

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LARISSA CAMILO DE SOUZA LIMA E SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DA TESOURA DE CAIBRO-
ARMADO E SOLUÇÃO ESTRUTURAL EM AÇO PARA TELHADOS COLONIAIS**

Ouro Preto, novembro de 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LARISSA CAMILO DE SOUZA LIMA E SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DA TESOURA DE CAIBRO-
ARMADO E SOLUÇÃO ESTRUTURAL EM AÇO PARA TELHADOS COLONIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo

Ouro Preto, novembro de 2013.

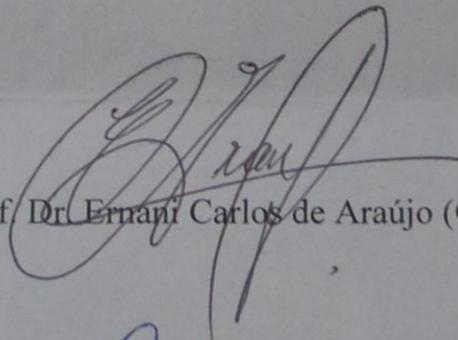
S586a	<p>Silva, Larissa Camilo de Souza Lima e. Avaliação do desempenho estrutural da tesoura de caibro-armado e solução estrutural em aço para telhados coloniais [manuscrito]/ Larissa Camilo de Souza Lima e Silva - 2014. 84f.: il. color.; graf.; tab.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Emani Carlos de Araújo.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Metálica.</p> <p>1. Imóveis - Teses. 2. Arquitetura colonial - Teses. 4. Conservação e restauração - Teses. 5. Preservação - Teses. I. Araújo, Emani Carlos de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 624.014:904:72</p>
-------	---

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

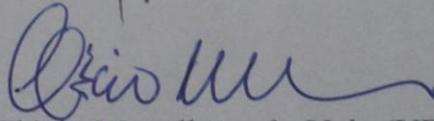
**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DA TESOURA DE
CAIBRO-ARMADO E SOLUÇÃO ESTRUTURAL EM AÇO PARA
TELHADOS COLONIAIS**

AUTOR: LARISSA CAMILO DE SOUZA LIMA E SILVA

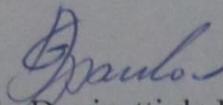
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 13 de novembro de 2013, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



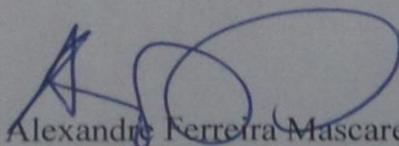
Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Clécio Magalhães do Vale (UFOP)



Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula (UFOP)



Prof. Dr. Alexandre Ferreira Mascarenhas (IFMG)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela Vida e todas as grandiosas oportunidades que me concede a cada novo amanhecer.

Ao Rafael Ribeiro pelo amor, carinho, paciência e apoio durante essa caminhada.

A minha família e amigos pelo incentivo e orações de apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo pelo incentivo, paciência, dedicação, aprendizado e confiança! Professor que me auxiliou bondosamente na realização deste trabalho, que para mim, é realização de um sonho.

Aos meus colegas de mestrado, em especial ao Carlos Roberto Jr. e Maicon Hillesheim pela ajuda em equipe, valiosa e indispensável colaboração no desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Também as amigas Camila Ferreira e Viviane Marçal pelo apoio nos momentos de dúvida e dificuldade.

Ao Prof. Dr. Clécio Magalhães pelo aprendizado e dedicação nos momentos iniciais deste trabalho, ao Prof. Dr. Tito Flávio de Aguiar pelo conhecimento e incentivo no estágio docência.

A Rovia Ribas por toda a colaboração e incentivo que simpaticamente nos oferece em seu trabalho na Secretaria do PROPEC.

Ao PROPEC pela oportunidade e confiança.

A Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade e formação profissional.

A FAPEMIG pelo apoio financeiro ao longo de todo o curso.

RESUMO

A arquitetura colonial brasileira é singular devido às diferentes influências europeias em sua concepção. Cidades como Ouro Preto e Diamantina, ambas em Minas Gerais, são referências mundiais da arquitetura de colônia, onde, apesar da primitiva arquitetura realizada, conseguiram, através de seus mestres de obras, edificar exímios monumentos da humanidade. As obras de conservação e restauro nas últimas décadas no Brasil tiveram um grande impulso, advindas da necessidade de preservação da nossa cultura e das diretrizes internacionais apresentadas através das cartas patrimoniais. Neste contexto este trabalho realiza um estudo numérico, através do software FTOOL (2012), da tesoura de caibro-armado, sistema construtivo bastante difundido entre os séculos XVII e XIX nas cidades históricas brasileiras. Foram realizadas vistorias em algumas edificações do centro histórico de Ouro Preto, com o apoio do PROGRAMA MONUMENTA/IPHAN, para maior conhecimento construtivo desta treliça. Como embasamento técnico e normativo seguiu-se a norma técnica brasileira NBR 7190:1997 para cálculo das ações atuantes nas estruturas de madeira. Os resultados mostraram que a resultante das forças na treliça em madeira é a principal fonte de patologia do sistema estrutural, indo de antemão ao que se acreditava que era o empuxo lateral que causava os deslocamentos e rotações nas paredes. Portanto foi sugerida a inserção da treliça de caibro-armado em aço, que para os cálculos das ações seguiu-se as diretrizes da norma brasileira NBR 8800:2008 para estruturas em aço, respeitando a arquitetura e espaços propostos pelo caibro-armado acrescidos dos benefícios do uso deste material.

Palavras-chave: restauração de imóveis, arquitetura colonial, análise estrutural.

ABSTRACT

The Brazilian colonial architecture is unique because of the different European influences in its design . Cities like Ouro Preto and Diamantina , both in Minas Gerais, are references global architecture colony, where, despite the primitive architecture held , managed , through their foremen , proficient build monuments of mankind . The works of conservation and restoration in recent decades in Brazil had a big boost , arising from the need to preserve our culture and international guidelines presented through letters equity . Therefore, this work carries out a numerical study , using software FTOOL (2012) , Shear rafter - armed, constructive system widespread between the seventeenth and nineteenth centuries in the historical Brazilian cities . Surveys were conducted in some buildings of the historic center of Ouro Preto , with the support of the PROGRAM MONUMENTA / IPHAN for greater constructive knowledge of this lattice . As technical foundation and normative followed the Brazilian NBR 7190:1997 standard technique for calculating the shares of the structures of wood. The results showed that the resultant of the forces in the truss wood is the primary source of structural system pathology going to advance it was believed that the lateral thrust causing displacements and rotations walls. Therefore it was suggested inserting the truss rafter - reinforced steel , for which the calculations of the actions followed the guidelines of the Brazilian standard NBR 8800:2008 for steel structures , respecting the architecture and spaces proposed by rafter - armed plus benefits the use of this material .

Keywords: building restoration, colonial architecture, structural analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Centro Histórico da Cidade de Ouro Preto, Minas Gerais.....	11
Figura 1.2 - Vista interna da Igreja de Santa Sofia, Constantinopla.....	13
Figura 1.3 - Vista interna do Teatro Municipal de Ouro Preto, Minas Gerais.....	14
Figura 2.1 - Ilustração de um corte transversal da madeira.....	22
Figura 2.2 - Ilustração de cortes na madeira.....	23
Figura 2.3 - Ilustração da anatomia de uma conífera.....	23
Figura 2.4 - Ilustração da anatomia de uma folhosa.....	24
Figura 2.5 - Anisotropia da madeira.....	25
Figura 2.6 - Os três eixos de crescimento da madeira.....	30
Figura 3.1 - Fábrica de chocolates Noisel-sur-Manne, França.....	36
Figura 3.2 - Galerie de Maschines. Paris, 1889.....	37
Figura 3.3 - Centro Georges Pompidou, França.....	37
Figura 3.4 - Mercado do Ver-o-peso, Belém.....	38
Figura 3.5 - Estação da Luz, São Paulo.....	39
Figura 3.6 - Edifício Garagem América. São Paulo, 1957.....	40
Figura 4.1 - Desenho de uma treliça de caibro-armado.....	49
Figura 4.2 - Peça em madeira atacada por agentes biológicos no telhado do Teatro Municipal de Ouro Preto.....	51
Figura 4.3 - Detalhe dos esforços e rotação das ações causados sobre a parede.....	52
Figura 4.4 - Deformação correspondente ao coeficiente de Poisson.....	54
Figura 4.5 - Treliça de Caibro-armado.....	62
Figura 4.6 - Fachada principal do Teatro Municipal de Ouro Preto, Minas Gerais.....	63
Figura 4.7 - Cobertura do Teatro Municipal de Ouro Preto.....	63
Figura 4.8 - Vista lateral da cobertura do Teatro.....	64
Figura 4.9 - Estrutura em madeira da cobertura em caibro-armado do Teatro.....	64
Figura 4.10 - Vista da cumeeira da cobertura do Teatro.....	65

Figura 4.11 - Detalhe da ligação entre os caibros na treliça.....	65
Figura 5.1 - Treliza de caibro-armado com o carregamento F_d para a madeira.....	67
Figura 5.2 - Resultado dos esforços normais.....	68
Figura 5.3 - Resultado dos esforços cortantes.....	68
Figura 5.4 - Momentos fletores.....	69
Figura 5.5 - Deformação máxima da treliça antes do colapso.....	69
Figura 5.6 -Sugestão de treliça.....	70
Figura 5.7 - Proposta de reliça com o carregamento das ações e os elementos de contorno já definidos.....	72
Figura 5.8 - Resultado dos esforços normais.....	73
Figura 5.9 - Resultado esforços cortantes.....	73
Figura 5.10 - Resultado do momento fletor.....	74
Figura 5.11 - Resultado da deformação máxima da treliça.....	74

GRÁFICOS

Gráfico 2.1- Gráfico comparativo de retratibilidades da madeira.....	28
Gráfico 3.1 - Gráfico Tensão x Deformação.....	41

TABELAS

Tabela 1.1- Quadro de Normas Técnicas Brasileiras.....	15
Tabela 2.1 - Classificação das árvores resinosas.....	27
Tabela 2.2 - Classificação das árvores folhosas.....	27
Tabela 2.3 - Variação da resistência e elasticidade das coníferas e dicotiledôneas.....	29
Tabela 2.4 - Classificação da madeira.	30
Tabela 2.5 - Classe de resistência das coníferas.....	31
Tabela 2.6- Classe de resistência das dicotiledôneas.	32
Tabela 3.1- Propriedades mecânicas dos aços estruturais.....	45
Tabela 4.1 - Características físicas e mecânicas da espécie Peroba-rosa.....	53
Tabela 4.2 - Coeficientes para ações permanentes.....	56
Tabela 4.3 - Coeficientes para ações variáveis.....	57
Tabela 4.4 - Coeficientes de minoração.....	57
Tabela 4.5- Característica das telhas.....	59
Tabela 4.6 - Propriedades da madeira a ser utilizada.....	59
Tabela 4.7- Dados das ripas.....	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Conceitos Iniciais	11
1.2. O Patrimônio Edificado	15
1.2.1. A Autenticidade Material	16
1.2.2. As Intervenções	17
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1 Gerais.....	19
1.3.2. Específicos.....	19
1.4. Metodologia Adotada	19
1.5. Estrutura do Trabalho	20
2. A MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	22
2.1. Classificação.....	22
2.2. Anatomia da Madeira	22
2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira	25
2.3.1. Umidade	26
2.3.2. Densidade	26
2.3.3. Retratibilidade	28
2.3.4. Resistência a Incêndios.....	28
2.3.5. Módulo de elasticidade.....	29
2.3.6. Variação de resistência e elasticidade	29
2.3.7. Heterogeneidade	29
2.4. Classes de Resistência da Madeira	31
2.5. Propriedades Mecânicas da Madeira	32
2.5.1. Resistência à Compressão	32
2.5.2. Resistência à Tração	32
2.5.3. Resistência à Flexão	33
2.5.4. Resistência ao Choque.....	33
2.5.5. Resistência ao Corte/cisalhamento	33
2.5.6. Resistência ao Fendilhamento	33
2.5.7. Elasticidade.....	34
2.5.8. Fluência e Fadiga.....	34
3. O AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	35
3.1. Breve Histórico do Aço e seu Uso na Construção Civil	35
3.2 Propriedades do Aço.....	40

3.3 Os Aços Estruturais	43
3.3.1. Classificação.....	43
3.3.2. Propriedades	45
3.4. A Aplicabilidade do Aço em Intervenções de Edificações Históricas	46
4. A TESOURA DE CAIBRO-ARMADO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL DE ESTUDO DE CASO	48
4.1. Caibro-armado.....	48
4.2 Parâmetros Técnicos para o Desenvolvimento do Estudo de Caso.....	52
4.2.1. Para Estados Limites Últimos	56
4.2.2. Coeficientes para Ações Permanentes e Variáveis.....	56
4.3. Especificações para a Treliza de Caibro-armado	58
4.3.1. Cálculo das Cargas Atuantes	60
4.3.1.1. Cargas Permanentes.....	60
4.3.2. Verificação dos Estados Limites Últimos	61
4.4. Análise Estrutural	61
5. RESULTADOS	66
5.1. Resultados das Análises Numéricas na Tesoura de Caibro-armado.....	66
5.2. Proposta de Tesoura	70
6. CONCLUSÃO.....	76
6.1. Sugestões para Futuros Trabalhos	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Conceitos Iniciais

A arquitetura colonial é a grande referência histórica edificada do descobrimento ao desenvolvimento do Brasil Colônia. Segundo Custódio (2011) o período colonial brasileiro teve desenvolvimento entre os anos de 1500 (chegada e Pedro Álvares Cabral ao Brasil) a 1822 (com a Independência do Brasil). Entretanto o uso do termo “colonial” destina-se a uma expressão designada para o uso da arquitetura realizada na época nas Américas e não como categoria de análise como é vulgarmente utilizada.

Como agente colonizador Portugal trouxe suas referências arquitetônicas para a então colônia brasileira. No entanto, devido às invasões territoriais e à extensão continental do nosso país outros países europeus como a Holanda, Alemanha, Inglaterra e Espanha também impuseram suas influências na arquitetura brasileira. Algumas características podem ser observadas como edificações margeando vias públicas, inexistência de afastamento frontal e lateral entre os imóveis e os urbanos são exemplo da herança nas colonizações europeias.

Figura 1.1 - Centro Histórico da Cidade de Ouro Preto, Minas Gerais.



Fonte: Bonfim, 2013.

Com a escassez de mão de obra qualificada e tendo-se que utilizar as matérias primas disponíveis na região, a arquitetura desenvolvida nos centros urbanos era bastante rudimentar.

Tirapeli (2006) afirma que os estilos predominantes da arquitetura colonial foram o barroco, rococó e maneirista “presentes em construções militares, civis e religiosas no litoral, no interior e em Minas Gerais, principalmente, a partir do século XVIII”. E acrescenta: “Logo após o Descobrimento do Brasil, as primeiras construções realizadas foram às fortalezas, erguidas com o objetivo de defesa das vilas e cidades litorâneas. Os arquitetos eram militares e, posteriormente, padres jesuítas, que fundaram vilas e construíram igrejas e conventos”. Campos (2006) complementa que: “o homem geralmente edifica a casa e suas dependências em conformidade com a experiência e os valores sociais de seu tempo”.

Hoje, a referência histórica brasileira edificada advém da arquitetura colonial, sendo assim a base da cultura construtiva de nosso país. As principais referências que tratam da preservação e conservação dos bens culturais são as Cartas Patrimoniais, onde estão discutidas as metodologias e diretrizes a serem consideradas nas intervenções dos acervos culturais.

A Carta de Burra (1980) afirma que: “a restauração deve servir para demonstrar novos aspectos em relação à significação cultural do bem. Ela se baseia no princípio do respeito aos conjuntos de testemunhos disponíveis, sejam materiais, documentais ou outros, e deve parar quando começar a hipótese.” A preservação de nossa cultura está intimamente ligada à conservação de nossos bens, e para o exercício pleno desta atividade se faz necessário o estudo das técnicas para evitar o falso histórico.

O falso histórico é a alteração construtiva de registros históricos ou arquitetônicos de um monumento. Esse tipo de intervenção apresenta como característica a criação, modificação ou recomposição do bem material a fim acrescentar novos registros recriando a história.

A preservação e conservação de bens históricos edificados são temas que exigem conhecimento específico, evitando assim a aplicabilidade dos conhecimentos empíricos muitas vezes inadequados, geralmente adotados nas obras de restauro pelas empresas, que não garantem a credibilidade da intervenção. Com isso, para a intervenção em edificações históricas, faz-se necessário um estudo indispensável da combinação entre o conhecimento científico e cultural do patrimônio arquitetônico.

Segundo o Comitê Científico para Análise e Restauração de Imóveis do Patrimônio Arquitetônico uma obra de intervenção demanda tanto dados qualitativos, baseados em observações diretas da deterioração e de danos estruturais, pesquisas históricas, quanto de

dados quantitativos baseados em testes específicos e modelos matemáticos usados na engenharia moderna, visando encontrar soluções mais adequadas para o problema de resistência, transporte, da aplicação em obra, de operacionalidade funcional e estética perante as estruturas existentes. (ICOMOS, 2001).

Em um breve estudo sobre a história do aço, descobre-se que entre os séculos XIX e XX a combinação do aço com madeira, pedra e argila, predominou em toda a construção neoclássica, até quando ocorreu a adoção do concreto como sistema construtivo, deixando em segundo plano a madeira e a pedra.

A aplicabilidade do uso das estruturas metálicas nas edificações, principalmente como reforço estrutural, é anterior ao ano de 1523, advindo da época do Renascimento conforme observado por Santos e Reis (1996). Como exemplo cita-se a Igreja de Santa Sofia de Constantinopla, (Fig. 1.2), onde barras de ferro fundido aparecem como elemento construtivo nos arcos e abóbadas colaterais.

Figura 1.2 - Vista interna da Igreja de Santa Sofia, Constantinopla.

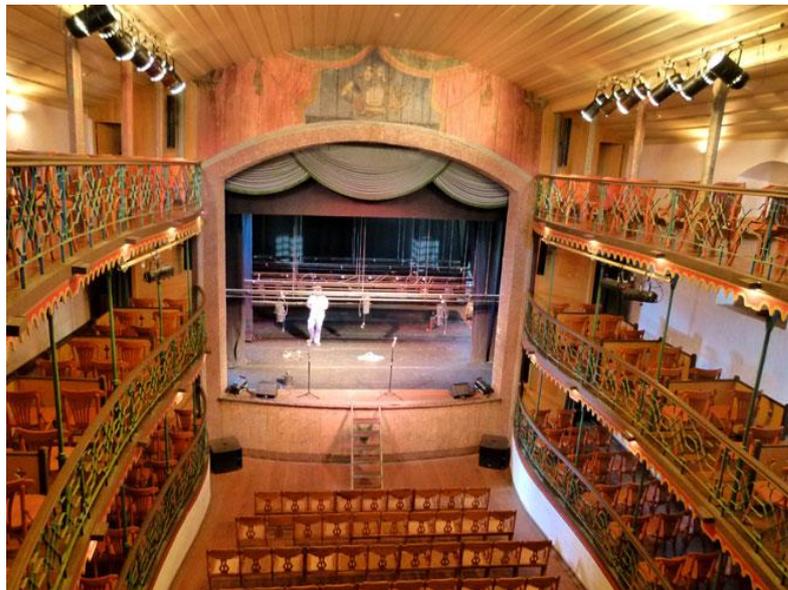


Fonte: Paiva, 2013.

As estruturas metálicas em ferro fundido foram ainda largamente utilizadas nos séculos XVIII e IX, fruto do período da Revolução Industrial na Europa. Em Minas Gerais a primeira estrutura metálica a ser utilizada na arquitetura foi em 1860, sendo uma iniciativa pioneira no cenário brasileiro. Um investimento do último primeiro-ministro do Império Afonso Celso de

Assis Figueiredo, o Visconde de Ouro Preto, que autorizou o uso deste material na primeira reforma da Casa da Ópera de Vila Rica, hoje renomeado Teatro Municipal de Ouro Preto. (Fig. 1.3).

Figura 1.3 - Vista interna do Teatro Municipal de Ouro Preto, Minas Gerais.



Fonte: Vicente, 2013.

Apesar das diretrizes apresentadas em documentos, como as Cartas Patrimoniais, é importante mencionar que não existem atualmente normas para a prática de conservação e restauro de bens culturais imóveis, apenas uma resolução criada pelo ICOMOS (2001). Onde são observados os limites e critérios a serem obedecidos pelos construtores e restauradores no canteiro de obras.

Com a carência de normas específicas para a prática de conservação e restauro em bens edificados, algumas normas brasileiras direcionadas ao uso do aço, madeira, dimensionamento estrutural e a verificação de esforços atuantes fornecem o embasamento teórico sugerido aos profissionais da área. (Tabela 1.1).

Tabela 1.1- Quadro de Normas Técnicas Brasileiras.

NORMA	ANO	DESCRIÇÃO
NBR 6120	1980	Cargas para o cálculo de estruturas de edificações
NBR 8681	1984	Ações e seguranças nas estruturas - Procedimento
NBR 6123	1988	Forças devidas ao vento em edificações
NBR 7190	1997	Projeto de estruturas de madeira
NBR 8800	2008b	Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios

1.2. O Patrimônio Edificado

No que diz respeito ao patrimônio edificado, o documento brasileiro gerado na reunião regional do Cone Sul, A Carta de Brasília (1995), apresenta diretrizes sobre autenticidade, como:

“... A intervenção contemporânea deve resgatar o caráter do edifício ou do conjunto – destarte rubricando sua autenticidade – sem transformar sua essência e equilíbrio, sem se deixar envolver em arbitrariedades, mas sim enaltecendo seus valores.”

A adoção de novos usos a edifícios de valor cultural é factível sempre que exista um reconhecimento apriorístico do edifício e um diagnóstico preciso das intervenções e dos novos elementos a serem introduzidos, e que estes tenham um caráter reversível e se harmonizem com o conjunto.

O respeito à preservação do pré-existente torna-se uma referência fundamental, pois consolida a possibilidade de interação entre o passado e o presente.

A primeira manifestação oficial para a preservação do patrimônio no Brasil ocorreu com um pedido do SPHAN a Mário de Andrade, solicitando ao mesmo preparar um documento que criasse uma instituição de proteção aos monumentos edificados, visando a reafirmação cultural nacional – (IPHAN, 2008). Com a criação deste documento foram iniciadas as discussões sobre os objetivos do então Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (SPHAN), que fora fundado em 13 de janeiro de 1937 no Governo de Getúlio Vargas, pela lei nº 378. Atualmente, após algumas mudanças, o antigo SPHAN denomina-se Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional, o IPHAN.

Dentre as competências hoje designadas ao IPHAN cita-se: a fiscalização, proteção, identificação, preservação, restauração, revitalização e conservação dos bens culturais materiais e imateriais. Estes serviços são realizados pelos agentes públicos, funcionários efetivos ou terceirizados. O IPHAN apresenta como função principal do órgão público a preservação da autenticidade do bem cultural.

1.2.1. A Autenticidade Material

Segundo a Carta de Brasília (1995), a autenticidade dos bens culturais é real quando há correspondência entre o objeto material e seu significado, preservando assim a mensagem original cultural do bem. A valorização das tradições culturais locais é a estratégia para a conservação da autenticidade.

Segundo a Carta de Burra (1980) a conservação e autenticidade definem-se da seguinte forma:

“O termo conservação designará os cuidados a serem dispensados a um bem para preservá-lo as características que apresentem uma significação cultural. De acordo com as circunstâncias, a conservação implicará ou não na restauração. (...) O termo manutenção designará a proteção contínua da substância, do conteúdo do entorno de um bem e não deve ser confundido com o termo reparação. A reparação implica a restauração e a reconstrução, e assim será considerada.

O objetivo da conservação é preservar a significação cultural de um bem; ela deve implicar medidas de segurança e manutenção, assim como disposições que prevejam sua futura destinação. (...) se baseia no respeito a substância existente e não deve deturpar o testemunho nela existente.

As técnicas empregadas devem, em princípio, ser de caráter tradicional, mas pode, em determinadas circunstâncias, utilizar técnicas modernas, desde que assentem em bases científicas e que sua eficácia seja garantida por certa experiência acumulada.

As opções assim efetuadas determinarão as futuras destinações consideradas compatíveis para o bem. As destinações compatíveis são as que implicam a ausência de qualquer modificação.

A conservação de um bem exige a manutenção de um entorno visual apropriado, no plano das formas, da escala, das cores, da textura, dos materiais, etc. Não deverão ser permitidas qualquer nova construção, nem qualquer demolição ou modificação susceptíveis de causar prejuízo ao entorno. A introdução de elementos estranhos ao meio circundante, que prejudiquem a apreciação ou fruição do bem, deve ser proibida.”

1.2.2. As Intervenções

Antes de tudo, para uma satisfatória conservação dos monumentos é imprescindível a periodicidade na manutenção. Como indica nos artigos 9 e 13 da Carta de Veneza, o objetivo da restauração é conservar a estrutura histórica, melhorando a função e preservando a legitimidade cultural, sua concepção e sua aparência original.

A inserção dos novos materiais o uso de técnicas contemporâneas nos processos de restauro devem ser usados quando a durabilidade, o comportamento estrutural e as tecnologias de construção apresentam resultados mais satisfatórios aos métodos originais encontrados no bem. Os sistemas de combate e prevenção a incêndios, sistemas de segurança e ventilação, por exemplo, devem ser inseridos com o devido respeito à importância histórica, estética e estrutural.

A recomposição dos materiais deve harmonizar com o conjunto, substituindo às partes faltantes. Contudo, as novas inserções devem ser distinguidas, afim de não falsificar o documento de arte e de história. Já os acréscimos só poderão ser aceitos respeitando a história do edifício, composição inicial e sua relação com o entorno.

A Carta de Veneza (1964) define o processo de restauração em um bem sendo como:

“... uma operação que deve ter caráter excepcional. Tem por objetivo conservar e revelar os valores estéticos e históricos do monumento e fundamentar-se no respeito ao material original e aos documentos autênticos. Termina onde começa a hipótese: no plano das reconstruções conjecturais, todo trabalho complementar reconhecido como indispensável por razões estéticas ou técnicas destacar-se-á da composição arquitetônica e deverá ostentar a marca do nosso tempo. A restauração será sempre precedida e acompanhada de um estudo arqueológico e histórico do monumento.”

Segundo o IPHAN a restauração é o conjunto de intervenções em um determinado edifício, sítio urbano ou paisagem que se fazem necessárias quando as obras ou serviços de conservação se mostram insuficientes para garantir a integridade.

Segundo Klen e Silva Filho (2003), para iniciar uma intervenção em uma edificação histórica, é importante conhecer e entender seu sistema construtivo da edificação original, tendo em vista as futuras intervenções a serem realizadas. Este conhecimento permite a avaliação da estabilidade atual da edificação bem como um correto procedimento no caso de necessidade de reforço estrutural. Segundo os autores, uma avaliação equivocada dos elementos portantes da edificação original pode acarretar sérios problemas em sua recuperação. Assim, conhecendo-se o comportamento estrutural da antiga edificação, é possível determinar a melhor tecnologia a ser implantada na intervenção. O importante, acima de tudo, é a sintonia entre os materiais novos e antigos, que, trabalhando em conjunto ou separadamente, contribuindo assim para aumentar a vida daquele bem.

O projeto de restauração de uma estrutura é um processo que envolve diversas etapas como a análise estrutural do sistema a ser recuperado, a definição dos materiais a serem utilizados neste processo, dimensionamento das tipologias, detalhamento, especificações e etc. O resultado final representa uma síntese de decisões tomadas por uma equipe multidisciplinar, ao longo do desenvolvimento do projeto de restauro.

A inserção da estrutura metálica em projetos de restauro apresenta uma ampla gama de possibilidades que podem ser adotadas. A informática, por meio de avanços no desenvolvimento de programas computacionais, tornou possível a simulação do desempenho de diversas tipologias estruturais, antes de tomar uma decisão final sobre a melhor solução adotada.

No caso específico de projeto de restauro de telhados coloniais, nota-se que o conhecimento ainda é bastante empírico, fazendo-se necessárias pesquisas acadêmicas para embasamento teórico mais eficiente e adequado às tipologias estruturais a serem restauradas.

A fim de solucionar problemas de ordem estrutural e sugerir diretrizes teóricas este trabalho espera contribuir para as futuras obras de intervenções em edificações históricas que possuem em sua cobertura a tesoura de caibro-armado, propondo uma solução com melhor

desempenho estrutural, adequada para concepção de projetos de restauro e afins, mantendo as características arquitetônicas e estéticas características do caibro-armado.

1.3. Objetivos

1.3.1 Gerais

Estudar e analisar os esforços e patologias decorrentes das cargas atuantes na treliça de caibro-armado, propondo a mesma tipologia estrutural com novo material (aço) a substituir satisfatoriamente a tipologia estudada.

1.3.2. Específicos

- Identificação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas relevantes da madeira estrutural que era utilizada nas coberturas deste sistema construtivo, muito difundido naquela época;
- A avaliação conceitual e prática das técnicas construtivas para cobertura.
- Estudo e análise do comportamento estrutural da treliça de caibro-armado;
- Identificação dos problemas patológicos da treliça e diretrizes para solução;
- Análise numérica pelo método dos elementos finitos (*FTOOL*, 2012) da treliça em tanto na madeira como em aço, para as futuras propostas estruturais;

1.4. Metodologia Adotada

O desenvolvimento deste trabalho abrange abordagens teórico-investigativa e numérica.

A abordagem teórico-investigativa engloba as seguintes etapas:

- I. Análise teórica da tesoura de caibro-armado implementada nas coberturas das edificações do século XVIII ao XIX no centro histórico da cidade de Ouro Preto;
- II. Identificação macro das propriedades físicas e mecânicas relevantes das espécies de madeira que eram utilizadas nas construções das coberturas entre os séculos XVII e XIX;
- III. Estudo das normas técnicas e artigos específicos;
- IV. Estudo e análise das patologias estruturais apresentadas pela treliça de caibro-armado;

A abordagem numérica deste trabalho compreende uma análise modal utilizando o *software FTOOL* (2012), em função do tipo de material utilizado e modulação necessária para o estudo

dos esforços solicitantes na treliça. A configuração de carregamento nesta tipologia de cobertura foi incluída também como parâmetro importante de análise.

O programa *FTOOL* (2012), desenvolvido pelo Professor Luiz Fernando Martha da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), é um software de cálculo estrutural que permite executar análises de estruturas planas de forma rápida e intuitiva. Através deste *software* é possível desenvolver análises estruturais bidimensionais, construindo os gráficos de momento fletor, normal e cortante, linha elástica e gráfico de configuração deformada. Como ferramenta educacional, o *FTOOL* (2012), se destina ao ensino do comportamento estrutural de pórticos planos, ocupando um espaço pouco explorado por programas educativos, que se preocupam mais com o ensino das técnicas numéricas de análise, ou por versões educacionais e programas comerciais, mais preocupados em introduzir o estudante às suas interfaces.

1.5. Estrutura do Trabalho

O capítulo I apresenta as características arquitetônicas do período de colonização no Brasil. É realizada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de restauração e conservação de bens tombados, juntamente com as diretrizes vigentes. Além disso, evidencia-se uma breve delimitação dos objetivos e da metodologia adotada neste trabalho.

O capítulo II estuda a madeira como elemento estrutural, realçando suas propriedades físicas e mecânicas.

O capítulo III discorre sobre a história do aço e sua aplicabilidade na construção civil. Estuda-se as propriedades físicas e mecânicas do aço. Em seguida é apresentado um comparativo entre o aço e a madeira como elementos estruturais.

O capítulo IV apresenta o estudo de caso: a tipologia de tesoura em madeira estudada e analisada neste trabalho, descrevendo um breve contexto histórico da cobertura e sua patologia estrutural.

O capítulo V descreve os procedimentos e parâmetros adotados para análise da tesoura, embasados nas normas brasileiras vigentes. Em seguida apresenta-se a modelagem numérica da tesoura em madeira no *software FTOOL* (2012).

O capítulo VI apresenta os resultados e uma nova proposta de tesoura em aço, via *software FTOOL* (2012), mostrando a eficiência do modelo em aço da tesoura desenvolvido.

O capítulo VII apresenta a conclusão este trabalho, em seguida uma sugestão para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

2. A MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

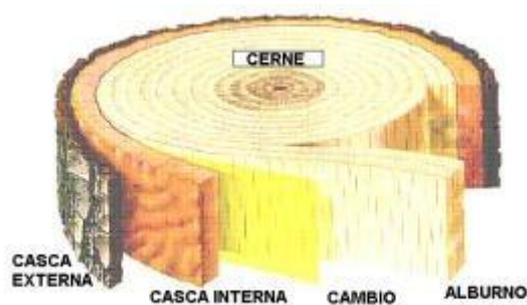
2.1. Classificação

A madeira é definida pela botânica como sendo um material de tecido xilemático dos vegetais superiores, localizado no tronco e nos galhos das árvores. As árvores são subdivididas em dois grupos, as gimnospermas e as angiospermas. A quantidade de cotilédones existente nas sementes é o principal elemento que subdivide as angiospermas em duas classes: as monocotiledôneas e as dicotiledôneas. O cotilédone é a parte da semente-embrião do vegetal que pode desenvolver as primeiras folhas de uma plântula, sendo, geralmente, estruturalmente diferente das outras folhas, contendo os nutrientes essenciais para o desenvolvimento do vegetal.

2.2. Anatomia da Madeira

A estrutura do tronco de uma árvore pode ser descrita, segundo Gonzaga (2006), simplificadamente, como sendo uma pilha de cones superpostos. O tronco, quando cortado transversalmente, apresenta “anéis” de crescimento ou anéis anuais, que determinam o tempo de desenvolvimento da árvore. (Fig 2.1 e 2.2)

Figura 2.1 - Ilustração de um corte transversal da madeira.



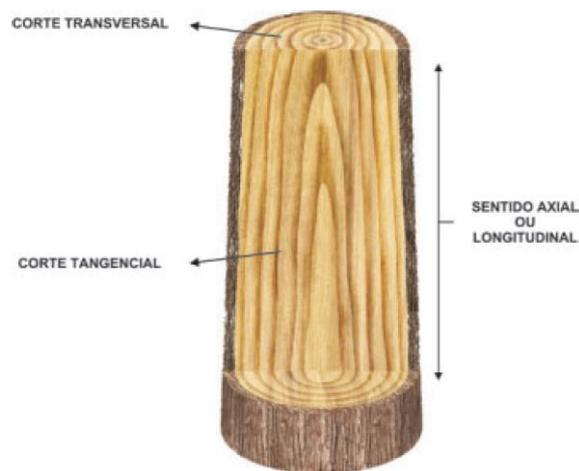
Fonte: IPHAN, 2006.

Detalhando a figura acima apresentamos:

- Cerne: é o núcleo da madeira, onde a coloração vai caracterizar o desempenho de resistência a fungos e insetos. É a parte da madeira composta por células mortas;

- Alburno: tecido estruturalmente complexo subdividido em medula, cerne e alburno. Cujas funções são a condução de sais minerais, armazenamento de substâncias e sustentação do vegetal;
- Cambio: é o tecido responsável pelo crescimento diametral do tronco;
- Casca exterior: sua função é proteger o tronco, é seca e inerte;

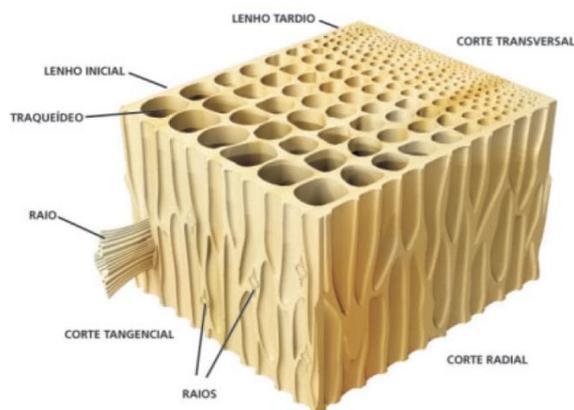
Figura 2.2 - Ilustração de cortes na madeira.



Fonte: IPHAN, 2006.

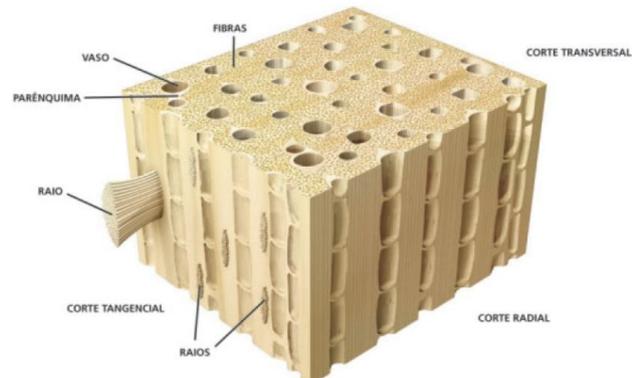
A estrutura anatômica da madeira divide-se em duas, conífera (gimnospermas) (Fig. 2.3) e dicotiledôneas (angiospermas) (Fig. 2.4). A anatomia das coníferas é mais simples, possuindo como o seu principal elemento os traqueídeos fibrosos.

Figura 2.3 - Ilustração da anatomia de uma conífera;



Fonte: IPHAN, 2006.

Figura 2.4 - Ilustração da anatomia de uma dicotiledônea.



Fonte: IPHAN, 2006.

As dicotiledôneas, devido a sua maior complexidade, possuem algumas características a mais, como os canais resiníferos, a estrutura estratificada, cristais, sílica e densidade (o que caracteriza a boa qualidade da madeira).

Outra parte importante da fisiologia da madeira são os anéis de crescimento é caracterizado como sendo círculos que nascem no centro do tronco e se desenvolvem até alcançar o status crescimento durante o ano, distinguindo-se em lenho inicial (lenho primaveril) e lenho tardio (lenho outonal ou estival). (COSTA, 2001)

Considera-se que os fatores determinantes que influenciam as propriedades da madeira são:

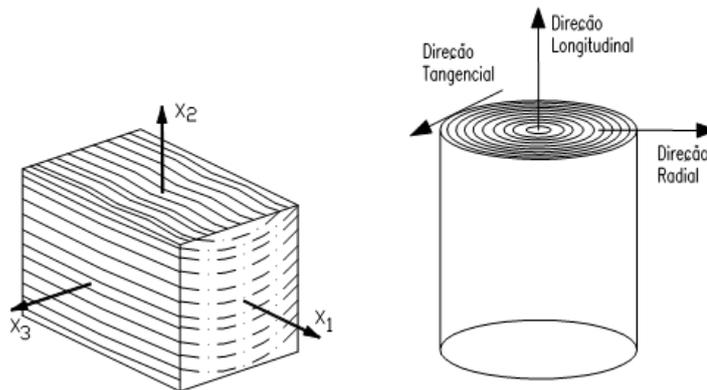
- espécie;
- solo e clima da região do plantio da árvore;
- fisiologia;
- anatomia do tecido lenhoso;
- composição química;

As características físicas que influenciam no bom uso da madeira são:

- umidade;
- densidade;
- resistência química;
- durabilidade;
- retratibilidade;

Outra característica da madeira é ser um material anisotrópico¹, tendo diferentes comportamentos em relação com o crescimento das fibras. Suas propriedades variam em três eixos, o longitudinal, radial e tangencial. A Figura 2.5 apresenta a anisotropia da madeira e a direção de crescimento de suas fibras.

Figura 2.5 - Anisotropia da madeira.



Fonte: Madeira Estrutural, 2010.

2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira

A madeira é um material não homogêneo com variações físicas e mecânicas em seus eixos de crescimento. Faz-se necessário o conhecimento das propriedades e características das diversas espécies da madeira para o melhor uso e aproveitamento do material. A Norma Brasileira para Projetos de Estrutura de Madeira, NBR 7190 (ABNT, 1997), define os procedimentos de caracterização das espécies de madeira, onde são encontrados os procedimentos para os projetos e execução das peças em madeira.

As propriedades físicas da madeira são:

- Umidade;
- Densidade;
- Retratibilidade;

¹ A anisotropia é o fato de a madeira possuir diferentes características nos três sentidos de crescimento, ou seja, suas propriedades são diferentes para cada eixo.

- Resistência ao fogo;
- Heterogeneidade ;
- Higrometricidade;
- Porosidade;
- Dureza;
- Anisotropia;
- Textura, cor, brilho e odor;
- Condutibilidade elétrica;
- Condutibilidade térmica;
- Condutibilidade acústica;
- Durabilidade;

A seguir apresenta-se uma descrição de cada propriedade física da madeira baseado no livro Estruturas de Madeira de PFEIL e PFEIL 2009:

2.3.1. Umidade

A umidade ocorrente na madeira pode ser subdividida em três tipos:

- **Água de constituição:** faz parte integrante da matéria lenhosa. Esta massa de água mantém-se invariável anterior o tratamento, aos agentes de intempéries e químicos que a destruam.
- **Água de embebição:** é a umidade que satura as paredes das células, também conhecida como “água de saturação”.
- **Água livre:** é a umidade que se encontra no interior das células e entre os espaços intercelulares.

Diz-se que a umidade é nula, do ponto de vista técnico, quando somente existe umidade na parte intrínseca do lenho. Além de ser uma propriedade física a umidade afeta muito na resistência da madeira.

2.3.2. Densidade

São caracterizadas duas densidades: a básica e a aparente. A densidade básica é definida pelo coeficiente da massa seca pelo volume saturado, definido na expressão:

$$\rho = \frac{m_s}{V_w} \quad (1)$$

Onde:

m_s : massa em quilogramas (ou gramas) do corpo-de-prova seco;

V_w : volume em metros cúbicos (ou centímetros cúbicos);

Martins e Araujo (2005) definem que a densidade aparente é a umidade padrão de referência, variando entre 12% e 15%.

Nas tabelas abaixo são classificadas as madeiras de acordo com as suas densidades:

Tabela 2.1 - Classificação das árvores coníferas.

Árvores Resinosas		
Classe	Valor	Exemplo
Muito pesada	> 0.70	Teixo
Pesada	0.60 a 0.70	Zimbros comum, Pinho Bravo
Moderadamente pesada	0.50 a 0.59	Pinhos
Leve	0.40 a 0.49	Espruce, Abeto, Ciprestes, Camecipar
Muito leve	< 0.40	Criptoméria, Pinho branco, Tuia

Fonte: Densidade (G/CM³) Árvores Resinosas. MARINTIS e ARAUJO, 2005.

Tabela 2.2 - Classificação das árvores dicotiledôneas.

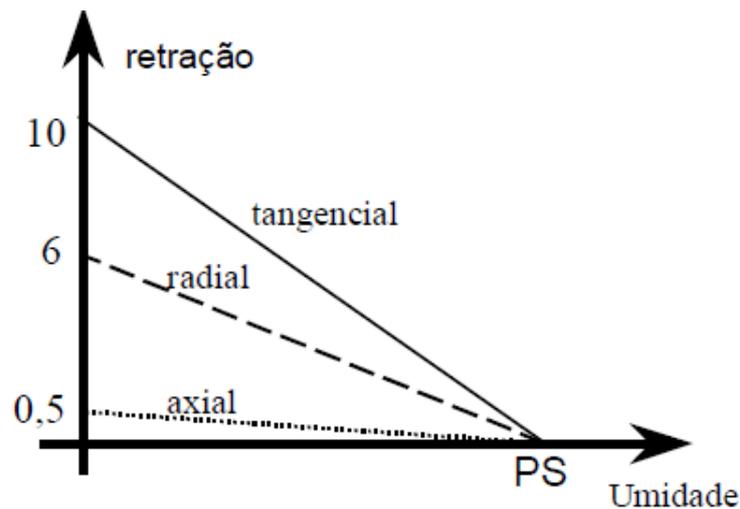
Árvores Folhosas		
Classe	Valor	Exemplo
Muito pesada	> 0.95	Azinhão, Oliveira, Casuarina vermelha
Pesada	0.80 a 0.95	Eucalipto de Cerne, Carvalhos duros
Moderadamente pesada	0.65 a 0.79	Faia, Carvalhos, Austrália
Leve	0.50 a 0.64	Castanho manso, Nogueiras, Cerejeiras
Muito leve	< 0.50	Choupos, Amieiro

Fonte: MARTINS e ARAUJO, 2005.

2.3.3. Retratabilidade

A retratabilidade ocorre quando há redução das dimensões pela perda da água contida nos tecidos da madeira. A madeira tem maior retratabilidade na direção tangencial, seguido da radial e axial, (Graf. 2.1)

Gráfico 2.1- Gráfico comparativo de retratabilidades da madeira.



Fonte: Gesualdo, 2003.

Tal como ocorre na maioria dos corpos sólidos a madeira varia suas dimensões com a temperatura. Deve-se notar que a cada aumento de temperatura conduz a uma dilatação correspondente. Uma diminuição do grau de umidade reflete diretamente na sua retração.

O coeficiente de dilatação da madeira pode ser definido como a percentagem da variação de uma extensão (axial, radial ou tangencial) para uma variação de temperatura de 1°C, sendo a madeira em condições iniciais de 0°C e 0% de umidade.

2.3.4. Resistência a Incêndios

A principal característica da madeira com relação ao fogo é a sua inflamabilidade. A madeira quando exposta a altas temperaturas não sofre alteração na sua resistência. Sendo assim, quando ocorre um incêndio ela poderá servir de combustível para a propagação das chamas, mas em contrapartida, suportará a ação do fogo em alta temperatura por um período de tempo maior.

2.3.5. Módulo de elasticidade

A madeira possui diferentes módulos de elasticidade e essa variação ocorre devido a função do tipo da direção da solicitação com relação às fibras. O valor básico do modo de elasticidade considerado é o da compressão paralela às fibras (longitudinal). A partir deste valor são definidos os demais módulos de elasticidade da madeira, sempre em função do tipo de solicitação: compressão, paralela, normal, flexão e tração.

De acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) o valor da Elasticidade (E) deverá ser igual para as solicitações de compressão e tração, ou seja, $E_t = E_c$.

2.3.6. Variação de resistência e elasticidade

A umidade de referência usada no dimensionamento sempre estará relacionada ao valor da umidade igual a 12%. Os valores de resistência obtidos para peças com umidade diferente a 12 % deverão ser corrigidos pelas expressões:

- Resistência: $f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right]$ (2)

- Elasticidade: $E_{12} = E_{u\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right]$ (3)

As variações de resistência e rigidez serão consideradas desprezíveis para umidades superiores a 20 % e variações de temperaturas entre 10°C e 60°C (GESUALDO, 2003). Na ausência de métodos de análise de resistência precisos, poderão ser adotadas como caracterização simplificada as relações entre resistências como na tabela indicada abaixo.

Tabela 2.3 - Variação da resistência e elasticidade das coníferas e dicotiledôneas.

					Conífera	Dicotiledônea
$f_{c0,k} / f_{t0,k}$	$f_{tM,k} / f_{t0,k}$	$f_{c90,k} / f_{c0,k}$	$f_{e0,k} / f_{c0,k}$	$f_{e90,k} / f_{c0,k}$	$f_{v0,k} / f_{c,k}$	$f_{v0,k} / f_{c0,k}$
0.77	1	0.25	1	0.25	0.15	0.12

Fonte: Gesualdo, 2003.

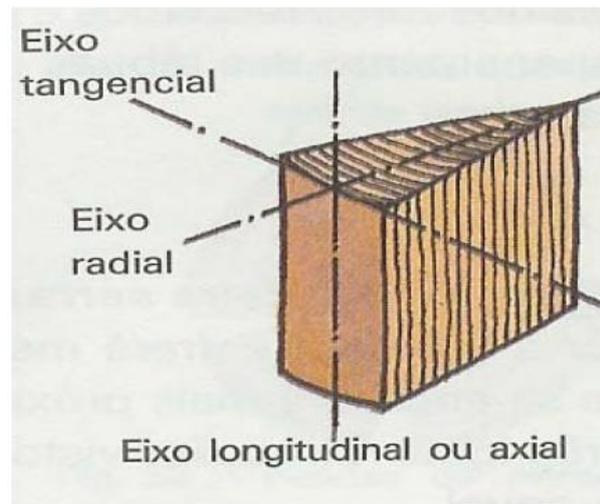
2.3.7. Heterogeneidade

A heterogeneidade da madeira é definida pelas peças extraídas, mesmo que de uma mesma árvore e podem apresentar comportamentos mecânicos diferentes entre si. Isso ocorre devido à diferença dos tecidos celulares das árvores, resultando em comportamentos mecânicos diferentes para cada peça.

As variáveis na heterogeneidade da madeira materializam-se na diferença da dureza, densidade e cor, dentre outras características.

Os três eixos são exemplificados na figura abaixo:

Figura 2.6 - Os três eixos de crescimento da madeira.



Fonte: Valente, 1988.

De acordo com Carvalho (1996), pode-se classificar a madeira segundo a tabela que segue:

Tabela 2.4 - Classificação da madeira.

Classe	Valor (%)	Exemplo
Baixa	< 1.5	Cedros, Zimbros, Nogueira Preta, Aderno
Média	1.5 a 2.0	Pinho Bravo, Castanho, Plátamo
Alta	> 2.0	Pinho Larício, Carvalhos, Eucaliptos

Fonte: Valente, 1988.

A durabilidade depende principalmente das condições em que as peças de madeira são expostas na obra e a umidade é o principal inimigo da madeira. Enquanto permanecem secas as peças de madeira podem ser conservadas por milhares de anos, a exemplo dos sarcófagos egípcios e das velhas catedrais. Se imersas em água doce podem apresentar um bom estado de conservação durante anos, desde que estas peças de madeira não estejam porosa ou demasiadamente tenras.

2.4. Classes de Resistência da Madeira

Para melhor caracterização e utilização, a madeira pode ser definida por classes de resistência, sendo cada classe um conjunto de espécies cujas características podem ser consideradas “iguais” dentro de uma mesma classe. A norma NBR 7190 (ABNT, 1997), com o intuito de orientar e padronizar as madeiras comerciais para o emprego em projetos estruturais adere ao conceito de classes de resistência, enquadrando uma espécie de acordo com pelo menos 70% do valor médio de compatibilidade dos resultados dos ensaios. Sendo assim, de acordo com Calil Jr., Lahr e Dias (2003), a seguinte expressão é considerada:

$$x_{k,12} = 0,7x_m \quad (4)$$

Defini-se o valor x_m como sendo a média aritmética dos resultados dos corpos de prova do lote ensaiado. O valor característico inferior $x_{k,inf}$, menor que o valor médio, corresponde ao valor que somente 5% dos corpos de prova da amostra possuem a probabilidade de não ultrapassarem. O valor característico $x_{k,sup}$, maior que o valor médio, corresponde ao valor qual somente 5% dos corpos de prova possuem probabilidade de ultrapassar em uma determinada amostra.

A fim de garantir a segurança, o valor característico da resistência da madeira adotado x_k é correspondente ao $x_{k,inf}$, considerando que as resistências do lote tenham distribuição normal.

Assim de acordo com o valor imediatamente inferior obtido na expressão adota-se os valores das tabelas:

Tabela 2.5 - Classe de resistência das coníferas.

Coníferas (valores na condição padrão de referência U =12%)					
Classes	f_{cok} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{co,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C 20	20	4	3500	400	500
C 25	25	5	8500	450	550
C 30	30	6	14500	500	600

Fonte: Gesualdo, 2003.

Tabela 2.6 - Classe de resistência das dicotiledôneas.

Dicotiledôneas					
(valores na condição padrão de referência U =12%)					
Classes	f_{cok} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{co,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C 20	20	4	9500	500	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	1000

Fonte: Gesualdo, 2003.

2.5. Propriedades Mecânicas da Madeira

Do posto de vista estrutural as propriedades a seguir devem também ser consideradas:

- Resistência à compressão;
- Resistência à tração;
- Resistência à flexão;
- Resistência ao choque;
- Resistência ao cisalhamento/corte;
- Resistência ao fendilhamento;
- Elasticidade;
- Fluência e fadiga;

2.5.1. Resistência à Compressão

Uma peça de madeira se encontra sujeita a compressão quando nas extremidades atuam duas forças no seu eixo longitudinal, tendendo a uma diminuição do seu comprimento. Quando a compressão for paralela às fibras e ao eixo da peça, então a compressão é do tipo “transversal” e se ela for no sentido das fibras a compressão é oblíqua. (ARAÚJO, 1997).

2.5.2. Resistência à Tração

Entende-se por resistência à tração a madeira que possui forças aplicadas às suas extremidades opostas, com a finalidade de aumentar o seu comprimento. Estas forças são

exercidas segundo o seu eixo (axial, transversal ou oblíquo). Conclui-se que a resistência à tração axial é, sensivelmente, o dobro da resistência à compressão. (ARAÚJO, 1997)

No eixo transversal na situação de tração, as fibras que constituem o tecido não se mantêm unidas à madeira, gerando assim uma resistência aquém do desejado. A compressão axial provoca trações transversais, sendo assim, a resistência axial de compressão diminui em função da menoridade da resistência transversal à tração.

2.5.3. Resistência à Flexão

A propriedade de resistência à flexão consiste na circunstância de uma peça se encontrar sujeita à flexão quando as cargas estão distribuídas em todo o comprimento, ou atuam em vários pontos isolados. Em geral, a capacidade da madeira a resistir à flexão é satisfatória nos projetos estruturais. (ARAÚJO, 1997).

2.5.4. Resistência ao Choque

A propriedade de resistência ao choque é vista como sendo a ruptura da madeira ou quando a mesma se danifica por consequência de exposição às ações de cargas menores que não foram aplicadas gradualmente (ações dinâmicas).

Madeiras como o Cedro, ou com características semelhantes, exibem uma resistência reduzida aos choques.

2.5.5. Resistência ao Corte/cisalhamento

Patologias como fendas e fissuras costumam ter sua origem na menor capacidade de resistência da madeira ao cisalhamento. O desenvolvimento do cisalhamento paralelo às fibras demonstra que a peça de madeira tem a menor resistência possível.

2.5.6. Resistência ao Fendilhamento

Define-se o fendilhamento como sendo o deslocamento longitudinal das fibras da madeira instigado por esforço normal as mesmas e exercido excentricamente a direção considerada. Podemos considerar que o fendilhamento é uma característica típica de qualquer material fibroso. (ARAÚJO, 1997)

A madeira tem uma considerável resistência ao fendilhamento, entretanto, essa considerável resistência varia devido a umidade, perdendo-a drasticamente.

2.5.7. Elasticidade

Entende-se como elasticidade da madeira a sensibilidade da mesma à flexão sobre ela exercida no sentido de modificar a sua forma.

Cada espécie da madeira tem sua própria variação nesta particularidade, uma vez que a elasticidade uma propriedade que pode servir, de forma aproximada, como medidor genérico das propriedades mecânicas da madeira.

2.5.8. Fluência e Fadiga

São propriedades que possuem estreita ligação com a elasticidade devido a sua resistência e o tempo de duração das pressões sobre as madeiras. A proporcionalidade é de quanto maior for à duração de uma pressão exercida sobre uma peça de madeira maior é a possibilidade de a mesma sofrer deformações, sendo o inverso (menor) igualmente proporcional.

Os efeitos da tensão exercidos de forma contínua sobre a madeira alteram suas propriedades de tal maneira:

- Fadiga: consiste na diminuição da resistência mecânica quando sujeita as tensões que podem provocar tensões permanentes.
- Fluência: consiste no aumento da deformação da madeira.

Esses dois fenômenos por si só caracterizam perda ou diminuição da resistência sem necessariamente estarem diretamente relacionados.

CAPÍTULO III

3. O AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

3.1. Breve Histórico do Aço e seu Uso na Construção Civil

As primeiras indústrias de metais surgiram na região sul do Cáucaso por volta de 1770 a.c. A matéria prima era encontrada sob pequenas formas de rochas a flor da terra. Apesar de algumas evidências do uso tão remoto do ferro, não pode-se precisar o surgimento de seu uso. Sabe-se que o Cobre era comumente utilizado para a confecção de materiais bélicos. Seu estado de utilização era quase sempre puro.

O ferro-gusa já era fabricado pelos chineses no século V a.C., anteriormente conhecido como ferro carburado. Os fornos eram no solo, sendo a partir da Idade Média os primeiros com as suas cubas elevadas e aumentadas sobre o solo. A combustão era ativada por foles movidos a energia hidráulica. O trabalho dentro das minas era feito a luz de velas e o minério era retirado por cestas puxadas por cordas.

No século XIV os fornos já eram maiores e com isso veio o aperfeiçoamento das condições de sopro. Com o aumento da temperatura de combustão, o ferro passou a absorver quantidades crescentes de combustão e, com o aumento do teor de carbono no metal, ocorria a fundição a uma temperatura mais baixa obtendo-se pela primeira vez um metal líquido na parte baixa do alto-forno. Com o aumento da produção do ferro, por volta de 1350, aumenta também a fundição de utensílios de uso domésticos e instrumentos agrícolas.

A descoberta do inglês Henry Bessemer na metade do século XIX, em 1856, permitiu realizar uma produção realmente industrial do aço pelo refino do gusa em um convertedor injetando um sopro de corrente de ar que, ao atravessar o banho de gusa, converte-o por oxidação em aço líquido. A partir de então era possível dispor de grandes quantidades da liga de ferro-carbono, com seus variados melhoramentos, possibilitando a execução de grandiosas obras da engenharia da modernidade.

A inserção do aço na construção civil está intimamente ligada com os acontecimentos históricos dos séculos XVIII e XIX na Europa e nos Estados Unidos, dentre eles destacando-se a Revolução Industrial. O século XX foi o grande salto da siderurgia brasileira com a criação da Companhia Siderúrgica Brasileira, posteriormente denominada de Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira.

O estabelecimento do Plano Siderúrgico Nacional levou a modernização e implementação de novas siderúrgicas como a Manesmann, Acesita, CSN, USIMINAS, Cosipa, aumentando os índices de produção e qualidade do aço.

O primeiro edifício de andares múltiplos a ser projetado foi a fábrica de chocolates *Noisiel-sur-Marne* (Fig. 3.1) totalmente estruturado em arquitetura de marco de ferro forjado industrial. Sua construção, de 1871-1872, teve tendo como responsável o técnico Jules Soulner. Atualmente, o prédio é propriedade da fábrica Nestlé e foi nomeado Patrimônio Cultural da Humanidade.

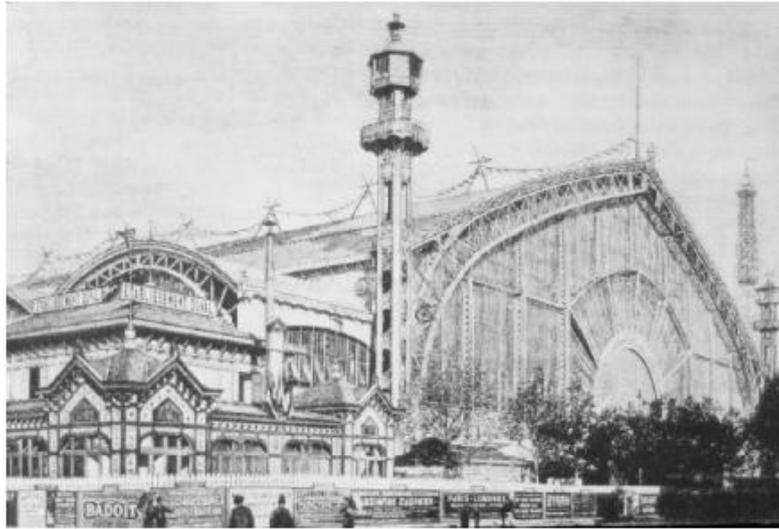
Figura 3.1 - Fábrica de chocolates Noisel-sur-Manne, França.



Fonte: UNESCO, 2013.

Em 1889 ocorreu na França a Exposição Universal de Paris, no aniversário do Primeiro Centenário da Revolução Francesa. Algumas obras se destacaram, dentre elas a *Galerie de Machines*, (Fig. 3.2) projetada pelo arquiteto Ferdinand Dutert juntamente com o engenheiro Vitor Contamim. O principal destaque da obra era o pavilhão de exposição que detinha 115m de vão livre, excedendo todos os outros já apresentados anteriormente.

Figura 3.2 - Galerie de Machines. Paris, 1889.



Fonte: Structurae, 2013.

O renascimento do uso das estruturas metálicas foi no século XX, tendo o seu destaque nos anos 70, ocorreu em Paris com o *Centro Pompidou*, (Fig. 3.3), projetado pelos arquitetos italiano Renzo Piano e o arquiteto inglês Richard Rogers. Estes produziram projetos com alta precisão e tecnologia.

Figura 3.3 - Centro Georges Pompidou, França.



Fonte: Manolo Blanco, 2012.

No Brasil, as primeiras fundições surgiram com a chegada de Dom João VI, na época de abertura dos portos com a vinda da família real em 1808 para a então colônia. Apesar de surgimento posterior das ferrovias e com o uso das estruturas pré-fabricadas no país, o material produzido era de baixa qualidade, pois era rico em fósforo, tendo assim uma baixa ductilidade tornando-o quebradiço, não conseguindo competir com o material inglês que era inserido no Brasil através de tratados políticos-comerciais. A desestimulação na metalurgia ocasionada pela importação do aço, contribuiu para que o Brasil recebesse estruturas em aço, resultante de uma tecnologia de ponta para a época. Posteriormente à dificuldade de importação da Inglaterra, causada pela Primeira Guerra Mundial, fez com que a construção civil sofresse alterações, vindo a se estabilizar posteriormente com os Estados Unidos como o principal fornecedor.

A arquitetura de ferro das estações ferroviárias brasileiras, assim como na Europa, foi construída com a estrutura de ferro fundido, que já chegaram prontas para a edificação. A ascensão da burguesia na segunda metade do século XX, enriquecida pelo café (na região sudeste), pela exploração da borracha (na região norte) e juntamente com o a expansão do comércio, contribuiu para o aumento de consumo de produtos europeus. O Mercado do Ver-o-peso, em Belém, (Fig.3.4), fazendo desta cidade a maior importadora de estruturas metálicas europeias da época no Brasil. (PENTEADO, 1968)

Figura 3.4 - Mercado do Ver-o-peso, Belém.



Fonte: Telma Pereira, 2013.

Outro centro urbano que se destaca por ter importado uma grande quantidade de estruturas metálicas da Europa é São Paulo. Um exemplo é a Estação da Luz, (Fig. 3.5), que apresenta um padrão estético na arquitetura industrial (de galpões).

Costa (2001) descreve que os componentes das estruturas metálicas chegavam completos, possibilitando assim a praticidade de serem montados facilmente. Os componentes modulados, em ferro fundido, formavam a estrutura que era montada com poucas ligações em parafusos. O acabamento era feito no canteiro de obras a gosto do usuário.

Figura 3.5 - Estação da Luz, São Paulo.



Fonte: Wanderlei Celestino, s/d.

O primeiro edifício brasileiro de múltiplos pavimentos em estrutura metálica edificado totalmente com tecnologia nacional, foi o Edifício Garagem América, em 1957 (Fig. 3.6). Este edifício foi projetado para o uso de garagem no centro de São Paulo, o arquiteto responsável foi o brasileiro Rino Levi. Apesar de utilizado as propriedades de estrutura metálica no edifício, a diferença do uso do aço na edificação em comparação aos outros países foi evidente.

A partir de então o uso do aço foi cada vez mais utilizado nas obras de arquitetura, sendo um reflexo também da expansão e modernização das siderúrgicas brasileiras.

Figura 3.6 - Edifício Garagem América. São Paulo, 1957.



Fonte: Santiago Calatrava, s/d.

3.2 Propriedades do Aço

O aço se solidifica através da formação de cristais, que devido ao seu crescimento em diferentes direções, formam diferenciados eixos de cristalização. A partir do desenvolvimento do eixo principal, os eixos secundários se desdobram em novos eixos e assim sucessivamente até que toda a massa do metal se torne sólida. Este processo de formação dos eixos principal e secundário resulta na dendrita. A partir da junção de duas dendritas origina-se a superfície de contato, e ao término do processo de cristalização resulta nos grãos que compõe o metal.

A formação dos cristais do ferro faz parte de um sistema cristalino cúbico. Na primeira tipologia, denominada “cúbico de corpo centrado” (CCC), ao isolar a unidade básica do cristal, verifica-se que os átomos de ferro localizam-se nos oito vértices e no centro do cubo. O segundo tipo denominado “cúbico de face centrada” (CFC), os átomos ficam sobrepostos nos oito vértices e no centro de cada face do cubo.

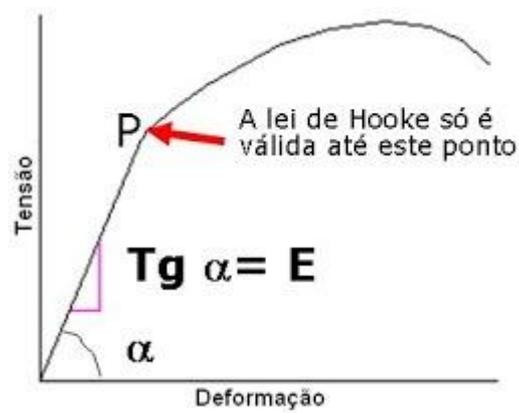
Os metais com estruturas cristalinas tipo hexagonal compacta (HPC), apresentam um comportamento intermediário às formações das estruturas cristalinas apresentadas acima e podem apresentar características dúcteis ou quebradiças.

Alguns conceitos sobre as propriedades são:

- Elasticidade: propriedade do metal de retornar a sua forma original quando submetido a ações externas. O modo de elasticidade varia de acordo com o material. A

deformação segue a Lei de Hook, ou módulo de Young, deste modo sendo proporcional ao esforço aplicado, entretanto, quanto maior o módulo da ação aplicada maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação (Gráf. 3.1) está representado a tensão e deformação do aço, onde a lei de Hooke, limite de plasticidade do aço é indicada;

Gráfico 3.1 - Gráfico Tensão x Deformação.



Fonte: Ladín, 2013.

De forma sucinta pode-se definir a teoria da elasticidade como o estudo das tensões, deformações e a relação entre elas em um sólido tridimensional.

- Plasticidade: a plasticidade é capacidade física do material não voltar a sua forma inicial após a remoção de uma ação externa, sendo assim, inversa a elasticidade, e resulta em deformações permanentes no material. A deformação plástica altera a estrutura de um metal e aumenta a sua dureza. Este fenômeno físico pode ser definido de encruamento ou deformação a frio;
- Ductilidade: é a propriedade do material de se deformar sob a ação de cargas antes de sua ruptura. Caracterizada através do fluxo do material sob a ação de uma tensão cisalhante. É de grande importância devido às deformações ser um aviso prévio da ruptura final de um material, prevenindo assim acidentes na construção civil, por exemplo. Ao oposto da ductilidade está a fragilidade do material, que a característica de ruptura brusca, sem um aviso prévio de deformação;

- Fluência: decorre da função de ajustes plásticos que podem ocorrer em pontos de tensão, ao longo dos contornos dos grãos do material. Os pontos de tensão aparecem logo após o material ser submetido a uma carga constante. Após a fluência ocorre a deformação contínua, reduzindo a área da seção transversal da peça (estricção). A propriedade de fluência está relacionada também com a temperatura ao qual o material está submetido, quanto mais elevada maior a fluência devido à facilitação do início e do fim da deformação plástica;
- Resiliência: é a propriedade do material de absorver energia mecânica em regime elástico;
- Tenacidade: é a energia total, plástica ou elástica, que o material pode absorver até a sua ruptura;
- Fadiga: é a ruptura do material decorrente de esforços repetitivos e cíclicos. A ruptura por fadiga é considerada uma ruptura frágil mesmo em materiais dúcteis;
- Dureza: é a propriedade de resistência de um material ao risco ou a abrasão. Pode ser avaliada basicamente como a capacidade de um material tem de “riscar” o outro. Sendo a resistência que a superfície oferece a penetração de uma peça de maior dureza;

Atualmente a oferta de aço nas construções civis do Brasil vem ganhando espaço e incentivos políticos que buscam aumentar a inserção deste material em substituição do concreto, madeira e alvenaria, principalmente em obras que exigem mais precisão, montagem, rapidez, racionalização e limpeza no canteiro de obras.

O aço é uma liga ferro-carbono que pode ser constituído em até dois por cento de carbono, mas para evitar à alta dureza do material, essa percentagem nos aços comerciais não ultrapassa um por cento, possibilitando assim a sua aplicação. Os outros elementos que podem compor uma liga de aço são o manganês (Mn), o silício (Si), o fósforo (P) e o enxofre (S). Estes são elementos residuais derivados do processo de fabricação. Os aços se diferem em adição de elementos de acordo com a sua finalidade. Elementos residuais como o níquel e o cromo aumentam a resistência à corrosão no aço, por exemplo. A classificação dos aços varia de acordo com as suas propriedades químicas. Os aços utilizados na construção civil são classificados como aços estruturais.

A norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008b), intitulada Projeto de Dimensionamento de Estruturas de Aço, adota algumas constantes físicas para os aços estruturais tais como:

- Massa específica: (ρ) 7 850 kg/m³;
- Módulo de elasticidade longitudinal: (E) 250 000 MPa;
- Coeficiente de Poisson: (ν) 0,3 – em regime elástico;
- Módulo de elasticidade transversal: (G) 78 850 MPa;
- Coeficiente de dilatação térmica linear (α) $12 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$;

São as propriedades mecânicas que definem o comportamento do aço quando sujeito a esforços mecânicos externos, caracterizando assim o material e sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços sem que haja uma deformação excessiva ou até mesmo a ruptura. Para a obtenção de tais propriedades é necessário realizar um ensaio simples de tração e cisalhamento. Este ensaio tem como um de seus resultados o gráfico de tensão/deformação e a sua finalidade é apresentar a relação existente entre a tensão aplicada e a deformação resultante.

3.3 Os Aços Estruturais

Os chamados “aços estruturais” são todos os tipos de aço que são ideais para o uso em elementos estruturais nas edificações e são classificados de acordo com as suas propriedades.

3.3.1. Classificação

O aço-carbono, segundo a norma NBR 6215 (ABNT, 2011) é o aço que contém elementos de liga em teores residuais máximos admissíveis. Estes elementos são: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Alumínio (Al), Cobre (Cu), Silício (Si) e Manganês (Mn). Este aço possui média resistência mecânica em função do carbono presente na liga e pode ser dividido em três classes:

- Baixo-Carbono: $C \leq 0,30\%$;
- Médio-Carbono: $0,30\% < C < 0,50\%$;
- Alto-Carbono: $C \geq 0,50\%$;

Como o alto teor de carbono impede uma boa ligação por solda nas ligações o aço de baixo-carbono é o mais indicado para a construção civil.

Alguns exemplos de aço-carbono são: ASTM-A-36 e ASTM-A-570.

Aços que possuem de média a alta resistência mecânica, resistência à corrosão atmosférica e ótima soldabilidade. Devido a sua considerável alta resistência mecânica, os aços de baixa liga proporciona uma esbelteza maior dos perfis, resultando assim em uma redução do consumo do material. Entretanto esse aço possui uma complexidade na sua fabricação, aumentando os custos..., sendo assim necessário um estudo de viabilidade econômica antes de sua utilização.

A diferença entre um aço de baixa liga e um aço patinável e que, no segundo, é feita a adição de pequenas quantidades de alguns elementos químicos, em destaque o cobre, criando assim uma película contra a corrosão do aço. Esta “película” se desenvolve a partir da exposição do perfil ao clima, resultado em uma camada de óxido compacta e aderente a superfície. Essa pátina no perfil só se forma após ciclos alternados de molhagem e secagem, levando, em média, dezoito meses a três anos para finalizar o processo de formação da película, a deixar por fim o perfil protegido. No primeiro ano já é detectável a coloração homogênea marrom clara.

O uso de revestimentos de proteção em aços patináveis é aconselhado para condições climáticas ou de utilização da estrutura que não permitem a criação da pátina. Exemplos dessas situações são as regiões submersas, onde não ocorram os ciclos de molhagem e secagem, em ambientes industriais agressivos e até 600 metros da orla marítima.

Uma das maiores preocupações com o uso do aço nas estruturas metálicas é a resistência ao fogo. Foram desenvolvidos aços mais resistentes ao incêndio com tempo maior de início de deformação de uma estrutura, garantindo assim maior segurança para a retirada de pessoas nas construções nos caso deste tipo de acidentes.

Os aços resistentes ao fogo são resultantes dos aços fabricados para a resistência a corrosão, tendo suas adições ajustadas sempre no limite mínimo possível, garantindo assim uma maior resistência à tração, sem prejudicar a soldabilidade e a resistência a corrosão atmosférica, característica do aço de origem.

3.3.2. Propriedades

Por ser um material industrializado e supervisionado por um controle de qualidade, as características de uma liga metálica são confiáveis, podendo ter seus coeficientes de segurança mais baixos no seu cálculo estrutural.

O aço estrutural tem a característica de resistir à tração e compressão aproximadamente o mesmo valor, sendo a tração mais adaptável ao material. A compressão pode causar flambagem no perfil, necessitando assim do aumento das seções dos perfis e/ou com a adaptação dos travamentos, denominados contraeventamentos, diminuindo assim o comprimento livre da peça.

Os aços produzidos para a construção civil possuem variações em suas dimensões possibilitando vários usos.

Propriedades mecânicas dos aços estruturais:

Tabela 3.1- Propriedades mecânicas dos aços estruturais.

Propriedades			
Módulo de Elasticidade	E	205GPa	2.090.418 N/m
Coefficiente de Poisson	ν_a	0.3	
Coefficiente de Dilatação Térmica	β	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$	
Peso Específico	γ_a	78kN/m ³	79,5N/m ³
Módulo de Elasticidade Transversal	G	78.93 GPa	804861.8 N/m

Fonte: Zattoni, 2008.

Os perfis laminados possuem sua linha de produção diretamente através de blocos e tarugos, podendo ser trabalhados a quente até chegarem ao formato “I”, “H” ou cantoneiras.

Dias (2002) relata que a oferta de perfis laminados de padrão americano no país é bastante restrita, possuindo uma limitação quanto à disponibilidade e a variedade de tamanhos, além disso, sua aba inclinada dificulta a execução das ligações. A partir do uso conjugado de perfis pode-se obter várias conformações, permitindo também a execução de curvas nos dois sentidos das peças. Tem-se como ideal o uso de raios longos, porque com o uso de raios pequenos se faz necessário o aquecimento dos perfis.

Os perfis soldados são obtidos pela composição, corte e soldagem das chapas planas de aço, possibilitando uma gama bastante variável de formas e dimensões. Perfis para uso estrutural não podem ser provenientes de chapas em formato de bobina, pois pode haver deformação quando aquecidas pela solda, assim só podem ser usadas chapas grossas, resultando assim em perfis mais pesados do que os perfis laminados.

Os perfis soldados podem ser também eletrossoldados, derivado de um sistema industrial onde a soldagem é feita por resistência elétrica denominada eletrofusão.

Os perfis formados a frio consistem no dobramento a frio das chapas de aço, este tipo de fabricação possibilita a criação de formas e dimensões variadas, além as padronizadas, variando dos padrões limitados dimensionais das linhas de produção. Estes perfis são indicados para construções mais leves, utilizadas principalmente como barras treliçadas, terças e etc. Sendo utilizados também nos painéis estruturais *steel-frame*.

Quando os perfis formados a frio são galvanizados seu principal uso é a composição de guias e montantes de vedações, lajes e coberturas, sendo projetados para absorção de cargas.

Os perfis também podem ser tubulares, tendo a partir da secção circular prensada perfis de seções quadradas e retangulares. Este tipo de perfil pode apresentar costura quando produzido por soldagem ou não quando fabricado a partir da laminação a quente das barras de aço maciças.

Perfis tubulares, retangulares ou quadrados de médio a grande porte possuem alta resistência a flambagem, sendo mais utilizados como pilares devido a essa característica geométrica. Perfis de menor diâmetro são utilizados como treliças planas e espaciais. Com a junção destes perfis as chapas são possíveis à composição de vigas e pilares.

3.4. A Aplicabilidade do Aço em Intervenções de Edificações Históricas

As vantagens do uso do sistema construtivo em aço em processos de intervenção em coberturas de edificações históricas são:

- O uso de vigas e pilares mais esbeltos possibilita um melhor aproveitamento da área útil. Essa relação entre a resistência e peso específico do material permite a diminuição das dimensões das peças;

- A redução do peso próprio do material provoca alívio de cargas nas fundações. Esse fato é de extrema importância quando se trata de intervenção em edificações históricas, uma vez que, as fundações antigas eram superdimensionadas, cargas menores poderiam ser absorvidas pelas fundações existentes, sem necessidade de reforços;
- A flexibilidade do aço permite adaptações, ampliações, reformas, reutilizações de espaço, facilitando a passagem de dutos de ar condicionado, água, telefonia, elétrica, etc;
- A reversibilidade do aço possibilita a montagem e desmontagem da estrutura, além de permitir a reutilização, principalmente quando a estrutura for parafusada. Esta vantagem é exigida em diversos tipos de intervenções, principalmente nas de reforço estrutural e em obras provisórias, muitas vezes construídas no interior das estruturas, após ocorrência de acidentes como sismos, incêndios, explosões, etc, até que seja construída a estrutura definitiva;
- O sistema em aço garante qualidade, já que a mão de obra é altamente qualificada, com rígido controle do processo industrial;

Portanto o aço tem considerável aplicabilidade quando utilizado em intervenções nas alvenarias e coberturas de edificações históricas. Contudo, essa resolução não é tão simples assim, já que cada edificação tem características particulares e demanda resoluções diferenciadas que devem ser analisadas caso a caso.

CAPÍTULO IV

4. A TESOURA DE CAIBRO-ARMADO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL DE ESTUDO DE CASO

O início da arquitetura colonial brasileira apresentou uma tipologia rudimentar na concepção das coberturas, dentre estes modelos destaca-se a tipologia de caibro-armado, onde há ausência de tesouras fazendo com que cada caibro receba seu próprio tirante. O uso de tesouras como estrutura principal nas tipologias de cobertura é mais recente.

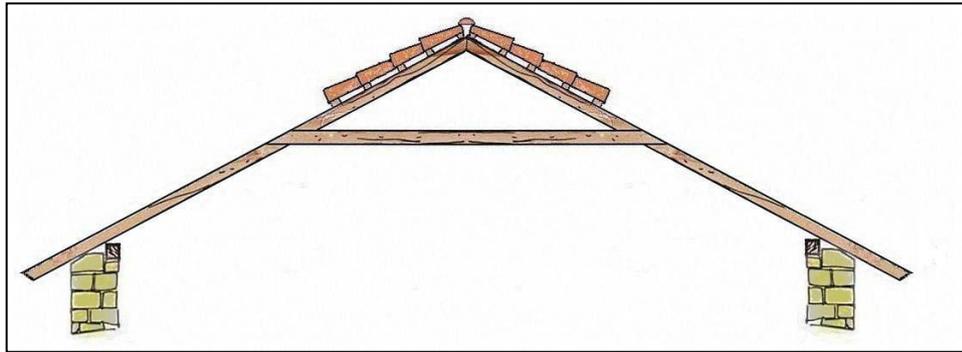
O caibro como elemento principal dispensa o uso de terças, tesouras ou vigas de cumeeira. As duas pernas de caibros são conectadas entre si e fixadas na extremidade oposta sobre a linha dos frechais, sendo unidas entre si pelas ripas.

A ausência de alguns elementos estruturais nesta tipologia proporciona um uso maior do vão, possibilitando a adoção, por exemplo, de forro tipo gamela e sótãos. Entretanto a falta da linha baixa nesta treliça causa excentricidades na estrutura sendo o principal deles o empuxo lateral nas paredes, tendo como um dos resultados o desaprumo das alvenarias.

4.1. Caibro-armado

A tipologia estrutural a ser analisada neste presente trabalho é a cobertura caibro-armado ou popularmente chamada de canga-de-porco. A escolha deste sistema estrutural está embasada na singularidade que a mesma representa para a arquitetura do período colonial e o interesse da resolução das patologias decorrentes das excentricidades na estrutura com a inserção do aço como material na preservação da arquitetura patrimonial do Brasil. Na cidade de Ouro Preto comumente encontra-se este tipo de cobertura em edificações religiosas e residenciais.

Figura 4.1 - Desenho de uma treliça de caibro-armado.



Fonte: Colin, 2010.

Os mestres carapinas navais influenciaram nesta tipologia estrutural, viam-se costelas de cavername² invertidas e adaptadas para moldar as coberturas. Entretanto a ausência da linha baixa faz com que o empuxo lateral sobre as paredes contribua para o aumento da rotação, tendo assim seu uso inapropriado.

Santos (1951), em seu livro *Arquitetura Religiosa em Ouro Preto*, relata a maioria dos casos repetia a simetria dos madeiramentos dos telhados, estes possuíam soluções antiquíssimas, que muito se afastam da solução atual e que por isso mereciam dês analisadas com atenção.

Segundo Vasconcellos (1977) a técnica de pau roliço e da ripa em régua de Imbiriba foi um sistema estrutural muito comum em grande parte das coberturas da arquitetura colonial. Santos (1951) afirma que as coberturas das edificações religiosas de Ouro Preto possuíam, quase em sua totalidade, os troncos roliços e eram muito comuns o uso dos caibros-armados em quase todas as capelas da época

Para os monumentos que possuem técnicas de construção com sistema aberto (sistemas que não apresentam linha baixa), mesmo apresentando sérios conflitos estruturais, não é possível afirmar, que as excentricidades da estrutura tenham passado despercebidas pelos construtores da época. Houve uma preocupação em adotar condições locais que minimizavam os empuxos, que eram imediatamente incorporados aos novos projetos. O sistema de caibro-armado dispensa a linha baixa, não garantindo assim a rigidez da estrutura, optando pela liberdade de utilização do espaço abaixo dessas tesouras para a execução de forros em gamela ou em

² Cavername: é o conjunto das balizas que formam o esqueleto do casco de um navio. Dicionário Aurelio.

abóbada de berço. Assim, para eliminar o empuxo oblíquo faz-se necessário a utilização da linha baixa para trabalhar à tração no sistema em madeira. Com a tomada dessa posição para a solução do empuxo, a parte côncava do telhado não poderia ser utilizada para alocar o berço que cobre a nave. Outras consequências ocorreriam tais como: o berço teria que ser rebaixado, comprometendo o pé direito da edificação, serem concebidos forros estritamente horizontais ou outra solução seria o alargamento das paredes, comprometendo as proporções de volume, elevando também os custos finais da obra;

Nesse caso prioriza-se muito a estética em detrimento da estrutura, os empuxos causados por este sistema estrutural podem comprometer todo o bem cultural, que pode vir a ruir.

Em alguns monumentos, entretanto, o IPHAN preocupado em manter a integridade física e cultural de algumas edificações, optou por retirar e substituir por completo a técnica que existiu. Essa ação foi justificada devido a tantas dificuldades e da urgência com que normalmente são feitas as intervenções, e esta tinha sido a única forma viável para se manter a integridade do patrimônio.

Os principais tipos de patologias estão relacionados ao tipo de estrutura e materiais adotados. A utilização da madeira como material estrutural requer uma periodicidade na manutenção, a fim de checar o estado de conservação dos elementos que compõem o madeiramento da cobertura. A umidade é a principal causa das patologias e sua ação provoca o apodrecimento e o aparecimento de fungos. Entre os fatores principais para o surgimento das patologias por infiltração nas estruturas em madeira estão: deslocamento das telhas e/ou mal estado de conservação, má execução de calhas, rufos ou algerozes e a execução incorreta do arremate das telhas na cumeeira;

Agentes biológicos também são responsáveis pela degradação da madeira, e estão divididos em dois grupos: os fungos e insetos.

Em construções em madeira os insetos são os grandes causadores de patologias. E estes podem ser subdivididos em: os térmitas (cupins) e coleópteros (brocas). Já os fundos, de forma geral, segundo Bareia (s/d), quando a madeira possui umidade acima de 20%. A temperatura ideal para seu desenvolvimento está em torno de 25°C. A 40°C a atividade dos fungos é parasitária, mas somente a 45°C consegue-se eliminá-los.

Na (Fig.4.2) a cobertura de caibro-armado do Teatro Municipal de Ouro Preto nota-se a presença de cupins que acabam reduziam drasticamente a resistência da madeira.

Figura 4.2 - Peça em madeira atacada por agentes biológicos no telhado do Teatro Municipal de Ouro Preto.



Fonte: Programa Monumenta, 2006.

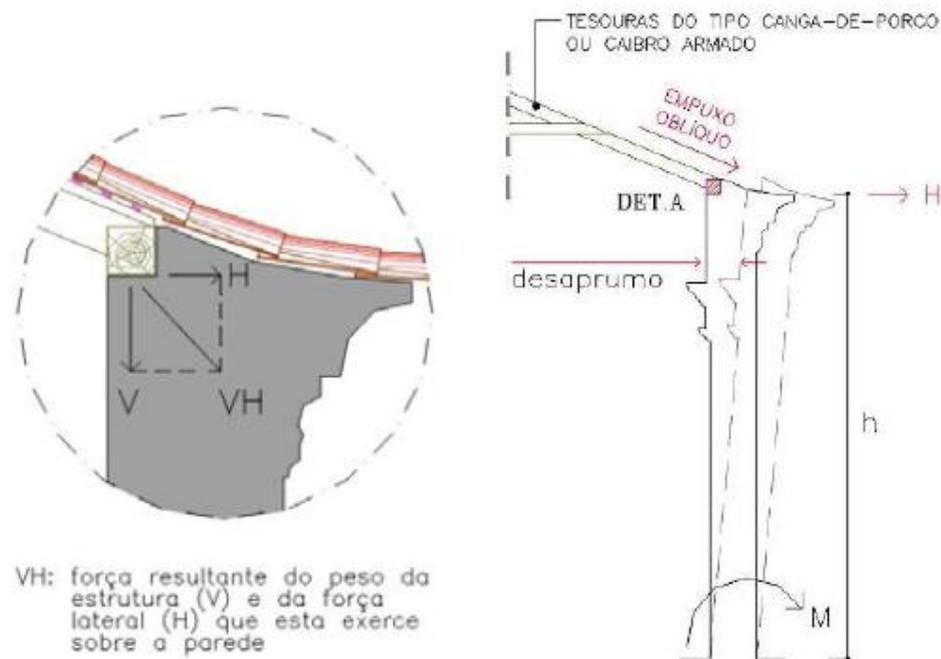
A flexão dos elementos estruturais da cobertura de caibro-armado possui sua causa nas seções insuficientes utilizadas nas peças que constituem o madeiramento e à adição de cargas extra no conjunto da estrutura, como também a deterioração das peças causadas pelos ataques biológicos, provocando seu desabamento ou até o seu arruinamento.

O empuxo lateral, proveniente da falta da linha baixa descarrega obliquamente as forças nas alvenarias, devido ao fato de não trabalharem a tração. Estes esforços horizontais (V_H), que são as resultantes do peso com a força lateral exercida na parede, resultam nas paredes um momento de giro na base igual a:

$$M = V_H \times h \quad (5)$$

Onde V_H é o *empuxo* horizontal, e h a altura da parede de apoio dessa estrutura.

Figura 4.3 - Detalhe dos esforços e rotação das ações causados sobre a parede.



Fonte: Almeida, Frederico. Mosteirinho de Paudalho (s/d)

Santos (1951) relata algumas variações estruturais da cobertura de caibro-armado na cidade de Ouro Preto visando à tentativa de melhoria do empuxo nas peças sobre a alvenaria. Paredes de espessuras mais grossas eram utilizadas para minimizar o empuxo lateral, mas também se fez comum a utilização de barras de ferro atirantadas ancoradas nas paredes para absorver as forças horizontais, de modo que restassem somente as cargas verticais para solicitação de esforços nas paredes.

4.2 Parâmetros Técnicos para o Desenvolvimento do Estudo de Caso

Será avaliado neste trabalho o desempenho da tesoura de caibro-armado e suas patologias estruturais em madeira, propondo em seguida, uma sugestão em aço que apresenta melhor desempenho estrutural preservando as mesmas características arquitetônicas de uso do espaço desejáveis do caibro-armado. Neste trabalho adota-se a espécie Peroba-rosa para a tesoura em madeira de caibro-armado a ser analisada. Esta espécie, segundo o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), possui as seguintes propriedades físicas e mecânicas:

Tabela 4.1 - Características físicas e mecânicas da espécie Peroba-rosa.

Propriedades Físicas			Classificação	
Massa específica aparente (densidade) a 15% de umidade			0,79	Pesada
Contrações (%) (do p.s.f. até 0% de umidade)	Radial		4,0	Média
	Tangencial		7,8	Média
	Volumétrica		13,1	Média
	Coeficiente de retrabilidade volumétrica		0,57	Médio
Propriedades Mecânicas			Classificação	
Compressão axial	Limite de resistência (kgf/cm ²)	madeira verde	424	Médio
		madeira a 15% de umidade	555	Médio
	Coeficiente de influência da umidade (%)		3,8	Médio
	Coeficiente de qualidade		7,1	Médio
	Limite de proporcionalidade - madeira verde (N/m)		284	Médio
	Módulo de elasticidade - madeira verde (N/m)		119.700	Médio
Flexão estática	Limite de resistência (N/m)	madeira verde	899	Médio
		madeira a 15% de umidade	1.058	Médio
	Relação L/F - madeira verde		29	Média
	Limite de proporcionalidade - madeira verde (N/m)		363	Médio
	Módulo de elasticidade - madeira verde (N/m)		94.300	Médio
Choque (madeira seca ao ar)	Trabalho absorvido (N/m)		2,38	Médio
	Coeficiente de resiliência R		0,39	Médio
	Cota dinâmica R/D2		0,67	Média
Cisalhamento- madeira verde (N/m)			121	Médio
Tração normal às fibras - madeira verde (N/m)			83	Média
Fendilhamento - madeira verde (N/m)			9,4	Médio

Fonte: IBAMA, 2013.

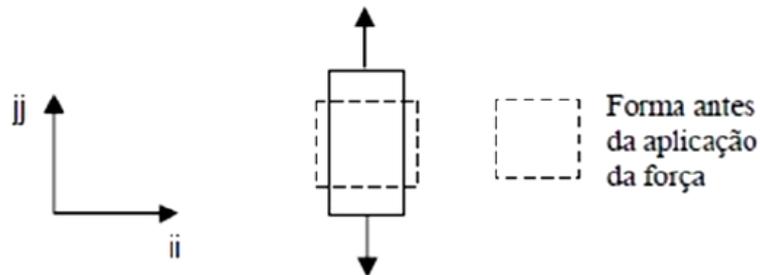
O coeficiente de Poisson é uma constante elástica que descreve a proporcionalidade entre a deformação numa direção e a deformação aplicada em outra direção que lhe seja perpendicular. Matematicamente define-se esse efeito como:

$$\nu_{ij} = - \frac{\epsilon_{ii}}{\epsilon_{jj}} \quad (6)$$

Onde ϵ_{ii} é a deformação no eixo perpendicular a aplicação da carga e ϵ_{jj} a deformação no eixo da aplicação da carga.

É possível verificar a afirmação à cima (Fig. 4.4), onde para uma deformação longitudinal positiva a deformação transversal é negativa, daí necessidade de acrescentar o sinal negativo à expressão, definindo assim o coeficiente de Poisson como positivo.

Figura 4.4 - Deformação correspondente ao coeficiente de Poisson.



Fonte: Martins, 2010.

Materiais anisotrópicos, como a madeira, apresentam o coeficiente do Poisson dependente do eixo (longitudinal, tangencial ou radial) a ser analisado. Há certo grau de dificuldade em se obter esta propriedade da madeira uma vez que a mesma caracteriza-se por ser um material ortotropico e orientado.

Green (1999) estabelece as seguintes relações para o coeficiente de Poisson nos três principais eixos da madeira:

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x}, \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x}, \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (7)$$

Para este presente trabalho foi-se adotado o coeficiente de Poisson 0,2 para as análises em madeira, de acordo as informações cedidas pelo Laboratório de Madeira da Universidade de São Paulo – USP – Campus São Carlos.

A ação em uma estrutura é definida como qualquer força, deformação ou outro agente que produza tensões e deformações na estrutura de uma obra, além de fenômeno químico, biológico ou outro, que afete os materiais, reduzindo, na maioria das vezes, sua resistência. As ações originais, que ocorrem desde o início da construção até o término da mesma, como o peso próprio, podem modificar-se durante sua vida útil, podendo causar danos na edificação. (PUCCIONI, 2001).

Segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) as ações são todas as cargas que provocam o aparecimento de esforços ou deformações na estrutura, as forças são consideradas como as ações diretas e as deformações impostas como ações indiretas. As estruturas de cobertura estão sujeitas as cargas de naturezas diferentes e com probabilidade de ocorrerem simultaneamente ou não, por isso é fundamental considerar o tempo de atuação de cada uma delas bem como a ocorrência concomitante.

As ações atuantes em uma estrutura, de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) podem ser divididas em três grupos:

- I. Ações Permanentes: são as cargas que possuem valores praticamente constantes durante toda a vida útil da edificação, ou seja, com pouca variação durante seu tempo de atuação;
- II. Ações Variáveis: são as cargas que possuem uma amplitude considerável durante a vida útil de uma construção;
- III. Ações Excepcionais: são cargas que tem duração muito curta ou instantânea, sua possibilidade de ocorrência é pequena.

A estrutura de cobertura em madeira está sujeita à diferentes tipos de ações, por isso devem ser usados critérios para combinação das ações a fim de corrigir as incertezas quanto a seus valores e a possibilidade de ocorrência simultânea. Com isso, as ações permanentes, que não possuem variação, devem ser consideradas sem redução de seus valores nominais, já as ações variáveis são minoradas através da multiplicação de coeficientes que consideram a

possibilidade de ocorrência conjunta com outras ações, como assim determina a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.2.1. Para Estados Limites Últimos

Neste trabalho será abordado para a estrutura em madeira apenas o estado limite último, visto que este é o que se aproxima mais da realidade da tesoura encontrada nas coberturas avaliadas, sendo este o enfoque principal desta etapa do trabalho. As construções correntes estão sujeitas a apenas dois tipos de ações de naturezas diferentes, em que $F_{Qj,k}$ representa o vento como ação variável principal e $F_{Gi,k}$ representa as cargas permanentes. Na norma NBR 7190 (ABNT, 1997) está prescrita a seguinte expressão para combinação dos estados limites de últimos:

$$F_{d,util} = \sum_{i=1}^m (\gamma_{Gi} F_{Gi,k}) + \gamma_Q [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qj,k}] \quad (8)$$

A verificação em relação às combinações permanentes é efetuada usualmente em todas as estruturas, evitando assim deformações que prejudiquem a aspecto estético, vibrações excessivas e deformações com magnitude suficiente para causar danos suficientes nos materiais frágeis não estruturais presentes na estrutura. Nessa combinação, as ações variáveis participam com valores correspondentes a classe de longa duração.

4.2.2. Coeficientes para Ações Permanentes e Variáveis

Os coeficientes são utilizados de acordo com as naturezas das ações e como elas se comportam ao longo da vida útil da construção. Quando a composição do carregamento inclui o peso da estrutura juntamente com outros elementos não estruturais de grande variabilidade, onde o peso próprio à estrutura representa menos de 75% do carregamento total, devem-se usar os coeficientes indicados na tabela:

Tabela 4.2 - Coeficientes para ações permanentes.

Combinações	Para Efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	$\gamma_g = 1,4$	$\gamma_g = 0,9$
Especiais ou de	$\gamma_g = 1,3$	$\gamma_g = 0,9$

Construção		
Excepcionais	$\gamma_g = 1,2$	$\gamma_g = 0,9$

Fonte: NBR 7190:1997

Os coeficientes para as ações variáveis são indicados na tabela:

Tabela 4.3 - Coeficientes para ações variáveis.

Combinações	Para Efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	$\gamma_Q = 1,4$	$\gamma_E = 0$
Especiais ou de Construção	$\gamma_Q = 1,2$	$\gamma_E = 0$
Excepcionais	$\gamma_Q = 0$	$\gamma_E = 0$

Fonte: NBR 7190:1997

Tabela 4.4 - Coeficientes de minoração.

Ações em Estruturas Correntes	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
-variações uniformes de temperaturas em relação à média anual local;	0,6	0,5	0,3
-Pressão dinâmica do vento;	0,5	0,2	0
Cargas Acidentais de Edifícios	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
-Locais em que não há predominância de pesos e equipamentos fixos, nem de elevadas concentrações de pessoas;	0,4	0,3	0,2
-Locais onde há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou elevadas concentrações de pessoas;	0,7	0,6	0,3
-Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens;	0,8	0,7	0,6
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
-Ponte de pedestres;	0,4	0,3	0,2*
-Pontes Rodoviárias;	0,6	0,4	0,2*
-Pontes ferroviárias (ferrovias não especializadas);	0,8	0,6	0,4*

Admite-se $\Psi_2 = 0$ quando a ação variável principal corresponde a um efeito sísmico;

Fonte: NBR 7190:1997

Em Estados Limites de Utilização o coeficiente Ψ_1 é utilizado para ações de média duração e Ψ_2 para ações variáveis de longa duração.

Assim, dessas ações apresentadas, as que mais atuam nas estruturas são decorrentes do peso próprio, das sobrecargas e da ação do vento. Os pesos próprios dos materiais são fornecidos pela norma NBR 6120 (ABNT, 1980), e no caso de elementos pré-fabricados, como chapas, perfis laminados, soldados ou formados a frio, os mesmos são fornecidos pelo fabricante. Pode-se também calcular o peso próprio de um elemento multiplicando-se o volume do mesmo pelo peso específico do material ao qual o elemento é constituído. Quanto às sobrecargas, a norma NBR 6120 (ABNT, 1980) também estabelece valores em função da destinação da estrutura.

A ação do vento, segundo Freitas (200-), depende de aspectos metrológicos e aerodinâmicos. Os metrológicos são relacionados com a velocidade do vento, influenciada diretamente pela localização geográfica da obra, tipo de terreno, altura da edificação, rugosidade do terreno e tipo de ocupação. Os aspectos aerodinâmicos são definidos através de uma análise da edificação no que se refere à dimensão e forma. Além disso, outros fatores importantes são as direções do vento bem como a quantidade e posição das aberturas na edificação.

Assim é importante se ter ciência das condições de carga da estrutura em que se deseja interferir, na medida em que qualquer alteração nessas condições, principalmente quando se tratar de aumento de cargas, significa aumento de tensões podendo causar danos a estrutura.

4.3. Especificações para a Trelça de Caibro-armado

Para a o cálculo das ações atuantes na trelça de caibro-armado é necessário sintetizar os dados inerentes à estrutura bem como a especificação da espécie da madeira a ser considerada, estes fatores influenciam diretamente no carregamento e conseqüentemente na variação das ações atuantes na trelça.

- Telhas cerâmicas tipo Portuguesa (Tab. 4.5);
- Materiais: todas as peças em madeira da espécie Peroba-rosa (Tab. 4.6);

Característica das telhas em cerâmica tipo Portuguesa:

Tabela 4.5 - Característica das telhas.

Característica das telhas	
Quantidade de telhas por metro quadrado	16
Peso de unitário	2,6 (kg)
Comprimento	400 (mm)
Largura	235 (mm)
Absorção	16 %
Absorção hidro	16 %
Carga por metro quadrado	40,8 kg/m ²

Fonte: Mecasa, 2013.

Tabela 4.6 - Propriedades da madeira a ser utilizada.

Madeira		Características				
Nome popular	Nome científico	Massa específica (a 15% de umidade) g/cm ³	Característicos mecânicos (madeira verde) Pequenos corpos isentos de defeitos			
			Compressão paralela as fibras- limite de resiliência N/m	Flexão elástica- limite de resistência F N/m	Modulo de elasticidad e (flexão) m E N/m	Cisalhamento paralelo as fibras - limite de resistencia N/m
Peroba Rosa ou Peroba	Aspidosperm a polyncuron	0,78	423	896	94000	121

Fonte: Centro Universitário União da Vitória (s/d).

A classe de resistência da madeira é:

$$x_{k,12} = 0,7X_m \quad (4)$$

$$x_{k,12} = 0,7 \times 42,3 \therefore x_{k,12} = 29,61 \text{ Mpa}$$

Com esse resultado, sabe-se que a Peroba-rosa pertence à classe de resistência C-20, enquadrando-se na tabela (6).

4.3.1. Cálculo das Cargas Atuantes

4.3.1.1. Cargas Permanentes

I. Peso das telhas

No cálculo das cargas geradas pelas telhas deve-se levar em consideração o índice de absorção de 16% da umidade. Assim a carga de contribuição das telhas pode ser calculada através da fórmula, (MOLITERNO, 2009):

$$P_{\text{telhas}} = \text{peso das telhas/m}^2 \times \text{área de influencia} \times \text{índice de absorção de água} \quad (9)$$

$$P_{\text{telhas}} = 40.8 \times 1.25 \times 1.16 = 59.16 \text{ kg/m}^2$$

II. Peso das Ripas

Neste trabalho foi adotado o espaçamento de 0,21m entre as ripas, resultando na quantidade de 6 ripas em 1 m². A tabela apresenta o detalhamento das dimensões das ripas.

Tabela 4.7 - Dados das ripas.

Seção	Comprimento	Volume	Densidade aparente
0.015x0.045m	6 m	0.00405m ³	790 kg/m ³

Moliterno (2009) recomenda um acréscimo de 3% na carga das ripas a fim de incluir o peso dos elementos metálicos presentes na estrutura. A ação das cargas gerada pelas ripas pode ser calculada da seguinte forma:

$$P_{\text{ripas}} = \frac{\text{densidade aparente} \times \text{volume}}{1 \text{ m}^3} \quad (10)$$

$$P_{\text{ripas}} = \frac{790 \times 0.00405}{1 \text{ m}^3} = 3.19 \text{ kg/m}^3$$

A carga distribuída sobre o caibro é resultante da somatória das ações geradas pelas telhas e ripas, sendo no total:

$$P_{total} = \text{carga das telhas} + \text{carga das ripas} \quad (11)$$

$$P_{total} = 59.16 + 3.19 = 62.35 \text{ kg/m}$$

4.3.2. Verificação dos Estados Limites Últimos

A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) admite que considere-se apenas 75% das ações variáveis de curta duração. Sendo assim calcula-se o ELU da seguinte forma:

$$F_{d,util} = \sum_{i=1}^m (\gamma_{Gi} F_{Gi,k}) + \gamma_Q [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qj,k}] \quad (8)$$

Onde;

$$\gamma_g = 1,4 \text{ (Ação permanente de grande variabilidade);}$$

$\gamma_Q = 1,4$ (Ações variáveis em geral, incluídas as cargas acidentais móveis – combinações normais);

$$\Psi_0 = 0,5 \text{ (Pressão dinâmica do vento);}$$

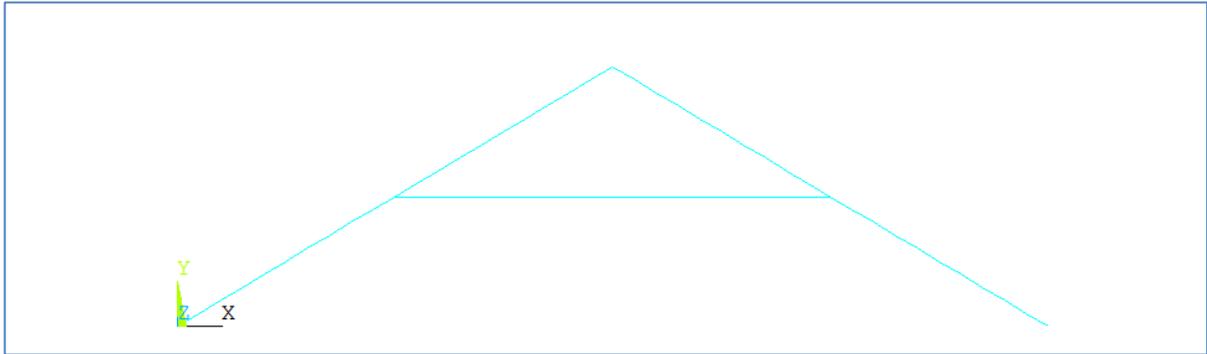
$F_{Q1,k} =$ (Ação variável do vento calculada de acordo com a norma NBR 6123 (ABNT,1998);

$$F_d = (3.19 + 59.16)1.4 + 1.4 (33) \times 0.5 = 133.49 \text{ N/m} \quad (9)$$

4.4. Análise Estrutural

O fator determinante na escolha do tipo de análise estrutural a ser feita é assegurar que os resultados obtidos serão a representação do real comportamento da estrutura. No sentido de validar esta análise estrutural, há no mercado internacional diversos programas computacionais, amplamente empregados na avaliação do comportamento de um grande número de problemas de engenharia. Neste contexto, no atual trabalho, utiliza-se o programa computacional *FTOOL*, versão 2012, para a realização da análise estrutural e dimensionamento dos modelos. (Fig. 4.5)

Figura 4.5 - Treliça de Caibro-armado sem o carregamento F_d .



As dimensões físicas para esta análise numérica foram embasadas através das tipologias de tesoura encontradas nas coberturas vistoriadas com o apoio do Programa Monumenta em Ouro Preto, onde:

- A treliça tem 10 metros longitudinais;
- A distância entre o caibro central e a cumeeira é de 1,5 metros;
- Foi considerada uma inclinação de 45 graus da treliça;
- Para esta análise considerou-se uma treliça isolada em um estado bidimensional;

Registros fotográficos de uma tesoura de caibro-armado na cobertura do Teatro Municipal de Ouro Preto, Minas Gerais. É visível a recomposição das peças em madeira, uma sobrepondo a outra, tornando o sistema ainda mais instável e frágil. Observam-se ainda os ataques biológicos e a ação do tempo no sistema de caibros e ripas que constituem a estrutura. As ligações entre as peças nesta tipologia da tesoura são bem rudimentares, vindo a ser basicamente composta por pregos.

Figura 4.6- Fachada principal do Teatro Municipal de Ouro Preto, Minas Gerais.



Fonte: Programa Monumenta, 2011.

Figura 4.7 - Cobertura do Teatro Municipal de Ouro Preto.



Fonte: Programa Monumenta, 2011.

Figura 4.8- Vista lateral da cobertura do Teatro.



Fonte: Programa Monumenta, 2011.

Figura 4.9 - Estrutura em madeira da cobertura em caibro-armado do Teatro.



Fonte: Programa Monumenta, 2011.

Figura 4.10 - Vista da cumeeira da cobertura do Teatro.



Fonte: Programa Monumenta, 2011.

Figura 4.11- Detalhe da ligação entre os caibros na treliça.



Fonte: Programa Monumenta, 2011.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

5.1. Resultados das Análises Numéricas na Tesoura de Caibro-armado

Para realizar este estudo, foi utilizado o *software FTOOL* (2012), desenvolvido pela PUC-RIO, cuja finalidade é educacional e busca dar facilidade no entendimento de pórticos planos. Caracteriza-se como uma ferramenta viável para determinação dos esforços, pois possui interface gráfica de fácil compressão e os recursos necessários para retratar com grande fidelidade a treliça estudada.

Foram vistoriadas, com o acompanhamento do Programa Monumenta, edificações no centro histórico de Ouro Preto, para a avaliação in loco da tesoura de caibro-armado e seu desempenho estrutural. Estas visitas orientadas tinham como objetivo principal o estudo dos danos estruturais decorrentes das forças atuantes na tesoura. Entretanto, observou-se também o arranjo das ligações entre os caibros, espécie de madeira comumente utilizada, simetria das peças e o uso que se destinava o espaço físico que esta tipologia proporciona.

Após as visitas, realizou-se um estudo sobre as madeiras comumente utilizadas nas coberturas do período colonial, e constatou-se que a diversidade da flora brasileira proporcionava aos seus exploradores uma gama de possibilidades de espécies que se destinavam ao uso da construção civil em cada região. Com isso, optou-se para análise da treliça neste trabalho pela espécie da Peroba-rosa. Devido a ocorrência de seu uso nas coberturas vistoriadas e pelas suas características físicas e mecânicas.

Para esta estudo considerou-se apenas o módulo de elasticidade no eixo longitudinal da Peroba-rosa de 94000 MPa pois com este valor já é possível obter os valores dos esforços normais que atuam na treliça.

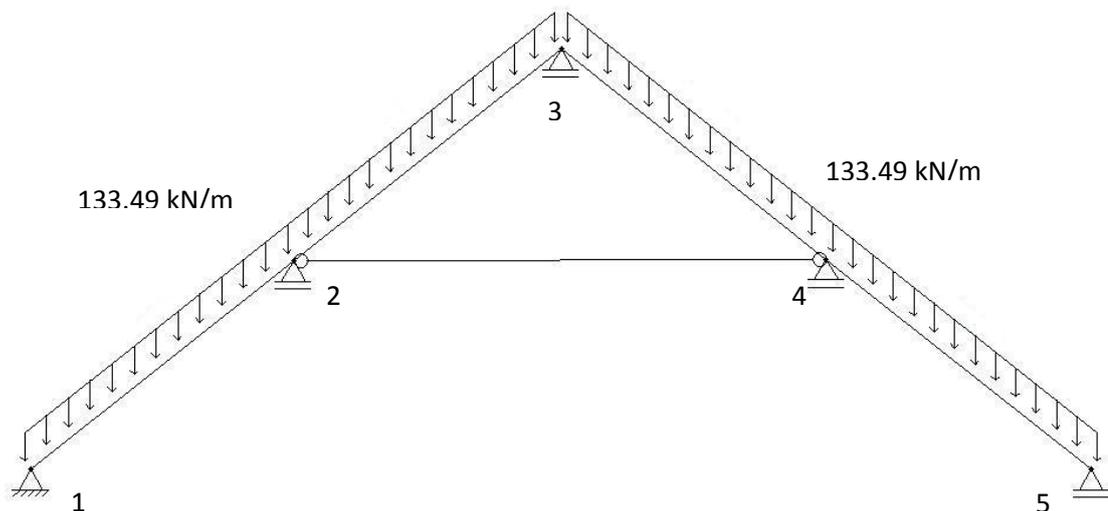
Com a análise estrutural realizada através do *software FTOOL* (2012) comprovou-se que as reações resultantes das forças aplicadas nos apoios geraram duas componentes: uma vertical e a outra horizontal. A componente horizontal tende a provocar rotações.

À princípio, acreditava-se que este tipo de tesoura apresentava em suas extremidades um empuxo lateral, entretanto, com as análises realizadas, observou-se numericamente, uma outra

resultante nos apoios cuja a componente horizontal tende a provocar os mesmos deslocamentos provocados pelo empuxo lateral.

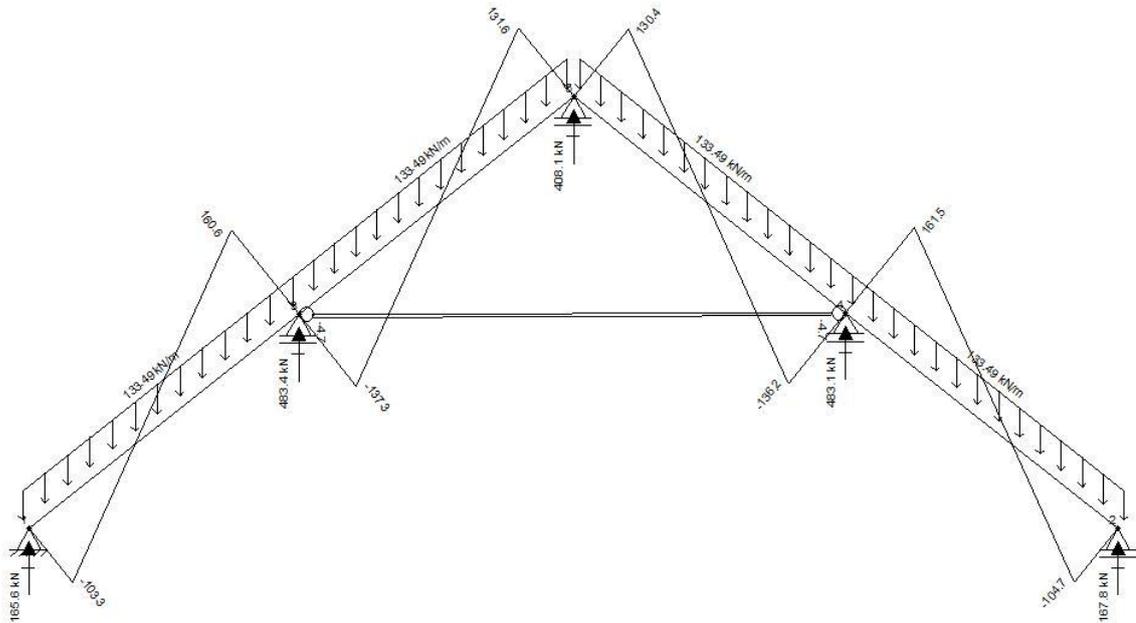
Na Figura 5.1 gerada pelo *software FTOOL* (2012), estão definidos o carregamento F_d e os elementos de contorno da tesoura. Adotou-se a carga vertical uniformemente distribuída nos caibros superiores de 133.49 kN/m calculada anteriormente segundo as diretrizes da norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Na ligação 1 foram restringidos os eixos x e y e para as ligações 2,3,4,5 foi restringido apenas o eixo y, adota-se este procedimento para esta análise devido ao que foi observado nos tipos de ligações encontradas nas visitas as coberturas das edificações.

Figura 5.1 - Treliça de caibro-armado com o carregamento F_d para a madeira.



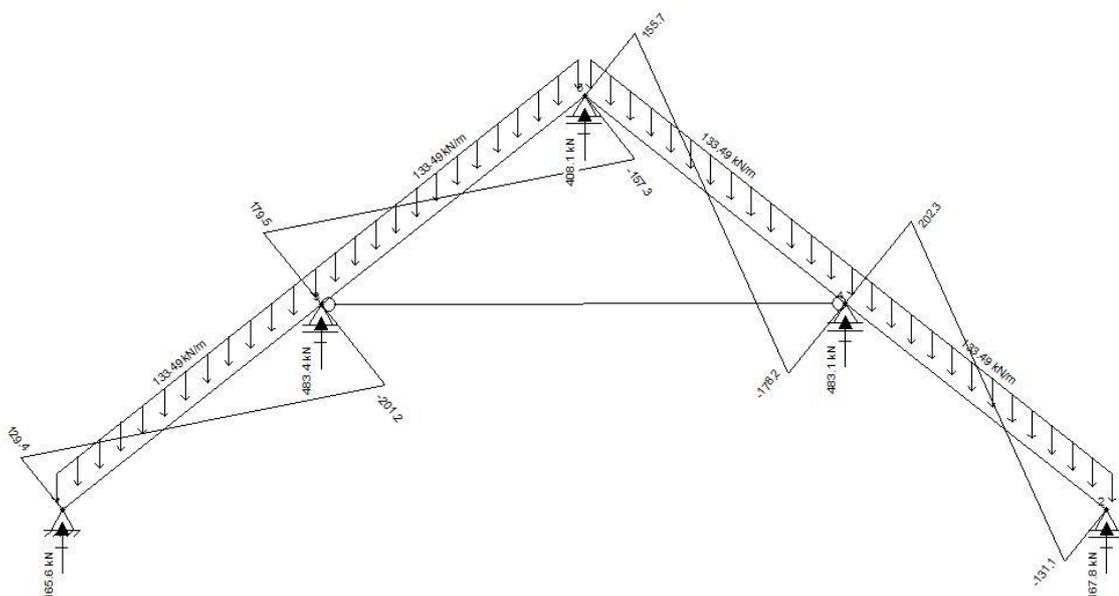
A Figura 5.2 apresenta os resultados gerados pelo *FTOOL* (2012) para a análise das forças normais atuantes na tesoura. Nota-se apenas esforços verticais devido ao tipo de carregamento aplicado. Verifica-se que os esforços no caibro central da tesoura são de compressão. A força axial máxima encontrada é 106 kN de tração localizada na ligação 4, sendo que o esforço mínimo de compressão aparecerá na barra central, sendo este de - 4 kN.

Figura 5.2 - Resultado dos esforços normais.



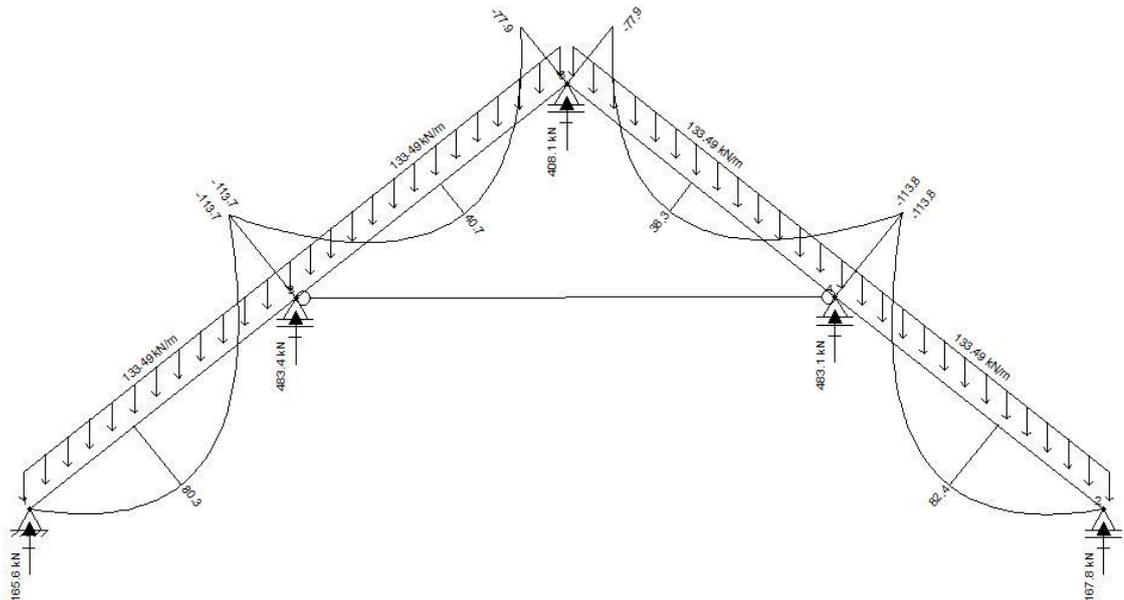
A Figura 5.3 apresenta o resultado dos esforços cortantes na tesoura. Nota-se que na barra central o esforço a flexão é nulo. O maior esforço cortante ocorrerá na ligação 4, este sendo 483.1 kN.

Figura 5.3 - Resultado dos esforços cortantes.



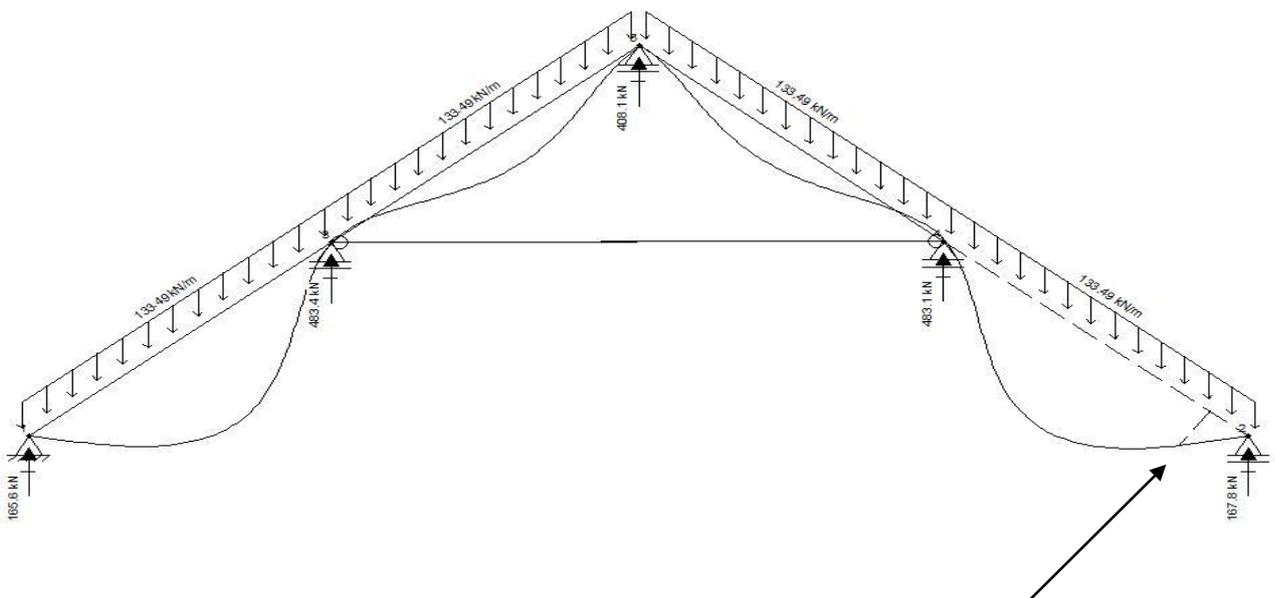
A Figura 5.4 apresenta onde ocorrem os momentos fletores da tesoura. Os maiores momentos fletores concentram-se nas ligações 2 e 4 respectivamente.

Figura 5.4 - Momentos Fletores.



A Figura 5.5 apresenta os resultados gerados para a deformação máxima da tesoura antes de seu colapso. Nota-se que há uma deformação excessiva nas partes inferiores do caibro esquerdo e direito. Essa deformação causa uma impressão errônea de empuxo lateral, como observado por este trabalho através das análises numéricas.

Figura 5.5 - Deformação máxima da tesoura antes do colapso.

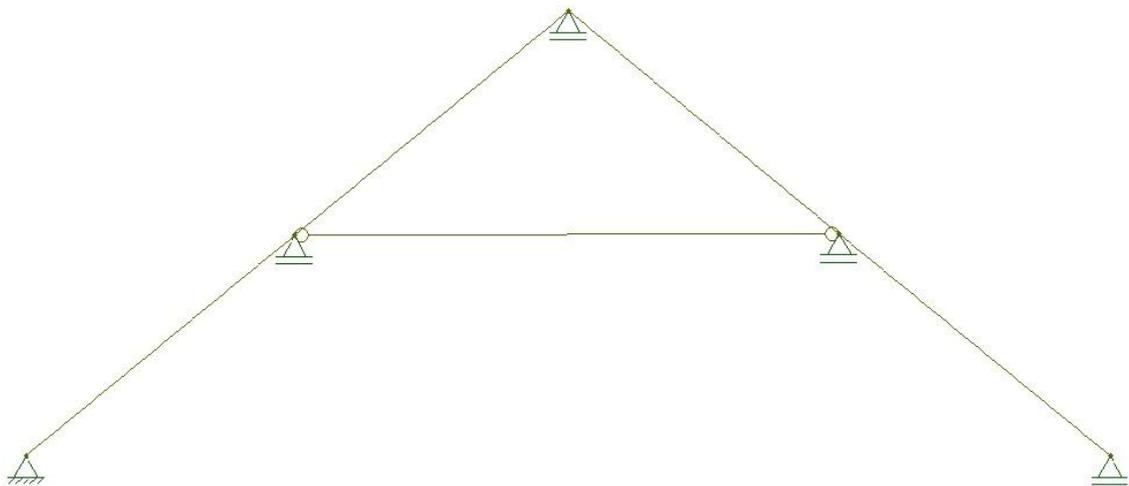


A Figura 5.5 também mostra a flecha máxima da treliça cuja localização se encontra nas barras inferiores da tesoura. O valor da flecha máxima é de $Dx: -4.140e001$ mm no eixo “x” e em $Dy: -5.587e-001$ mm no eixo “y”. Nota-se que esta flecha se encontra próximo à ligação da tesoura com a parede, que apesar de ser relativamente pequena, já é suficiente para causar deslocamentos e rotações.

5.2. Proposta de Tesoura

É sugerida neste trabalho a substituição total do material em madeira da tesoura de caibro-armado por aço. Entretanto, a substituição total, em certos casos, pode comprometer outros elementos originais da edificação, como forros, alvenarias, entre outros, sendo então indispensável à avaliação da consequência dessa opção para os elementos que serão interligados a ela. Como testemunho do antigo telhado, costuma-se deixar uma tesoura original sem carregamento entre as novas estruturas. Preservando as ripas em madeira, conforme as originais.

Figura 5.6- Sugestão de tesoura.



Para o dimensionamento da proposta de tesoura foi considerado as mesmas dimensões físicas do caibro-armado analisado anteriormente neste trabalho. Entretanto, optou-se pelo aço ASTM-36 em perfil caixão com 3mm de espessura.

Para uma análise comparativa foi desenvolvido o cálculo para o Estado Limite Ultimo de acordo com a norma NBR 8800 (ABNT, 2008b) – Projeto de Estruturas em Aço e de

estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – com o intuito de demonstrar a maior resistência de caga da treliça em aço. Logo para a análise realizada no *FTOOL* (2012), a treliça em aço está submetida ao carregamento último de $133.49 N/m$, o mesmo aplicado para a treliça em madeira, visto que as cargas aplicadas são as mesmas, diferenciando apenas o material a ser utilizado na concepção da estrutura.

Na norma NBR 8800 (ABNT, 2008B) está prescrita a seguinte expressão para combinação dos estados limites de utilização:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \times F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^m (\gamma_{qj} \times \Psi_{oj} \times F_{Qj,k}) \quad (15)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ são os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada como principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$ são os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal;

γ_{gi} é a ação permanente do peso próprio da estrutura metálica. De acordo com a norma NBR 8800 (ABNT, 2008b) adotou-se o coeficiente 1,25;

γ_{qj} é a ação variável do vento. De acordo com o a norma NBR 8800 (ABNT, 2008b) adotou-se o coeficiente 1,4;

Ψ_{oj} é a ação de pressão dinâmica do vento em estruturas em geral. De acordo com o a norma NBR 8800 (ABNT, 2008b) adotou-se o coeficiente 0,6;

Para este calculo foram adotados as mesmas ações permanentes e variáveis utilizadas para a tesoura em madeira. Sendo assim:

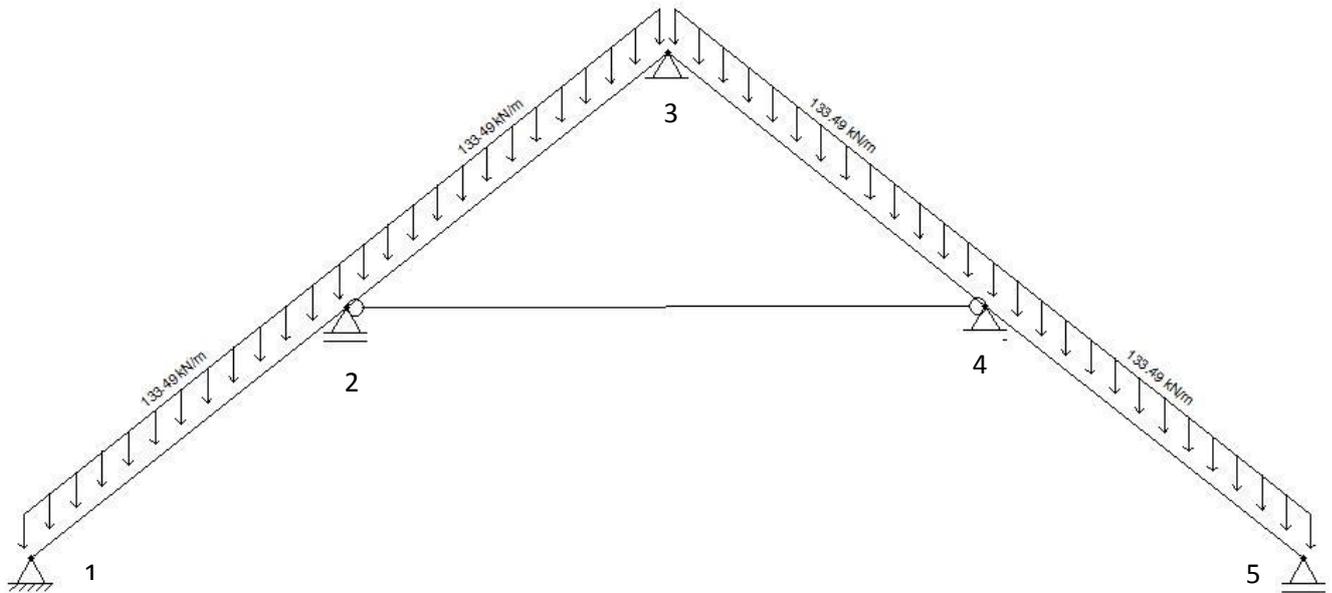
$$F_d = 1.25(3.19 \times 59.16) + 1.4 (33) + 1.4 \times 0,6 \quad (16)$$

$$F_d = 282.94 \text{ kN/m}$$

Com o resultado deste cálculo nota-se que a resistência da treliça em aço para as ações atuantes é de 282.94 kN/m, sendo quase 3 vezes maior que a mesma em madeira. De acordo

PFEIL (2003) foram adotados o módulo de elasticidade longitudinal do aço $E= 205\text{GPa}$ e Coeficiente de Poisson 0,3 para o aço nesta análise.

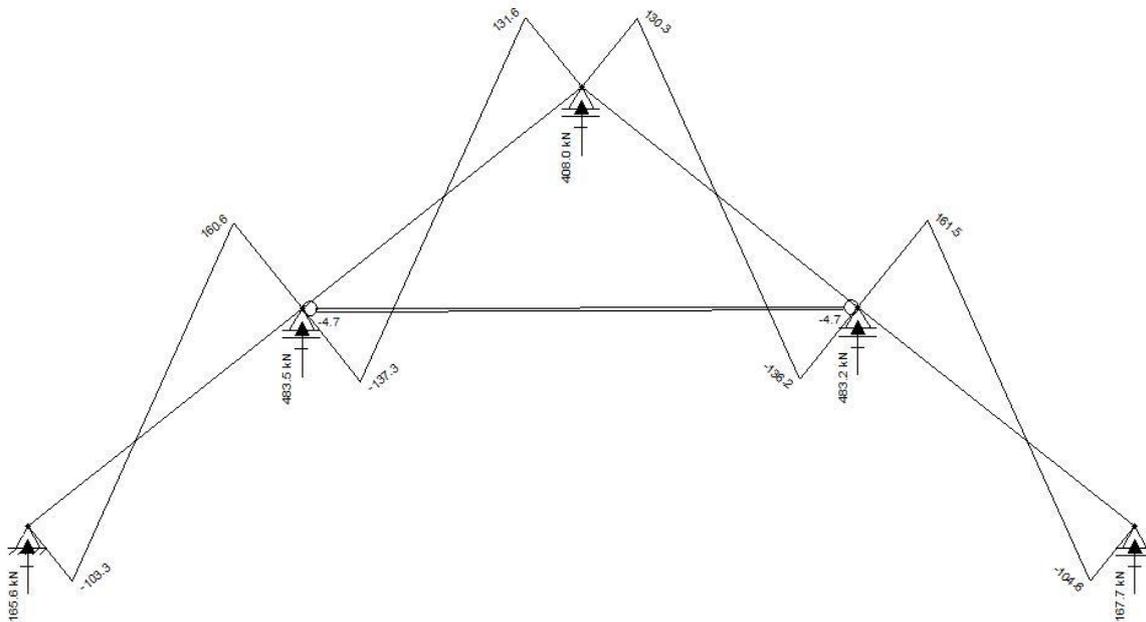
Figura 5.7 - Proposta de treliça com o carregamento das ações e os elementos de contorno já definidos.



As condições de contorno impostas para a tesoura em madeira foram mantidas também para a treliça em aço.

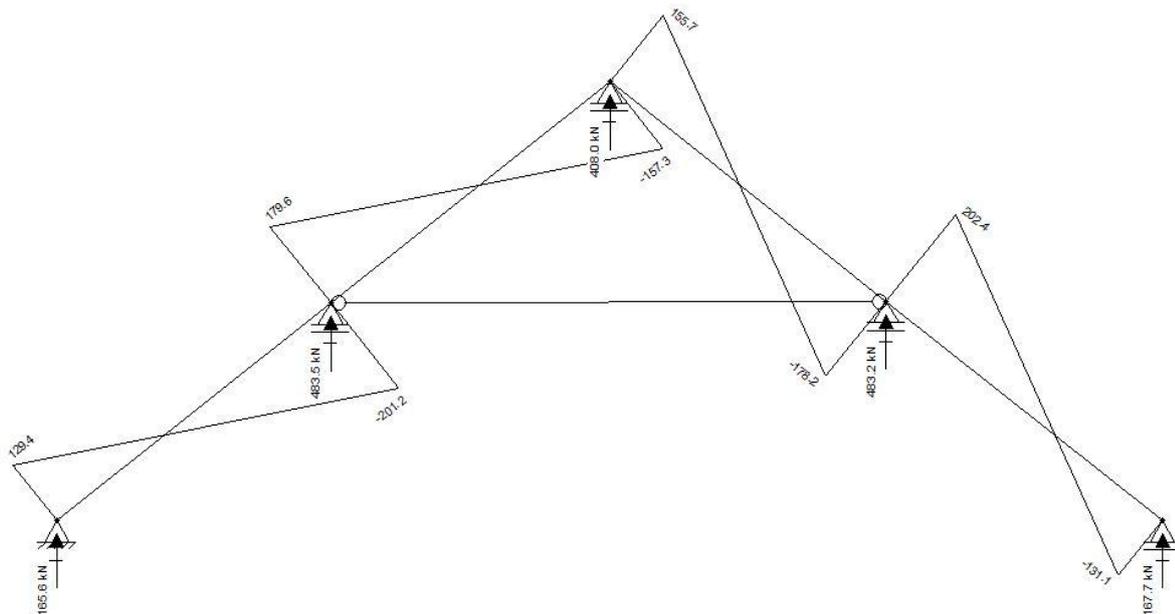
A Figura 5.8 mostra os resultados da análise dos esforços normais atuantes na tesoura. Nota-se uma uniformidade dos esforços nas barras devido a capacidade do aço de vencer grandes vãos, minimizando assim o uso de ligações ao longo da estrutura. A barra central continua a trabalhar a compressão.

Figura 5.8 - Resultado dos esforços normais.



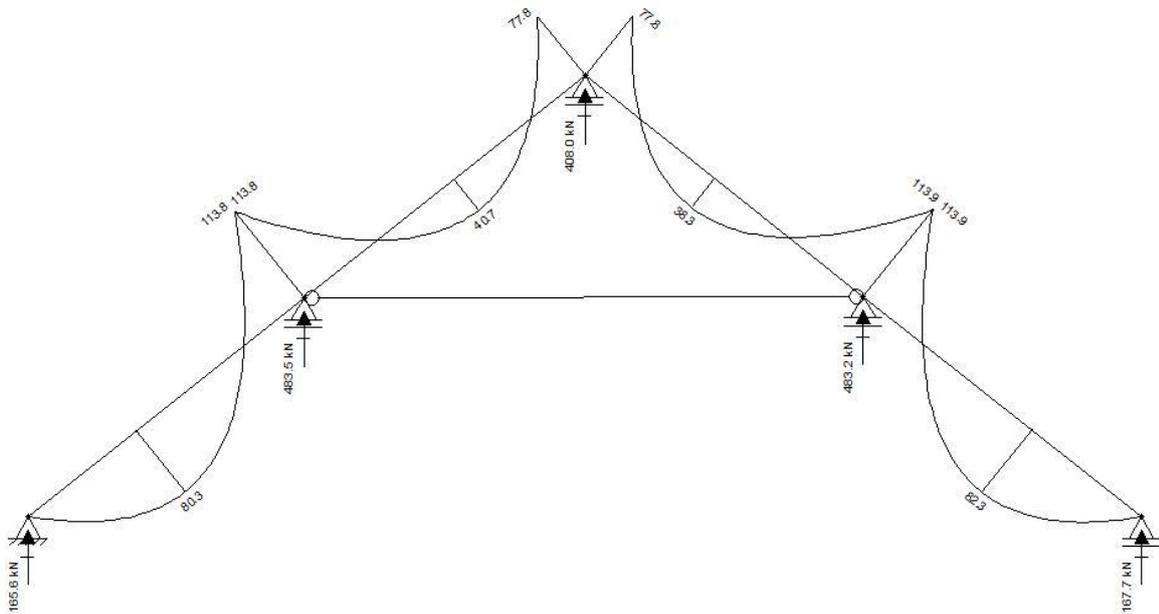
A Figura 5.9 apresenta os resultados dos esforços cortantes. Nota-se que os esforços cortantes maiores ocorrem nas barras superiores.

Figura 5.9 - Resultado esforços cortantes.



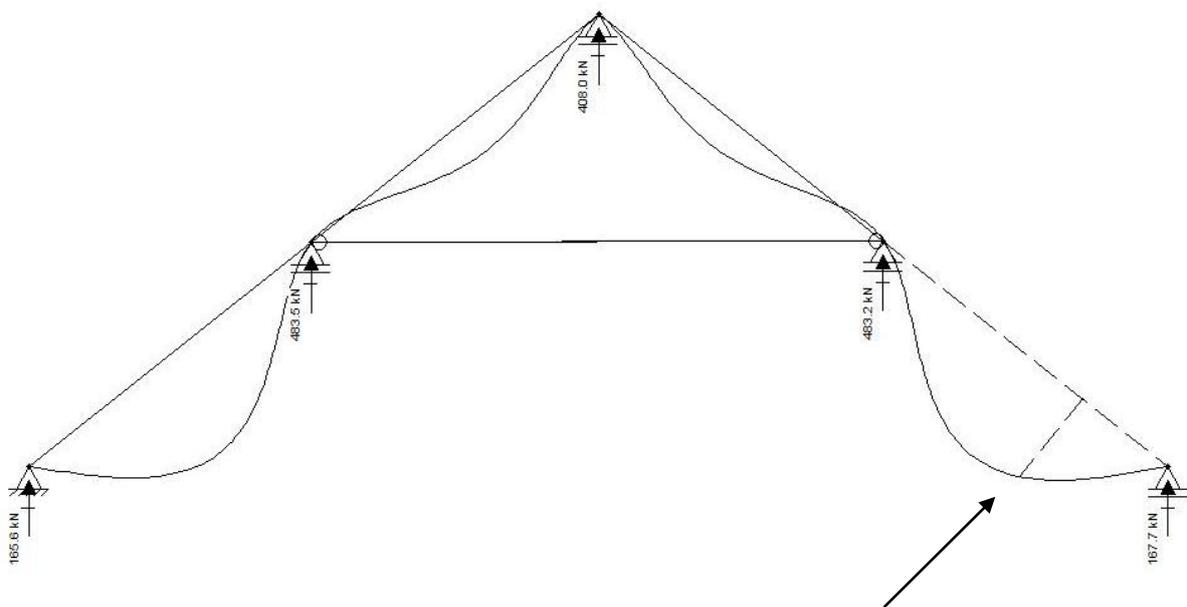
Na Figura 5.10 são apresentados os momentos fletores. Nota-se que os maiores momentos ocorrerão nas rotulas, sendo estes de 317 kN/m.

Figura 5.10 - Resultado do momento fletor.



A Figura 5.11 apresenta a deformação máxima. Nota-se que a flecha nas extremidades das barras inferiores são de $D_x: -2.266e+001$ mm no eixo “x” e de $D_y: -2.858e+001$ mm no eixo “y”. Nota-se que o valor da flecha da treliça em aço é bem inferior ao da treliça em madeira, concluindo por tanto que o desempenho estrutural da treliça em aço é superior ao da mesma em madeira, proporcionando assim maior estabilidade e durabilidade da estrutura.

Figura 5.11- Resultado da deformação máxima da treliça.



Observa-se que os deslocamentos laterais são mínimos nesta proposta de tesoura preservando assim as alvenarias e evitando as rotações e deslocamentos da estrutura.

Sugere-se para esta tesoura utilização de aço galvanizado ou zincado devido a resistência a corrosão que apresentam dando assim mais confiabilidade à estrutura e reduzindo os custos de manutenção. Devido à espessura reduzida e a esbeltez dos perfis metálicos a treliça de caibro-armado disponibiliza mais espaço, podendo ampliar e melhorar o uso na cobertura da edificação.

Após essas análises observa-se que a tesoura de caibro-armado em madeira apresenta patologias decorrentes de sua tipologia estrutural, mesmo agregando-se reforços a estrutura, apresentará deslocamentos horizontais comprometendo a edificação como um todo, caracterizando-a assim como uma tesoura estruturalmente instável.

A proposta de tesoura em aço sugerida por este trabalho satisfaz as mesmas necessidades arquitetônicas que a do caibro-armado em madeira com os benefícios de uma maior estabilidade, resistência e praticidade. O emprego do aço como elemento estrutural permite vencer maiores vãos, trazendo para a cobertura uniformidade no carregamento das ações atuantes. Sugere-se que as ligações entre os perfis metálicos sejam parafusadas, visto a facilidade de mão de obra disponível no mercado e a praticidade que este tipo de ligação proporciona.

Contudo os cuidados a serem tomados com essa substituição total em aço devem ser avaliados por se tratar de obras destinadas a edificações históricas, sendo sugeridos:

- A rigidez e as demais propriedades do novo material são diferentes da matéria original, portanto deve-se analisar o impacto da substituição além da questão patrimonial, também sob o âmbito da compatibilidade com os materiais originais da edificação acerca das propriedades físicas e mecânicas. Por exemplo, ao substituir a estrutura de madeira por aço, por este assumir maior resistência mecânica, muitas vezes diminui-se o número de tesouras e modifica-se o seu posicionamento sobre a alvenaria, podendo ocasionar rachaduras, em função da redistribuição do peso sobre a alvenaria antiga;
- O aço sob o efeito do fogo sofre perda de resistência mecânica, o que causa deformações significativas.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÃO

A preservação de nossa cultura é a prerrogativa do incentivo às obras de conservação e restauro dos nossos bens edificados. Os países desenvolvidos estabeleceram suas normas e resoluções para a preservação do patrimônio anteriores ao Brasil, que apesar de recente, vem valorizando seus bens culturais materiais e imateriais. Os profissionais atuantes neste conceito de intervenção em edifícios, como arquitetos, engenheiros, restauradores e cientistas, vem buscando formas mais eficazes de promover a conservação e restauração dos bens históricos. Conclui-se que só com a consolidação da ciência e da preservação da cultura em nosso país, é que se podem traçar diretrizes para uma intervenção em nossos bens de forma plena.

O presente trabalho trata do estudo das cargas atuantes em uma tesoura típica da arquitetura colonial brasileira e sua conseqüente patologia. Inicialmente faz-se um apanhado histórico da arquitetura colonial, após apresenta-se o aço como elemento de reforço estrutural ao qual se tornaria posteriormente elemento parcial ou total na concepção de uma edificação. Abordam-se na revisão bibliográfica as resoluções e diretrizes das cartas patrimoniais.

A madeira e o aço como elementos estruturais são abordados neste presente trabalho bem como suas características físicas e mecânicas. Logo após é apresentada a tipologia de tesoura caibro-armado, faz-se um apanhado histórico e construtivo.

Foi-se utilizado como campo o sítio histórico da cidade de Ouro Preto, Minas Gerais. Foram realizadas visitas às obras onde a tipologia da cobertura apresentava o caibro-armado. Este trabalho explorou o Teatro Municipal de Ouro Preto, antiga Casa da Ópera, devido à facilidade de acesso a cobertura e praticidade na obtenção de referências documentais.

Seguindo as recomendações da norma NBR 7190 (ABNT, 1997), para o dimensionamento de estruturas de madeira, primeiramente calculou-se o estado limite último da tesoura em madeira para verificar os esforços atuantes. Após essa verificação realizou-se a análise estrutural no *software FTOOL* (2012), onde se constatou que as reações resultantes, vertical e horizontal, das forças causam a principal patologia nesta tipologia, resultando em deslocamentos e rotações nas paredes, indo contra a concepção de empuxo lateral gerada pela tesoura de caibro-armado.

Na proposta em aço sugerida por este trabalho calculou-se o estado limite último segundo a norma NBR 8800 (ABNT, 2008b), para projetos de estruturas em aço, seguida de uma análise através do *software FTOOL* (2012), para a validação do modelo. Para a concepção dessa estrutura foram mantidas as características arquitetônicas do caibro-armado, ao qual o intuito é promover uma liberdade de uso na cobertura, beneficiada pelas características físicas e mecânicas que o aço agrega ao seu uso como uma maior rigidez, leveza e resistência estrutural.

Análises de estruturas através de softwares numéricos são de extrema importância para o conhecimento das ações atuantes e resultantes, visto que sem este estudo científico o avanço das técnicas de conservação e restauro não passam de formulas empíricas, sem embasamento normativo, como ocorre hoje no Brasil.

A recomposição de peças em madeira por aço repercute polêmica ao meio técnico-científico restaurador, mas trabalhos como este mostram que é possível a realização de boas intervenções sem a descaracterização do bem cultural respeitando a volumetria, ritmo e simetria da arquitetura concebida na edificação histórica.

6.1. Sugestões para Futuros Trabalhos

A partir do tema abordado pelo presente trabalho, sugere-se como pesquisas futuras:

- i. Realizar investigações em estudos de caso, para identificar as técnicas de restauro mais utilizadas em coberturas de estruturas em madeira;
- ii. Estudar novas técnicas de restauro e o seu emprego nas coberturas de madeira em edificações históricas;
- iii. Estudar reforços estruturais com a utilização do aço;
- iv. Avaliar a durabilidade de novos materiais empregados na intervenção de coberturas com estruturas de madeira;
- v. Avaliar o emprego de cada método de restauro em coberturas em madeira sob o ponto de vista da economia e sustentabilidade;
- vi. Estudar os elementos estruturais agregados as coberturas os adequando ao sistema metálico, padronizando-os;
- vii. Estudar aplicabilidade da cinta metálica nas coberturas como reforço estrutural;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6125**: Produtos Siderúrgicos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas em aço e de estruturas mistas de aço e concreto em edifícios. Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 8681**: Ações e seguranças na estrutura – Procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ARAÚJO, Maria de Fátima. **Guia do Arquivo Regional da Madeira**. Arquivo Histórico da madeira, vol. XX, 1997, 204 pág.

BONELLI, Rômulo e DELPINO, Rossana. **Manual Prático de Conservação de Telhados**. IPHAN/MONUMENTA. Rio de Janeiro 2006.

CADERNOS TÉCNICOS. **Madeira: Uso e Conservação** Caderno Técnico vol.6. PROGRAMA MONUMENTA, Brasília, 2006.

CALIL Jr., LAHR e DIAS. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. Editora Manole, 2002.

CARDOSO, Francisco Ferreira. **Coberturas em Telhados**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

CARVALHO, Albino. **Madeiras Portuguesas – Vol. I**. Instituto Florestal, Lisboa, 1996, ISBN 972-8097-23-9, 415 p

CAVALCANTE DE CASTRO, Eduardo Mariano. **Patologia dos Edifícios em Estrutura Metálica**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PROPEC/E,/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE UNIÃO DA VITÓRIA. **Propriedades Mecânicas e Tensões Admissíveis de Algumas Madeiras Brasileiras**. Disponível em: < <http://velho.uniuv.edu.br> > Acessado em 12 de março de 2011.

COLIN, Sílvio. **Técnicas Construtivas do período Colonial**, 2010. Disponível em: <http://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2010/09/06/tecnicas-construtivas-do-periodo-colonial-i/>

CONFERENCIA DE NARA. **Conferencia sobre a autenticidade em relação a convenção do patrimônio mundial**. UNESCO/ICCROM/ICOMOS, 1994.

CUSTODIO, José de Arimathéia Cordeiro. **A arquitetura de defesa no Brasil Colonial**. Londrina, v.7, n.10, p.173-194, jan./jun. 2011.

FAUSTO, Boris. **História do Brasil (Colônia)**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996.

FERNANDES GUARNIER, Cristhiane Roberta. **Metodologias de Detalhamento de Estruturas Metálicas**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PROPEC/E,/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil, 2009.

FERREIRA, Osvaldo Poffo, **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2003.

FRANÇA, Klaydson D. Lopes. **Estudo de Reforços de Elementos Estruturais de Madeira com Estrutura Metálica em Edificações Antigas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PROPEC/E,/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil, 2007.

FREITAS, Arlene Maria Sarmanho. Curso de Pós-Graduação em Construção Metálica: Sistemas Estruturais - Notas de Aula. PROPEC/EM/UFOP, Ouro Preto, 200-.

GESUALDO, Francisco A. R. **Patologias com construções em madeira**. Editora Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2003.

HILLESHEIM, Maicon José. **Cobertura de Madeira Executada sem Projeto Localizada em Sinop/MT: Análise Técnica dop Modelo Estrutural**. Trabalho de Conclusão de curso. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Mato Grosso, Sinop/MT, 2011.

ICOMOS. **Carta de Burra**. Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. ICOMOS, 1980.

INSTITUTO ESTADUAL DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS. **Diretrizes para a proteção do patrimônio cultural de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2001.

INSTITUTO PATRIMÔNIO HISTÓRICO NACIONAL. **Carta de Brasília**. Documento Regional do Cone Sul sobre autenticidade. Brasília, 1995.

JUNIOR BOTELHO, Jerônimo Araújo. **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2006.

KLEIN, D.L e SILVA FILHO, L.C.P. **Edificações Históricas: procedimento de recuperação**. In: VII Congresso Latino-americano de Patologia de La Construcción y IX Congreso de Control de Calidad em La Construcción, 3.,2003, México. CONPAT. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

LLOYD, Ana Luiza Lima. **O uso do aço nas intervenções em edificações históricas: Interfaces da arquitetura e da estrutura** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PROPEC/EM/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil, 2006.

LOURENÇO, Paulo B. **Reabilitação de construções antigas – casos práticos**: documento de trabalho. Universidade do Minho, 1999. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Historical%20constructions/page%2091-116%20_Lourenco_.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2006.

MACHADO, J. Saporiti. **Características anatômicas, físicas e mecânicas da madeira**. In Documentação do Curso de Especialização “A madeira na construção”. LNEC, 1999.

MEDEIROS. R. C. **Forças em peças de contraventamento de treliças de madeira**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, 2010.

MELO SANTOS, Mirvane Vasconcelos. **Avaliação do Desempenho de Soluções Estruturais em Aço Para Telhados Coloniais**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PROPEC/EM/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil, 2011.

MOLITERNO, ANTONIO. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. 3ª ed. São Paulo: E. Blucher, 2009.

RAAD JÚNIOR, Antoine Aziz. **Diretrizes para Fabricação e Montagem das Estruturas Metálicas**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PROPEC/EM/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil.

PEREIRA, Natália Biscaglia. **Restauro em Coberturas com Estruturas em Madeira: Influência da Decisão de Projeto na Preservação do Patrimônio Cultural**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

PERSIKE, H. **Metodologia para manutenção do patrimônio edificado partindo do diagnóstico de causa prováveis e indicando sua terapia**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PFEIL Walter, PFEIL Michéle. **Estruturas de Madeira**. 6 edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2003. 224p. Rio de Janeiro, 2003.

PFEIL Walter, PFEIL Michéle. **Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático**. 8 edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2009.

PENTEADO, Antônio Rocha. **Belém, Estudo e Geografia Urbana**. Vol. 1. Coleção Amazônica. Universidade Federal do Pará, 1968.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca. **Estruturas Metálicas**. 2 edição. Editora Edgard Blucher, 2005.

PROGRAMA MONUMENTA/IPHAN. **Fotos de Arquivo**. Ouro Preto, 2011.

PUCCIONI, Silva. **Recomendações para análise, conservação e restauro estrutural do patrimônio arquitetônico**. In: Comitê Científico Internacional para Análise e Restauração de

Estruturas do Patrimônio Arquitetônico – ISCAR SAH, Paris, 2001. Documento aprovado pelo comitê na reunião de Paris. ISCAR SAH, Paris, 2001.

REIS, Márcia. **Uma proposta de padronização de telhados coloniais em estruturas metálicas**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PROPEC/EM/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil, 1996.

REIS, Nestor Goulart. **Evolução Urbana do Brasil 1500/1720**. São Paulo: Editora Pioneira, Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

RODRIGUES, Romana M.S. Costa de Oliveira. **Construções antigas de madeira: Experiência de obra de reforço estrutural**. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Universidade do Minho, Minho, 2004.

SANTOS, Paulo F. **Arquitetura Religiosa em Ouro Preto I**. Livraria Kosmos, Rio de Janeiro, 1951.

SZUS, Carlos Alberto e TEREZO, Rodrigo Figueiredo. **Estruturas de Madeira**. Notas de aula, UFCS. Florianópolis. 2005.

TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas**. 2004, 137 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil, 2004.

TIRAPELI, Percival. **Arte colonial: barroco e rococó**. Companhia Editora Nacional (Coleção Arte Brasileira), São Paulo, 2006.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM). Produção Acadêmica. São Carlos, 2000.

VASCONCELOS, Diogo de. **História antiga das Minas Gerais**. Belo Horizonte: Itatiaia, 1974 (2 vols.).

VASCONCELLOS, Sylvio de. **Vila Rica: formação e desenvolvimento: residências**. Editora Perspectiva, São Paulo, 1977.

KLOCK, Umberto. **Química da Madeira**. 3d. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba, 2005.

II CONGRESSO INTERNACIONAL DE ARQUITETOS E TÉCNICOS DE MOMUMENTOS HISTÓRICOS. **Carta Patrimonial de Veneza**. . – ICOMOS – Conselho Internacional de Museus e Sítios Históricos. Veneza, 1964.

REFERENCIA DAS ILUSTRAÇÕES

BLANCO, Manolo. Centro Georges Pompidou, França. Disponível em www.oglobo.globo.com acessado em cinco de maio de 2013.

BONFIM, Andréa. Cidade histórica de Ouro Preto. Disponível em www.momentospelomundo.com acessado em 03 de abril de 2013.

CALATRAVA, Santiago. Edifício Garagem América. São Paulo. Disponível em www.metálica.com.br acessado em seis de maio de 2013.

CELESTINO, Wanderlei. Estação da Luz, São Paulo. Disponível em www.infoescola.com.br acessado em seis de maio de 2013.

COSTA, Arlindo. Anisotropia da madeira. www.portaldamadeira.com.br acessado em 15 de novembro de 2012.

LADÍN – Laboratório de Dinâmica e Instrumentação. Disponível em www.ladin.usp.br acessado em seis de fevereiro de 2013.

PAIVA, Alessandro. Catedral de Santa Sofia de Constantinopla. Disponível em www.fuievouvoltar.files.wordpress.com acessado em treze de abril de 2013.

PEREIRA, Telma. Mercado de Ver-o-Peso, Belém. Disponível em www.curtasasferias.com.br acessado em seis de maio de 2013.

STRUCTURAE – *International Database and Gallery of Structures*. Disponível em www.en.structurae.de/en/strutures/data/str00131.php acessado em 5 de maio de 2013.

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura.. Disponível em en.unesco.org acessado em 5 de maio de 2013.

VICENTI, Marcel. Teatro Municipal de Ouro Preto. Disponível em www.viagem.uol.com.br acessado em treze de abril de 2013.

