mas cada caso exige sua própria solução de acordo com cada projeto apresentado.

A seguir serão apresentados alguns dos serviços utilizados no processo de reabilitação de estruturas existentes.

### **2.3. Serviços Provisórios**

Os serviços provisórios são normalmente de responsabilidade do contratante da obra ao invés do projetista estrutural. O problema principal é assegurar que nenhum serviço provisório que sustentará a estrutura existente obstrua os serviços futuros. As soluções apropriadas devem oferecer a facilidade de elevação e fornecer flexibilidade à construção. Para esta finalidade, o aço, com seu sistema industrializado, permite o uso de soluções que padronizem o projeto e se adequem as especificações necessárias.

#### **2.3.1. Estabilização de Elementos Verticais**

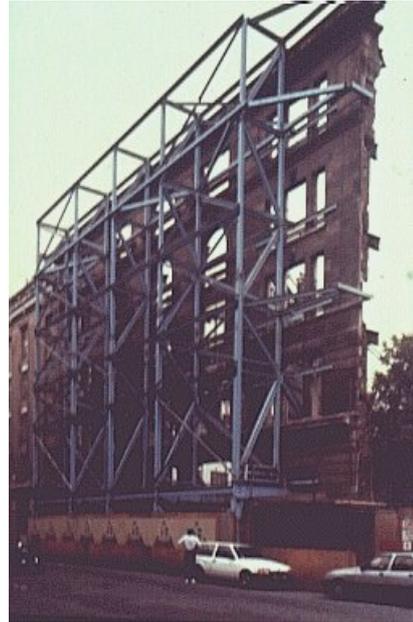
Freqüentemente torna-se necessário executar uma sustentação lateral provisória estabilizando-se as paredes que devem ser mantidas durante a fase de demolição em um serviço de restauração. Existem diversos sistemas diferentes usados para isto – escoras, andaimes na forma de escoras e como grades, e os quadros de aço retangulares dispostos horizontalmente e verticalmente.

O sistema de sustentação para manter a fachada pode ser instalado internamente (Figura 2.7a) ou externamente (Figura 2.7b). Se for instalado internamente, deverá ser executado através de cavidades feitas na estrutura existente, e apoiadas em fundações provisórias antes de se fazer toda a demolição necessária. Obviamente, a necessidade de se evitar a obstrução da instalação da nova estrutura e das fundações são de primordial importância (Figura 2.8).

Se os serviços provisórios forem posicionados externamente, estes podem ser instalados antes de ocorrer qualquer demolição. Entretanto em centros de grandes cidades é importante fornecer o acesso e a proteção ao público através de pórticos de aço em toda a extensão da fachada (Figura 2.9). Estruturas horizontais colocadas por toda a extensão da fachada livre desviam as cargas do vento traseiro para os pórticos verticais. Claramente nestes casos o escoramento externo não cria nenhuma obstrução à inserção da nova estrutura.



a) Fixação interna

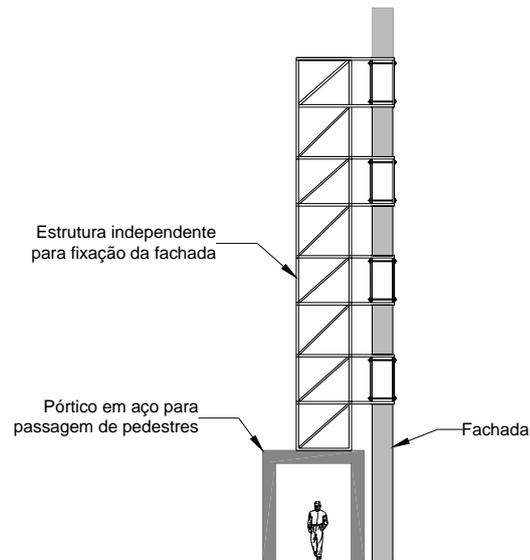


b) Fixação externa

Figura 2.7 – Sistema de fixação de fachadas



Figura 2.8 – Escoramento de fachadas para criação de subsolo

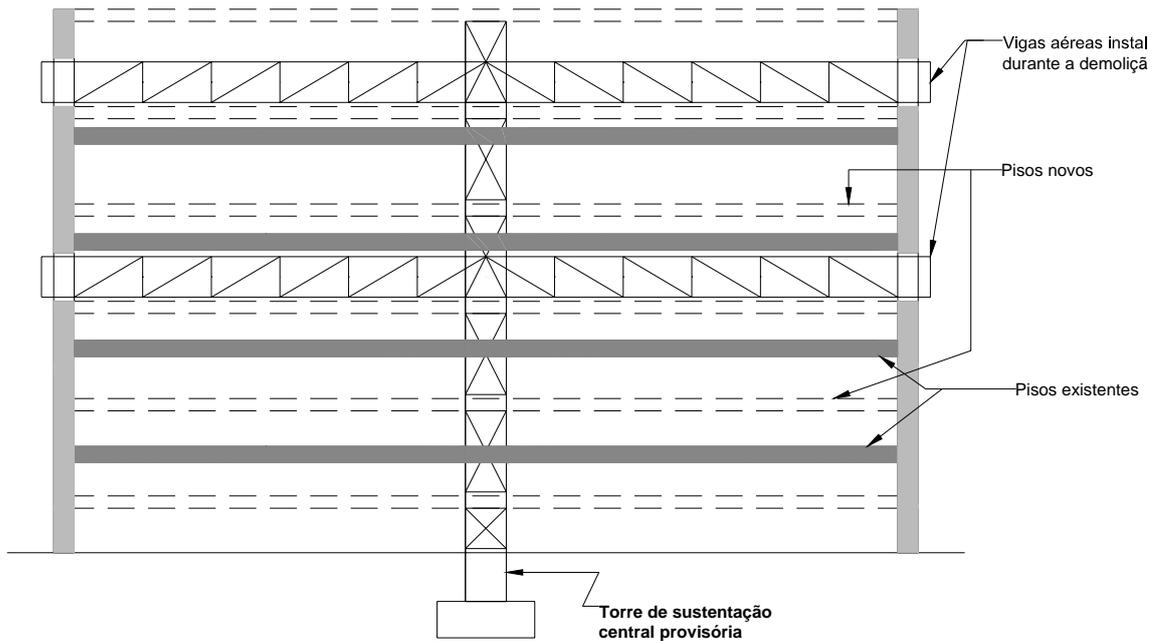


**Figura 2.9 – Sistema de fixação externo de fachadas**

Considerando-se que os serviços provisórios podem ser executados interna e externamente, torna-se necessário assegurar que estes não obstruam as fundações novas, particularmente onde serão necessárias operações para a colocação de blocos com múltiplas estacas.

Uma alternativa é usar escoramento aéreo em torno das paredes laterais do edifício. Este escoramento pode ser introduzido independente de qualquer demolição, através de cavidades feitas em paredes que estejam no caminho. Para grandes extensões, um apoio ou uma torre central de sustentação pode ser necessário. Este apoio ou torre necessitará ter uma fundação provisória para suportar a carga que ele receberá (Figura 2.10). Tal sistema de reforço provisório de paredes, por meio de anéis de aço horizontais fixados às paredes, foi usado durante a reestruturação do antigo teatro de Moller em Darmstadt, na Alemanha, que passou a ser utilizado como edifício de escritórios do governo, como pôde ser visto na Figura 2.7 a. Neste caso, o único problema passa a ser a necessidade de se interceptar membros da nova estrutura de aço através do escoramento provisório.

O posicionamento do escoramento necessário, entretanto, deverá ser cuidadosamente levado em consideração a fim de evitar a obstrução do novo pórtico estrutural.



**Figura 2.10 – Sistema de fixação interno de fachadas**

Pode também ser necessário fornecer estabilidade lateral às paredes durante o processo de reconstrução. Neste caso, as fachadas podem ser amarradas para impedir a propagação das forças do vento usando as seções de aço horizontais ou inclinadas, presas como faixas, em torno do perímetro do edifício (Figura 2.11).

#### **2.4. Sistemas de Reparo e Reforço**

Todos os materiais utilizados em uma edificação estão propensos a danificar-se ou deteriorar-se após um longo período de uso podendo ser necessário, entretanto, empreender ações corretivas de reforço das estruturas enfraquecidas. As mudanças de uso da edificação podem exigir um aumento de sua resistência para suportar os novos carregamentos. Em muitas situações o aço pode ser usado para reforçar estruturas existentes. Algumas destas são descritas a seguir.



Figura 2.11 – Amarração de fachadas [1]

#### 2.4.1.Reforço de Estruturas de Alvenaria

O reforço de estruturas de alvenaria pode estar relacionado com o aumento do carregamento considerando tanto ações verticais como horizontais causadas, por exemplo, por movimento das fundações, assimetria geométrica ou de carga.

Os edifícios de alvenaria estrutural podem ser reforçados através de técnicas de uso do aço em diferentes tipos de intervenção, indo da simples proteção, passando pela reparação e reforço até a total reformulação estrutural.

O aumento de resistência ao carregamento vertical pode ser obtido pelos seguintes métodos

- encamisamento das colunas de alvenaria, danificadas, com perfis verticais de aço;
- inserção de colunas de aço novas em cavidades apropriadas ou simplesmente colocadas ao lado da parede a ser reforçada (Figura 2.12);
- recuperar a resistência da parede em torno de aberturas por meio de vigamentos de aço, colocados acima das aberturas ou de pórticos colocados em torno da abertura.



**Figura 2.12 – Inserção de pilares para contenção de paredes de alvenaria [1]**

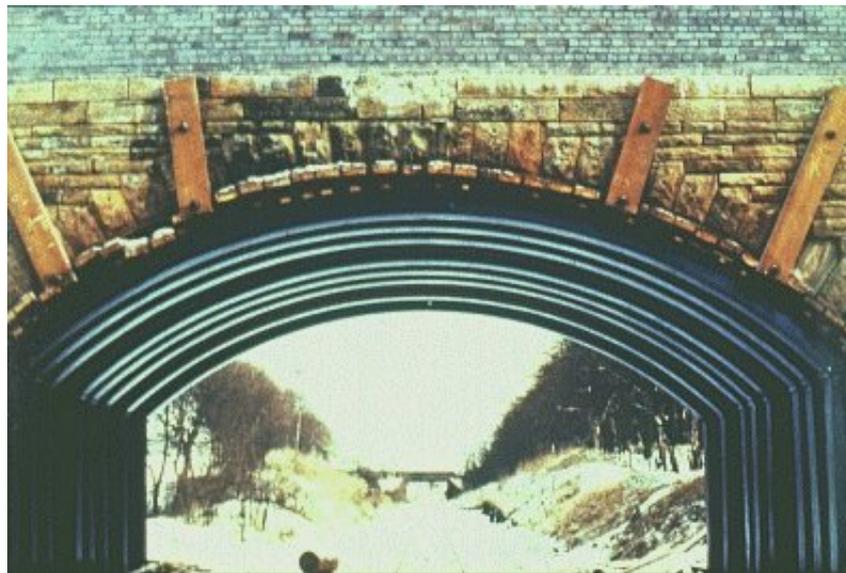
O reforço de paredes ou colunas para suportar cargas horizontais pode ser feito como se segue:

- fixação das paredes da fachada com seções de aço formando uma série de anéis horizontais de vários níveis formando um feixe de vigas;
- fixação dos cantos por meio de seções verticais de aço unidas por meio de vigas ou caibros;
- introdução de contraventamento em aço para fornecer uma ligação transversal entre as paredes principais;
- enrijecimento das paredes principais por meio de contraventamento em “X” introduzidos entre as colunas de aço (Figura 2.13).

Para estruturas de alvenaria em forma de arco, o reforço pode ser feito utilizando-se seções de aço com mesma curvatura e instaladas sob a estrutura existente conforme apresentado na Figura 2.14.



**Figura 2.13 – Contraventamento em “X” de parede de alvenaria existente**



**Figura 2.14 – Reforço de estrutura em alvenaria em forma de arco**

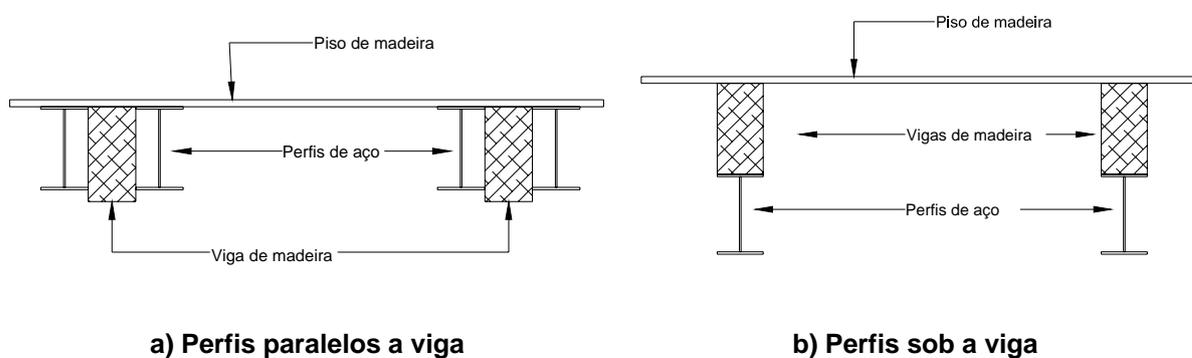
#### **2.4.2. Estruturas de Madeira**

Uma alternativa para evitar a troca total dos assoalhos de madeira, que são muito comuns em edifícios antigos, pode ser o reforço dos mesmos, conseguido facilmente através do uso de perfis de aço através de vários métodos construtivos onde pode-se citar:

- cantoneiras podem ser aparafusadas através de membros principais de madeira estendendo-se a aba inferior das mesmas;

- um par de perfis de seção “I” ou “U” podem ser posicionados, um de cada lado da viga em madeira sendo aparafusados através desta ou então, através de placas soldadas nas mesas inferiores;
- utilização de placas de aço a serem inseridas em cavidades nas vigas principais de madeira formando vigas compostas. Estas placas podem ser fixadas através de parafusos e/ou resina epóxi de forma a aumentar a resistência à flexão e ao cisalhamento;
- em casos de estruturas de telhados, se as vigas de madeira estiverem em boas condições e for necessária a sua exposição, estas podem ser reforçadas através de perfis “I” colocados na parte superior das mesmas e fixados por um sistema apropriado de conectores.

Uma variante interessante deste último método foi usada na restauração do Forte Leste de St. Martino em Rio, Reggio Emilia, na Itália <sup>(i)</sup>. O objetivo era proteger o assoalho de madeira antigo criando uma estrutura de aço nova para aumentar sua resistência. Seções “I” foram colocadas em canaletas apropriadas feitas no topo das vigas de madeira e uma laje de concreto com forma metálica foi executada. A ação conjunta entre a viga de aço e a laje de concreto foi conseguida por meio de conectores “stud” soldados no topo da viga de aço.



**Figura 2.15 – Reforço de pisos de madeira com perfis de aço**

<sup>(i)</sup> Não se possui maiores informações a respeito dessa obra.



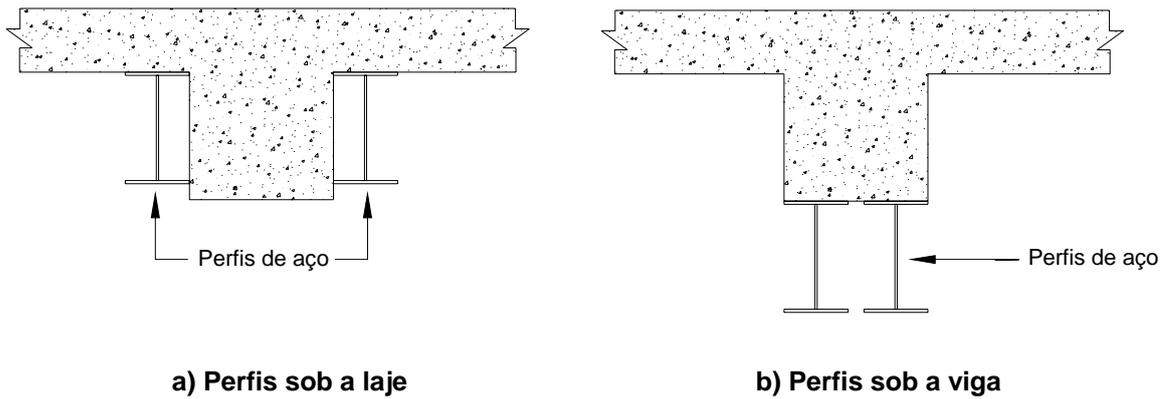
**Figura 2.16 – Reforço de pisos de madeira (Gávea Golf Club – RJ) [1]**

### **2.4.3. Estruturas de Concreto Armado**

As estruturas de concreto armado podem também ser reforçadas usando-se perfis de aço, conforme apresentado na Figura 2.17. Vigas e colunas de aço podem ser colocadas juntas ou sob as vigas de concreto existentes e fixadas na posição desejada com uma mistura feita de resina epóxi e argamassa. Como alternativa, placas de aço podem ser fixadas às superfícies superiores e inferiores de lajes de concreto ou ao lado das vigas de concreto para aumentar a sua resistência ao cisalhamento e a flexão. O uso destas placas de aço é uma técnica relativamente direta; entretanto, proteções à corrosão e ao fogo devem ser consideradas. Enrijecedores podem ser necessários ao longo dos lados das placas para evitar distorções durante o processo de fixação. Furos também deverão ser feitos para assegurar uma completa cobertura da argamassa com a resina epóxi.

Os assoalhos e forros de telhado feitos com lajes pré-moldadas podem ser reforçados de uma maneira similar ou introduzindo-se vigas “I” em cavidades apropriadas entre as vigotas da laje. (Figura 2.18).

Para se reforçar lajes cogumelo, geralmente é necessário cortar e soldar perfis de aço no local para se adaptar à diferença entre a altura da laje e os capitéis na extremidade do pilar. Ver Figura 2.19.



**Figura 2.17 – Reforço de Estruturas de Concreto**



**Figura 2.18 – Reforço de lajes de concreto**

Um uso muito eficaz do aço estrutural, em obras de reforço de estruturas de concreto armado submetidas a terremotos, consiste em introduzir painéis de cisalhamento, que têm dupla finalidade. Aumentam consideravelmente a resistência da estrutura a carregamentos horizontais além de proporcionarem uma melhor distribuição da rigidez interna da estrutura com respeito ao centro de cisalhamento, minimizando os efeitos de vibração torsional. Os painéis de cisalhamento com contraventamento são feitos através da ligação de perfis de aço com as vigas e colunas de concreto armado. De acordo com as necessidades pórticos estruturais podem ser montados com diagonais simples, conforme apresentado na Figura 2.20, ou seguindo outro modelo de acordo com a configuração da edificação, Figura 2.21. A colocação de uma única diagonal para cada painel retangular possibilita a abertura de vãos para portas ou janelas. Um sistema como esse foi usado no reforço contra terremotos na

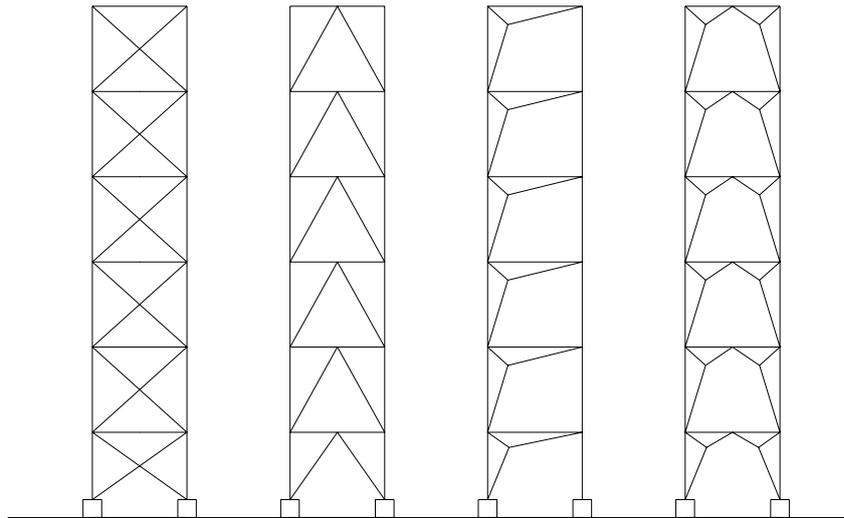
estrutura de concreto armado no complexo do hospital de Carderelli em Nápoles, Itália. O pórtico e as diagonais foram feitos usando-se perfis “I”.



**Figura 2.19 – Reforço de lajes cogumelo**



**Figura 2.20 – Contraventamento em “X”**



**Figura 2.21 – Tipos de contraventamento**

#### **2.4.4. Ferro fundido e estruturas de aço**

A resistência das estruturas de aço e ferro fundido em edifícios aumentou muito com a evolução da manufatura e produção. Por volta de 1800 a tensão admissível para o ferro fundido girava em torno de 15 Mpa (SI) e para o ferro forjado girava em torno de 75 Mpa (SI). A tensão de escoamento do aço fabricado atualmente, obtida de acordo com os novos padrões de cálculo de estruturas de aço é muito superior. A resistência de estruturas existentes em aço ou ferro fundido deve ser considerada com relação aos padrões de carregamento da época da construção original, embora possa se justificar um aumento desta resistência através de realização de diversos testes.

Quando se considera o reforço de estruturas de aço existentes, várias técnicas podem ser empregadas, conforme apresentado na Figura 2.22:

- placas podem ser soldados na parte superior ou inferior das mesas;
- perfis “I”, “H”, ou seções “T” podem ser soldados as mesas;
- podem ser soldadas placas entre as mesas para se formar seções caixão;
- pode ser feita uma laje de concreto armado, a qual será unida a viga através de conectores de cisalhamento apropriados (cantoneiras, perfis “T”, pinos, “perforbond”, etc.) soldados a mesa superior para trabalhar como viga mista.

Em todos os casos, a ligação entre a nova estrutura e a existente deve ser cuidadosamente considerada. Se forem usadas ligações aparafusadas, a perda inicial de resistência da peça existente, enquanto os furos para a instalação dos parafusos estão sendo feitos, precisa ser considerada, porque esta condição provisória pode ser crítica. Se a

alternativa da solda for escolhida, então a especificação técnica da solda deve ser compatível com o material existente. Algumas regras básicas devem ser consideradas:

- algumas seções de aço devem sempre ser testadas antes de se decidir a especificação final;
- uma vez que a utilização da solda foi definida, alguns pontos necessitam ser considerados para detalhar a solda que será feita no local;
- as soldas de filete são preferíveis às soldas de entalhe porque exigem menos preparação;
- sempre garantir fácil acesso ao local em que será feita a solda para assegurar uma melhor qualidade das mesmas;
- deve-se manter a solda paralela a linha de resistência para evitar corte;
- soldas intermitentes requerem menos calor e assim são mais econômicas do que as soldas contínuas;
- seções mais espessas necessitam ser pré-aquecidas a fim reduzir a taxa de resfriamento e assim, assegurar que o metal base e o metal da solda alcancem as tensões requeridas;
- deve-se fazer alguns testes no local: soldar uma placa na seção de aço e executar o teste do martelo para verificar ductilidade da solda e o encruamento do metal base.

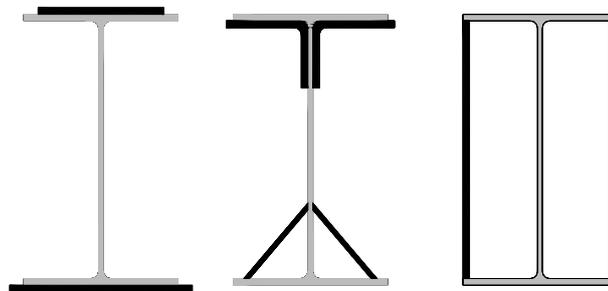


Figura 2.22 – Tipos de reforço em estruturas metálicas

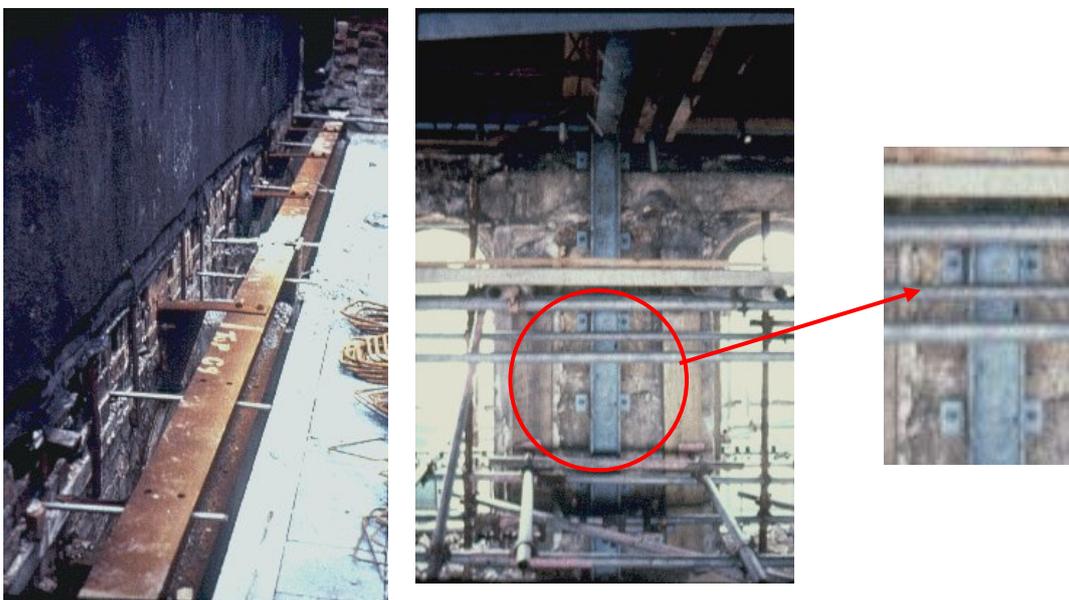
## 2.5. Conexão da estrutura nova com a fachada

Uma vez terminada, parcialmente, a estrutura interna, torna-se necessário unir essa estrutura com a fachada original. Para isso é preciso saber se alguma carga será transferida para a fachada.

O modo mais comum de se conectar a estrutura nova com a fachada consiste na utilização de chumbadores de expansão. Entretanto, em locais onde o solo pode sofrer adensamento, como a argila, o recalque da fundação deve ser levado em consideração. A

fachada existente estará sendo carregada durante anos, devido ao assentamento das fundações. Uma vez aliviada essa carga, e transferida para a nova estrutura interna, o solo poderá se recuperar e as fundações da fachada existente poderão subir.

Ao mesmo tempo, as fundações vão se ajustando, provocando um movimento diferencial entre a fachada e a nova estrutura. Uma solução normalmente empregada nestes casos é estabelecer uma ligação entre a parede e as vigas de periferia da nova estrutura, as quais têm alguma flexibilidade na direção vertical. Uma forma simples de se aplicar esse método consiste na utilização de uma chapa de aço para se ligar a viga à parede da fachada (Figura 2.23 a).



a) Ligação sem transferência de carga para a fachada

b) Ligação com transferência de carga para a fachada através de cantoneiras

**Figura 2.23 – Fixação da estrutura nova à fachada existente**

Se não for possível executar uma conexão suficiente com as vigas de periferia, pode ser necessário fazer a ligação da fachada com as colunas. Essa conexão pode ser conseguida através do uso de cantoneiras soldadas em ambos os lados da coluna e aparafusadas na fachada através de chumbadores químicos ou de expansão (Figura 2.23b).

Os pórticos de aço utilizados para estabilizar a fachada, podem ser incorporados a estrutura definitiva da edificação. Para isso, as colunas devem ser inicialmente instaladas, antes de qualquer demolição (Figura 2.24). Um contraventamento provisório com utilização de cantoneiras pode ser utilizado, se necessário e as vigas de piso podem ser instaladas imediatamente acima do piso existente. A ligação provisória entre a viga de piso e a fachada

pode ser feita com cantoneiras. A demolição pode, então, ter início, e a fachada estará fixada através da estrutura instalada (Figura 2.25).

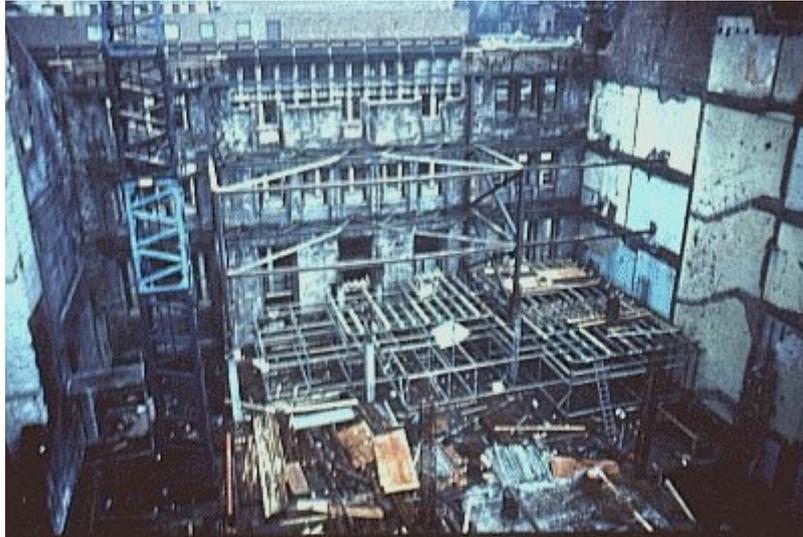


**Figura 2.24 – Instalação de colunas antes da demolição com contraventamento provisório**

Uma vez terminada a demolição e a limpeza do local, a reconstrução do restante da edificação pode ser iniciada (Figura 2.26). Como a estrutura provisória é também parte da estrutura definitiva da edificação, haverá uma economia no custo final da obra.



**Figura 2.25 – Demolição interna após a instalação parcial da nova estrutura**



**Figura 2.26 – Retomada do processo construtivo**

## 2.6. Exemplos Práticos

Serão mostrados aqui alguns exemplos da utilização de estruturas de aço na recuperação, restauração e reforço de estruturas existentes.

Inicialmente apresenta-se o projeto de reabilitação estrutural em aço executado no edifício da Biblioteca Nacional do Rio de Janeiro. O edifício inteiro foi restaurado em seus aspectos arquitetônicos (dentro e fora do edifício), estruturais e de serviços (elétricos, hidráulicos, etc).

O edifício da Biblioteca Nacional foi construído no Rio de Janeiro entre 1905 e 1909. A construção do edifício foi terminada pelo Coronel N.A. Moniz Freire, em 1910. O edifício apresenta estilo eclético e a técnica de construção apresenta uma estrutura principal de aço não visível ao público, conforme apresentado na Figura 2.27. O edifício recebeu diversas restaurações durante seus 80 anos, que resultaram em mudanças importantes em sua aparência externa e interna. Em 1994 foi iniciada uma restauração completa do edifício e foi decidido pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) recuperar suas cores e estilos originais. Após uma investigação cuidadosa, as superfícies internas e externas foram restauradas em suas cores originais, os metais receberam o tratamento especial e o telhado foi totalmente restaurado.

A estrutura de aço foi inspecionada em regiões críticas, como a estrutura do telhado, a estrutura de aço que suporta a abóbada central e as regiões em contato com o ambiente externo. Atenção especial foi dada às seis torres de periferia, na região superior, onde os balcões são colocados. Estes balcões são redondos, suportados internamente por treliças de aço. Estas inspeções indicaram várias rachaduras nas paredes de argamassa “*deployè*” e um avançado processo de corrosão na estrutura de aço.

Como as plantas originais da estrutura não estavam disponíveis, uma inspeção detalhada permitiu a definição do sistema estrutural e dos perfis de aço nas regiões do balcão. Baseado nestas inspeções, foram produzidas plantas de execução. Uma estrutura treliçada espacial dupla de 2160mm de altura suporta diretamente o balcão superior e as vigas laterais.

A estrutura treliçada dupla é apoiada sobre duas ou três colunas de aço. O engenheiro utilizou também sustentações intermediárias nas cordas superiores das estruturas treliçadas por meio de vigas "I" e ligações soldadas.

A degradação das paredes externas do edifício, principalmente devido à presença de ornamentos externos, permitiu o desenvolvimento de rachaduras.

Este processo de degradação resultou na penetração contínua de água e umidade nas câmaras internas dos balcões, o que gerou um processo de corrosão na estrutura de aço. Como nenhum acesso conveniente à estrutura estava disponível, nenhuma rotina de inspeção foi fornecida.

Durante a inspeção detectou-se que um dos balcões esteve submetido a reabilitação recente, com uma estrutura de concreto que substituiu partes da estrutura de aço original. O sistema estrutural demasiadamente pesado, inconvenientemente construído, ineficiente e com deficiente adaptação à construção original, foi completamente demolido junto com a estrutura de aço restante. Neste caso uma reconstrução completa foi planejada.

Um sistema de apoios provisórios permitiu o planejamento das intervenções em cada região. Para o caso de uma estrutura que está completamente condenada, um sistema de apoio provisório foi providenciado e a demolição completa da estrutura de concreto armado e da estrutura de aço restante foi realizada.

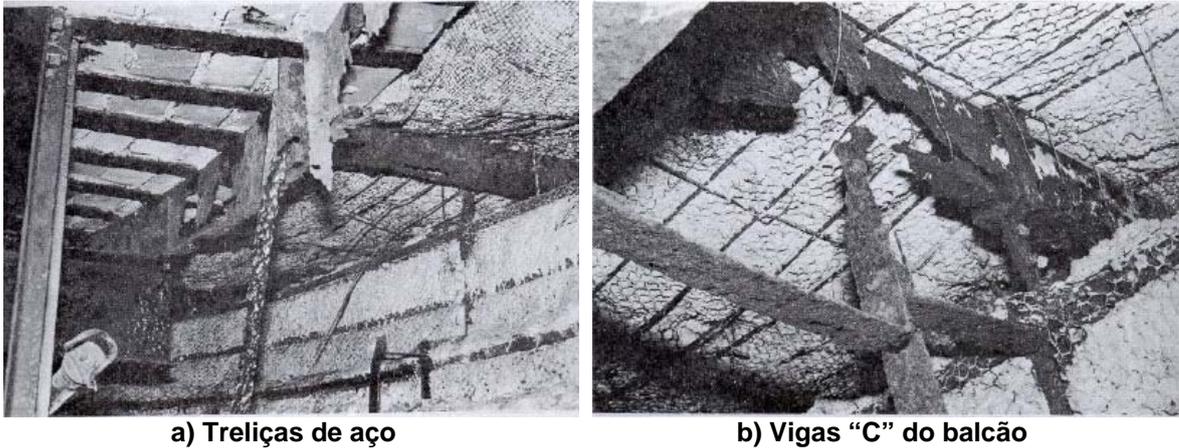


a) Antes da restauração



b) Após última restauração

**Figura 2.27 – Biblioteca Nacional antes e depois da última restauração**



a) Treliças de aço

b) Vigas “C” do balcão

Figura 2.28 – Detalhes da corrosão na estrutura

Um outro exemplo da utilização de estruturas de aço em uma edificação histórica é o Coliseu de Roma, que passou por uma reforma para a instalação de um elevador para deficientes. Foram instalados perfis de aço em um setor da entrada principal para a locação dos elevadores (Figura 2.29 e Figura 2.30).

Com o intuito de permitir aos visitantes de Roma visualizarem as obras do Mercado de Augusto, foi construída uma passarela de ligação da Avenida “Fórum Imperiali” ao Mercado conforme pode ser visualizado na Figura 2.31. Mais uma vez, a utilização de uma estrutura em aço mostrou-se bastante eficiente, atendendo a necessidade de ser retirada futuramente.



Figura 2.29 – Coliseu de Roma [1]



**Figura 2.30 – Estrutura do elevador do Coliseu de Roma [1]**



**Figura 2.31 – Passarela (Roma) [1]**

Em Cantu, província de Como, na Itália, uma antiga fábrica foi transformada em ginásio poliesportivo. Originalmente existiam dois pavimentos, mas como era necessário a retirada da laje intermediária, e a conseqüente retirada dos pilares intermediários, optou-se por utilizar pórticos de aço em pares para suportar a laje do teto. Estes pilares instalados também na parte externa da edificação ajudam a compor a fachada, criando um motivo arquitetônico para a mesma (Figura 2.32).

Em Rosenhein, na Alemanha, um antigo depósito de locomotivas, abandonado, virou um centro de convenções. Para isto tornou-se necessária a criação de uma cobertura com vão livre de 15m, através da utilização de perfis IPE 500, conforme pode ser observado na Figura 2.33. Nesta mesma figura, pode-se visualizar o detalhe do apoio destas vigas da cobertura nos pilares da periferia proporcionando um contraste interessante com as paredes de alvenaria da estrutura original.



**Figura 2.32 – Conversão de fábrica em um Ginásio em Canto, Itália**



**a) Vista geral do telhado**

**b) Detalhe do apoio da viga no pilar**

**Figura 2.33 – Depósito de locomotivas transformado em centro de convenções**

Em Jarinú, interior de São Paulo, a capela de Nossa Senhora do Carmo, começou a ser erguida em 1807, sendo concluída definitivamente em 1950 após várias obras de ampliação e pinturas. Como o madeiramento de sustentação do telhado e do forro, onde havia as figuras sacras, estava deteriorada por ação do tempo, a Igreja construída em taipa de pilão foi restaurada, com o mais moderno sistema construtivo: o “*Steel Framing*”. A estrutura utilizada nesta restauração consiste no uso de perfis metálicos leves galvanizados que acompanham a curvatura do arco do altar. O uso de estruturas metálicas também proporcionou maior espaço para manutenção da rede elétrica e hidráulica (Figura 2.34 a Figura 2.36).



**Figura 2.34 – Forro do Telhado (Igreja de Nª Srª do Carmo) [8]**



**Figura 2.35 – Forro do Telhado (Igreja de Nª Srª do Carmo) [8]**



**Figura 2.36 – Estrutura de Aço do Telhado (Igreja de Nª Srª do Carmo) [8]**

Um exemplo de reforço estrutural em uma estrutura de aço para atender a uma nova solicitação diz respeito a ponte sobre o Rio Tejo (Lisboa, Portugal) originalmente chamada de Ponte Salazar, por ter sido mandada construir por este em 1966. Esta começou a ser chamada popularmente por Ponte 25 de Abril para comemorar a Revolução de 25 de Abril de 1974, que restaurou a democracia em Portugal.

A Ponte 25 de Abril é uma ponte suspensa, com um comprimento total de cerca de 2.280m, tendo um vão central de 1.013m e dois vãos laterais de 483m cada, conforme apresentado na Figura 2.37. Na margem Norte existem dois vãos extremos e na margem Sul um vão extremo, cada um deles com 100m aproximadamente. Trata-se de uma das treliças mais longas do mundo, com ambas as torres principais elevando-se cerca de 190m acima do nível d'água e tendo uma altura livre de navegação de 70m que assegura o acesso ao porto de Lisboa de navios de grande porte.

A ponte foi originalmente projetada para a circulação de carros no tabuleiro superior e para trens no tabuleiro inferior. Entretanto, a ponte foi inicialmente construída apenas com o tabuleiro superior utilizado para a circulação de automóveis mas preparada para em uma segunda etapa, receber o tabuleiro inferior com uma ferrovia.

Em 1997 foi iniciado o trabalho para a construção da via ferroviária sob a rodoviária. Só que ao invés de se proceder a troca dos cabos originais por outros que resistissem as cargas da via rodoviária e da ferroviária, foi instalado um cabo novo acima do existente trabalhando independentemente (Figura 2.38a). Com isso conseguiu-se fazer o reforço da estrutura e construir a nova via férrea (Figura 2.38b), sem causar maiores transtornos a cidade.



**Figura 2.37 – Vista Geral da Ponte 25 de Abril [4]**



**a) Cabos instalados independentemente dos originais**



**b) Via Ferroviária na parte inferior da ponte**

**Figura 2.38 – Detalhes da ampliação da ponte 25 de Abril, Lisboa**

O Gávea Golf and Country Club, localizado em São Conrado, no Rio de Janeiro, necessitava, para as obras de ampliação da sua sede social, da execução de um reforço estrutural. Optou-se, então, pela utilização de estruturas de aço já que a estrutura anterior, de concreto e madeira encontravam-se em péssimas condições. Vigas de aço foram instaladas sob o piso de madeira, ao lado das antigas vigas de madeira, para reforçar a estrutura do piso como mostrado na Figura 2.39.



**Figura 2.39 – Reforço de piso de madeira [1]**

No local onde foi construído o bar da piscina, tornou-se necessário, retirar um pilar de concreto para se obter um ganho de área do bar. Optou-se, então, pela instalação de uma viga W410x60, apoiada em três pontos como apresentado na Figura 2.40, para servir de apoio a laje após a retirada do pilar. Em uma extremidade, a viga foi aparafusada a face do pilar, usando-se uma placa de extremidade e chumbadores de expansão (Figura 2.41a). Na outra extremidade e no ponto de apoio intermediário (Figura 2.41b) a viga foi apoiada e fixada na face superior do pilar. Devido a sua grande dimensão, ao peso e a dificuldade de transporte na obra, a viga foi dividida em duas partes. Na obra a viga foi soldada e recebeu um reforço na alma conforme observado na Figura 2.42.

A obra foi executada pela CMN engenharia (civil), Integração (instalações elétricas e hidráulicas), Ambient-air (Ar condicionado e exaustão) e SBrasil (cálculos estruturais).



**Figura 2.40 – Vista geral da Viga W410 Instalada [1]**

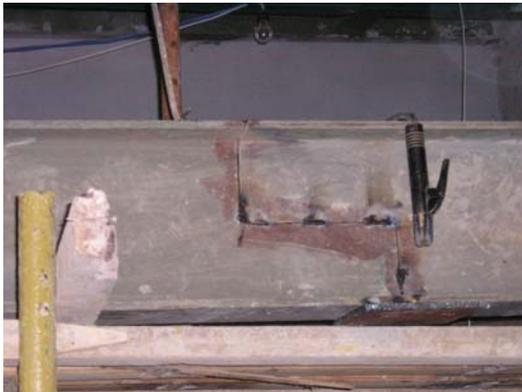


**a) Detalhe da placa chumbada no pilar**

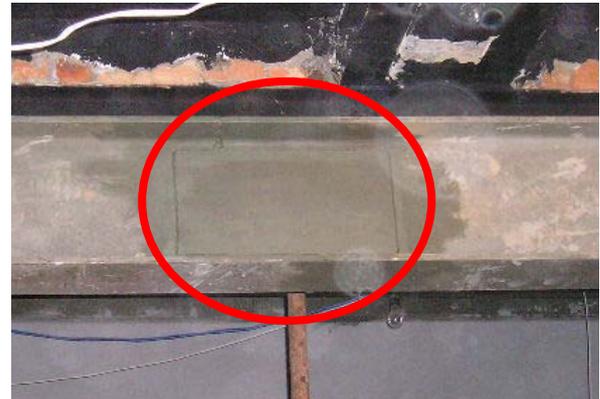


**b) vista geral da viga e pilar a ser demolido**

**Figura 2.41 – Viga W410 instalada e sendo soldada [1]**



**a) Viga sendo soldada**



**b) Viga já soldada e com reforço na alma**

**Figura 2.42 – Detalhe da emenda da viga [1]**

Uma outra aplicação das estruturas de aço no reforço e recuperação estrutural pode ser vista na edificação situada a Rua Vieira Souto nº 438. Trata-se de um edifício residencial de quatorze andares, onde um reforço estrutural foi executado em suas varandas, que feitas em concreto armado, já estavam deterioradas devido à falta de manutenção e aos efeitos da

maresia. Resolveu-se então que junto ao reforço, seria feito um acréscimo de área nas varandas. Assim a varanda teve seu comprimento e largura aumentados (Figura 2.43).

Foram construídos três pilares, em aço, adjacentes aos pilares da fachada do edifício, aos quais são fixadas as vigas, em balanço, que reforçam a estrutura antiga das varandas. Para complementar a laje das varandas, a solução escolhida foi a de lajes pré-moldadas (Figura 2.44).



**Figura 2.43 – Vista geral da edificação [1]**



**Figura 2.44 – Detalhe da montagem da estrutura [1]**

Visto os processos de restauração, as intervenções, os processos de reparo e reforço estrutural, será dada agora uma breve explicação dos tipos de materiais mais utilizados nas estruturas estudadas.

### 3. Modelo Numérico

#### 3.1. Modelo Experimental [6]

Para os modelos de reforços estruturais que serão apresentados no próximo capítulo, foi tomado como base uma viga de madeira com 6,80m de comprimento encontrada no salão da casa Bernardo Guimarães, atual biblioteca da FAOP (Figura 3.1) (Fundação de Arte de Ouro Preto – MG). Este salão possui três vigas de madeira como mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.1 – Casa Bernardo Guimarães

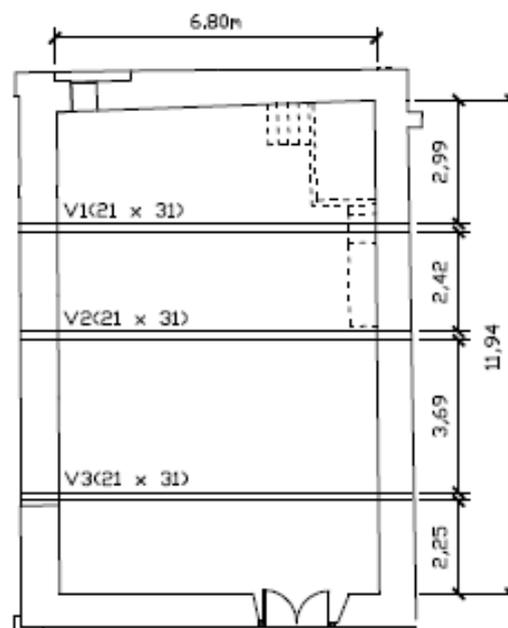


Figura 3.2 – Corte da edificação

### 3.2. Modelo Numérico Desenvolvido

O modelo desenvolvido no presente trabalho foi desenvolvido no software Ansys versão 10.0 e foi constituído de elementos sólidos com oito nós tendo três graus de liberdade por nó, sendo, translação nos eixos X, Y e Z (SOLID64 - Ansys Manual Reference, 2003 - Figura 3.3).

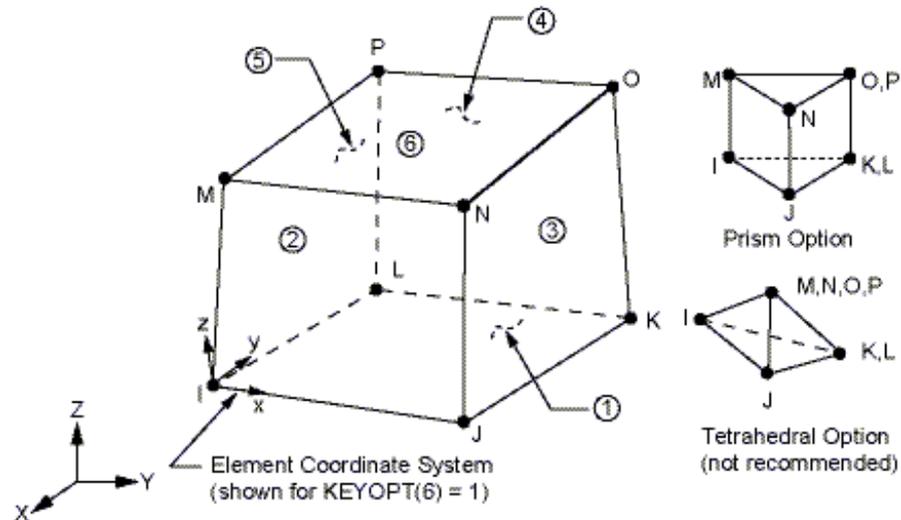


Figura 3.3 – Geometria do Elemento SOLID64

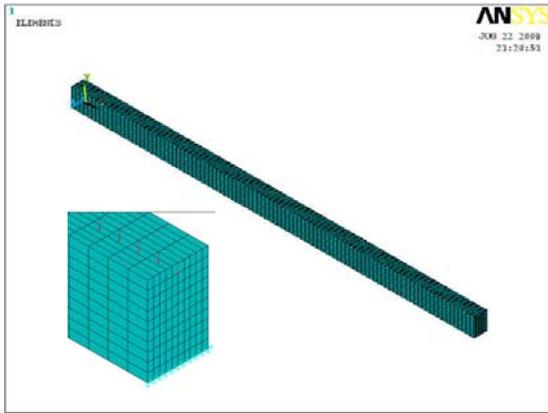
O estudo realizado através do programa Ansys, que consistiu na análise linear de quatro modelos numéricos diferentes com intuito de encontrar o modelo que apresentasse os valores de deformação, de tensão normal e de tensão cisalhante, mais próximo da realidade, comparados com os valores teóricos que aquela estrutura pudesse apresentar.

A seguir será apresentado na Tabela 3.1 o número de divisões das malhas de quatro modelos diferentes para a escolha da melhor malha.

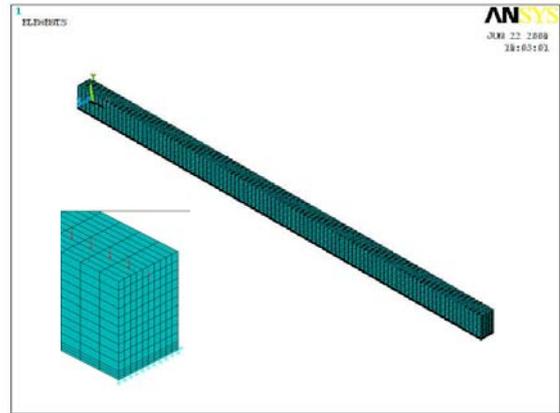
Tabela 3.1 – Estudo do número de divisões das malhas

Modelo	E (MPa)	Dimensões (mm)			Carga (KN/m)	N° divisões		
		l	h	e		q	A	B
1	14895	6800	310	210	50,00	1	2	20
2	14895	6800	310	210	50,00	3	6	60
3	14895	6800	310	210	50,00	5	10	100
4	14895	6800	310	210	50,00	10	20	200

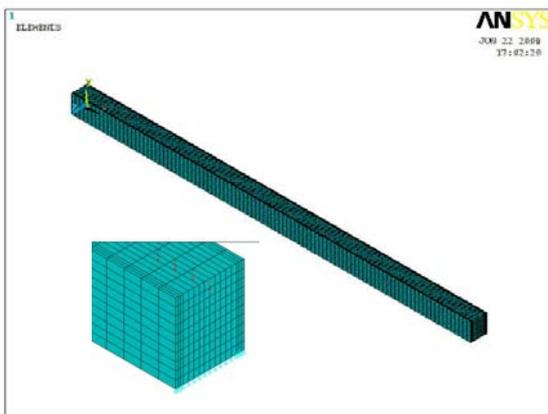
A figura a seguir (Figura 3.4) apresenta as malhas dos modelos desenvolvidos para cada tipo de reforço.



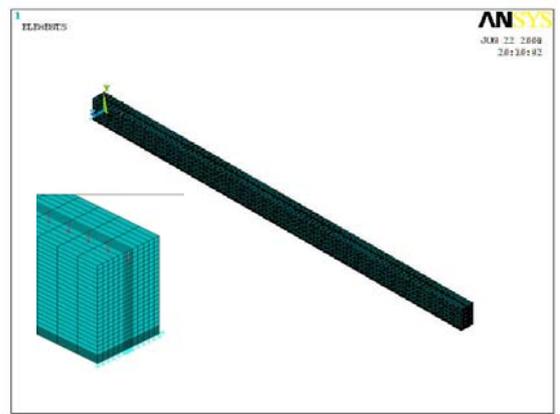
a) Malha padrão da viga de madeira



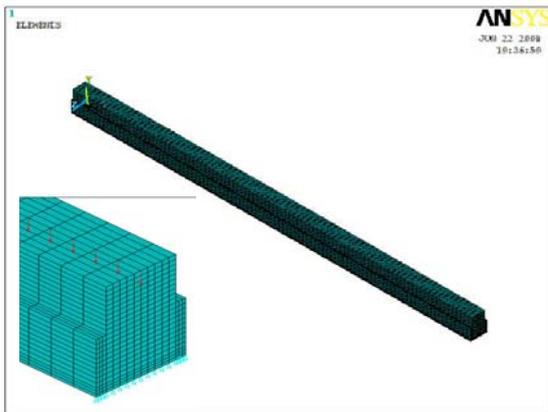
b) Malha da viga com chapa inferior



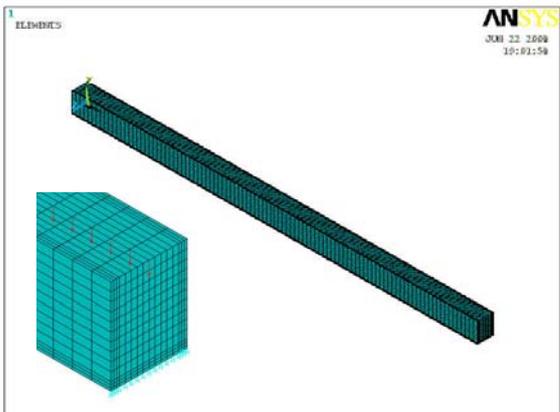
c) Malha da viga com duas chapas laterais



d) Malha da viga com perfil T



e) Malha da viga com perfil U metade



f) Malha da viga com perfil U

**Figura 3.4 – Malha dos modelos e seção transversal**

## 4. Análise de Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através do programa Ansys para cada tipo de reforço escolhido. Para tal, efetuou-se uma análise linear elástica de cinco tipos de reforços para uma viga de madeira que apresenta as seguintes dimensões: comprimento de 6,8 metros, largura de 21 centímetros e altura de 31 centímetros, e uma carga distribuída sobre a mesma de 50 kN/m. Os reforços em aço escolhidos foram: reforço com chapa inferior de 3,0 centímetros de espessura; reforço com duas chapas uma em cada lateral com 3,0 centímetros de espessura; reforço com perfil T na parte inferior com alma de 3,0 centímetros de espessura e mesa de 3,0 centímetros de espessura; reforço com perfil U até a metade da viga com 3,0 centímetros de espessura; reforço com perfil U com 3,0 centímetros de espessura. A união desses materiais foi considerada através de interação total considerando-se que não haverá deslizamentos entre as faces das peças de diferentes materiais (madeira e aço).

### 4.1. Modelo Padrão

A Figura 4.1 mostra o modelo adotado como padrão desenvolvido no Ansys com o respectivo carregamento, modelo este que foi usado nos tipos de reforços que serão apresentados a seguir. Através deste modelo foi obtida a configuração deformada da estrutura além da distribuição de tensões normais e cisalhantes da viga de madeira, apresentados na Figura 4.2 e Figura 4.3, respectivamente. Estes resultados servirão para uma comparação ao final da análise de cada tipo de reforço.

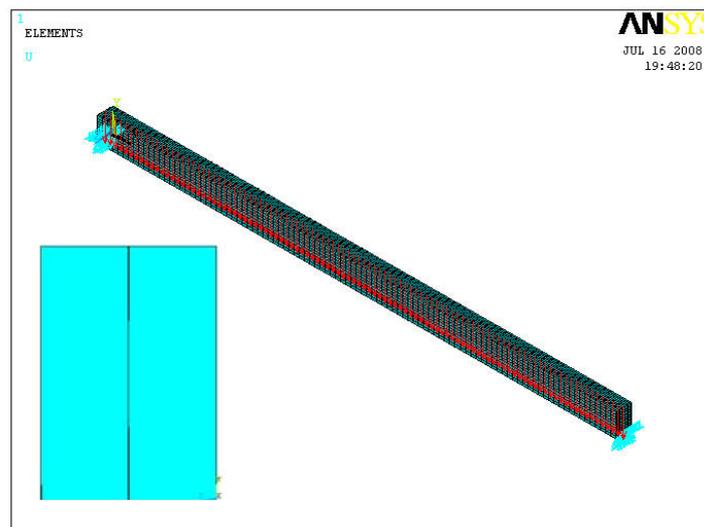


Figura 4.1 –Malha padrão com carregamento distribuído e seção transversal

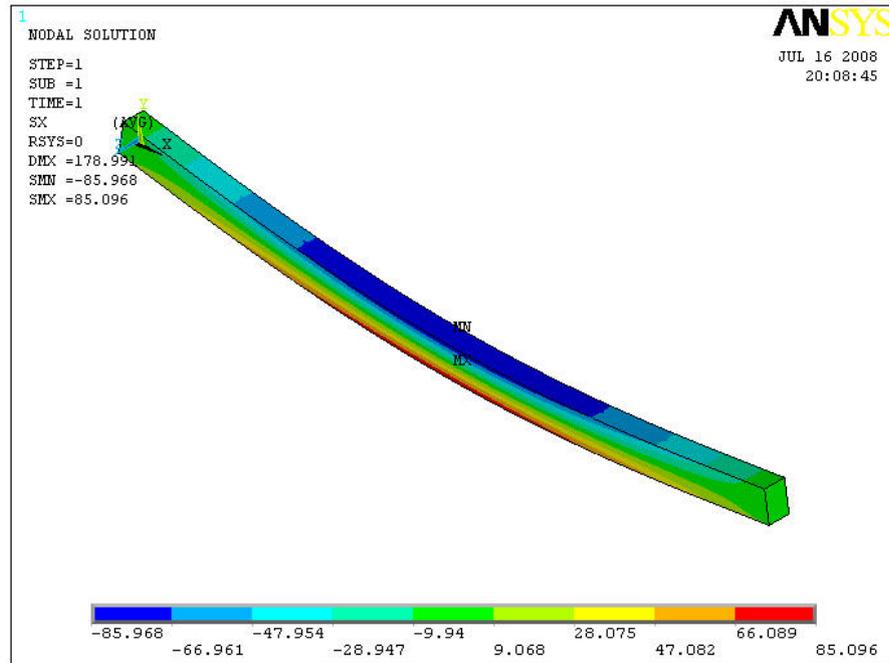


Figura 4.2 – Deformada e Tensão Normal (MPa)

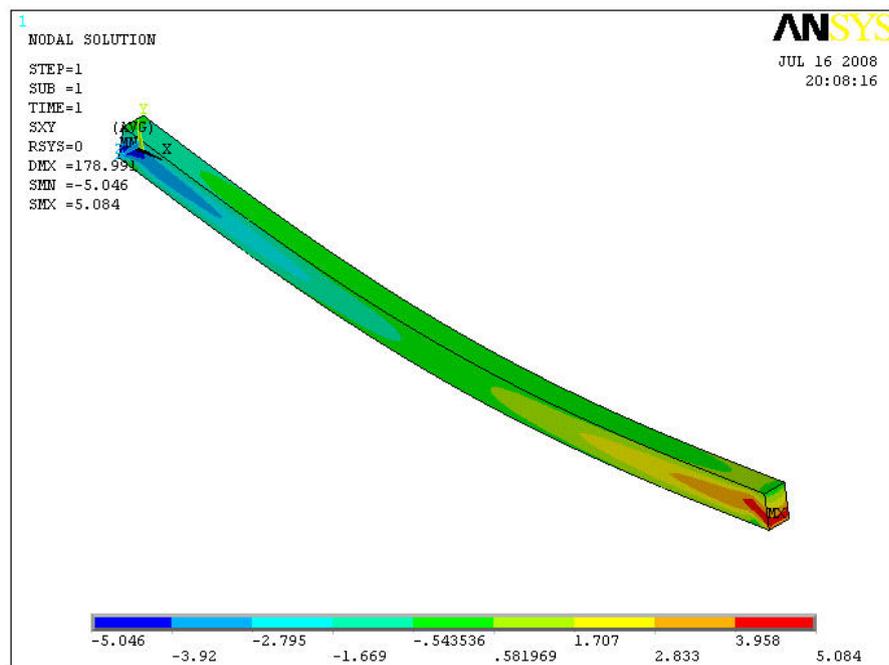


Figura 4.3 – Tensão Cisalhante (MPa)

A seguir serão apresentados na Tabela 4.1, os valores obtidos nos modelos numéricos através do programa Ansys em comparação com a teoria de Resistência dos Materiais.

Tabela 4.1 – Análise dos modelos para escolha da melhor malha

Modelo	Flecha (mm)		Tensao (MPa)		T. Cisalh. (MPa)
	Ansys	Teoria	Ansys	Teoria	Ansys
1	171,22	179,26	81,36	85,92	
2	177,71	179,26	84,50	85,92	
3	179,00	179,26	85,10	85,92	5,04
4		179,26		85,92	

ADOTADA

De acordo com esta tabela, na qual é apresentado o módulo de elasticidade (E) da madeira, o comprimento da viga (l), a altura da seção transversal da viga (h), a largura da seção transversal da viga (e) e uma suposta carga (q) sobre a qual a viga estará submetida, adotou-se o modelo 3 (três), tendo em vista os resultados por ele obtidos, terem se aproximado mais da realidade. Sendo assim, utilizar-se-á a malha do modelo 3 para o desenvolvimento dos modelos nos quais serão estudados os diversos tipos de reforços estruturais em uma viga de madeira. O número de divisões é referente ao valor adotado em cada uma das malhas para a largura, altura e comprimento da viga apresentada, respectivamente. Nota-se que o modelo 3 apresentou uma flecha máxima e uma tensão normal muito próxima da teoria, por isso a malha deste modelo foi escolhida como padrão para o desenvolvimento dos reforços estruturais.

#### 4.2. Reforço com Perfil T

O modelo apresentado na Figura 4.4, refere-se a deformada da viga de madeira com a utilização de perfil T com espessura da alma e da mesa de 30mm. Para este tipo de reforço deve-se fazer um corte no meio da viga no sentido longitudinal para que a alma do perfil possa fazer parte da viga, dando assim uma melhor análise de resultados e um melhor comportamento dos materiais. Com a elaboração de um modelo desenvolvido no Ansys, foi possível obter os valores da deformada, da tensão normal e da tensão cisalhante para cada material separadamente apresentados da Figura 4.5 a Figura 4.8.

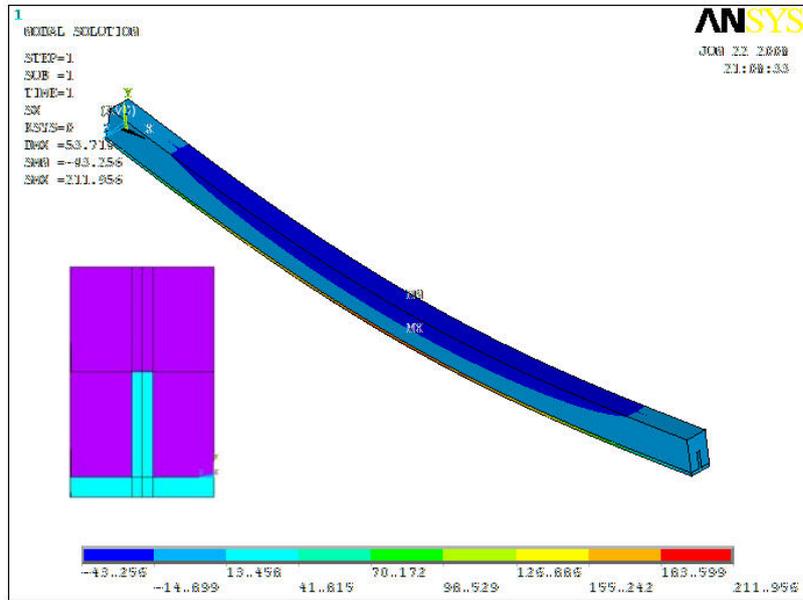


Figura 4.4 – Deformada da estrutura com reforço T

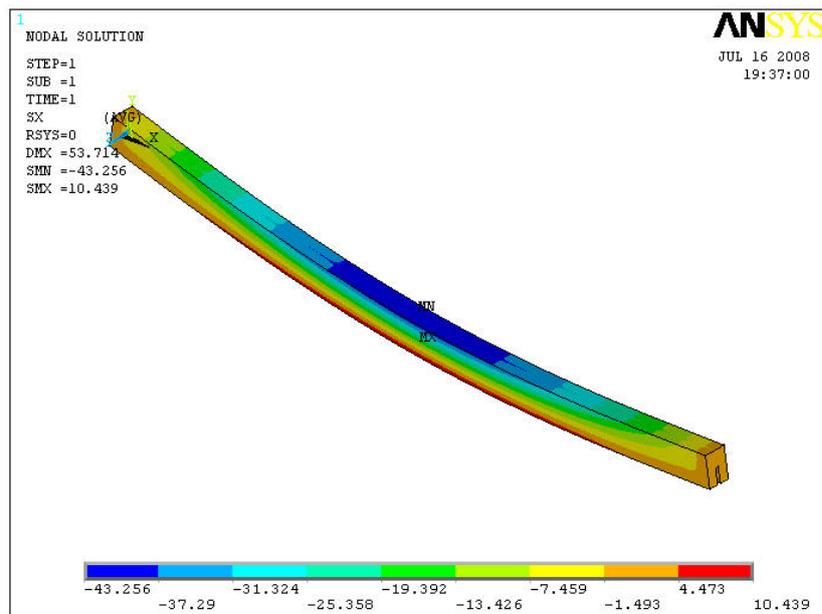


Figura 4.5 – Tensão normal (MPa) na madeira

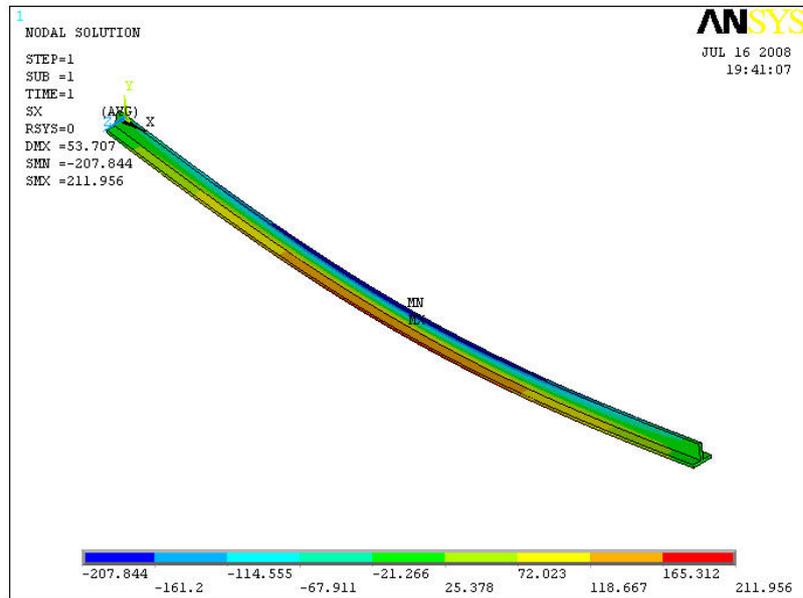


Figura 4.6 –Tensão normal (MPa) no aço

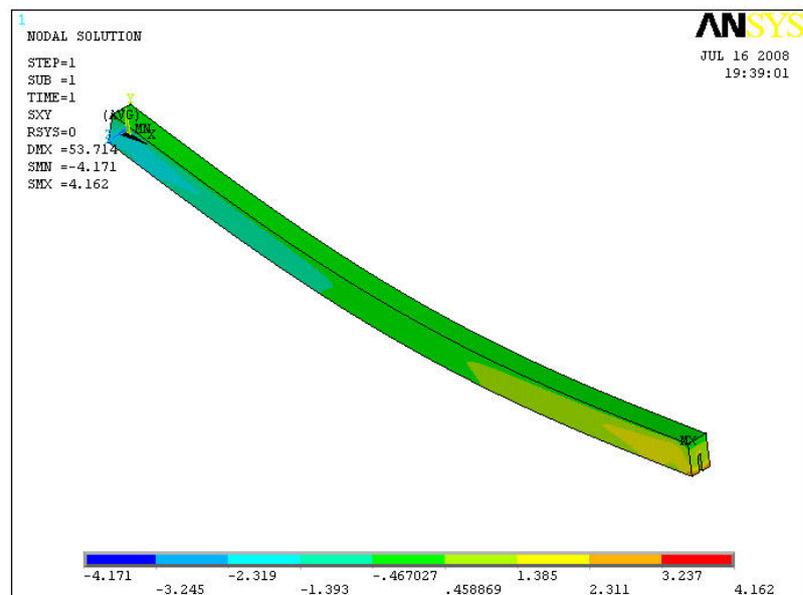


Figura 4.7 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira

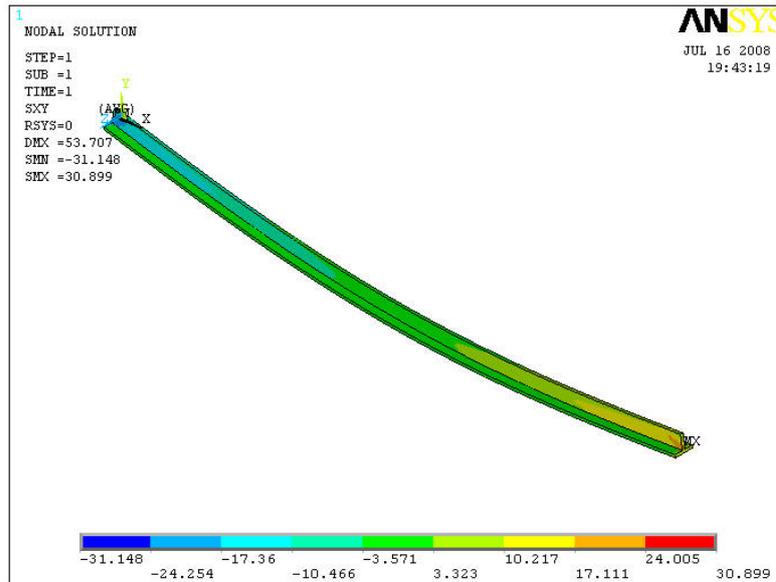


Figura 4.8 –Tensão cisalhante (MPa) no aço

### 4.3. Reforço com Perfil U metade

O modelo apresentado na Figura 4.9, refere-se a deformada da viga de madeira com a utilização de perfil U de 30mm de espessura até a metade da altura da viga. Com a elaboração de um modelo desenvolvido no Ansys, foi possível obter os valores da deformada, da tensão normal e da tensão cisalhante para cada material separadamente apresentados da Figura 4.10 a Figura 4.13.

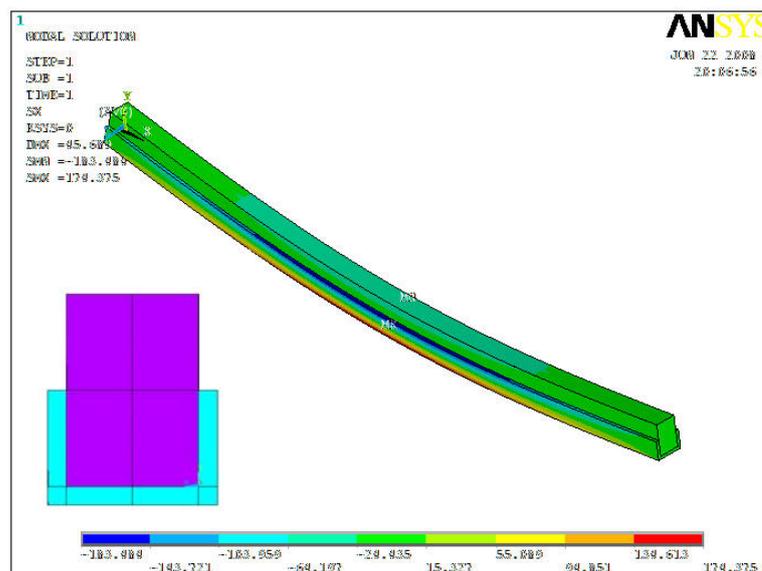


Figura 4.9 –Deformada da estrutura com seção U metade

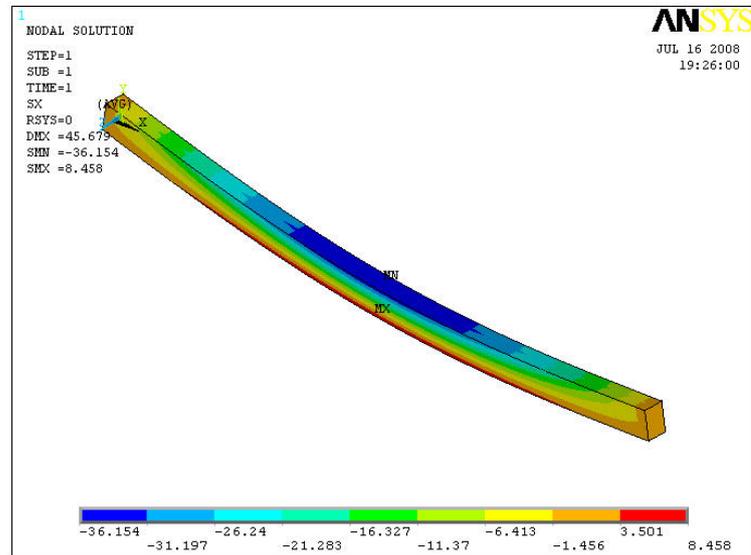


Figura 4.10 –Tensão normal (MPa) na madeira

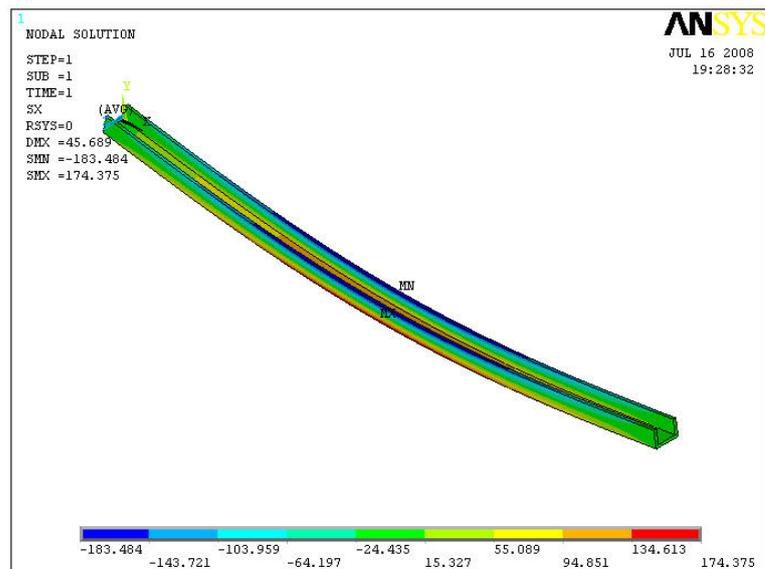


Figura 4.11 –Tensão normal (MPa) no aço

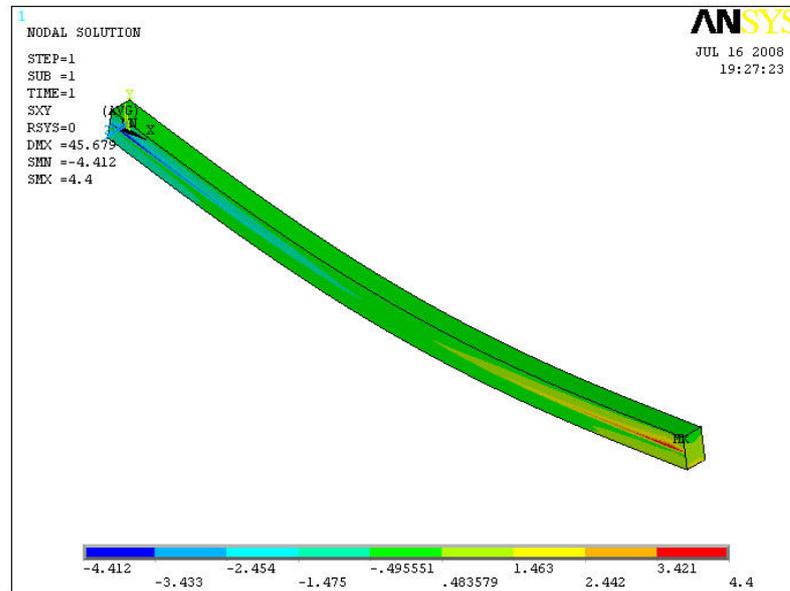


Figura 4.12 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira

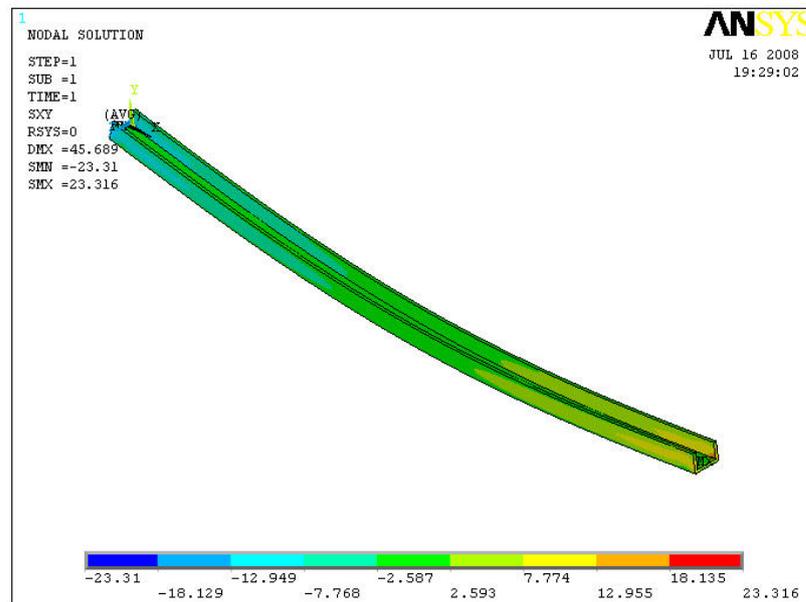


Figura 4.13 –Tensão cisalhante (MPa) no aço

#### 4.4. Reforço com Perfil U

O modelo apresentado na Figura 4.14, se refere a deformada da viga de madeira com a utilização de perfil U com 30mm de espessura. Com a elaboração de um modelo desenhado no Ansys, foi possível obter os valores da deformada, da tensão normal e da tensão cisalhante para cada material separadamente apresentados Figura 4.15 a Figura 4.18

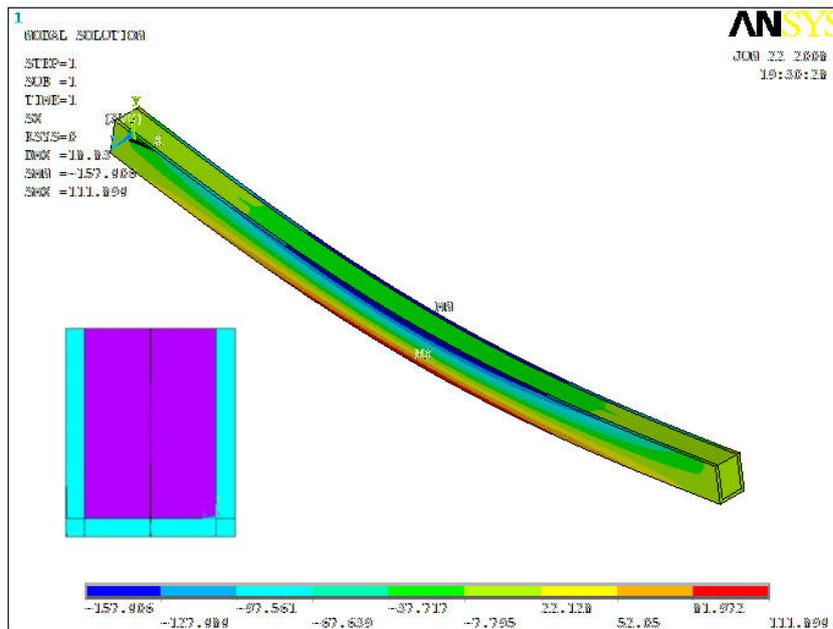


Figura 4.14 –Deformada da estrutura e seção do perfil U

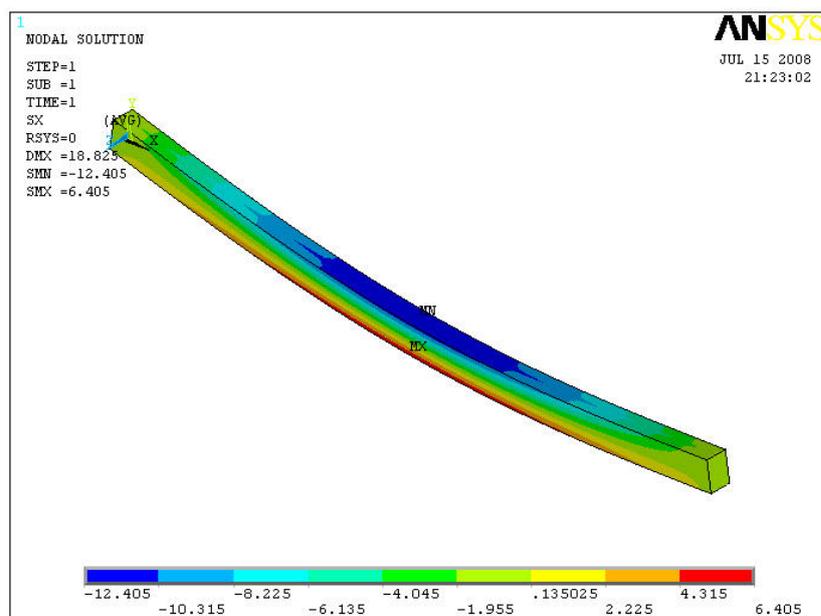


Figura 4.15 –Tensão normal (MPa) na madeira

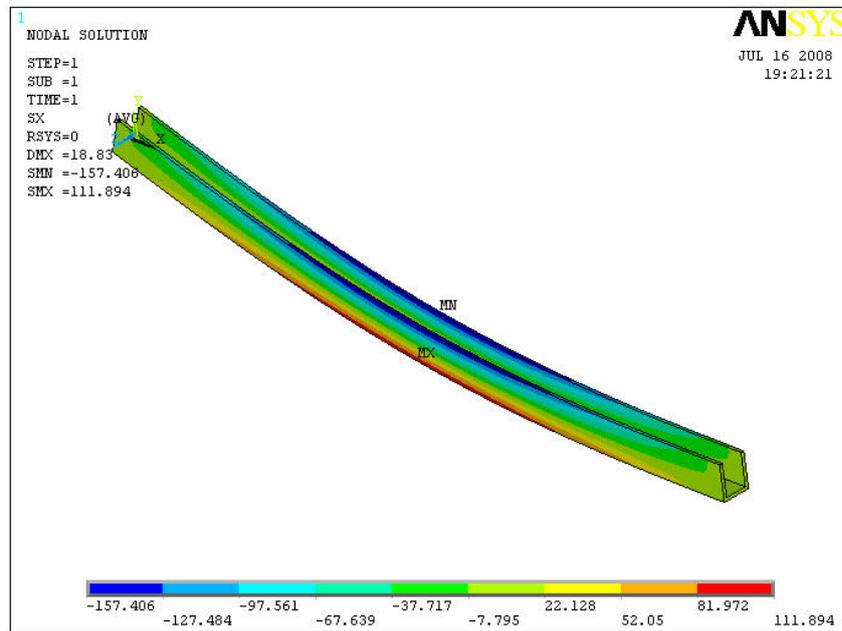


Figura 4.16 –Tensão normal (MPa) no aço

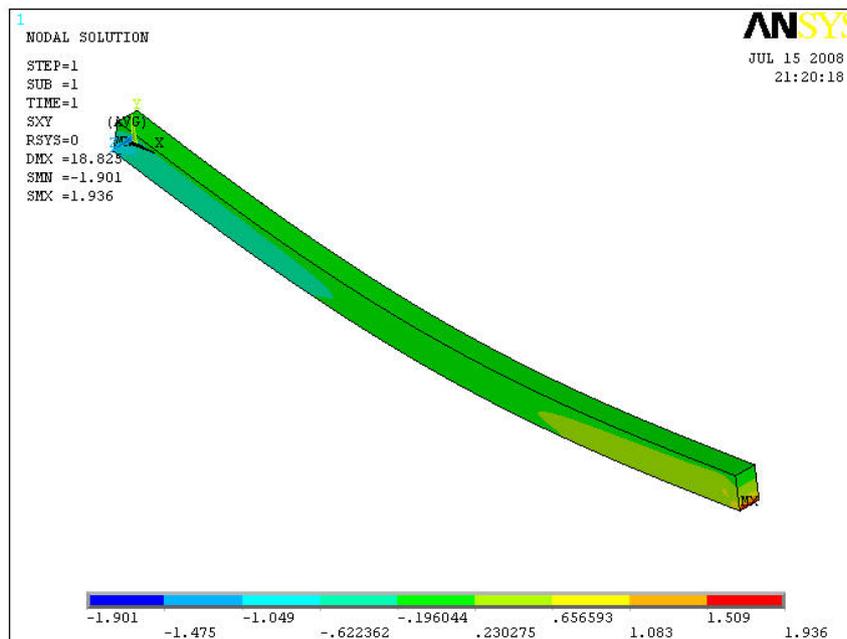


Figura 4.17 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira

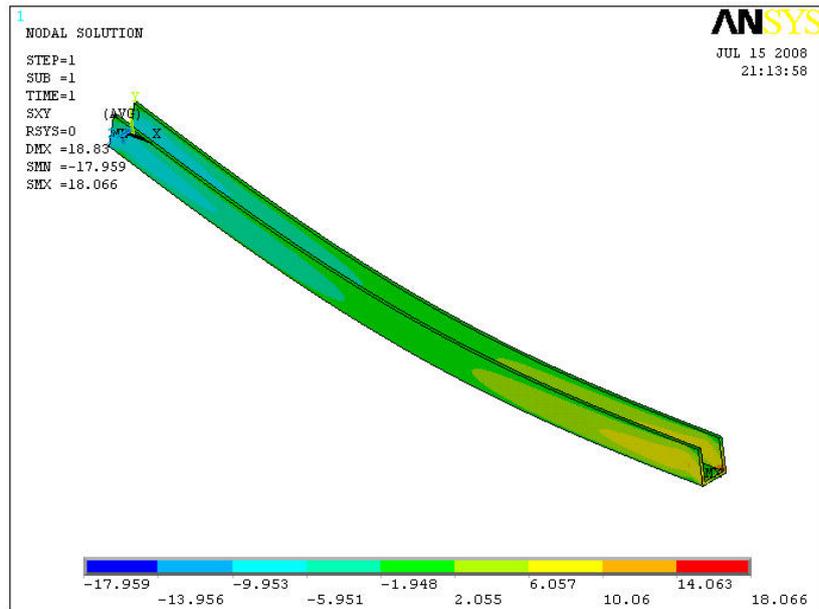


Figura 4.18 –Tensão cisalhante (MPa) no aço

#### 4.5. Reforço com chapa inferior

O modelo apresentado na Figura 4.19, refere-se a deformada da viga de madeira com a utilização de uma chapa de aço de 30mm de espessura na parte inferior. Com a elaboração de um modelo desenvolvido no Ansys, foi possível obter os valores da deformada, da tensão normal e da tensão cisalhante para cada material separadamente, apresentados nas Figura 4.20 a Figura 4.23.

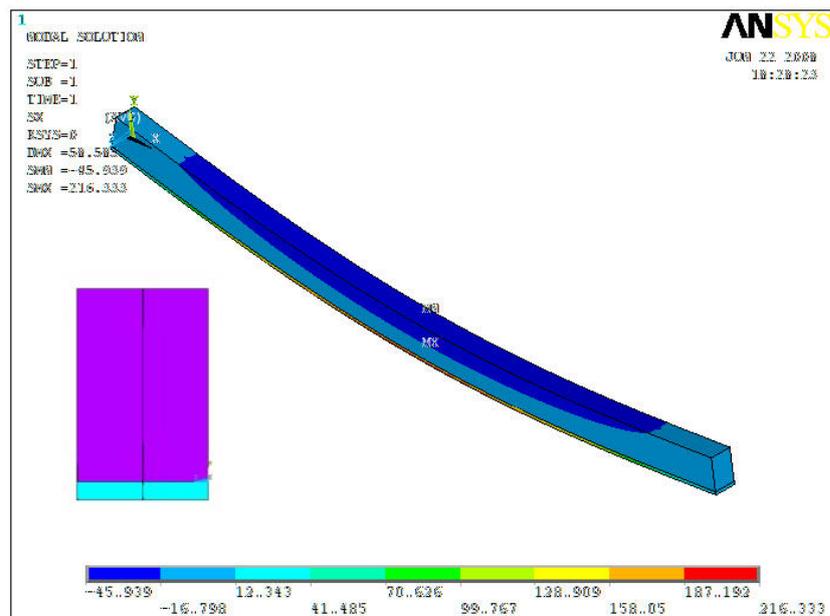


Figura 4.19 –Deformada da estrutura e seção da chapa inferior

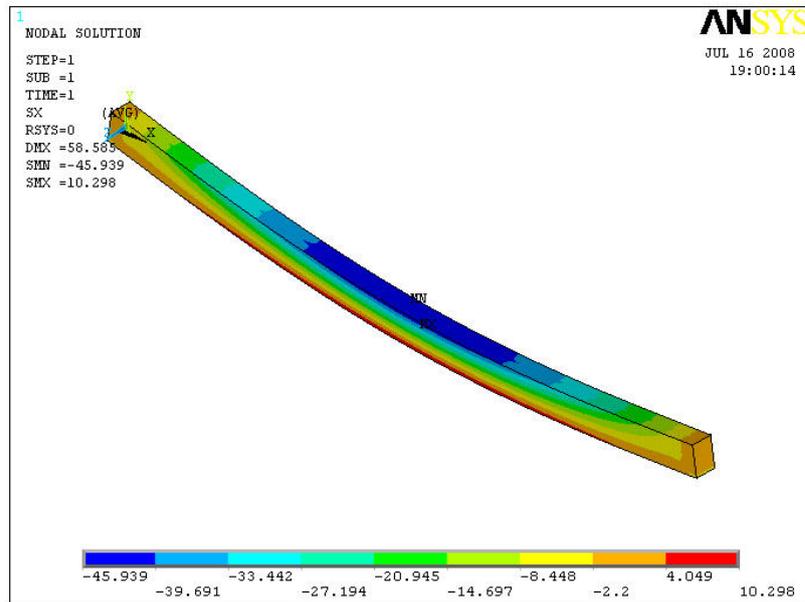


Figura 4.20 –Tensão normal (MPa) na madeira

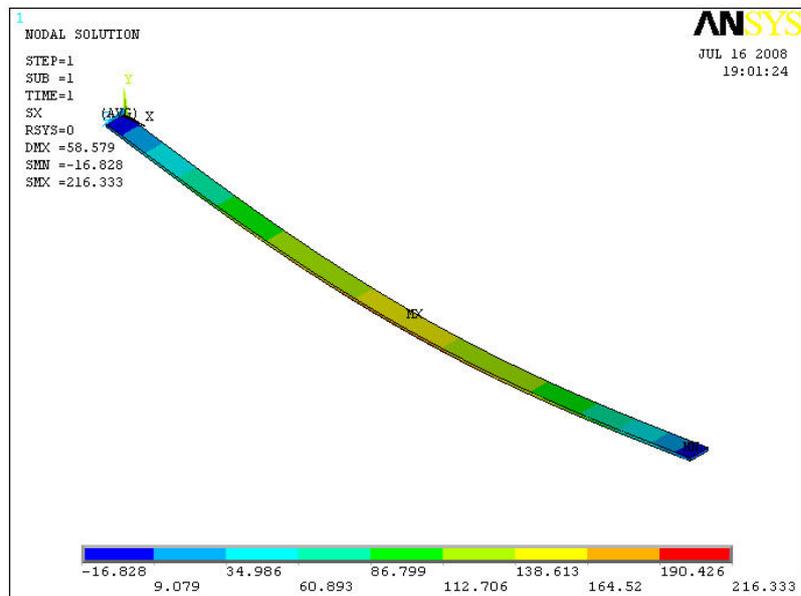


Figura 4.21 –Tensão normal (MPa) no aço

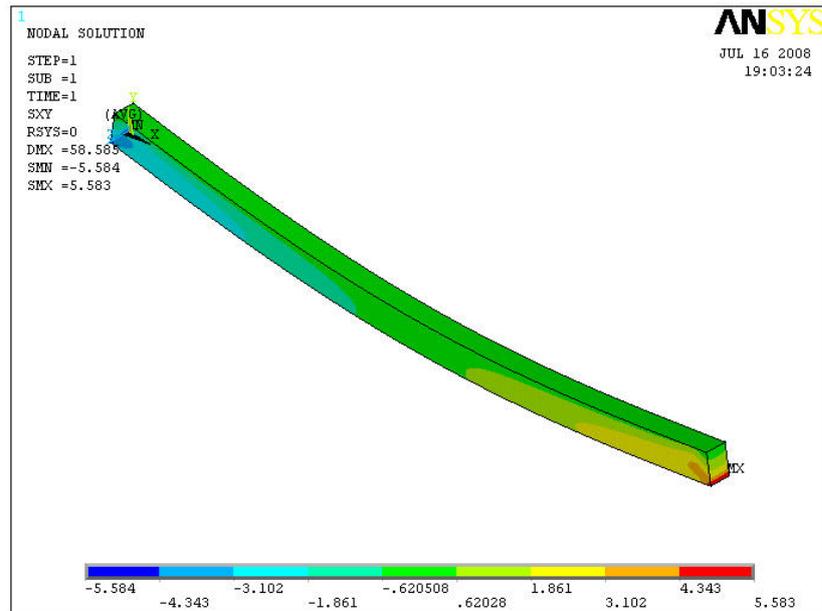


Figura 4.22 –Tensão cisalhante (MPa) na madeira

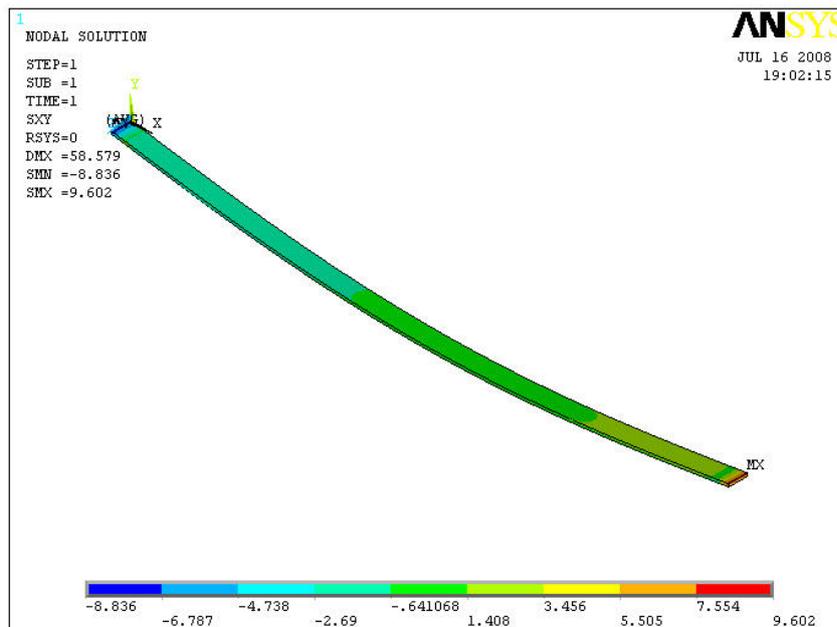


Figura 4.23 –Tensão cisalhante (MPa) no aço

#### 4.6. Reforço com Duas Chapas Laterais

O modelo apresentado na Figura 2.24, refere-se a deformada da viga de madeira com a utilização de duas chapas de aço, sendo colocada uma de cada lado, com 30mm de espessura cada chapa. Com a elaboração de um modelo desenvolvido no Ansys, foi possível obter os valores da deformada, da tensão normal e da tensão cisalhante para cada material separadamente, apresentados da Figura 4.25 a Figura 4.28.

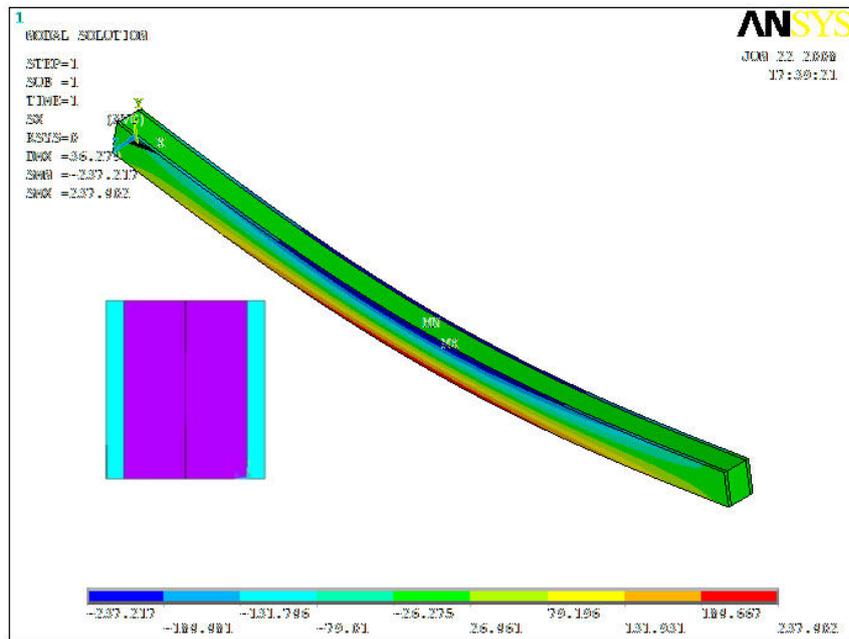


Figura 4.24 –Deformada da estrutura e seção da chapa lateral

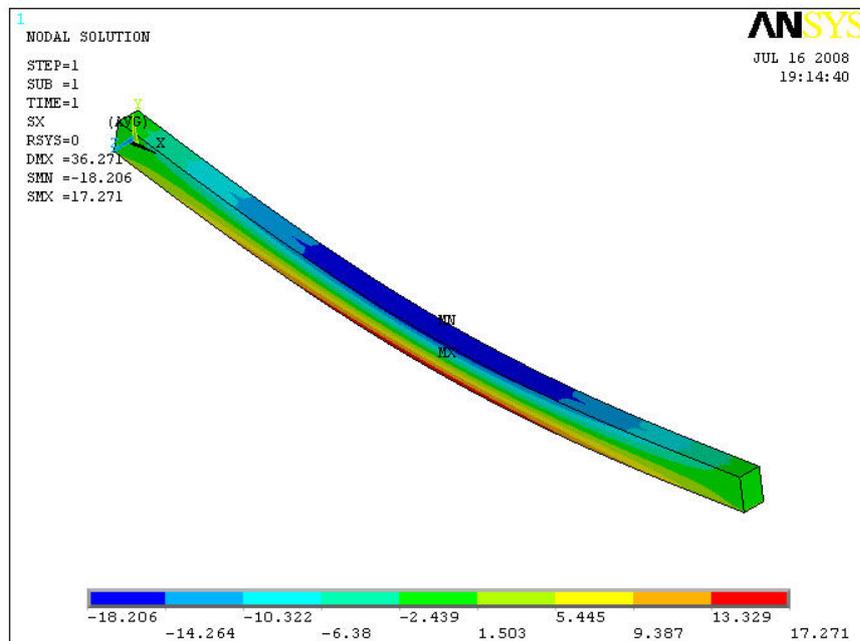


Figura 4.25 –Tensão normal (MPa) na madeira

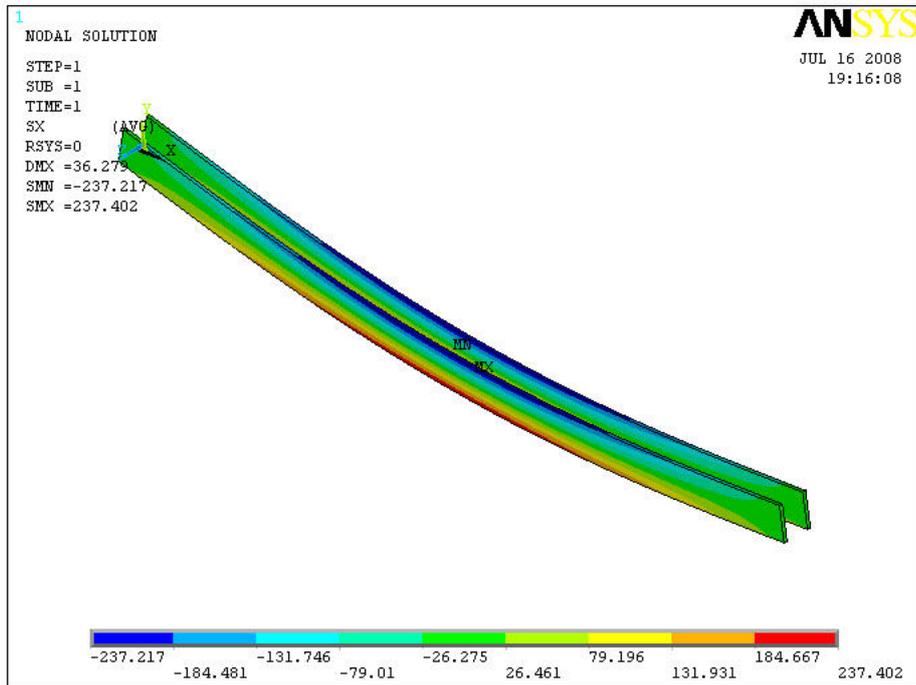


Figura 4.26 –Tensão normal no aço

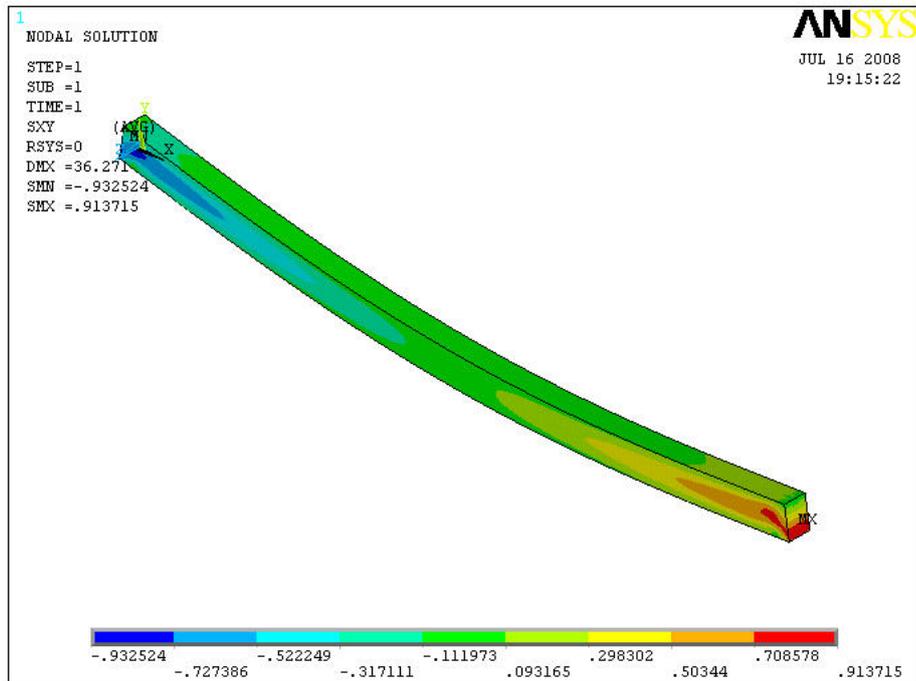


Figura 4.27 –Tensão cisalhante na madeira

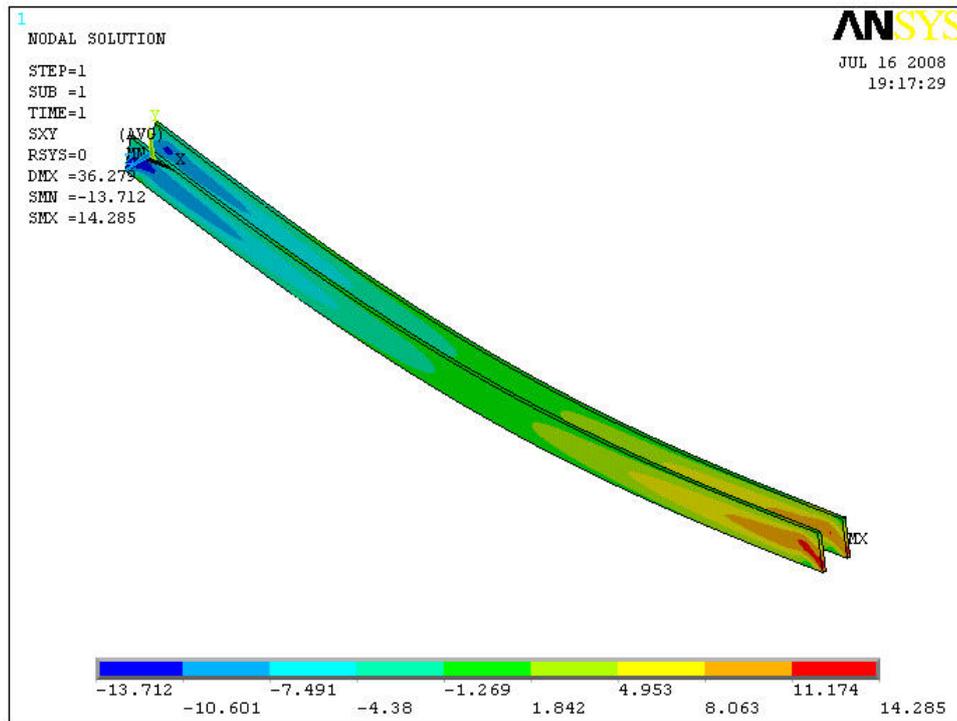


Figura 4.28 –Tensão cisalhante no aço

## **5. Considerações Finais**

Este trabalho teve como objetivo principal apresentar as diversas possibilidades e vantagens do uso das estruturas de aço em reformas, restaurações e reforço de estruturas existentes construídas com diversos materiais, tendo um enfoque especial no reforço com estrutura de aço em vigas de madeira.

Os próximos itens apresentam as principais conclusões obtidas neste trabalho e apresentação do melhor tipo de reforço estrutural para uma viga de madeira decorrente dos estudos realizados no decorrer deste projeto.

### **5.1. Conclusões**

Como pôde ser visto no primeiro capítulo, existem muitas edificações, principalmente no Rio de Janeiro, que estão em situação precária. Estas edificações deveriam passar por um completo processo de restauração para restabelecer sua funcionalidade, se não como originalmente projetada, mas com outra finalidade que também possa atender a comunidade.

No segundo capítulo inicialmente foi detalhado a terminologia referente aos processos de restauração e suas intervenções com por exemplo o “Gutting”, que é um dos processos de restauro mais usado, pois é mantida a fachada original e reprojeto todo o seu interior. Também foi detalhado o processo de “Insertion” onde foi citado como exemplo mais corrente a criação de pisos intermediários entre pisos existentes, o processo de “Vertical Addition” onde a altura da edificação é aumentada e o “Lateral Addition” que consiste em se ampliar a edificação lateralmente, na parte frontal, criando-se por exemplo, varandas e nos fundos da edificação. Finalmente exemplificou-se o processo de “Lightening”, onde que por necessidade de limitar a sobrecarga na estrutura existente trocam-se assoalhos, telhados e outros elementos estruturais por outros mais leves.

Foi visto que os métodos de reforço e reparo em estruturas de alvenaria, de madeira e de concreto armado são muito semelhantes. Em todos os casos a solução mais usual é a instalação de perfis de aço ou ao lado, ou sob os elementos a serem reforçados ou reparados. Já para as estruturas de ferro fundido e de aço a solução mais usada para o reparo ou reforço estrutural é a utilização de chapas de aço soldadas as peças a serem recuperadas.

Outro ponto importante disse respeito a conexão da nova estrutura com a fachada existente que pode ser feita com ou sem transmissão de carga da fachada para a nova

estrutura. Também foram citados alguns exemplos práticos da utilização de estruturas de aço para se reforçar ou restaurar uma edificação.

No terceiro capítulo foi feito a modelagem da malha padrão levando em consideração a análise de quatro diferentes tipos de malhas, sendo utilizada nas modelagem das malhas dos modelos dos reforços estruturais.

No quarto capítulo foram estudados cinco tipos de reforços estruturais, para a coleta de resultados referentes a deformação, a tensão normal e a tensão cisalhante com intuito de fornecer a viga de madeira uma maior capacidade de carga. A utilização de um perfil T, de um perfil U até a metade da altura da viga, de um perfil U, de um a chapa de aço colocada na parte inferior da viga e de duas chapas de aço colocadas nas laterais da viga.

## 5.2. Reforço estrutural mais adequado

Com os resultados coletados durante a elaboração deste projeto, dados estes apresentados na Tabela 5.1, obtidos pela modelagem de estruturas com reforços, através de um modelo em elementos finitos desenvolvido pelo programa computacional Ansys, foi possível chegar a conclusão de uma estrutura de aço capaz de minimizar as deformações, tensões normais e cisalhantes de uma viga de madeira, atuando como elemento que fará com que esta viga suporte uma carga maior sem que a mesma apresente deformações com valores superiores ao que possa resistir. Tendo em vista toda esta análise, pode-se afirmar que para este caso, pode-se adotar o reforço estrutural com perfil U, material este que envolve toda a parte inferior e as partes laterais da viga madeira citada neste projeto.

**Tabela 5.1 – Resultados obtidos pelo Ansys para escolha do melhor reforço**

Reforço	Flecha (mm)	Tensão (MPa)		T. Cisalh. (MPa)	
		Madeira	Aço	Madeira	Aço
Chapa inf	58,59	10,30	216,33	5,58	9,60
Chapa lat	36,28	17,27	237,40	0,91	14,29
<b>Perfil U</b>	<b>18,83</b>	<b>6,41</b>	<b>111,89</b>	<b>1,94</b>	<b>18,07</b>
Perfil U1/2	45,69	8,46	174,37	4,40	23,32
Perfil T	53,71	10,44	211,96	4,16	30,90

ADOTADO

## Referências Bibliográficas

- 1 Luiz Eduardo Teixeira Campos. **Técnicas de Recuperação e Reforço Estrutural com Estruturas de Aço**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- 2 **Revista de Domingo – Jornal do Brasil**. Ano29. Nº 1507. 20 de Março de 2005
- 3 PAKVOR, Aleksandar. **Rehabilitation: The Chance for Extending the Life of Structures**. IABSE SYMPOSIUM – Rio de Janeiro 1999. p. 34, 35
- 4 Wikipédia - A Enciclopédia Livre. **Ponte 25 de Abril** (disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_25\\_de\\_Abril](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_25_de_Abril))
- 5 CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço. <http://www.cbca-ibs.org.br/index.asp>
- 6 Artigo da XXXIII Jornada Sulamericana de Engenharia Estrutural
- 7 Coletânea do Uso do Aço 1 – “Interface entre Perfis Estruturais Laminados e Sistemas Complementares”. 3ª Edição. 2004. 63fls. GERDAU - Açominas
- 8 Rangel, F. **Uso Inédito do Aço Restaura Igreja**, Revista Construção Metálica, edição 72, 2005, pp. 36-37.
- 9 Curso **ESDEP – The European Steel Design Education Programme (WG 16)**. disponível em: <http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/wg16/toc.htm>

## Anexo A - Arquivo APDL

```
+++++
APDL da Malha Padrão
+++++
finish
/clear,nostart
/filename,madeira_3

/prep7

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST

+++++
Dimensões do elemento
+++++

l=6800 (comprimento da viga)

h=310 (altura da viga)

e=210 (largura da viga)

forca=50000*l/1000 !carga distribuída (carga aplicada sobre a viga)

+++++
Divisão da Malha
+++++

div_A=5 (número de divisões da malha do modelo referentes a largura)

div_B=10 (número de divisões da malha do modelo referentes a altura)

div_D=100 (número de divisões da malha do modelo referentes ao
comprimento)
```

+++++

Propriedades do Material

+++++

ET,1,SOLID64

MP,EX,1,14895 !aroreira-do-sertão (material que compõe a viga)

MP,PRXY,1,0.3

+++++

Montagem do Elemento

+++++

k,1,0,0,e

k,2,0,0,e/2

k,3,0,0,0

k,4,0,h,0

k,5,0,h,e/2

k,6,0,h,e

LSTR,1,2

LSTR,2,3

LSTR,3,4

LSTR,4,5

LSTR,5,6

LSTR,6,1

LSTR,2,5

AL,1,7,5,6

AL,2,3,4,7

VOFFST,1,1

VOFFST,2,1

```

+++++++
Montagem da Malha
+++++++

```

```

LESIZE,1,,,div_A
LESIZE,2,,,div_A
LESIZE,3,,,div_B
LESIZE,4,,,div_A
LESIZE,5,,,div_A
LESIZE,6,,,div_B
LESIZE,7,,,div_B
LESIZE,12,,,div_D
LESIZE,15,,,div_D
LESIZE,20,,,div_D
LESIZE,21,,,div_D
LESIZE,22,,,div_D
LESIZE,23,,,div_D
LESIZE,8,,,div_A
LESIZE,10,,,div_A
LESIZE,11,,,div_B
LESIZE,16,,,div_A
LESIZE,17,,,div_B
LESIZE,18,,,div_A
LESIZE,19,,,div_B

```

```
vmesh,all
```

```
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
```

```

+++++++
Aplicação dos Apoios
+++++++

```

```

NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,0
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,UX,UY

```

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0

NSEL,R,LOC,X,1

!NSLL,R,1

D,ALL,,,,,,,,UY

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0

NSEL,R,LOC,X,0

!NSLL,R,1

D,ALL,,,,,,,,UZ

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0

NSEL,R,LOC,X,1

!NSLL,R,1

D,ALL,,,,,,,,UZ

ALLSEL,ALL

/REPLOT

+++++

Aplicação da Carga no Elemento

+++++

NSEL,S,LOC,Y,h

NSEL,R,LOC,Z,e/2

\*GET,TOTALDENOS,NODE,,COUNT

F,ALL,FY,-forca/TOTALDENOS

ALLSEL,ALL

SAVE

/SOLU

SOLVE

+++++

```
+++++
APDL do Reforço com Perfil U
```

```
+++++
finish
```

```
/clear,nostart
/filename,perfil_U
```

```
/prep7
```

```
/VIEW,1,1,1,1
```

```
/ANG,1
```

```
/REP,FAST
```

```
+++++
Dimensões do elemento
+++++
```

```
l=6800 (comprimento da viga)
```

```
h=310 (altura da viga)
```

```
e=210 (largura da viga)
```

```
esp=30 (espessura da chapa do reforço)
```

```
forca=50000*l/1000 !carga distribuída (carga aplicada sobre a viga)
```

```
+++++
Divisão da Malha
+++++
```

```
div_A=5 (número de divisões da malha do modelo referentes a largura)
```

```
div_B=10 (número de divisões da malha do modelo referentes a altura)
```

div\_D=100 (número de divisões da malha do modelo referentes ao comprimento)

++++  
 Propriedades dos Materiais  
 ++++

ET,1,SOLID64

MP,EX,1,14895 !aroreira-do-sertão (material que compõe a viga)  
 MP,PRXY,1,0.3

MP,EX,2,205000 !aço (material que compõe o reforço)  
 MP,PRXY,2,0.3

++++  
 Montagem do Elemento  
 ++++

k,1,0,0,e  
 k,2,0,0,e/2  
 k,3,0,0,0  
 k,4,0,h,0  
 k,5,0,h,e/2  
 k,6,0,h,e

LSTR,1,2  
 LSTR,2,3  
 LSTR,3,4  
 LSTR,4,5  
 LSTR,5,6  
 LSTR,6,1  
 LSTR,2,5

AL,1,7,5,6  
 AL,2,3,4,7

VOFFST,1,1  
VOFFST,2,1  
VOFFST,4,esp  
VOFFST,9,esp  
VOFFST,7,esp  
VOFFST,17,esp  
VOFFST,10,esp  
VOFFST,20,esp

++++  
Montagem da Malha  
++++

LESIZE,1,,div\_A  
LESIZE,2,,div\_A  
LESIZE,3,,div\_B  
LESIZE,4,,div\_A  
LESIZE,5,,div\_A  
LESIZE,6,,div\_B  
LESIZE,7,,div\_B  
LESIZE,12,,div\_D  
LESIZE,15,,div\_D  
LESIZE,20,,div\_D  
LESIZE,21,,div\_D  
LESIZE,22,,div\_D  
LESIZE,23,,div\_D  
LESIZE,8,,div\_A  
LESIZE,10,,div\_A  
LESIZE,11,,div\_B  
LESIZE,16,,div\_A  
LESIZE,17,,div\_B  
LESIZE,18,,div\_A  
LESIZE,19,,div\_B

MAT,1

```
vmesh,1
vmesh,2
```

```
MAT,2
vmesh,3
vmesh,4
vmesh,5
vmesh,6
vmesh,7
vmesh,8
```

```
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
```

```
+++++
Aplicação dos Apoios
+++++
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-ESP
NSEL,R,LOC,X,0
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,UX,UY
ALLSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-ESP
NSEL,R,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Z,0
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,UZ
ALLSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-ESP
NSEL,R,LOC,X,1
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,UY
ALLSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-ESP
```

```
NSEL,R,LOC,X,1
NSEL,R,LOC,Z,0
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,UZ
ALLSEL,ALL
```

```
/REPLOT
```

```
+++++
Aplicação da Carga no Elemento
+++++
```

```
NSEL,S,LOC,Y,h
NSEL,R,LOC,Z,e/2
*GET,TOTALDENOS,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-forca/TOTALDENOS
ALLSEL,ALL
SAVE
```

```
/SOLU
```

```
SOLVE
```

```
++++
```

```
FIM
```

```
++++
```

```
+++++
```

```
+++++  
APDL do Reforço com Perfil T  
+++++
```

```
finish  
/clear,nostart  
/filename,perfil_T
```

```
/prep7
```

```
/VIEW,1,1,1,1  
/ANG,1  
/REP,FAST
```

```
+++++  
Dimensões do elemento  
+++++
```

```
l=6800 (comprimento da viga)
```

```
h=310 (altura da viga)
```

```
e=210 (largura da viga)
```

```
esp=30 (espessura da chapa do reforço)
```

```
forca=50000*l/1000 !carga distribuída (carga aplicada sobre a viga)
```

```
+++++  
Divisão da Malha  
+++++
```

```
div_A=5 (número de divisões da malha do modelo referentes a largura)
```

```
div_B=10 (número de divisões da malha do modelo referentes a altura)
```

div\_D=100 (número de divisões da malha do modelo referentes ao comprimento)

+++++

Propriedades dos Materiais

+++++

ET,1,SOLID64

MP,EX,1,14895 !aroreira-do-sertão (material que compõe a viga)

MP,PRXY,1,0.3

MP,EX,2,205000 !aço (material que compõe o reforço)

MP,PRXY,2,0.3

+++++

Montagem do Elemento

+++++

k,1,0,0,e

k,2,0,0,((e-esp)/2)+esp

k,3,0,h/2,((e-esp)/2)+esp

k,4,0,h/2,(e-esp)/2

k,5,0,0,(e-esp)/2

k,6,0,0,0

k,7,0,h,0

k,8,0,h,(e-esp)/2

k,9,0,h,((e-esp)/2)+esp

k,10,0,h,e

k,11,0,h,((e-esp)/2)+(esp/2)

k,12,0,h/2,((e-esp)/2)+(esp/2)

k,13,0,h/2,0

k,14,0,h/2,e

LSTR,1,2

LSTR,2,3

LSTR,3,12

LSTR,12,4

LSTR, 4, 5  
LSTR, 5, 6  
LSTR, 6, 13  
LSTR, 13, 7  
LSTR, 7, 8  
LSTR, 8, 4  
LSTR, 3, 9  
LSTR, 9, 11  
LSTR, 11, 8  
LSTR, 9, 10  
LSTR, 10, 14  
LSTR, 1, 14  
LSTR, 11, 12  
LSTR, 13, 4  
LSTR, 14, 3

AL, 1, 2, 16, 19  
AL, 11, 14, 15, 19  
AL, 3, 11, 12, 17  
AL, 4, 10, 13, 17  
AL, 5, 6, 7, 18  
AL, 8, 9, 10, 18

VOFFST, 1, 1  
VOFFST, 2, 1  
VOFFST, 3, 1  
VOFFST, 4, 1  
VOFFST, 5, 1  
VOFFST, 6, 1  
VOFFST, 23, (h/2)  
VOFFST, 18, (h/2)  
VOFFST, 42, esp  
VOFFST, 37, esp  
VOFFST, 8, esp  
VOFFST, 29, esp

```
+++++
Montagem da Malha
+++++
```

```
LESIZE,1,,div_A
LESIZE,6,,div_A
LESIZE,18,,div_A
LESIZE,19,,div_A
LESIZE,100,,div_A
LESIZE,108,,div_A
LESIZE,7,,div_B
LESIZE,8,,div_B
LESIZE,15,,div_B
LESIZE,16,,div_B
LESIZE,17,,div_B
LESIZE,72,,div_B
LESIZE,89,,div_B
LESIZE,104,,div_B
LESIZE,113,,div_B
LESIZE,103,,div_D
LESIZE,24,,div_D
LESIZE,87,,div_D
LESIZE,85,,div_D
LESIZE,93,,div_D
LESIZE,24,,div_D
LESIZE,87,,div_D
LESIZE,85,,div_D
LESIZE,93,,div_D
LESIZE,25,,div_D
LESIZE,71,,div_D
LESIZE,57,,div_D
LESIZE,109,,div_D
LESIZE,58,,div_D
LESIZE,27,,div_D
LESIZE,26,,div_D
LESIZE,41,,div_D
LESIZE,49,,div_D
```

```

LESIZE,34,,,div_D
LESIZE,59,,,div_D
LESIZE,33,,,div_D
LESIZE,42,,,div_D
LESIZE,50,,,div_D
LESIZE,65,,,div_D

```

```

NUMMRG,KP, , , ,LOW

```

```

MAT,1
vmesh,1
vmesh,2
vmesh,3
vmesh,4
vmesh,5
vmesh,6

```

```

MAT,2
vmesh,7
vmesh,8
vmesh,9
vmesh,10
vmesh,11
vmesh,12

```

```

NUMMRG,NODE, , , ,LOW

```

```

+++++
Aplicação dos Apoios
+++++

```

```

NSEL,S,LOC,Y,-ESP
NSEL,R,LOC,X,0
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,UX,UY
ALLSEL,ALL

```

```

NSEL,S,LOC,Y,-ESP
NSEL,R,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Z,0
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,,,,UZ
ALLSEL,ALL

```

```

NSEL,S,LOC,Y,-ESP
NSEL,R,LOC,X,1
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,,,,UY
ALLSEL,ALL

```

```

NSEL,S,LOC,Y,-ESP
NSEL,R,LOC,X,1
NSEL,R,LOC,Z,0
!NSLL,R,1
D,ALL,,,,,,,,UZ
ALLSEL,ALL
/REPLOT

```

```

+++++
Aplicação da Carga no Elemento
+++++

```

```

NSEL,S,LOC,Y,h
NSEL,R,LOC,Z,((e-esp)/2)+(esp/2)
*GET,TOTALDENOS,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-forca/TOTALDENOS
ALLSEL,ALL
SAVE
/SOLU
SOLVE

```

```

+++++
FIM
+++++

```