

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÓMICA DE ESTRUTURAS DE COBERTURA DE GRANDE VÃO EM MADEIRA LAMELADA COLADA

PAULO ALEXANDRE RIBEIRO DE CARVALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Prof. Dr. José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus pais e minha irmã

Não basta saber, é preciso também aplicar

Johann Goethe

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui o meu reconhecimento a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho e os quais queria destacar enumerando-os em seguida.

A meus Pais e minha irmã sem os quais seria impossível a realização do Mestrado.

Aos meus avós, pelos exemplos de determinação e perseverança.

À Ana, minha namorada, pela paciência e apoio constante.

Ao Prof. Doutor José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria, meu orientador, gostaria de agradecer o acompanhamento e apoio incondicional dado, especialmente durante os momentos de maior incerteza.

Por último, agradeço aos meus companheiros de Mestrado, Sandro Alves, Pedro Teixeira e José Mondragão, pelo apoio dado durante as várias horas de trabalho que partilhamos.

RESUMO

A dissertação aqui apresentada tem como objectivo fazer um estudo sobre o potencial de estruturas de cobertura de grande vão em madeira lamelada colada. Este estudo irá assentar numa análise comparativa entre a GLULAM e o aço incidindo em parâmetros técnicos e económicos.

A análise dos parâmetros técnicos englobará o estudo de características físicas e mecânicas da GLULAM e aço, tipos de sistemas estruturais, definição dos tipos de vãos e o processo construtivo.

A análise económica encontra-se dividida em duas etapas. Primeiro, será feito um estudo do mercado português de estruturas de cobertura em aço e GLULAM. Partindo dos dados recolhidos será criado um modelo que permitirá simular o custo da construção deste tipo de estruturas.

Na conclusão, os critérios de desempenho seleccionados irão ser compilados e resumidos de forma a permitir uma comparação rápida e intuitiva.

Palavras-Chave: madeira lamelada colada, GLULAM, estrutura de cobertura, aço, grande vão, Análise técnica e económica.

ABSTRACT

This thesis has the objective of analysing the potential of long span roof structures in glued laminated timber. The research will be based in a comparative study between GLULAM and steel regarding technical and economical parameters.

The analysis of technical parameters will comprise the study of physical and mechanical properties of GLULAM and steel, roof structures types, span definitions and construction processes.

The economical analysis is divided in two stages. First, a study of the Portuguese steel and GLULAM roof structure market will be made. Based on the results, a model will be created in order to simulate the building cost of this type of structure.

In the conclusion part the performance criteria will be gathered and summarized to allow a fast and intuitive comparison.

KEYWORDS: glued laminated timber, GLULAM, roof structure, steel, long span, technical and economical analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS	XIII
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	XV
1 INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS	1
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2 OBJECTIVOS	3
1.3 ÂMBITO E MÉTODO DA PESQUISA	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS SIMPLES EM MADEIRA LAMELADA COLADA E AÇO	5
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	5
2.2 A MADEIRA LAMELADA COLADA COMO MATERIAL ESTRUTURAL.....	5
2.2.1 O QUE É A GLULAM?	5
2.2.2 A ORIGEM DA GLULAM.....	6
2.2.3 A MADEIRA E O LAMELADO COLADO.....	7
2.2.4 VANTAGENS DA GLULAM SOBRE A MADEIRA MACIÇA.....	12
2.2.5 PROCESSO DE FABRICO	15
2.2.6 COLAS	19
2.2.7 TIPOS DE GLULAM.....	20
2.3 O AÇO COMO MATERIAL ESTRUTURAL	21
2.3.1 O QUE É O AÇO?	21
2.3.2 A ORIGEM DO AÇO.....	21
2.3.3 PROCESSO DE FABRICO	23
3 ESTRUTURAS DE COBERTURA EM MADEIRA LAMELADA COLADA E AÇO	27
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	27
3.2 DEFINIÇÃO DE VÃO	27

3.3 TIPOS DE ESTRUTURAS DE COBERTURA	29
3.3.1 VIGAS	29
3.3.2 ESTRUTURAS ARTICULADAS PLANAS	32
3.3.3 ARCOS	34
3.3.4 PÓRTICOS	36
3.3.5 ESTRUTURAS RETICULADAS ESPACIAIS	38
3.3.6 CÚPULAS.....	41
3.3.7 CASCAS	43
3.3.8 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS EM FUNÇÃO DO VÃO.....	45
3.4 ESTRUTURAS EM AÇO OU GLULAM	46
3.4.1 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE GLULAM	47
3.4.2 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO.....	54
4 ANÁLISE TÉCNICA DE COBERTURAS DE GRANDE VÃO EM GLULAM E AÇO.....	57
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	57
4.2 ANÁLISE DOS MATERIAIS.....	57
4.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS	58
4.2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS	66
4.2.3 SUSTENTABILIDADE.....	75
4.3 ANÁLISE DO PROCESSO CONSTRUTIVO	81
4.3.1 EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA E AÇO	81
4.3.2 TRANSPORTE.....	84
4.3.3 MANUTENÇÃO.....	85
5 ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES DE GLULAM E AÇO	87
5.1 INTRODUÇÃO.....	87
5.2 FICHAS DE CUSTOS	87
5.2.1 FICHAS DE CUSTOS DE ESTRUTURAS DE GLULAM	90
5.2.2 FICHAS DE CUSTOS DE ESTRUTURAS DE AÇO.....	93
5.2.3 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	94
5.3 SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE CADA UM DOS MATERIAIS	98
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	105

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	105
6.2 DIFICULDADES SENTIDAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
BIBLIOGRAFIA	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de elemento em GLULAM.....	6
Figura 2.2 – Corte transversal de um tronco [06] Legenda A – medula / B- cerne / C- raio medular / D- borne / E- câmbio / F- líber / G- casca	8
Figura 2.3 – Lenho das resinosas	9
Figura 2.4 – Lenho das folhosas	10
Figura 2.5 – Direcções principais da madeira	11
Figura 2.6 – Exemplo do potencial arquitectónico da GLULAM.....	13
Figura 2.7 – Formas típicas de vigas de GLULAM	14
Figura 2.8 – Disposição das lamelas em função do esforço.....	15
Figura 2.9 – Exemplo da etapa de colagem sobre pressão.....	17
Figura 2.10 – Exemplo de marcação CE de produtos GLULAM.....	19
Figura 2.11 – Falcata ibérica	22
Figura 2.12. – Laminagem a quente.....	24
Figura 2.13 – Exemplos de produtos laminados a quente	24
Figura 2.14 – Exemplos de produtos enformados a frio	25
Figura 3.1. – Definição de vão de uma cobertura	28
Figura 3.2 – Exemplos de vigas simples	30
Figura 3.3 – Exemplos de vigas contínuas.....	30
Figura 3.4 – Exemplos de edifício com várias vigas curvas.....	31
Figura 3.5 – Exemplos de sistemas tridimensionais com vigas	31
Figura 3.6 – Cobertura de um pavilhão industrial	33
Figura 3.7 – Estruturas articuladas planas de cordões paralelos	33
Figura 3.8 – Asna de duas águas para suporte de cobertura.....	34
Figura 3.9 – Diagrama de esforços de vigas e arcos para uma mesma carga e vão.....	34
Figura 3.10 – Exemplos de arcos.....	35
Figura 3.11 – Exemplos de pórticos	37
Figura 3.12 – Grelhas espaciais de estrutura simples	39
Figura 3.13 – Exemplo de estrutura múltipla com pormenor de ligações	39
Figura 3.14 – Estrutura duplamente curva com duas camadas (cidade de Oguni).....	40
Figura 3.15 – Exemplos de estruturas reticuladas espaciais em abobadas	40
Figura 3.16 – Cúpulas nervuradas	41

Figura 3.17 – Cúpulas Schwedler	42
Figura 3.18 – Cúpula “three-way”	42
Figura 3.19 – Cúpula lamelar	42
Figura 3.20 – Cúpula geodésica	43
Figura 3.21 – Exemplo de casca (Bad Dür rheim - Alemanha)	44
Figura 3.22 – Exemplo de casca hiperbólica parabólica	45
Figura 3.23 – Ligadores comuns em estruturas de madeira (goetz 1989)	47
Figura 3.24 – Exemplo de ligação protegida contra o fogo	49
Figura 3.25 – Exemplo de patologia causada devido à retracção	49
Figura 3.26 – Separação das fibras causada por esforços na direcção perpendicular ao grão	50
Figura 3.27 – Exemplo de ligações em vigas	51
Figura 3.28 – Exemplo de ligações em estruturas articuladas planas.....	51
Figura 3.29 – Exemplo de ligação em arcos de duas rótulas	52
Figura 3.30 – Exemplo de ligações em pórticos	52
Figura 3.31 – Exemplo de ligações em estruturas articuladas espaciais	53
Figura 3.32 – Exemplo de ligações em cúpulas	53
Figura 3.33 – Exemplo de ligações em cascas.....	53
Figura 3.34– Exemplo de uma soldadura de topo a topo e uma soldadura de ângulo	54
Figura 3.35 – Exemplo de uma ligação com parafusos antes e após a execução da ligação	55
Figura 3.36 – Exemplo de uma junta sobreposta e um junta de topo	56
Figura 4.1 – Compressão da madeira na direcção perpendicular e paralela às fibras	59
Figura 4.2 – Tracção da madeira na direcção perpendicular e paralela às fibras.....	60
Figura 4.3 – Flexão de elemento de madeira	61
Figura 4.4 – Esforços de corte na GLULAM	62
Figura 4.5 – Diagrama tensões-extensões de um aço laminado a quente	63
Figura 4.6 – Comparação relativa da resistência em função do peso de vários materiais de construção.	67
Figura 4.7. – Curvas de retracção da madeira em função do teor em água	68
Figura 4.8 – Carbonização de um elemento em GLULAM ao longo do tempo	73
Figura 4.9 – Comparação entre a redução em resistência do aço e madeira.....	73
Figura 4.10 – Vigas de aço deformadas pela acção do fogo sobre viga de GLULAM carbonizada	74
Figura 4.11 – Esquema da avaliação do ciclo de vida dos produtos derivados da madeira	77
Figura 4.12 – Energia de combustíveis fósseis necessário para produzir quatro materiais de construção.....	79

Figura 4.13 – Estrutura de cobertura com 25m x 30m a ser colocada sobre os apoios com a ajuda de uma grua. (Mitek Solutions, documento on-line).....	82
Figura 4.14. – Armazenamento de estruturas articuladas planas antes da montagem da estrutura	82
Figura 4.15 – Parte central de arco de duas rótulas a ser erguida em obra com a ajuda de uma grua.....	83
Figura 4.16 – Camião a transportar asnas de GLULAM	84
Figura 4.17 – GLULAM a sofrer de ataque biológico	85
Figura 4.18 – Exemplo de aço oxidado	86
Figura 5.1– Pavilhão multifunções em Leindon (Holanda).....	91
Figura 5.2 – Ringue de patinagem em Langnau (Suíça).....	91
Figura 5.3 – Pavilhão multi usos de Biebesheim (Alemanha).....	92
Figura 5.4 – Esquema do pórtico	93
Figura 5.5 – Gráfico resumo dos custos de estruturas de cobertura em aço e GLULAM	97

LISTA DE TABELAS

Quadro 2.1 – Escolha das colas em função das condições ambientais [7].....	20
Quadro 3.1 – Resumo dos sistemas estruturais em função do vão em metros	46
Quadro 3.2 – Classes de qualidade dos parafusos	55
Quadro 4.1 – Resumo da influência da composição química nas propriedades do aço.....	65
Quadro 4.2 – Comparação das tensões admissíveis em MPa na madeira e Aço [21]	65
Quadro 4.3 – Resumo das propriedades térmicas de madeira e aço	70
Quadro 4.4 – Índices de desempenho ambiental de edifícios residenciais.....	77
Quadro 4.5 – Energia de combustíveis fósseis necessário para produzir quatro materiais de construção	78
Quadro 4.6 – Quantidades de carbono armazenadas e libertadas durante o fabrico de quatro materiais de construção	79
Quadro 5.1 – Exemplo da estrutura de uma ficha de custos.....	87
Quadro 5.2 – Exemplo de uma ficha de custos de uma cobertura em aço [31].....	88
Quadro 5.3 – Exemplo de uma ficha de custos de uma cobertura em GLULAM.....	89
Quadro 5.4 – Medições do pavilhão de Leidon.....	91
Quadro 5.5 – Medições do Ringue de patinagem de Langnau	92
Quadro 5.6 – Medições do pavilhão de Bielbsheim.....	92
Quadro 5.7 – Medições do pórtico	94
Quadro 5.8 – Ficha de custos de estruturas de GLULAM com rendimentos minorados	95
Quadro 5.9 – Ficha de custos de estruturas de GLULAM com rendimentos majorados	95
Quadro 5.10 – Ficha de custos de estruturas de aço com rendimentos minorados	96
Quadro 5.11 – Ficha de custos de estruturas de aço com rendimentos majorados	96
Quadro 5.12 – Quadro resumo das propriedades mecânicas dos materiais	99
Quadro 5.13 – Quadro resumo das propriedades físicas dos materiais.....	100
Quadro 5.14 – Quadro resumo das propriedades relacionadas com a sustentabilidade dos materiais ..	102
Quadro 5.15 – Quadro resumo das propriedades relacionadas com processo construtivo e com custos	103

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

α – Coeficiente de absorção sonora

CORRIM– Consortium for Research on Renewable Materials

GLULAM – Madeira lamelada colada (*glued laminate timber*)

GLTA – Glued Laminated Timber Association

GWP – Global Warming Potencial

NRC – Noise Reduction Coefficient

TRADA – Timber Research and Development Associaion

INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

As exigências em relação a grandes vãos livres têm sido um dos desafios colocados a engenheiros em todo o mundo.

A necessidade actual de grandes espaços interiores provém dos mais diversos segmentos da nossa sociedade, desde equipamentos industriais a grandes pavilhões desportivos ou a salas de espectáculos. De forma a providenciar uma resposta a esta procura, têm sido elaborados projectos de uma grande diversidade em termos de formas, sistemas construtivos e materiais.

O processo de escolha do sistema estrutural inicia-se com a definição da forma e da imagem do edifício pelo arquitecto. Numa época em que a estética e o enquadramento urbanístico têm uma preponderância cada vez maior, a questão da forma é central no projecto pois, de acordo com as opções do arquitecto, muitos dos parâmetros ficarão definidos ou pelo menos restringidos.

Após a definição da forma, os principais factores estruturais a ter em consideração num projecto de coberturas de vão médio/grande são o vão a vencer, o pé-direito pretendido e a carga a suportar. Logicamente que quanto maior o vão a vencer maior será a carga que a estrutura terá que suportar estando assim estes dois factores ligados de uma forma unívoca.

Contudo, quando inserimos na equação a variável económica, outros factores ganham uma importância considerável. Efectivamente, não se podem ignorar questões como o tempo de montagem, a mão-de-obra, o transporte ou o tipo de material aquando da elaboração do projecto.

Relativamente aos materiais, devido aos avanços tecnológicos, ao decréscimo de custos e à beleza natural da madeira, as coberturas em madeira lamelada colada têm tido uma aplicação considerável em países do Norte da Europa e América do Norte entre outros. Contudo, no nosso país, para o mesmo tipo de aplicações, o material de eleição continua ainda a ser o aço.

Esta monografia está inserida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tema proposto tem como finalidade realizar uma análise técnico-económica de coberturas de grande vão em madeira lamelada-colada (GLULAM). Pretende-se também estabelecer uma comparação com coberturas em aço, descrevendo as suas vantagens e desvantagens nos parâmetros considerados mais relevantes.

Espera-se que através desta comparação se estabeleça uma melhor compreensão das potencialidades da GLULAM, levando a um aumento do uso desse material em Portugal. Contudo, não se pretende estabelecer uma defesa da GLULAM em relação ao aço mas sim mostrar que os dois materiais têm abrangências diferentes e indicar em que situações o uso da GLULAM será mais adequado.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A GLULAM possui características que a torna especialmente interessante na construção de estruturas de grande vão. Contudo, apesar da GLULAM ser um material estrutural, as suas capacidades não são bem conhecidas pelos técnicos do sector da construção e o aço é usualmente o material escolhido para estruturas de grande vão. Têm sido elaboradas diferentes formas e sistemas construtivos em países do Norte da Europa e da América do Norte, contudo em Portugal o potencial da GLULAM não é bem conhecido e não é aplicada por razões diversas tais como o custo, a falta de conhecimento, a falta de procura e a quase ausência de produção nacional do produto. Isto cria alguns constrangimentos na concepção de edifícios pois, em muitos casos, a originalidade e aplicabilidade do sistema estrutural e do material escolhidos não vão ao encontro das expectativas dos projectistas. A sistemática repetição de sistemas estruturais em aço, com o passar do tempo, deixa de ser satisfatória para o utilizador.

Existem algumas empresas especializadas na aplicação de madeira estrutural, especialmente de GLULAM, mas a sua aplicação encontra-se restringida a situações tipificadas tais como pavilhões desportivos e industriais de médio vão. O uso da GLULAM tem várias vantagens, como por exemplo o seu bom aspecto final. Efectivamente as estruturas de coberturas executadas em GLULAM possuem uma beleza que as tornam uma atracção adicional para os utentes dos espaços. Além das suas vantagens estéticas, a GLULAM tem um desempenho excelente para vãos de média e grande dimensão devido às suas boas propriedades mecânicas, físicas e construtivas.

O uso da GLULAM implica um esforço de pesquisa adicional, quando comparado com materiais tradicionais pois, para uma correcta elaboração do projecto, os engenheiros e arquitectos devem possuir um conhecimento profundo sobre o sistema estrutural mais adequado a cada situação. Normalmente, as empresas que vendem soluções de GLULAM possuem um conhecimento limitado do assunto possuindo, na maior parte das vezes, capacidade para projectar sistemas estruturais simples e padronizados. Muitos dos projectistas limitam-se a aplicar sucessivas repetições de projectos anteriormente elaborados sem possuírem o conhecimento necessário sobre os diversos sistemas estruturais que lhe permitam conceber e projectar projectos inovadores com características de obra de autor, com uma marca distintiva e bem característica resultante da forma, das dimensões, dos volumes, da iluminação natural e de muitos outros parâmetros normalmente associados à concepção arquitectónica.

Se o uso de GLULAM em estruturas começar a ser divulgado, os arquitectos e engenheiros passarão a ter opções construtivas adicionais o que levará à apresentação de projectos alternativos e potencialmente mais adequados a cada espaço e função. Para alguns tipos de coberturas, aplicadas por exemplo em piscinas e fábricas, a GLULAM poderá apresentar resultados bastante satisfatórios, pois é resistente a muitos tipos de químicos não sendo tão afectada como o aço.

Quando são comparados o tempo de montagem, a resistência ao fogo, o peso próprio, a durabilidade, o transporte, a expansão e condutividade térmica e os custos, podem obter-se vários tipos de resultados. Com base em critérios do tipo dos enunciados, deve ser feita uma escolha para cada projecto concreto sobre os tipos de sistema e de material estrutural a usar. Dependendo de cada situação e com projectos diferentes, podem conseguir-se soluções optimizadas tanto em aço como em GLULAM. No entanto, de forma a obter o melhor desempenho possível, devem conhecer-se muito bem as propriedades de ambos os materiais de modo a efectuar a escolha mais acertada a cada situação. Este trabalho representa um contributo nesse sentido.

1.2 OBJECTIVOS

O aço e a GLULAM são potencialmente os materiais estruturais mais adequados à construção de estruturas de cobertura, quer de médio, quer de grande vão. Estruturas projectadas em ambos os materiais podem ser completamente montadas em obra ou então serem prefabricadas. O objectivo essencial deste trabalho consiste em comparar o desempenho físico, mecânico e de desempenho funcional do aço e da GLULAM para que um engenheiro civil, ou um arquitecto, possam ter uma noção do potencial da GLULAM, enquanto material estrutural.

A lista de critérios a analisar foram seleccionados tendo em consideração as características mecânicas, físicas e construtivas dos dois materiais. O objectivo principal deste trabalho consiste assim em criar uma base de conhecimento sobre as características e o potencial da GLULAM, apresentando em simultâneo as características equivalentes do aço para uma melhor e mais completa compreensão dos defeitos e das virtudes da GLULAM. Deste modo pretende-se dar a um utilizador técnico adequadamente habilitado as ferramentas que lhe permitam fazer uma comparação entre ambos os materiais ao nível económico e de desempenho funcional, e desse modo poder optar pela solução mais adequada a cada caso concreto.

1.3 ÂMBITO E MÉTODO DA PESQUISA

Numa primeira fase, o âmbito da pesquisa ao nível dos exemplos e dos documentos técnicos foi limitado aos países Europeus, aos Estados Unidos da América, ao Canadá e à Austrália, onde o uso da GLULAM é comum em estruturas de cobertura. O âmbito da pesquisa limitou-se assim a estes países, devido ao conhecimento muito profundo que possuem sobre este tipo de construção.

A pesquisa limitou-se também aos critérios de desempenho seleccionados para as propriedades físicas, mecânicas e construtivas da GLULAM e do aço. Procurou-se, ao longo do trabalho, sustentar as opiniões formadas recorrendo a informação científica, fórmulas comprovadas e tabelas de valores rigorosos.

Vários autores prepararam tabelas de síntese com as diversas propriedades dos materiais. Contudo, na elaboração deste estudo, condensou-se esta informação de forma a limitar a dimensão do documento.

Numa segunda fase, fez-se uma pesquisa de mercado em Portugal que se pretendeu pudesse representar o suporte fundamental para a análise económica incluída no final do trabalho. A pesquisa efectuada permitiu preparar uma descrição sintética do estado actual da construção em GLULAM no nosso país.

Como atrás se refere, apresenta-se um estudo comparativo do desempenho de estruturas de cobertura de grande vão executadas em GLULAM e Aço. Com base em pesquisa bibliográfica de documentação de origem estrangeira, preparou-se uma síntese sobre os diversos sistemas estruturais que são possíveis de ser usados em ambos os materiais de modo a melhor dar conta das potencialidades estruturais da GLULAM, nomeadamente quando se pretende construir formas curvas e pouco usuais.

A informação usada na pesquisa é constituída por documentos maioritariamente obtidos na Web.

Foi feito um esforço por usar como exemplo estruturas o mais recentes possíveis. A pesquisa de mercado, foi feita junto dos produtores e fabricantes de estruturas de GLULAM que operam no mercado português.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na sua estrutura, este trabalho é constituído por quatro capítulos principais, para além da Introdução e Conclusões.

No Capítulo 2 faz-se uma introdução aos elementos estruturais em aço e GLULAM, procurando fazer uma descrição geral dos materiais e abordando assuntos tais como os processos de fabrico e as características especiais de cada material, dignas de serem mencionadas.

No Capítulo 3, faz-se referência aos vários sistemas estruturais que são usualmente adoptados em estruturas de coberturas. Também se estabelecem os limites, em termos de vãos, para cada um dos sistemas considerados. Referem-se ainda os principais tipos de ligações correntemente adoptadas em estruturas de aço e de GLULAM.

No Capítulo 4 faz-se a análise técnica dos dois materiais sendo esta dividida em três grandes grupos: (a) propriedades mecânicas; (b) propriedades físicas; (c) sustentabilidade.

Apresenta-se ainda neste capítulo uma análise do processo construtivo de estruturas executadas em ambos os materiais, incidindo sucessivamente nas fases de execução em obra, de transporte e de manutenção e limpeza.

No Capítulo 5 procede-se à análise económica. Este capítulo divide-se em duas partes. Na primeira parte, faz-se uma descrição do mercado de estruturas de cobertura executadas em aço e em GLULAM em Portugal. Na segunda parte, apresentam-se fichas de custos e diversos exemplos de simulação de preços de estruturas de cobertura executadas em ambos os materiais, e que podem ser utilizadas como base de trabalho a adoptar por projectistas em casos concretos de projecto com vista a uma melhor avaliação do custo dos respectivos projectos.

2

ELEMENTOS ESTRUTURAIS SIMPLES EM MADEIRA LAMELADA COLADA E AÇO

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De forma a poder comparar o desempenho de coberturas de grande vão em madeira lamelada colada e aço é necessário criar uma contextualização destes dois materiais. Desta forma, este capítulo, divide-se em duas partes, uma para cada um dos dois materiais, embora dando um especial ênfase à GLULAM.

Abordam-se neste capítulo assuntos como a matéria-prima, o processo de fabrico, os tipos e formas que estes materiais tomam e qual o enquadramento normativo em vigor para a sua aplicação na construção.

2.2 A MADEIRA LAMELADA COLADA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

2.2.1 O QUE É A GLULAM?

A GLULAM é o nome popular pelo qual é conhecida a madeira lamelada colada. Este resulta da contracção das palavras inglesas GLUed LAMinated cuja tradução à letra significa lamelada colada.

Este produto pode ser definido como o material criado pela união de peças individuais de madeira maciça. Lamelas de madeira são ligadas pelos topos de forma a criar elementos de maior comprimento. Posteriormente as lamelas são unidas pela face através de uniões coladas. Obtém-se assim um novo material estrutural com características típicas da madeira maciça mas com outras potencialidades em termos de capacidade estrutural e arquitectónica [1].

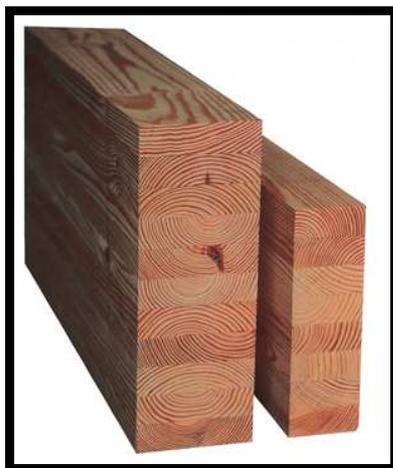


Figura 2.1 – Exemplo de elemento em GLULAM

O fabrico da GLULAM a partir destas lamelas de madeira (com largura máxima de 45mm em elementos rectos para aplicação nas Classes de Serviço 1 ou 2 definidas no Eurocódigo 5) permite uma dispersão, ou mesmo eliminação dos defeitos naturais da madeira, formando assim um material mais homogéneo e consequentemente mais fiável e resistente [2].

2.2.2 A ORIGEM DA GLULAM

A GLULAM é um dos derivados da madeira mais antigo sendo que as primeiras construções datam do início do século XIX. A primeira utilização da GLULAM, na forma como é conhecida actualmente, foi em 1893 na construção de um auditório em Basileia, na Suíça. Esta primeira versão da GLULAM, patenteada em 1893 pelo sueco Otto Hetzer com o nome de “Sistema Hetzer”, usava colas que pelos padrões de hoje não seriam consideradas à prova de água.

Durante a 2ª Guerra Mundial, a necessidade de elementos estruturais de grande dimensão para a construção de edifícios militares, como armazéns e hangares, e a escassez dos materiais tradicionais criou uma maior procura de GLULAM. Por outro lado, melhorias no fabrico da GLULAM tornaram-na um material mais abrangente. Graças ao desenvolvimento de resinas sintéticas à prova de água criaram-se as condições necessárias para a sua utilização em pontes e em outros usos exteriores.

Um exemplo da importância da GLULAM durante a 2ª Guerra Mundial foi a sua aplicação na indústria aeronáutica mais concretamente no avião bombardeiro DH. 98 Mosquito [3].

Efectivamente, as necessidades causadas pela segunda grande guerra provocaram um grande desenvolvimento tecnológico no processo de produção da GLULAM. Podem-se destacar 2 grandes motivos para este aumento de qualidade: (a) passou a haver uma maior selectividade na escolha de madeiras, optando por peças com características mais uniformes; (b) verificou-se e um aumento de qualidade no processo de colagem devido ao controlo de produção associado às maiores exigências da indústria aeronáutica.

Após a guerra, a GLULAM emergiu como uma alternativa credível a materiais mais tradicionais como o aço e o betão, tornando-se um produto importante no sector da construção com destaque para a América do Norte e Europa, principalmente na região escandinava [4].

2.2.3 A MADEIRA E O LAMELADO COLADO

A madeira maciça é o principal constituinte do lamelado colado definindo grande parte das suas características. Devido à sua influência no comportamento da GLULAM é importante fazer uma descrição da madeira e estabelecer uma comparação com a GLULAM.

A madeira estrutural é um material de construção que se destaca dos restantes em vários aspectos. Se por um lado, é um material apreciado pela sua versatilidade arquitectónica, por outro, possui também características físicas e mecânicas que lhe proporcionam múltiplos usos. Efectivamente, a madeira possui uma elevada resistência mecânica, é durável, tem uma boa relação resistência/peso, tem baixa condutibilidade térmica e eléctrica e resiste à acção de vários agentes corrosivos, entre outras características [1].

Contudo a madeira não possui apenas vantagens Devido a ter a sua origem nas árvores, a madeira herdou algumas características típicas de um material orgânico, como a sua heterogeneidade e anisotropia, o que afecta o seu desempenho estrutural de forma negativa [5].

2.2.3.1 Anatomia da madeira

Em função da sua anatomia, as madeiras podem ser divididas em dois grandes grupos [6]:

- As madeiras Gimnospérmicas, provenientes de árvores resinosas, também designadas por madeiras brandas.
- As madeiras Angiospérmicas, provenientes de árvores folhosas, também designadas de madeiras duras.

Conforme foi dito anteriormente, a madeira tem origem nas árvores sendo estas constituídas por raiz, caule e copa. Contudo, para este estudo só será relevante a análise do tronco (caule) pois é desta parte da árvore que se obtém a madeira.

Fazendo um corte transversal no tronco (figura 2.2) podem-se visualizar as seguintes partes:

Casca – parte mais exterior da árvore, formada por uma camada externa de células mortas com a função de protecção, e uma camada interna (líber), de células vivas com função de transporte do alimento produzido nas folhas para as partes em crescimento.

Borne – camada formada por células vivas e que tem a função de transportar a seiva da raiz até as folhas.

Cerne – com o crescimento, as células do borne tornam-se inactivas e passam a ter uma função unicamente estrutural. Esta zona apresenta uma maior resistência mecânica.

Medula – tecido macio em torno do qual se inicia o crescimento da madeira.

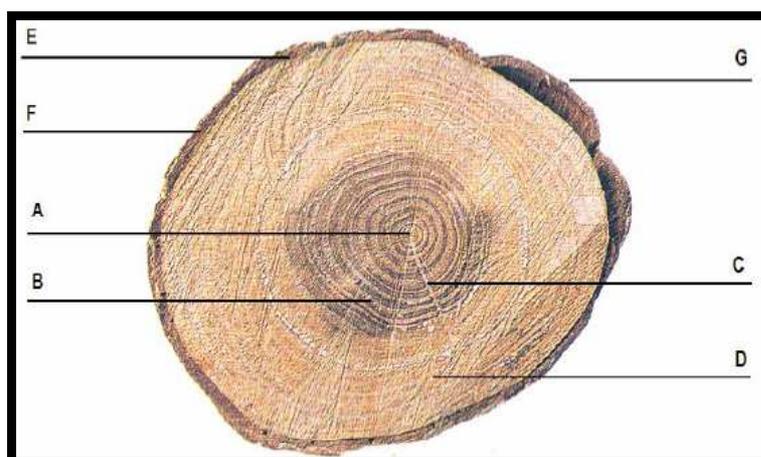


Figura 2.2 – Corte transversal de um tronco [5] Legenda A – medula / B- cerne / C- raio medular / D- borne / E- câmbio / F- líber / G- casca

Destas camadas, têm particular interesse o cerne e o borne pois é dessa zona do tronco que provém a madeira estrutural. O conjunto destas duas camadas é designado de lenho e desempenha a função principal de suporte da árvore.

Outra característica que é possível visualizar na zona do lenho é a existência de anéis concêntricos que são resultado do crescimento das árvores pela adição de sucessivas camadas. Estes anéis de crescimento variam em tamanho e coloração em função das condições a que a árvore se encontra exposta na altura da sua formação. Podem ser classificados em dois tipos, os anéis anuais e os anéis estacionais (em zonas tropicais) [6], e são formados por duas camadas. Uma clara, constituída por células de paredes mais finas, correspondendo ao crescimento no período da Primavera, e outra mais escura, constituída por células mais pequenas, e que corresponde ao crescimento do Verão [7]. Desta forma, contando os anéis de crescimento, é possível determinar a idade da árvore.

2.2.3.2 Estrutura celular do lenho

Varias das características da madeira, como por exemplo a heterogeneidade e a anisotropia, têm origem na sua organização celular. A este nível verificam-se algumas diferenças entre as árvores resinosas e as árvores folhosas.

Genericamente, as células das madeiras são caracterizadas por possuírem uma forma alongada com vazios internos, variando em forma e tamanho dependendo da sua função [7]. Podem-se encontrar os seguintes tipos de células: traqueídeos, vasos, fibras e raios lenhosos.

O lenho das árvores resinosas é composto fundamentalmente por traqueídeos, raios lenhosos e canais de resina.

Os traqueídeos, também designados de fibras, são células alongadas de diâmetro quase constante, semelhantes a tubos finos, têm função estrutural e de condução da seiva e dividem-se em alinhamentos longitudinais.

Os raios lenhosos, são células curtas providas de paredes relativamente pouco espessas, com funções de distribuição e reserva de nutrientes.

Quanto aos canais de resina, estes são vazios delimitados por células secretoras de resina e têm a função de transporte.

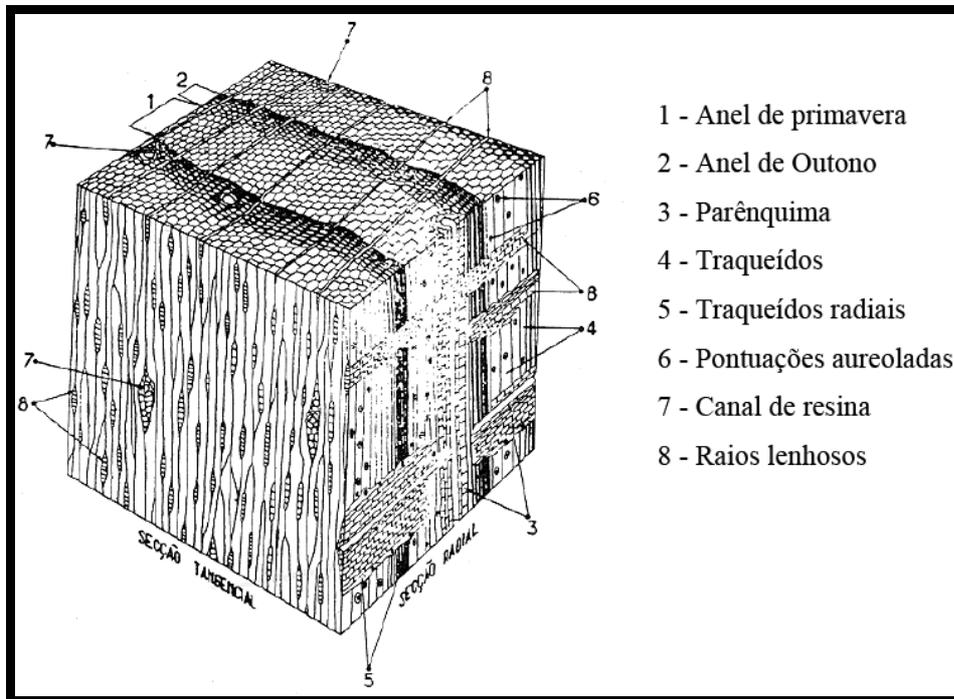


Figura 2.3 – Lenho das resinosas

Em relação ao lenho das árvores folhosas, este é constituído por vasos e fibras (que constituem o prosênquima), pelo parênquima e pelos raios lenhosos.

Os vasos são células longitudinais e tubulares, abertas nas extremidades e que desempenham funções de transporte. As fibras, também dispostas longitudinalmente no caule, são células de extremidade afilada, diâmetro variável e reduzido com função estrutural. O conjunto destes dois tipos de células forma o prosênquima.

O parênquima é formado por células curtas de paredes relativamente pouco espessas com função de distribuição e reserva de hidratos de carbono.

Os raios lenhosos são formados por células do parênquima e provocam um efeito de amarração das fibras no sentido radial.

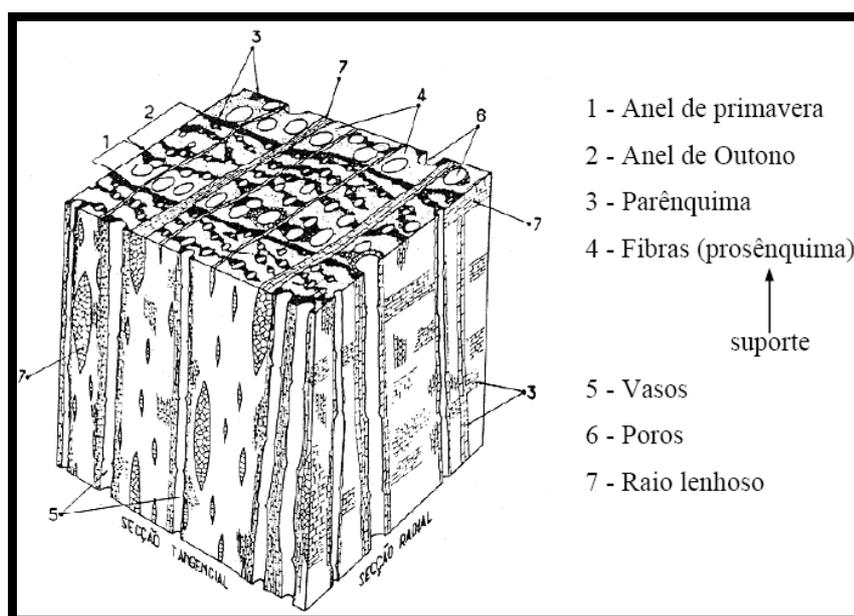


Figura 2.4 – Lenho das folhosas

2.2.3.3 Composição química

A composição química da madeira varia pouco de espécie para espécie sendo comum usar os seguintes valores médios [1]:

- Carbono 50%;
- Hidrogénio 6%;
- Oxigénio 44%;

Comos se pode deduzir pelos compostos acima indicados, a madeira é essencialmente constituído por matéria orgânica (hidratos de carbono) sendo de destacar os seguintes compostos:

- Celulose (cerca de 50% da composição da madeira) – este composto forma os filamentos que reforçam as paredes das fibras longitudinais.
- Hemicelulose (20 a 25% da composição da madeira) – Em conjunto com a lenhina envolve as moléculas de celulose unindo-as.
- Lenhina (20 a 30% da composição da madeira) – Em conjunto com a hemicelulose envolvem as moléculas de celulose unindo-as. A lenhina é responsável pela rigidez e resistência à compressão das paredes das fibras.
- Em menores quantidades existem outros compostos como os sais minerais, as resinas, óleos, ceras, etc. [8]

2.2.3.4 Anisotropia

A madeira comporta-se como um material anisotrópico, isto é, as suas propriedades mecânicas variam com a direcção em que são determinadas. Detectam-se na madeira três direcções principais que são designadas em referência aos anéis de crescimento (figura 2.5).

- Direcção tangencial (transversal tangencial aos anéis de crescimento);
- Direcção radial (transversal radial dos anéis de crescimento – a projecção passa na medula);
- Direcção longitudinal (perpendicular ao plano dos anéis de crescimento).

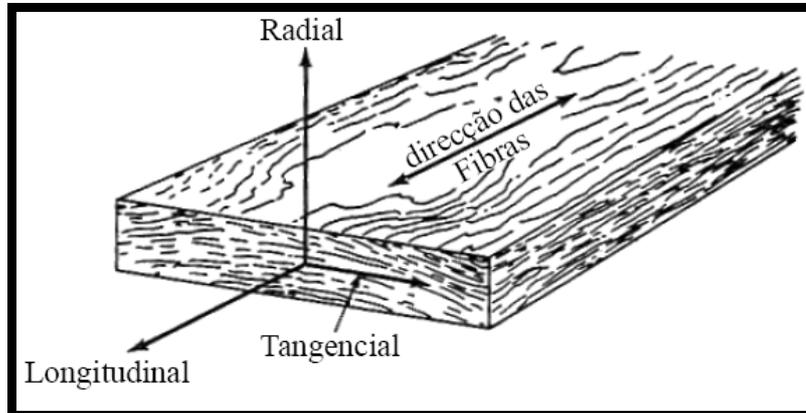


Figura 2.5 – Direcções principais da madeira

Esta característica da madeira tem origem na disposição espacial das células e no tipo de união entre elas.

2.2.3.5 Densidade

A densidade ou massa volúmica é uma medida do peso por unidade de volume sendo a sua unidade, no sistema internacional, o Kg/m^3 . No caso da madeira, o teor em água faz variar bastante o valor da densidade já que altera o peso e o volume da madeira. De forma a poder comparar valores entre madeiras e a ter valores de referência, geralmente determina-se a densidade para um valor de 12% em teor em água.

2.2.3.6 Importância do teor em água

O teor em água representa o peso de água expresso como uma percentagem do peso da madeira seca em estufa [9]. A água encontra-se presente na madeira de duas formas distintas: (a) no interior das células; (b) absorvida nas paredes das fibras.

Aquando da secagem da madeira, primeiro evapora-se a água presente no interior das células até se atingir o ponto de saturação das células onde apenas há água nas paredes das fibras, que ainda se encontram completamente saturadas. Após este ponto, a secagem continua até se atingir um teor em água em equilíbrio com o meio ambiente (normalmente 12% para uma atmosfera com 60% de humidade relativa e uma temperatura de 20°C [1]. Este ponto de equilíbrio não é estático, variando o teor em água em conformidade com o ambiente em que se encontra o elemento estrutural.

A capacidade da madeira variar de teor em água deve-se à sua higroscopicidade. Esta pode ser descrita como a capacidade que um material tem de absorver ou perder água conforme as condições ambientais (humidade relativa e temperatura do ar) existentes até se atingir um ponto de equilíbrio. Torna-se assim importante que a madeira tenha um teor em água apropriado ao ambiente a que o seu uso se

destina (próximo do valor necessário para o equilíbrio higroscópico) de modo a evitar variações de volume com as consequentes, e muitas vezes indesejáveis, variações nas dimensões.

As madeiras sofrem o fenómeno de retracção quando o valor do teor em água se encontra abaixo dos 30%, isto é, abaixo do ponto de saturação. A retracção pode ser considerado aproximadamente linear mas tendo efeitos distintos segundo cada uma das direcções principais da madeira (tangencial, radial e longitudinal). Efectivamente, a retracção na direcção tangencial é mais elevada podendo ocorrer variações entre 5 a 10% enquanto que na direcção radial a variação é apenas metade. Na direcção longitudinal, a retracção é menos importante, assumindo valores de 0,1 a 0,3%.

Além dos problemas estruturais inerentes à variação de volume, a retracção coloca ainda outras dificuldades. Devido à criação de esforços internos, existe o risco de surgirem fendas de secagem na madeira que, além de diminuir a sua resistência estrutural, abrem uma porta a ataques biológicos.

2.2.3.7. Defeitos típicos da madeira

Além dos defeitos introduzidos pelo processo de transformação, a origem orgânica da madeira aumenta a lista de defeitos que podem prejudicar a sua resistência, o aspecto ou a durabilidade. Apresentam-se de seguida os principais defeitos da madeira:

- Nós;
- Desvio da fibra causado pela presença de nós;
- Fendas longitudinais radiais devido à secagem;
- Fendas longitudinais tangenciais devido à separação de anéis de crescimento;
- Descaio da madeira;
- Abaulamento;
- Arqueamento;
- Fibras reversas.

Outro problema associado aos defeitos é o facto de estes poderem ocorrer de forma aleatória não sendo às vezes possível localiza-los no controlo de fabrico nas serrações. Deste modo, o risco associado ao uso da madeira estrutural é bastante maior do que o de outros materiais de características mais regulares.

2.2.4 VANTAGENS DA GLULAM SOBRE A MADEIRA MACIÇA

O ideal que esteve na origem da GLULAM foi o de criar um material que possuísse todas as vantagens da madeira maciça mas no qual os seus inconvenientes fossem minorados.

Como já foi referido anteriormente, o facto de a GLULAM ser fabricada a partir da sobreposição de lamelas de madeira maciça, permite uma selecção criteriosa das características desejadas e a eliminação de defeitos inerentes à madeira.

Efectivamente, quando comparada com a madeira maciça, a GLULAM pode ser considerada uma evolução natural desta. Apresentam-se de seguida algumas das vantagens que se tem com o uso da GLULAM em vez de madeira maciça.

2.2.4.1 Dimensão dos elementos estruturais

A GLULAM permite criar elementos estruturais que são muito maiores do que as árvores a partir das quais as lamelas tiveram origem. Enquanto que no passado, a indústria madeireira, recorria a árvores com bastante idade e de grande diâmetro, a prática corrente actual passa por abater árvores de menor porte com períodos menores entre abates.

Como resultado desta prática, quase todas as serrações modernas são construídas para converter troncos relativamente pequenos. Contudo, através da combinação de pequenas peças de madeira em peças de GLULAM é possível a criação de elementos de grandes dimensões. É comum o fabrico de peças rectas com mais de 30m de comprimento e 2m de altura dependendo o comprimento do esquema estrutural adoptado [3].

2.2.4.2 Maior liberdade arquitectónica

A GLULAM, graças às dimensões que se podem obter para as peças, permite projectar espaços com grandes vãos livres, evitando assim o incómodo de pilares desenquadrados. Além disso, devido à sua beleza natural, herdada da madeira, a GLULAM é também usada frequentemente como elemento decorativo em igrejas, centros comerciais e outros espaços de uso público.

Outra característica é a de que o encurvamento das lamelas de madeira durante o processo de fabrico, permite obter uma grande variedade de efeitos arquitectónicos que não são possíveis obter com outros materiais, de forma obrigatoriamente mais rectilínea ou plana.



Figura 2.6 – Exemplo do potencial arquitectónico da GLULAM

O grau de curvatura obtido é controlado pela espessura da lamela. Assim, os elementos de glulam com uma curvatura média são geralmente fabricados de lamelas com uma espessura aproximada de 19mm. Elementos com uma curvatura ligeira são produzidos a partir de lamelas de maior espessura, como por exemplo 38mm. Para conseguir curvaturas mais acentuadas é necessário recorrer a lamelas de 13mm ou inferiores. Existe uma ligação entre o raio da curvatura e a espessura da lamela, estando o primeiro limitado a um valor entre 100 a 125 vezes o valor da segunda.

Os custos de fabrico aumentam com a diminuição do raio da curvatura sendo que a maior parte dos fabricantes prefere não descer abaixo dos 2500mm [4].

2.2.4.3 Secagem em estufa

Conforme será descrito mais à frente neste capítulo, a madeira usada no fabrico da GLULAM é seca em estufa antes de entrar na linha de produção. Assim, os efeitos que normalmente ocorrem aquando da secagem não controlada da madeira são minimizados, garantindo a manutenção das características mecânicas e visuais da GLULAM.

Outra vantagem inerente ao controlo que se tem do teor em água das estruturas de GLULAM é de estas serem projectadas considerando a madeira seca, o que permite o uso de valores de cálculo maiores do que os atribuídos à madeira verde.

2.2.4.4 Secção transversal de geometria variável

Os elementos estruturais podem ser projectados com uma secção transversal de geometria variável, adaptando-se as exigências das condições de serviço em termos de resistência e rigidez.

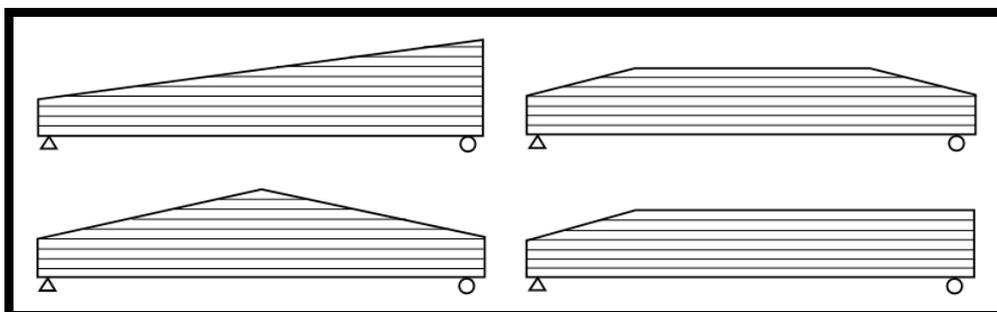


Figura 2.7 – Formas típicas de vigas de GLULAM

Na figura 3 são dados alguns exemplos desta característica da GLULAM. Como se pode ver, é possível ter secções transversais maiores nas zonas de maior solicitação. Deste modo, é possível, com um projecto bem concebido, usar menos material para situações semelhantes e ao mesmo tempo tendo mais possibilidades arquitectónicas.

2.2.4.5 Secção transversal de geometria variável

Outra possibilidade oferecida pela GLULAM é o facto de o processo de laminagem permitir colocar lamelas de classes resistentes diferentes em posições estratégicas na peça. Normalmente, as lamelas

com melhores capacidades resistentes são colocadas nas zonas sujeitas a esforços mais elevados, isto é, na parte superior e inferior do elemento estrutural.

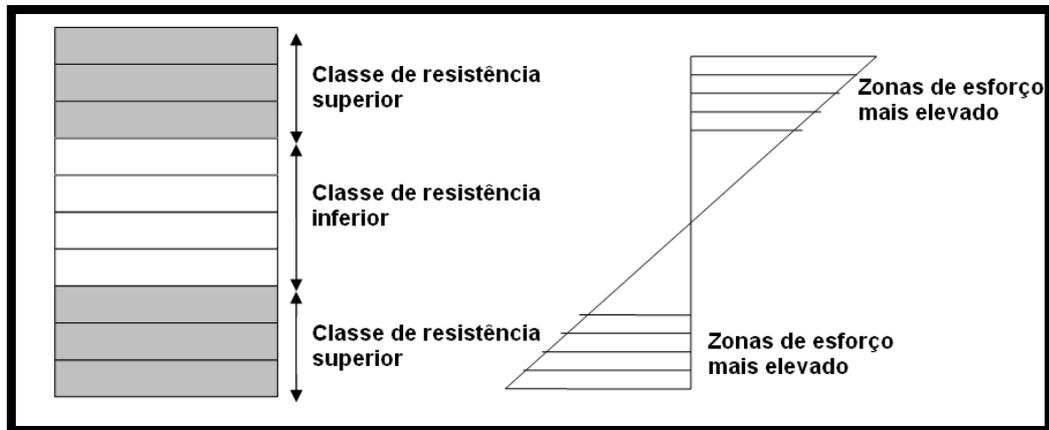


Figura 2.8 – Disposição das lamelas em função do esforço

Isto significa que uma grande quantidade de madeira de menor capacidade resistente pode ser usada nas lamelas menos solicitadas. Também é possível usar espécies de madeira diferentes num mesmo elemento estrutural [3].

Basicamente isto traduz-se em duas ideias: a GLULAM é altamente adaptável às necessidades estruturais e esta capacidade de adaptação permite um ganho também em termos económicos, reduzindo o desperdício.

2.2.5 PROCESSO DE FABRICO

Conforme já foi referido anteriormente, a GLULAM é formada pela associação de lamelas de madeira seleccionadas, coladas com adesivos sob pressão [9]. Quando o processo de fabrico é executado de forma adequada, atinge-se um equilíbrio entre o desempenho estrutural das lamelas e da cola.

O processo de fabrico pode ser dividido em quatro partes: (a) secagem das lamelas; (b) ligação de topo das lamelas de madeira maciça; (c) colagem sobre pressão; (d) acabamentos e tratamentos preservativos [9].

Um aspecto importante que é comum a todo o processo do fabrico da GLULAM, e que será também desenvolvido em pormenor neste capítulo, é o papel do controlo de qualidade e a sua relação com a normalização existente.

2.2.5.1 Secagem da madeira

De forma a minorar alterações dimensionais após o fabrico e para tirar partido da melhoria das propriedades estruturais, é fundamental um processo de secagem apropriado. Na maior parte dos casos este processo será feito em estufas.

A secagem pode demorar de um a vários dias, dependendo do teor em água inicial. O limite máximo para o teor em água após a secagem é de 15%. Este limite existe devido às exigências das colas.

A diferença de teor em água entre lamelas, no momento da colagem, é de 5% [9]. Este limite é imposto de forma a minorar variações dimensionais após o fabrico.

É comum o uso do valor de 12%, ou ligeiramente abaixo, para o teor em água. Isto sucede por dois motivos: (a) é mais fácil realizar a união dos topos com este valor de teor em água; (b) este valor é o mais frequente para condições de serviço em aplicações interiores. Igualar o teor em água no momento do fabrico com o valor que irá atingir quando entrar em serviço previne problemas ligados à expansão e à retracção futura das peças.

2.2.5.2 Ligação de topo das lamelas

Antes de proceder à união das lamelas por ligações denteadas (*"finger joints"*) ocorre a preparação das lamelas que consiste simplesmente em aplainá-las e serrá-las de modo a obter as dimensões pretendidas.

A vantagem deste tipo de ligações é que necessitam de pouca madeira para serem realizadas reduzindo os desperdícios. Esta etapa é fundamental para garantir um correcto funcionamento da madeira sendo importante o papel do controlo de produção para a obtenção de juntas de elevada resistência.

Se bem executadas, estas juntas conseguem atingir pelo menos 75% da resistência da secção de madeira maciça. [4].

2.2.5.3 Colagem sob pressão

A produção de peças estruturais pela colagem das lâminas é executada com várias exigências a nível de tolerâncias dimensionais de forma a obter peças finais rectangulares e de modo a garantir que a pressão aplicada nas faces das lamelas é igualmente distribuída.

O procedimento para a colagem sobre pressão é o seguinte: (a) as superfícies das lâminas são aplainadas imediatamente antes do processo de colagem; (b) é aplicada a cola às lâminas; (c) é aplicada pressão sobre as lâminas recorrendo a sistemas mecânicos ou hidráulicos durante um período de 6 a 24 horas [3].

A colagem é feita sobre pressão variável de 0,7 a 1,5MPa, dependendo se se trata de madeiras brandas ou duras. Durante este processo é utilizada uma quantidade de cola de cerca de 250g por metro quadrado de superfície [9].

Após este processo o elemento estrutural deve ter atingido 90% da sua capacidade resistente adquirindo os restantes 10% de forma gradual mas lenta durante os próximos dias.

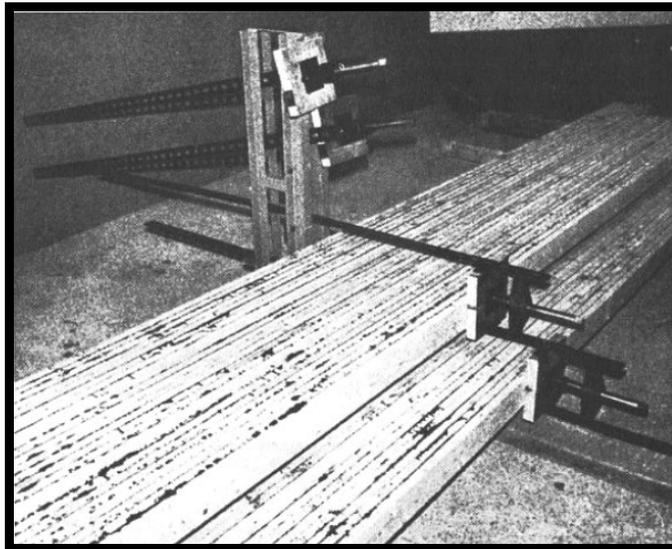


Figura 2.9 – Exemplo da etapa de colagem sobre pressão

É nesta etapa que se define se os elementos estruturais vão ter um desenvolvimento curvo ou recto.

2.2.5.4 Acabamentos e tratamentos preservativos

Após a remoção do sistema de fixação os elementos estruturais são aplainados de forma a remover a cola que tenha escorrido durante a etapa anterior e para nivelar as superfícies. Isto implica que a peça final tenha dimensões ligeiramente inferiores às lamelas originalmente usadas no processo de fabrico [3].

É nesta etapa que se define qual a aparência que o elemento estrutural vai ter além de eventuais tratamentos que possam ser aplicados. Apesar de se poderem usar os elementos de GLULAM com o aspecto de “fábrica” a maior parte sofre um tratamento de modo a realçar a beleza natural da madeira.

Dependendo do sistema estrutural em que serão aplicados, os perfis de GLULAM irão ser trabalhados de forma a executar os orifícios, a colocar os conectores e aplicar selantes conforme as especificações do projectista.

Em casos em que as condições de utilização excederam um teor em água de 20% (maioria das aplicações exteriores) são também aplicados produtos preservadores da madeira.

2.2.5.5 O processo de controlo de produção e a certificação como garantia de qualidade

O fabrico da GLULAM é um processo complexo que requer precisão de forma a garantir os valores de cálculo pretendidos. De modo a garantir o nível de qualidade exigido, o seu fabrico encontra-se regulamentado por normas.

Para a descrição do enquadramento normativo da produção de elementos estruturais de GLULAM vão-se considerar as normas europeias em vigor em Portugal.

É graças à existência destas normas que se consegue uniformizar as características dos vários produtos presentes no mercado e obter garantias de qualidade para a sua aplicação.

Existem dois tipos de normas relacionadas com a GLULAM: (a) normas de produção onde vêm especificadas os requisitos do processo de fabrico; (b) normas de produto onde vêm especificadas as características físicas e mecânicas da GLULAM.

Quanto às normas de produção, as condições gerais de produção e controlo encontram-se especificados na norma europeia EN 386 - *“Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements”*.

Durante o fabrico das peças de GLULAM, são controlados, segundo a EN 386, os seguintes factores que afectam a resistência do produto final e a sua durabilidade: temperatura e humidade relativa do ar ambiente, limpeza e afinação de máquinas, calibração de equipamentos de medida; teor em água, dimensões das lamelas de madeira, resistência mecânica, qualidade e orientação das lamelas; mistura, qualidade e quantidade da cola; tempo, temperatura e pressão de colagem [2].

Também é controlada a qualidade da execução das ligações denteadas através da realização de ensaios de flexão. Estas devem cumprir as especificações das normas europeias EN 385 - *“Finger-jointed structural timber. Performance requirements and minimum production requirements”* e EN 387 *“Glued laminated timber – Larger finger-joints. Performance requirements and minimum production requirements”*

Além do controlo de produção de fabrica, a madeira lamelada deve também cumprir os requisitos da norma europeia EN 14080 - *“Timber structures. Glued laminated timber. Requirements”*. Enquanto que as normas anteriores eram normas de produção, esta trata-se de uma norma de produto onde vêm especificadas as suas características.

Trata-se de uma norma europeia harmonizada, o que significa que no seu anexo ZA.1 são identificados os requisitos objectos de regulamentação e as cláusulas da norma onde eles são tratados, constituindo assim a parte harmonizada da norma a partir da qual a marcação CE é atribuída.

A marcação CE é a evidência, dada pelo fabricante, de que esses produtos estão conformes com as disposições das directivas comunitárias que lhe são aplicáveis, permitindo-lhes assim a sua livre circulação no Espaço Económico Europeu (EEE).

 01234 2)	1) Marcação de conformidade CE, consistindo do símbolo "CE" apresentado na Directiva 93/68/EEC; 2) Número de identificação do organismo de certificação;
GlulamCo A/S, P.O. Box 12, DK 1234 3) 06 4) 01234-CPD-00234 5)	3) Nome ou marca de identificação e endereço registado do produtor; 4) Últimos dois dígitos do ano de aposição da marcação; 5) Número do certificado;
EN 14080 6)	6) Nº de Norma Europeia; 7) Designação do produto 8) Tipo de cola usado na união das lamelas; 9) Espécie de madeira;
Madeira lamelada colada 7) Tipo de cola I de acordo com EN 301 8) Espriuce: Picea abies 9) Resistência à flexão na direcção do fio 10) 35 Mpa Resistência à compressão na direcção do fio 11) 31 Mpa Resistência à tracção 12) 24 Mpa Resistência ao corte 13) 4,8 Mpa Módulo de elasticidade 14) 13500 Mpa Classe de Formaldeído: Classe E1 15) Reacção ao fogo: Classe D-s2, d0 16) Classe de durabilidade natural: 4 17)	10) Valor característico de resistência à flexão na direcção do fio; 11) Valor característico de resistência à compressão na direcção do fio; 12) Valor característico de resistência à tracção; 13) Valor característico de resistência ao corte; 14) Valor característico do módulo de elasticidade; 15) Classe de formaldeído (EN 717-1); 16) Classe de reacção ao fogo (EN 13501-1); 17) Classe de durabilidade (EN 350-2);

Figura 2.10 – Exemplo de marcação CE de produtos GLULAM

Com base no especificado nas normas harmonizadas, a marcação CE, garante a existência de um controlo de qualidade na fábrica adequado e a conformidade da madeira lamelada colada com as exigências da norma e com os valores declarados.

Facilmente se percebe que a aposição da marcação CE é uma vantagem que a GLULAM possui, pois é regula a qualidade final do produto, sendo um incentivo ao seu uso.

2.2.6 COLAS

A escolha da cola a usar na união das lamelas está ligada principalmente às condições ambientais colocando em segundo plano factores como a durabilidade ou a estética. É importante, na escolha da cola a usar, ter em consideração a humidade relativa do ar, a temperatura e a presença de compostos agressivos na atmosfera.

Apesar de haver uma enorme variedade de colas no mercado, as opções mais frequentes são as colas baseadas nos seguintes compostos:

- Caseína;
- Resorcinol;
- Resorcinol-Fenol-Formol;
- Ureia-Formol.

A característica fundamental que a cola deve possuir é a de, nas condições de serviço, ter um tempo útil de vida no mínimo igual à madeira usada no elemento lamelado colado. Uma estrutura de GLULAM normalmente possui um período de vida útil de pelo menos 100 anos. Normalmente consideram-se aceitáveis as seguintes escolhas:

Quadro 2.1 – Escolha das colas em função das condições ambientais [7]

	Boas condições atmosféricas		Más condições atmosféricas	
	Teor em água da madeira		Exposição em atmosfera contendo produtos químicos ou exposição directa às intempéries	
	<18%	≥ 18%		
Temperatura elevada	Resorcinol Caseína	Resorcinol	Resorcinol	
Temperatura normal	Resorcinol Caseína Ureia-formol	Resorcinol Ureia-formol	Resorcinol	

De uma maneira resumida, uma cola que seja aplicada no fabrico de GLULAM deve possuir as seguintes características:

- A cola deve formar uma película, de forma a fluir em todas as direcções da superfície da madeira;
- A cola deve ser capaz de penetrar nas duas superfícies a unir;
- A cola deve aderir adequadamente à madeira;
- O processo de cura deve ser passível de ser cuidadosamente controlado, quer por variações de temperatura, quer por aceleradores de crescimento.

2.2.7 TIPOS DE GLULAM

A GLULAM pode ser dividida em duas classes: (a) madeira lamelada colada homogénea; (b) madeira lamelada colada combinada. A madeira lamelada colada homogénea é constituída por lamelas com a mesma classe de resistência e a mesma espécie ou combinação de espécies. A madeira lamelada colada combinada, por sua vez, é constituída por lamelas interiores e exteriores que pertencem a classes de resistência diferentes ou a espécies (ou combinação de espécies) diferentes. As lamelas exteriores são de resistência superior pois, como já foi referido anteriormente, serão estas a suportar os esforços mais elevados.

As suas capacidades de resistência e as propriedades mecânicas encontram-se descritas na norma europeia EN 1194:2002 - *“Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values”*.

Nesta norma estão previstas quatro classes de resistência para cada tipo de GLULAM. Para a madeira lamelada colada homogénea as classes previstas são: GL 24h, GL 28h, GL 32h e GL 36h. No caso da madeira lamelada colada combinada as classes são: GL 24c, GL 28c, GL 32c e GL 36c.

O número usado na nomenclatura traduz o valor da resistência à flexão em mega pascal (MPa) logo, quando uma peça de GLULAM é designada de GL 24c, isto significa que se trata de um elemento estrutural de madeira lamelada colada combinada com valor característico de resistência à flexão de 24MPa.

2.3 O AÇO COMO MATERIAL ESTRUTURAL

2.3.1 O QUE É O AÇO?

Podem-se definir os aços como ligas de ferro (Fe) e carbono (C) em que as percentagens deste último variam entre 0,008% e 2,11%. Podem conter outros elementos de liga sendo os mais frequentes o cromo (Cr), manganês (Mn), silício (Si), molibdênio (Mo), vanádio (V), nióbio (Nb), tungstênio (W), titânio (Ti) e níquel (Ni).

O aço, quando usado em estruturas, é identificado pela designação especificada na norma europeia EN 10027 – “*Designation systems for steels. Part 1: Steel names*”. Os aços mais usados são o S235, S275 e o S355 sendo que a letra S designa qual o fim a que se destina o aço, neste caso o S vem da palavra inglesa *structural*. A numeração indica a tensão de cedência em mega pascal.

As restantes propriedades mecânicas do aço, à temperatura ambiente, são consideradas constantes, como por exemplo, o módulo de elasticidade igual a $E=2,06 \times 10^5$ MPa, o coeficiente de Poisson igual a $\nu=0,3$ e o resultante módulo de rigidez transversal igual a $G=0,8 \times 10^5$ MPa.

A classificação de aços pode ainda ser complementada com letras JR, JO, J2 e K2 que representam o nível de qualidade do aço no respeitante à soldabilidade e aos valores especificados no ensaio de choque. A qualidade aumenta para a designação de JR a K2.

O aço estrutural é um material abrangente, podendo ser aplicado, quer na estrutura de edifícios, quer por exemplo na construção de pontes. Encontra-se disponível em varias formas e dimensões, o que permite uma grande flexibilidade de projecto. Por outro lado, as secções ocas permitirão criar estruturas igualmente resistentes mas mais leves aumentando assim o potencial de utilização do aço.

O aço é relativamente barato de produzir sendo ao mesmo tempo um material extremamente resistente e económico. O aço é essencialmente uniforme em termos de qualidade e de estabilidade dimensional. A sua durabilidade não é afectada por processos de gelo e degelo.

O aço também possui ainda outras características que o tornam particularmente adaptável às exigências da indústria da construção. Pode ser ligado e tratado termicamente de forma a obter resistência, ductilidade e dureza adequada as condições de serviço, e continuar apto à fabricação em oficinas de obra convencionais.

A aplicação do aço em estruturas de cobertura consiste maioritariamente em elementos laminados a quente unidos entre si por soldadura ou ligações aparafusados (mais adequada).

2.3.2 A ORIGEM DO AÇO

O fabrico de ferro teve início na Anatólia, cerca de 2000 a.C. tendo sido a Idade do Ferro plenamente estabelecida por volta de 1000 a.C.. Neste período a tecnologia do fabrico do ferro espalhou-se pelo mundo. Em, aproximadamente, 500 a.C., chegou às fronteiras orientais da Europa e por volta de 400 a.C. chegou à China. .C. No século IV A.C. já se usavam armas baseadas em aços como por exemplo a falcata ibérica. Os minérios de ferro eram encontrados em abundância na natureza, assim como o

carvão. Actualmente a maior quantidade de matéria-prima para produção de aço é a sucata proveniente dos resíduos industriais.



Figura 2.11 – Arma em aço - Falcata ibérica

A forma de produção era em pequenos fornos na forma de torrões ou pedaços sólidos, denominados tarugos. Estes, em seguida, eram forjados a quente na forma de barras de ferro trabalhando, possuindo maleabilidade, contendo, entretanto pedaços de escória e carvão. O teor de carbono dos primeiros aços fabricados variava entre 0,07% e 0,8% sendo este último considerado um aço de verdade. Os egípcios, por volta de 900 a.C., já dominavam processos relativos a tratamentos térmicos nos aços para fabricação de espadas e facas. Como quando o teor de carbono supera 0,3% o material torna-se muito duro e frágil caso seja temperado (resfriado bruscamente em água) de uma temperatura acima de 850°C a 900°C, eles utilizavam o tratamento denominado revenido que consiste em diminuir a fragilidade minimizando-a por reaquecimento do aço a uma temperatura entre 350°C e 500°C.

Já os chineses produziam aços tratados termicamente por volta de 200 a.C. e os japoneses aprenderam a arte da produção de artefactos em metal dos chineses, embora tenham ajudado a espalhar o conhecimento da tecnologia da fabricação de aços, aumentando muito a produção de ferro trabalhado no mundo romano.

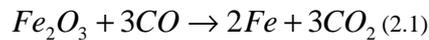
Com o declínio do Império Romano, a produção de aço ou ferro trabalhado estabilizou-se na Europa até que, no começo do século XV, começaram-se a utilizar quedas de água para insuflar ar nos fornos de fusão. Em consequência a temperatura no interior dos fornos passou a ser superior a 1200°C. Desta forma, ao invés de se produzirem os torrões, passou-se a produzir um líquido rico em carbono: o ferro fundido. Para se obter o ferro trabalhado e reduzir o teor de carbono deste ferro fundido, o mesmo era solidificado e em seguida fundido em atmosfera oxidante, utilizando carvão como combustível. Este processo retirava o carbono do ferro dando origem a um tarugo semi-sólido que após resfriamento era martelado até ficar na forma final.

A história moderna do fabrico do aço começou com a introdução do processo de Bessemer em 1858. Este processo permitia que o aço fosse produzido em maiores quantidades e de forma mais económica tornando-o aplicável em situações em que antes apenas o ferro era usado. Este foi apenas o primeiro processo moderno de produção de aço. O processo siderúrgico Gilchrist-Thomas resultou de uma evolução do processo Bessemer e consistia em alinhar o conversor com um material básico de forma a remover o fósforo presente. Outro método foi o processo Siemens-Martin, que tal como o processo Gilchrist-Thomas complementava, em vez de substituir o processo Bessemer.

Estes processos tornaram-se obsoletos pelo processo Linz-Donawitz baseado na produção em conversores de oxigénio, desenvolvido cerca de 1950, e por outros processos baseados na oxidação do ferro. [10]

2.3.3 PROCESSO DE FABRICO

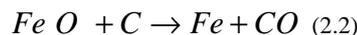
A maior parte do ferro é extraído a partir dos minérios de ferro em altos-fornos. Num alto-forno o coque (carbono) actua como agente redutor dos óxidos de ferro (principalmente Fe_2O_3) originando gusa, que contém cerca de 4% de carbono, juntamente com outras impurezas, de acordo com a reacção:



A gusa de alto-forno é geralmente transferida no estado líquido para um forno de produção de aço.

Como foi referido anteriormente, os aços são essencialmente ligas de ferro e carbono com um teor máximo de 2% de carbono. Porém, a maior parte dos aços contém menos de 0,5% de carbono. São quase sempre produzidos por oxidação do carbono e das outras impurezas contidas na gusa, até que a quantidade de carbono seja reduzida para os níveis requeridos.

O processo vulgarmente usado na conversão da gusa em aço é o de oxidação por oxigénio. Neste processo, a gusa e um máximo de 30% de sucata de aço são carregadas num conversor em forma de barril, revestido a refractário, no qual é inserida uma lança de oxigénio. O oxigénio puro soprado através da lança reage com o banho líquido e forma-se óxido de ferro. O carbono do aço reage então com o óxido de ferro e forma-se monóxido de carbono através da reacção:



Imediatamente antes do início da reacção de oxidação, são adicionados em quantidades controladas, fundentes à base de carbonato de cálcio (calcário). Neste processo, a quantidade de carbono pode ser reduzida drasticamente, reduzindo-se simultaneamente outras impurezas, como o enxofre e o fósforo.

O aço fundido que sai do conversor é então vazado em moldes estacionários ou vazado continuamente. O aço vazado é posteriormente manufacturado nos diferentes tipos de produtos de aço (laminagem a quente, enformação a frio, extrusão, forjamento e vazamento). No caso dos aços estruturais, os processos mais usados são a laminagem a quente e a enformação a frio.

A laminagem a quente é um processo metalúrgico, no qual o aço vazado é deformado entre uma série de rolos sendo que a sua temperatura se encontra acima da temperatura de recristalização do aço. Este processo, quando comparado com a enformação a frio, permite atingir maiores deformações num menor número de ciclos.

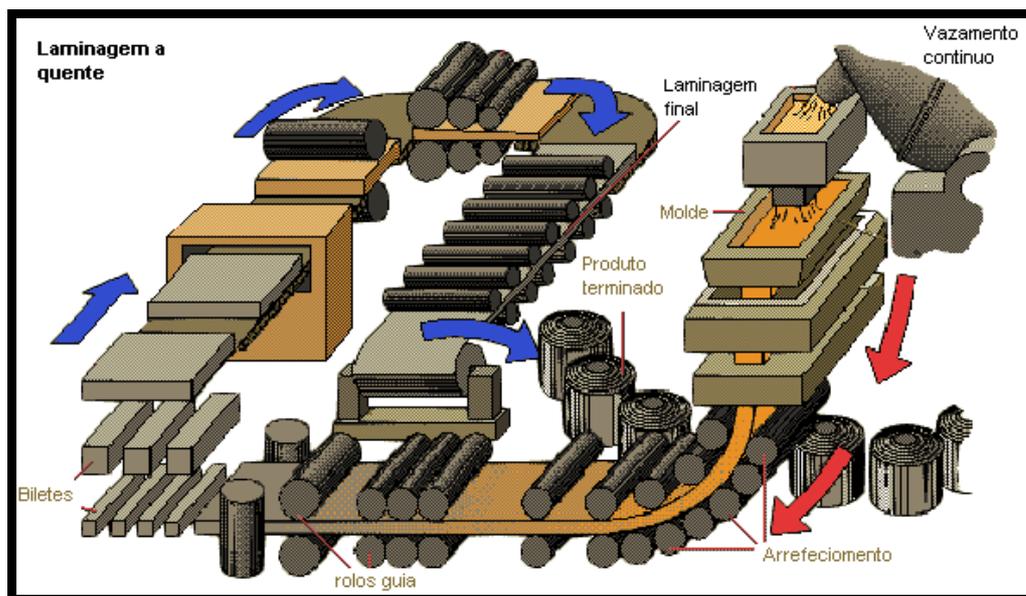


Figura 2.12. – Laminagem a quente

Como o material é trabalhado antes da estrutura cristalina se formar, o processo em si não afecta as propriedades microestruturais. O processo de laminagem a quente tem como objectivo principal a manipulação da forma e geometria do material não pretendendo alterar as propriedades mecânicas. [10]

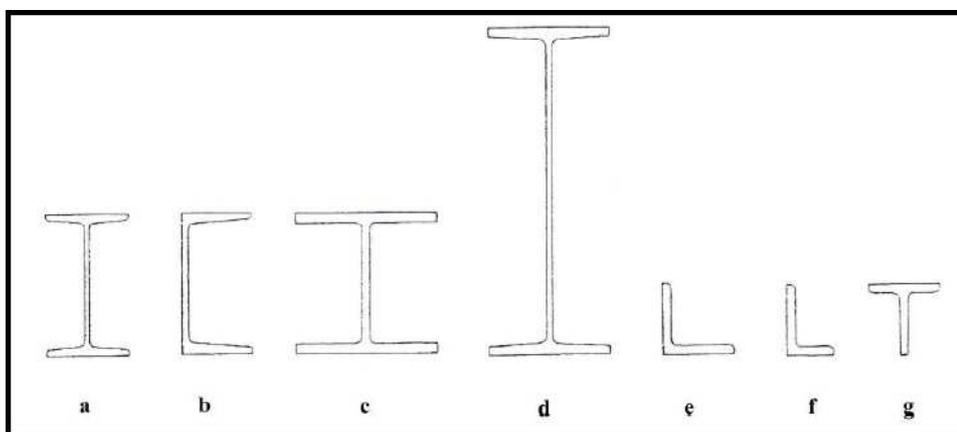


Figura 2.13 – Exemplos de produtos laminados a quente

Na enformação a frio, o aço também é passado por rolos mas, neste caso, a temperatura encontra-se abaixo do ponto de recristalização. Este processo aumenta a tensão de cedência do metal introduzindo deformações na estrutura cristalina. Estas deformações podem ser pontuais ou lineares. À medida que estas deformações se acumulam, torna-se cada vez mais difícil ocorrerem deslizamentos na estrutura cristalina, provocando assim um endurecimento do material. Por outro lado, à medida que aumenta a dureza do aço diminui a sua ductilidade tornando-o sensível à presença de fendas sendo frequente ocorrerem casos de rotura frágil.

A enformagem a frio é usada principalmente para reduzir a espessura das placas.

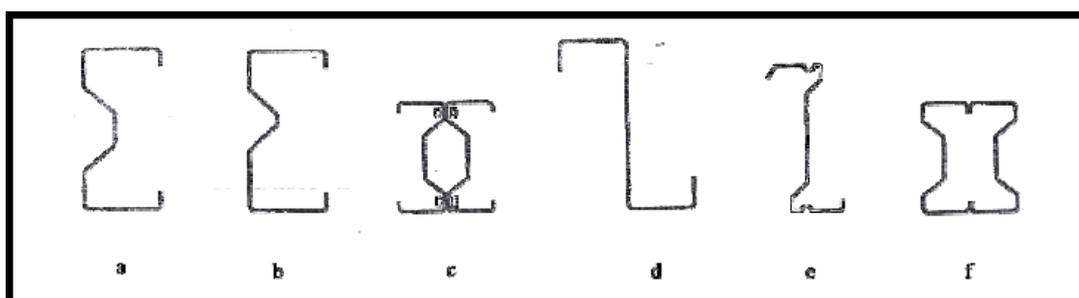


Figura 2.14 – Exemplos de produtos enformados a frio

3

ESTRUTURAS DE COBERTURA EM MADEIRA LAMELADA COLADA E AÇO

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Pode-se definir uma cobertura como o elemento superior de um edifício que tem como função principal fechar o espaço interior e garantir a sua protecção contra os elementos externos. Tem que cumprir requisitos em vários campos como, por exemplo, na resistência e estabilidade estrutural, resistência ao fogo, isolamento acústico, isolamento térmico e resistência às intempéries.

Pode-se subdividir a concepção de uma cobertura em dois temas centrais: (a) definição da forma da cobertura; b) criação de meios para garantir a habitabilidade do espaço abrangido pela cobertura.

A definição da forma da cobertura esta ligada a dois tipos distintos de requisitos: (a) um de origem arquitectónica; (b) outro de origem estrutural.

Após estabelecer a disposição do espaço interior e de quais os critérios arquitectónicos que a cobertura deve cumprir fica definido um dos parâmetros estruturais mais importantes da cobertura, o vão.

A determinação do vão restringe imediatamente o tipo de sistemas estruturais possíveis para a cobertura estando neste momento o projectista apto a iniciar o cálculo estrutural.

Contudo, o cumprimento do vão não é o único critério a considerar. Além do peso próprio da estrutura e sobrecargas, o uso do espaço interior cria necessidades como a colocação de infra-estruturas relacionadas com a iluminação, climatização, ventilação ou outro tipo de elementos que possam provocar cargas significativas.

Deste modo, pode-se considerar que o sistema estrutural da cobertura é decidido tendo em conta o tipo de edifício, o vão a ser vencido, o tipo de cargas aplicadas na cobertura, a disposição espacial e a arquitectura pretendida para o espaço.

Neste capítulo irá abordar-se a questão dos sistemas estruturais mais usuais em coberturas e posteriormente procurar relacioná-los com o vão que conseguem vencer.

3.2 DEFINIÇÃO DE VÃO

O vão, é a distância entre dois pontos de apoio consecutivos de uma estrutura. A classificação do vão e a escolha de um sistema estrutural adequado encontram-se relacionados e são fundamentais para o desempenho da cobertura. Por exemplo, o uso de um sistema de asnas é aplicável a estruturas de vão

médio, não sendo viável o seu uso para vãos maiores podendo nesses casos optar-se por sistemas como pórticos ou arcos.

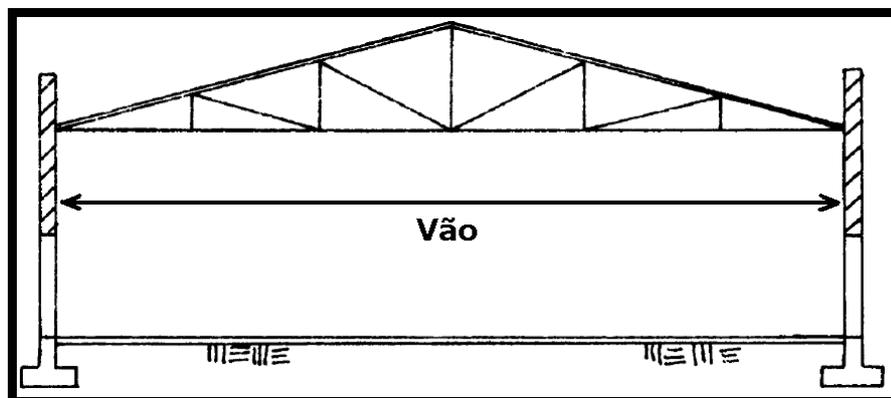


Figura 3.1. – Definição de vão de uma cobertura

Tradicionalmente faz-se a classificação de vãos em três tipos de acordo com a dificuldade em vencer a distância entre apoios: (a) pequeno vão; (b) médio vão; (c) grande vão.

Esta classificação não depende só do sistema escolhido mas também do material pois, de acordo com alguns autores, enquanto que para betão se pode considerar um vão de 3 a 6m como pequeno, no caso do aço pode-se considerar entre 3 a 12m. Tendo esta consideração presente, optou-se neste trabalho por estabelecer um sistema de classificação de vãos com base no potencial dos sistemas estruturais em madeira lamelada colada.

Teoricamente é possível adaptar todos os sistemas estruturais a qualquer vão. Contudo, quando se entra em consideração com a sua viabilidade económica têm que se considerar variáveis como a quantidade necessária de material, tempo de montagem ou o custo da produção em fábrica dos elementos da estrutura. Com base numa análise económica criteriosa é possível estabelecer os limites para os quais um sistema é viável.

Tendo em consideração estes limites económicos, conclui-se que quanto maior o vão mais o sistema estrutural deve estar otimizado de forma a seguir a direcção da resultante das cargas e sobrecargas. Este aspecto encontra-se demonstrado na relação que o mercado estabelece entre sistemas estruturais e o vão em que estão disponíveis. Deste modo, verifica-se a aplicação quase exclusiva de vigas para pequeno vão, asnas e pórticos para vãos médios e arcos, estruturas espaciais, cúpulas e cascas para grandes vãos [11].

Outro aspecto importante para estabelecer os limites de viabilidade do sistema está relacionado com a flecha permitida para a estrutura. Por exemplo, no caso das vigas simplesmente apoiadas, muitas vezes atinge-se o limite permitido para a flecha antes de se esgotar a capacidade resistente da secção transversal utilizada [8].

De acordo com a pesquisa de mercado realizado pelo autor baseada em sites de construtores de estruturas de GLULAM, e adoptando critérios de livros especializados da área [8] [12] optou-se pelos seguintes limites para o referencial:

- Considera-se um vão de pequena dimensão como o vão máximo possível de ser vencido por um sistema de vigas planas simplesmente apoiadas. Estabeleceu-se a distância de 20m como sendo um limite máximo aceitável.

- Definiu-se que um vão médio se encontra entre os 20 e os 40m. O valor do limite superior foi determinado como sendo o valor máximo médio que decorreu da pesquisa de mercado para os sistemas estruturais em asna ou pórticos.
- Um vão de grande dimensão é aquele que consegue vencer distâncias superiores a 40m. Para este tipo de vão é comum optar por sistemas em arco, cúpulas, cascas ou estruturas espaciais.

A razão pela qual se optou por definir um sistema de classificação próprio decorre da falta de informação específica para estruturas de GLULAM e do facto de as dimensões de vãos, com o avanço da tecnologia, para um mesmo sistema estrutural estarem a aumentar. Efectivamente, hoje em dia, é possível atingir vãos até 180m enquanto que alguns dos livros consultados referem apenas 100m [11] como sendo o limite.

3.3 TIPOS DE ESTRUTURAS DE COBERTURA

De modo a compreender o funcionamento das estruturas de cobertura, faz-se em seguida uma breve descrição dos tipos de sistemas estruturais mais comuns, desde os mais simples (pequeno vão) aos mais complexos (grande vão).

É possível fazer a divisão dos sistemas estruturais segundo vários parâmetros como por exemplo a forma ou o sistema construtivo. Além disso, a classificação varia de autor para autor. Por este motivo neste trabalho vai-se seguir de uma forma genérica a classificação usada por Goetz *et al* [11].

Os sistemas estruturais serão também classificados em função do seu vão podendo ainda fazer uma subdivisão entre estruturas bidimensionais e estruturas tridimensionais.

No caso das estruturas bidimensionais estas apenas suportam cargas num único plano vertical (o plano em que se encontra a estrutura). Por outro lado, as estruturas tridimensionais podem suportar cargas em qualquer plano.

Incluem-se nas estruturas bidimensionais, os seguintes sistemas estruturais: vigas, estruturas articuladas planas (onde se incluem as asnas), arcos e pórticos. Neste tipo de estruturas é necessário a inclusão de elementos estruturais secundários com a dupla função de receber as cargas e de contraventar a estrutura.

As estruturas tridimensionais incluem estruturas espaciais articuladas, cascas, cúpulas e variantes de estruturas bidimensionais como grelhas de vigas, pórticos radiais, arcos radiais, etc.

3.3.1 VIGAS

Uma viga pode ser descrita como um elemento simples horizontal projectado para suportar cargas verticais. Apesar de ser um elemento estrutural muito simples, existem algumas soluções diferentes para a sua aplicação em coberturas.

Os sistemas estruturais mais usuais baseados em vigas são os seguintes: (a) vigas simples; (b) vigas contínuas; (c) vigas curvas e (d) grelhas de vigas.

As vigas simples dividem-se em dois tipos: (a) vigas de secção constante; (b) vigas de secção variável.

As vigas de secção simples são a forma mais comum de elementos de GLULAM e são preferencialmente aplicadas em vãos muito pequenos. Para vãos maiores poderá ser economicamente

mais viável optar por vigas de secção variável. Este sistema permite dimensionar as vigas de forma a serem mais resistentes nos locais de maior esforço. [13]

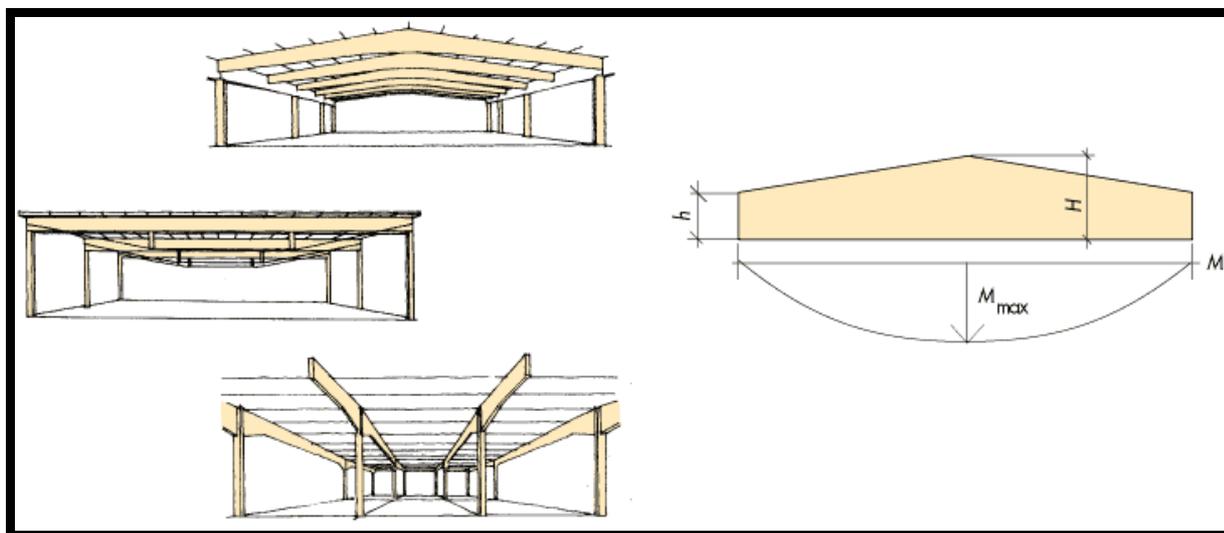


Figura 3.2 – Exemplos de vigas simples

Os dois parâmetros a ter em conta aquando da escolha deste sistema estrutural são o vão que é possível vencer e qual a flecha da deformação máxima. Várias vezes o factor limitativo será precisamente a flecha apesar de a estrutura não se encontrar perto do seu limite de rotura. É possível melhorar o comportamento das vigas neste campo através do encastramento em ambas as extremidades.

As vigas de GLULAM normalmente são desenhadas com a parte inferior recta mas, devido a motivos estéticos, é possível atribuir-lhes uma aparência mais curva ficando com uma forma semelhante a um boomerang.

Vigas com vários apoios intermédios ou vigas com encastramentos permitem um uso mais eficaz de material do que se consegue com vigas simplesmente apoiadas em dois pontos. Com a aplicação de vigas contínuas consegue-se usar secções transversais de menor dimensão quando comparadas com vigas simples de igual vão. É possível aumentar ainda mais a viabilidade deste sistema estrutural elevando a altura da secção nos apoios intermédios, aumentando assim a sua resistência no ponto mais crítico. Nesta situação muito raramente é a flecha a funcionar como parâmetro limite mas sim a resistência do material. Adicionalmente, o momento flector máximo possível de atingir nos apoios intermédios (que é o factor limitativo na maior parte dos casos) aumenta cerca de 10%.

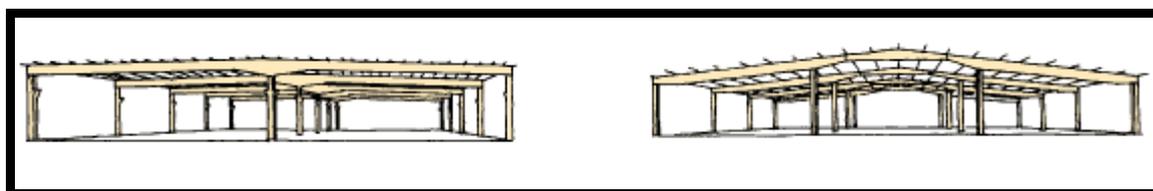


Figura 3.3 – Exemplos de vigas contínuas

Nas vigas curvas, o apoio revela-se importante. Se existir um travamento na direcção horizontal, serão produzidos esforços nessa direcção. Caso seja permitido o livre deslizamento da viga, esta apenas

estará sujeita a reacções verticais. Este tipo de viga é usado principalmente por motivos estéticos permitindo um maior grau de liberdade arquitectónico.



Figura 3.4 – Exemplos de edifício com várias vigas curvas

Apesar de constituírem um sistema bidimensional, é possível criar sistemas tridimensionais baseados em vigas. As vigas podem ser colocadas radialmente ou sob a forma de grelhas. Este último tipo de estruturas expande-se em várias dimensões o que permite uma estrutura com menor altura que o sistema tradicional de vigas. Por outro lado, ao aumentar o número de ligações existe um aumento do custo. As vantagens deste sistema são optimizadas quando a distância entre pilares é igual em todas as direcções.

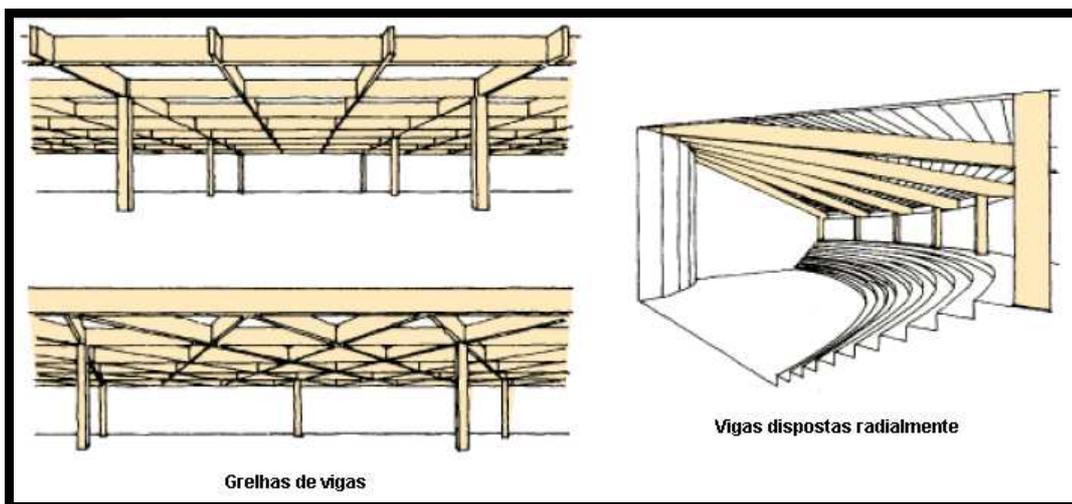


Figura 3.5 – Exemplos de sistemas tridimensionais com vigas

Basicamente, as grelhas de vigas são sistemas planos de vigas que se intersectam a 90°, 60° ou 45°. As vigas podem ser contínuas nas intersecções ou podem ser unidas por ligações que garantam a

transmissão dos momentos. Estas ligações rígidas criam um sistema estático altamente indeterminado no qual as cargas são distribuídas em duas ou três direcções. A ocorrência de deformações quando em carga afecta todas as vigas da grelha e não apenas aquela que suporta directamente a carga. Deste modo todas as vigas suportam a carga de acordo com a respectiva rigidez e vão a vencer.

Este tipo de sistema estrutural permite vencer vãos na ordem dos 20m podendo chegar a 25m no caso de vigas contínuas. [12]

3.3.2 ESTRUTURAS ARTICULADAS PLANAS

As estruturas articuladas, também designadas de treliças ou sistemas triangulados, podem ser descritas como estruturas reticuladas cujas barras estão ligadas entre si nas extremidades por rótulas ou articulações e com o exterior por apoios [14]. As treliças são formadas a partir de um triângulo base para que cada novo nó desencadeie a ligação de duas novas barras. Quando a estrutura articulada se desenvolve apenas num plano esta é designada de estrutura articulada plana.

São estruturas interiormente isostáticas. Para efeitos de cálculo considera-se que as forças são aplicadas exclusivamente nos nós sendo que deste modo as barras apenas são sujeitas a esforços de tracção e compressão. Na prática, os elementos superiores estão sujeitos a cargas distribuídas que provocam a flexão das barras e conseqüentemente a introdução de momentos. A dimensão da secção transversal dos elementos à compressão é determinada pelo limite considerado aceitável para encurvadura das barras enquanto que a dimensão da secção transversal é estabelecida pelos esforços axiais nos pontos mais frágeis (normalmente nas ligações).

As treliças possuem uma série de vantagens sobre os elementos maciços:

- O uso otimizado do material aumenta a viabilidade económica;
- Maior liberdade arquitectónica;
- Podem ser fabricadas em várias partes de modo a facilitar o transporte;
- Um peso próprio baixo permite um manuseamento mais fácil quer na fábrica, quer no estaleiro, com baixos custos de transporte.

Os elementos constituintes das estruturas articuladas planas podem ser designados de: (a) cordão inferior (conjunto que forma a parte inferior); (b) cordão superior (conjunto de elementos que forma a parte superior); (c) montantes (barras verticais); (s) diagonais (barras inclinadas).

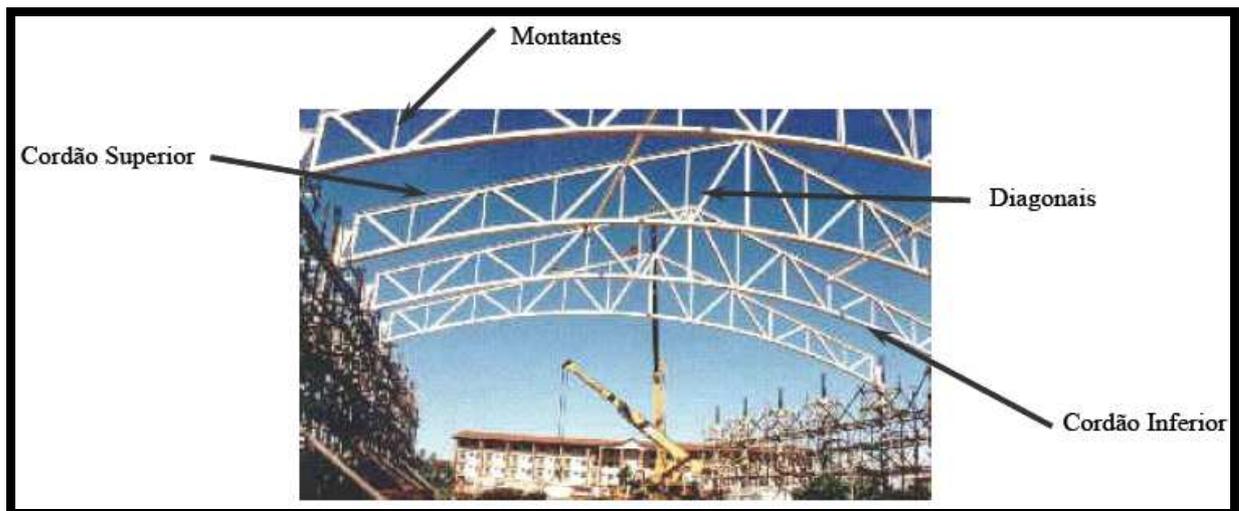


Figura 3.6 – Cobertura de um pavilhão industrial

A classificação das estruturas articuladas planas é feita de acordo com a técnica de construção, tipo de ligações e tipo de forma. Este tipo de sistema estrutural possui várias configurações diferentes. Contudo para estruturas modernas os mais usuais são as estruturas articuladas planas triangulares, também designadas de asnas, e as estruturas articuladas de cordões paralelos.

No caso das estruturas articuladas de cordões paralelos, tal como o nome indica, o cordão inferior é paralelo ao superior. Os diferentes subtipos variam consoante o número e disposição dos montantes e diagonais.

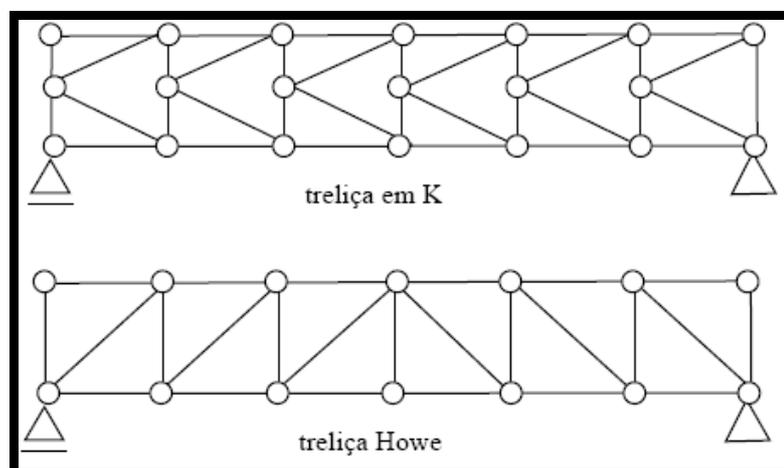


Figura 3.7 – Estruturas articuladas planas de cordões paralelos

As asnas, constituem um caso particular das estruturas articuladas devido à sua antiguidade e por serem tradicionalmente um dos sistemas estruturais mais usados em coberturas. A asna, como estrutura de cobertura, tem a sua origem no renascimento italiano, sendo frequente o seu uso nos trabalhos do arquitecto *Andreas Palladio* (sec. XVI). As designações dos elementos da asna são ligeiramente diferentes das restantes estruturas articuladas como se pode verificar na seguinte figura.

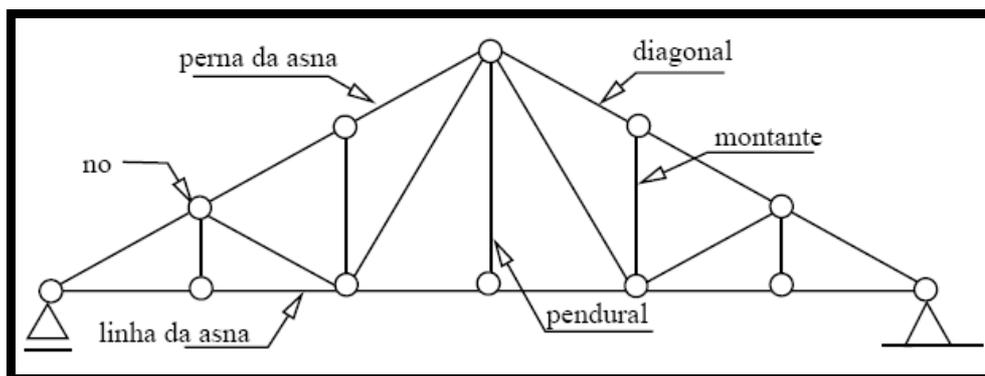


Figura 3.8 – Asna de duas águas para suporte de cobertura

A asna mais simples é constituída por uma linha, duas pernas e um pendural. Através da adição de mais elemento consegue-se materializar asnas com maior vão. Efectivamente, existem diversos tipo de asnas como por exemplo asnas simples, asnas compostas, meias-asnas, etc.

É possível, com o uso de sistemas articulados planos, vencer vãos até aproximadamente 50m.

3.3.3 ARCOS

Os sistemas estruturais em arco podem ser classificados com base em três parâmetros distintos: (a) quanto à forma; (b) quanto ao tipo de arco; (c) e se os elementos constituintes são maciços de secção com altura constante ou em treliça.

Uma característica típica dos arcos é que se sobre eles forem aplicadas a cargas puramente verticais eles ficam sujeitos apenas a esforços de compressão. Devido a este facto, nos arcos, as características do material são melhores aproveitadas sendo que para arcos de GULAM, a altura do elemento estrutural é aproximadamente 1/3 do necessário num sistema em viga com o mesmo vão e carga [13]. Esta diferença de funcionamento encontra-se explicita na seguinte figura.

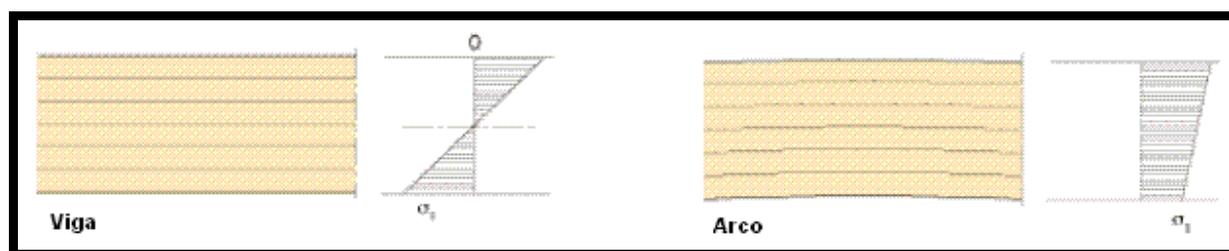


Figura 3.9 – Diagrama de esforços de vigas e arcos para uma mesma carga e vão

Em relação à forma os arcos podem ser: (a) circulares; (b) parabólicos; (c) elípticos. A forma do arco é estabelecida de modo a diminuir os momentos máximos. Normalmente o tipo mais usual é o circular pois é o que possui um fabrico mais simples devido à curvatura que se introduz nas lamelas ser constante. Contudo, para vãos maiores, poderá ser mais económico usar o arco parabólico. Por outro lado, de forma a aumentar a altura junto dos apoios, pode-se recorrer ao arco em elipse. Outro método para aumentar a altura junto a apoios é colocar o arco a apoiar em pilares.

Quanto ao tipo de arcos os mais usuais são os seguintes: (a) arco de duas rótulas; (b) arco de três rótulas.

O arco de duas rótulas é uma estrutura estaticamente indeterminada que nos apoios causa reacções maioritariamente de compressão na direcção do arco. Cargas não simétricas ou cargas horizontais, como por exemplo o peso da neve ou o vento, provocam a deformação do arco sendo que a intensidade deste efeito depende da rigidez a meio vão e da flecha.

Se os apoios forem sujeitos a deslocamentos laterais, o arco de duas rótulas é capaz de se deformar de forma a adaptar-se mas por sua vez são introduzidos esforços adicionais na estrutura.

Uma variante do arco de duas rótulas é o arco de duas rótulas com um tirante metálico assente em pilares. Neste tipo de arco a componente vertical da reacção é providenciada pelo pilar que fica sujeito a esforços de compressão, enquanto que o componente horizontal da reacção provém do tirante metálico colocado no topo dos pilares (ver figura 3.10) que fica sujeito a esforços de tracção.

Arcos ou pórticos de duas rótulas raramente são usados pois são estruturas indeterminadas de 1º grau e como tal sensíveis ao movimento dos apoios ou à deformação das ligações. [11]

O arco de três rótulas é uma estrutura estaticamente determinada. Este tipo de arco resiste às cargas exteriores maioritariamente através de esforços de compressão no arco. As reacções nos apoios são inclinadas sendo que a sua componente horizontal depende da flecha do arco. Os três parâmetros a ter em consideração no projecto deste tipo de arco são os esforços de compressão, o momento-flector causado por cargas assimétricas ou cargas horizontais e a encurvadura em planos que não o do arco. Arcos mais esbeltos também poderão sofrer encurvadura no plano do arco.

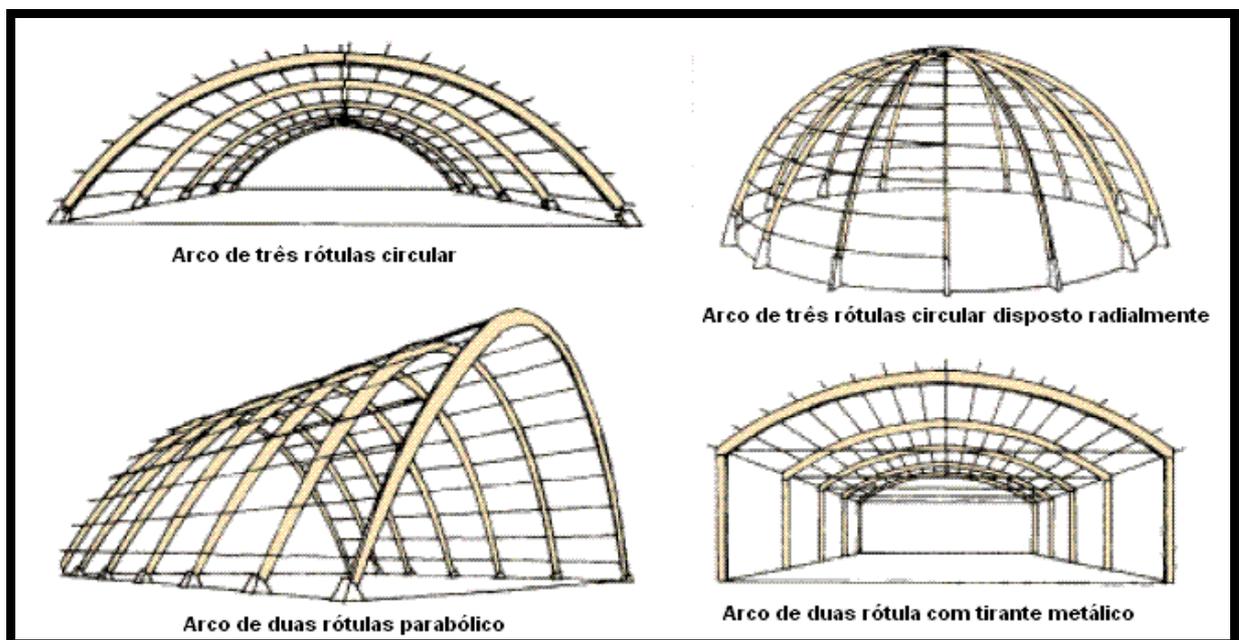


Figura 3.10 – Exemplos de arcos

Quanto à natureza maciça ou em treliça dos elementos constituintes do arco, o sistema treliçado permite maiores vãos devido ao melhor aproveitamento da capacidade resistente dos elementos constituintes e à diminuição do peso próprio da estrutura.

Uma vantagem inerente aos arcos é que normalmente são pré-fabricados sendo apenas necessário proceder à sua instalação em obra, poupando tempo e mão-de-obra.

Segundo a TRADA [12], é comum executar arcos com vãos entre 24m e 98m, se for formado por elementos maciços, ou 48 e 120m se for usado um sistema treliçado.

Também é possível dispor arcos radialmente, desde que possuam as mesmas potencialidades em termos de vãos, criando assim uma cobertura em forma de cúpula.

3.3.4 PÓRTICOS

Os pórticos são usados especialmente em condições em que é necessário uma secção de espaço utilizável aproximadamente constante. Em vez de serem compostos por um elemento único como os arcos, os pórticos são constituídos pela união de dois tipos de elementos. Um dos elementos destina-se a vencer o vão enquanto o outro, as pernas, une o pórtico às fundações.

Os sistemas estruturais porticados, à semelhança dos arcos, também podem ser classificados com base em três parâmetros distintos: (a) quanto à forma; (b) quanto ao tipo de pórtico; (c) e se os elementos constituintes são maciços ou em treliça.

Quando um pórtico é erguido não fica sujeito a esforços constantes. O peso próprio mantém-se estável. Contudo a estrutura pode ser deformada por esforços axiais ou por movimentos das fundações. Por outro lado, as sobrecargas variam consoante o tipo de utilização. Estas variações podem ser antecipadas e incluídas no cálculo da estrutura levando à escolha do tipo de pórtico da forma mais apropriada. Esta combinação será a que levará a um menor uso de material (diminuindo o peso próprio) e em princípio não causará esforços de tracção na estrutura.

O uso de pórticos permite corrigir o problema da altura da cobertura e do aumento do peso próprio da estrutura que se verifica no uso de estruturas em asna.

Quanto à forma, os pórticos podem ser classificados em função da forma do elemento que vence o vão podendo ser: (a) horizontal; (b) inclinado ou (c) arqueado.

Estruturalmente os pórticos podem ser classificados em três tipos: (a) rígidos; (b) de duas rótulas; (c) de três rótulas.

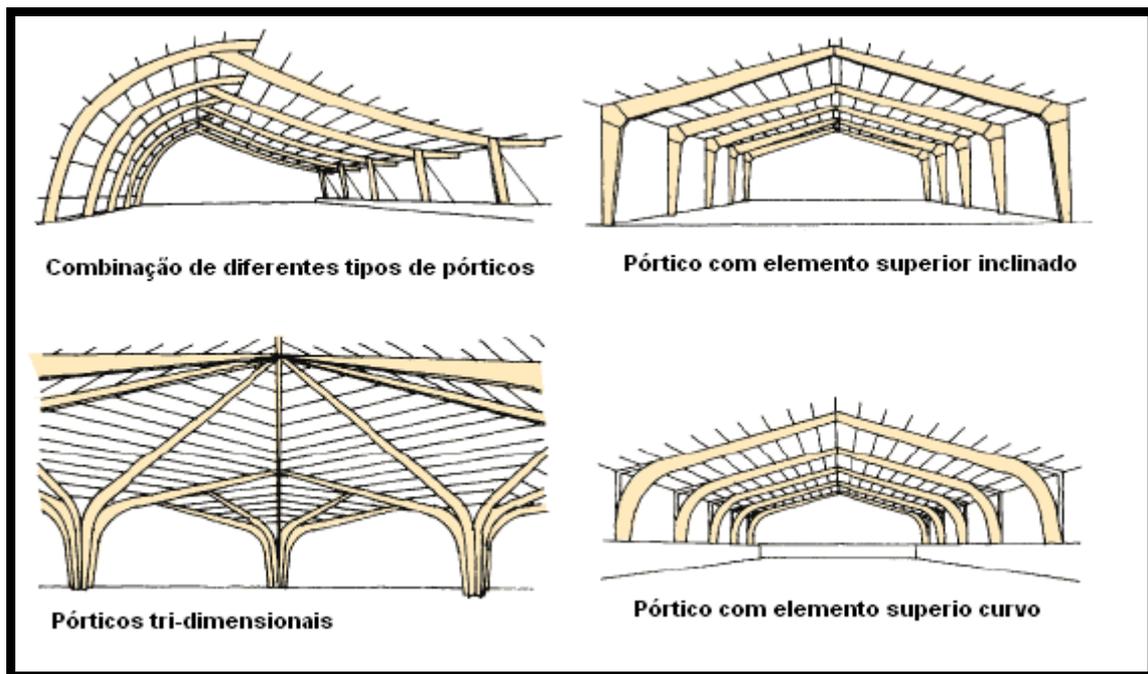


Figura 3.11 – Exemplos de pórticos

A característica principal dos pórticos rígidos é a continuidade da estrutura devida às juntas rígidas entre as várias partes constituintes. Devido à ausência de rótulas, os momentos são transmitidos para as fundações o que obriga a ter em consideração as características resistentes do solo durante o cálculo da estrutura. Esta questão não se coloca nos pórticos de duas ou três rótulas pois nestes sistemas os momentos não são transmitidos para as fundações, contudo os momentos a que a estrutura fica sujeita aumentam.

Os pórticos de duas rótulas são estruturas indeterminadas de primeiro grau e consistem em dois elementos verticais (pernas), ou aproximadamente verticais, com duas rótulas nas extremidades inferiores, unidos por uma viga nas extremidades superiores. Os momentos que se formam nas ligações entre a viga e as pernas são transmitidos para as pernas. Como resultado, existem forças horizontais nos elementos verticais, mesmo quando a estrutura apenas está sujeita a esforços verticais. A forma é condicionada não só pela flexão da viga e pernas mas também pelos esforços de corte na união entre a viga e as pernas. A estabilidade da estrutura deve ser analisada tendo em conta os esforços de compressão que estão presentes na viga e pernas.

Os pórticos de três rótulas são estruturas estaticamente determinadas. As cargas são transmitidas através de momentos e de esforços de corte. As ligações rígidas entre as pernas e os elementos inclinados garantem a transmissão dos momentos na estrutura. Isto provoca reacções horizontais e verticais nos apoios. O tamanho da componente horizontal depende da relação entre a altura e o vão do pórtico. Quanto mais alto for o pórtico, menor será a reacção horizontal. A rótula a meio vão anula o momento nesse ponto. Deste modo, os maiores momentos verificam-se na união entre as pernas e os elementos inclinados. São os esforços de flexão e de corte que condicionam o cálculo da estrutura. A compressão nos elementos inclinados e pernas pode ser crítica para a estabilidade da estrutura.

Tradicionalmente as estruturas porticadas desenvolvem-se pela união dos pórticos em planos paralelos, contudo, tal como nos arcos, é possível obter espaços diferentes pela combinação de outros elementos construtivos, curvos ou rectos, ou pelo arranjo tridimensional de meios pórticos.

Tal como para as estruturas articuladas planas, o vão máximo possível de vencer com esta estrutura é de cerca de 50m.

3.3.5 ESTRUTURAS RETICULADAS ESPACIAIS

As estruturas reticuladas espaciais são estruturas tridimensionais capazes de vencer um vão livre considerável. Podem ser construídos a partir de elementos individuais ou de módulos pré-fabricados e são caracterizados por possuírem uma rigidez e um rácio resistência/peso elevados. [15]

A unidade básica é um triângulo de forma geométrica indeformável formando um conjunto tridimensional resistente e de alta eficiência estrutural. A repartição das barras no espaço e o elevado número de barras que torna o sistema hiperstático, proporciona uma excelente distribuição espacial de rigidez e consequentemente dos esforços. Forma-se um sistema que trabalha de tal forma que, quando um membro atinge a sua capacidade máxima de carga, ocasiona uma redistribuição de esforços a outros membros que suportam cargas adicionais, fazendo o sistema funcionar de forma integrada.

As estruturas reticuladas espaciais podem ser usadas de forma eficaz em coberturas, paredes ou pavimentos contudo a sua principal aplicação é em coberturas de grande vão.

Estas estruturas possuem uma serie de características que as tornam interessantes quando comparadas com outras estruturas, nomeadamente:

- Maior liberdade criativa e construtiva: Devido à sua configuração espacial, é possível criar grandes vãos e simultaneamente conseguir dar liberdade ao arquitecto para definir a forma.
- Prefabricação: Como já foi referido anteriormente, este tipo de estrutura pode ser montada a partir de módulos com dimensões e comprimentos previamente definidos permitindo formar estruturas com grande rigor geométrico e com um peso inferior ao de outras estruturas para os mesmos vãos. Além disso, o uso de módulos diminui significativamente o trabalho em obra, otimizando-o e tornando-o mais eficaz e rápido.
- Transporte: quando comparado com estruturas como arcos e pórticos, o uso de módulos permite um transporte muito mais fácil, tanto entre fábrica e estaleiro como na própria obra.

Estas estruturas podem ser classificadas em função do número de camadas pelas quais são constituídas. Desta forma podem ser de estrutura simples (uma só camada), de estrutura dupla (duas camadas) ou de estrutura múltipla (mais de duas camadas). Estas camadas podem ser planas, resultando numa estrutura em grelha, ou podem ser curvas em uma ou mais direcções, formando por exemplo abóbadas ou cúpulas.

As estruturas em grelha podem ainda ser divididas em grelhas directas e grelhas espaciais. O que distingue estes dois tipos grelhas é que nas grelhas directas, as grelhas formadas na parte superior e inferior são idênticas posicionando-se a grelha superior directamente acima da grelha inferior, enquanto que nas grelhas espaciais isto não se verifica. As barras das malhas podem desenvolver-se em duas, três ou quatro direcções.

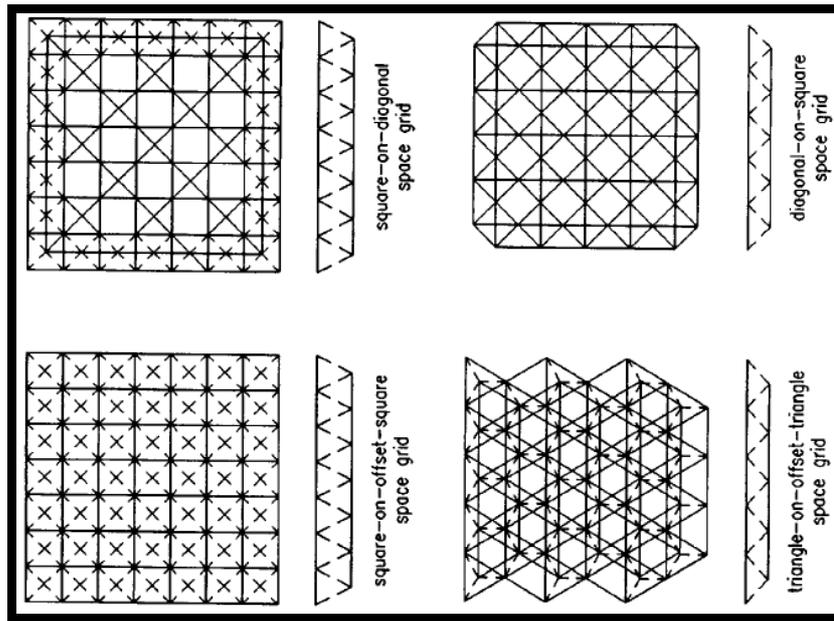


Figura 3.12 – Grelhas espaciais de estrutura simples

Nas grelhas espaciais de estrutura dupla, estas são formadas por unidades piramidais com base triangular ou rectangular, resultando em malhas paralelas idênticas em ambas as camadas com um desvio na horizontal, ou grelhas superiores e inferiores paralelas cada uma com configurações diferentes ligadas entre si em nós através de membros inclinados (diagonais) de forma a criar uma estrutura estável.

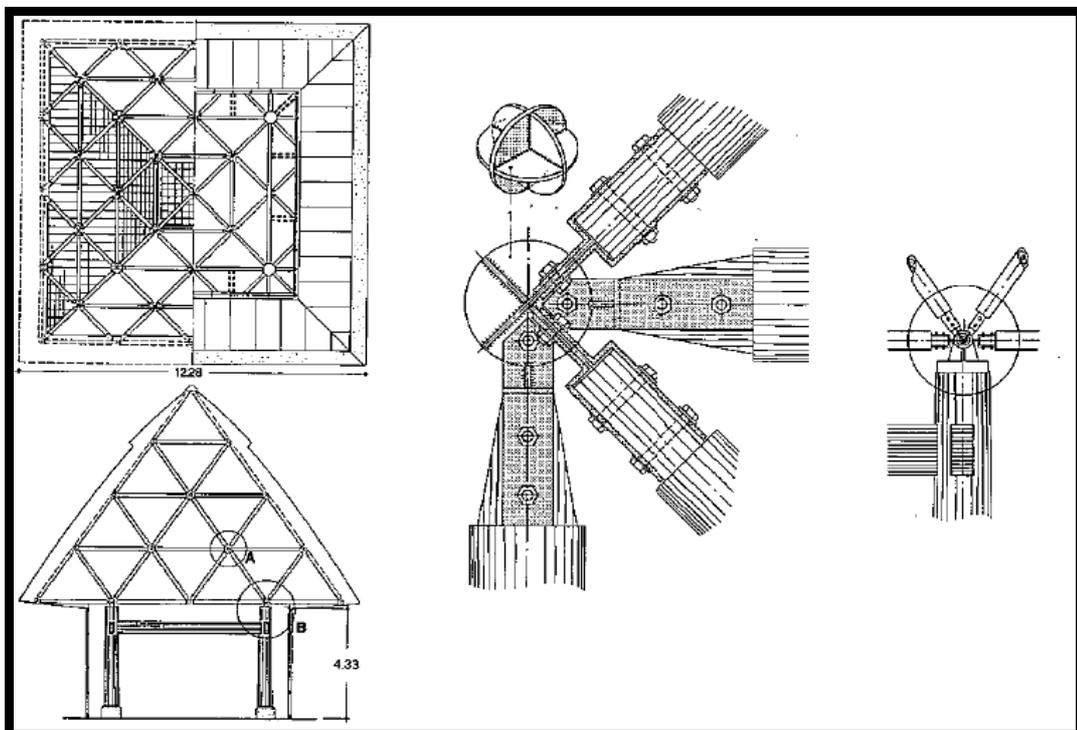


Figura 3.13 – Exemplo de estrutura múltipla com pormenor de ligações

As grelhas de estrutura simples, são sujeitas principalmente a momentos flectores, enquanto que as grelhas de estrutura dupla e múltipla são sujeitas maioritariamente a esforços de tracção e compressão. Estas características das grelhas de estrutura simples, dupla e tripla determinam em grande parte o seu desempenho estrutural. As grelhas de estrutura simples, são aplicáveis em vãos livres até 15m enquanto que as de estrutura dupla são economicamente viáveis para vãos até 100m.

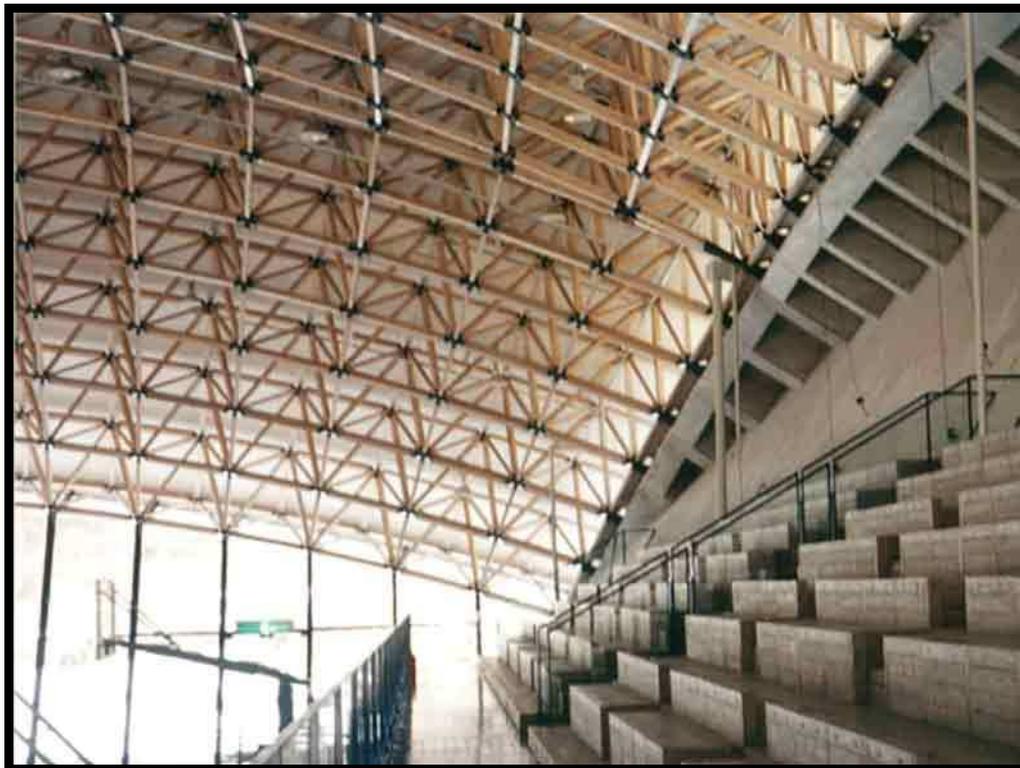


Figura 3.14 – Estrutura duplamente curva com duas camadas (cidade de Oguni)

Por outro lado, estruturas reticuladas espaciais curvas numa só direcção, formando abóbadas, de uma só camada, providenciam uma capacidade de vão livre até 40m que pode ser aumentada substancialmente com a inclusão de uma segunda camada em zonas específicas. Abóbadas de estrutura dupla podem atingir vãos até 120m [16].

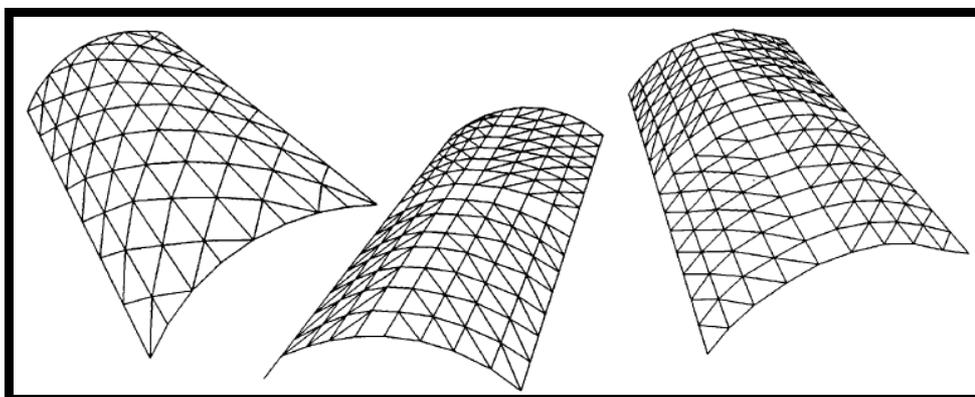


Figura 3.15 – Exemplos de estruturas reticuladas espaciais em abóbadas

As estruturas em cúpula, providenciam uma forma particularmente eficaz e de cobrir grandes áreas. Cúpulas constituídas por estruturas reticuladas de uma camada podem atingir 50m enquanto que as de duas camadas podem atingir os 200m. Este tipo de estrutura será abordada mais adiante num tópico próprio.

O principal problema na construção de estruturas espaciais reticuladas em GLULAM está na ligação entre os elementos estruturais em diferentes planos. A solução passa por encastrar nos extremos das peças de glulam uma peça metálica que se irá unir em nós metálicos ou directamente com a restante estrutura.

3.3.6 CÚPULAS

Segundo Vendrame [17], ao longo do tempo foram surgindo varias configurações de cúpulas mas pode-se reduzir esse número aos cinco tipos mais usados: (a) cúpulas nervuradas; (b) cúpulas Schwedler; (c) cúpulas com malha “three-way”; (d) cúpulas lamelares; (e) cúpulas geodésicas.

Uma cúpula nervurada, tal como o nome sugere, é formada por um determinado número de nervuras que seguem as suas linhas meridionais partindo desde as fundações até ao topo da estrutura. É frequente estas nervuras estarem unidas no topo por um anel de compressão de pequeno diâmetro. As nervuras são ainda ligadas entre si por anéis horizontais com especial destaque para o anel de reforço na base.

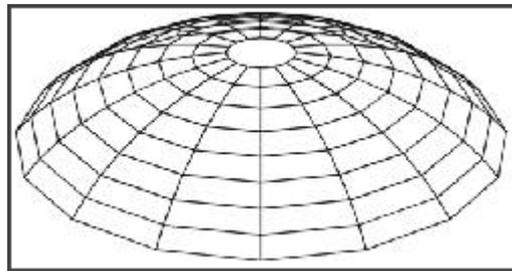


Figura 3.16 – Cúpulas nervuradas

A cúpula Schwedler, cujo nome deriva do engenheiro Alemão J.W. Schwedler, é também constituída por uma série de nervuras meridionais unidas por anéis horizontais mas neste caso são adicionados elementos diagonais que dividem os trapézios formados pelas nervuras e anéis em duas partes iguais. Estas diagonais são adicionadas de forma a aumentar a resistência da estrutura a cargas assimétricas.

As nervuras radiais são elementos contínuos ligados aos anéis horizontais através de uniões rígidas de forma a permitir que os elementos individuais fiquem sujeitos a esforços axiais, de flexão e a esforços de torção.

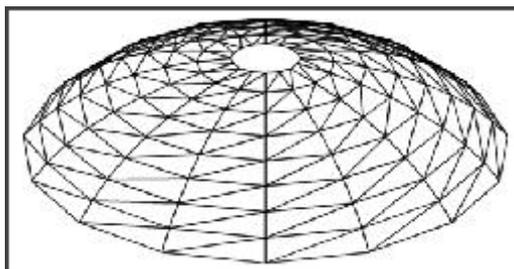


Figura 3.17 – Cúpulas Schwedler

A cúpula “three-way” é formada por uma malha constituída pela repetição de três elementos principais dispostos de modo a formar uma treliça triangular. Os elementos são dispostos em três direcções principais: (a) horizontal; (b) vertical; (c) diagonal. Este tipo de disposição é ideal para estruturas de uma ou de duas camadas.

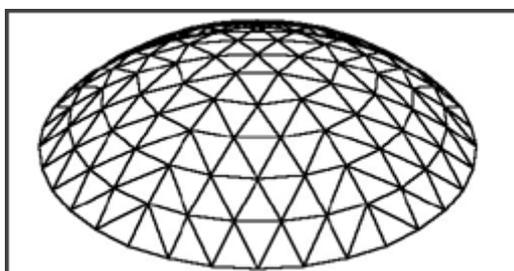


Figura 3.18 – Cúpula “three-way”

As cúpulas lamelares são constituídas por varias unidades similares, designadas de lamelas, com o formato de losango.

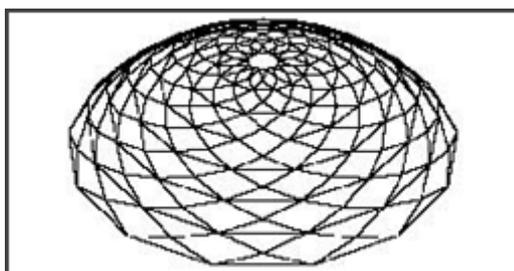


Figura 3.19 – Cúpula lamelar

A cúpula geodésica distingue-se das anteriores devido a ser a aproximação mais fiel a uma semi-esfera. Efectivamente uma estrutura geodésica é constituída por unidades triangulares equiláteras aproximadamente semelhantes em que os seus vértices se encontram todos assentes numa mesma superfície esférica.

Neste tipo de estrutura as cargas são suportadas pela estrutura sob a forma de forças de compressão e tracção tangenciais e radiais. O cálculo da estrutura tem como parâmetros principais os esforços de tracção e compressão nos elementos que formam os triângulos.

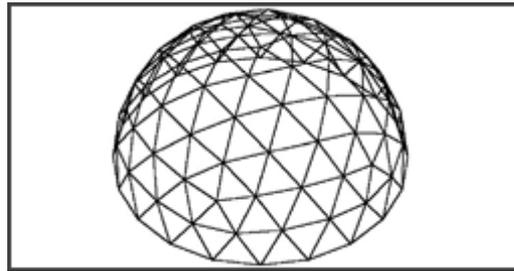


Figura 3.20 – Cúpula geodésica

Apesar de se considerar 200m como o limite máximo do vão, teoricamente é possível atingir valores superiores com as cúpulas sendo que, com a evolução dos materiais e da técnica de construção, esse valor pode ser facilmente ultrapassado.

3.3.7 CASCAS

O termo casca é geralmente usado para estruturas tridimensionais construídas com uma laje curva ou com uma membrana tensionada, cuja rigidez é usada para transferir as cargas para os apoios. As cascas podem ser projectadas com nervuras que suportam as placas curvas, ou sem nervuras para que toda a placa curva funcione como casca. As cascas podem tomar várias formas dependendo principalmente da criatividade do arquitecto, contudo normalmente tomam as seguintes formas padronizadas: (a) em abóbada; (b) conóides; (c) hiperbólicas parabólicas. [11]

Quando a casca fica sujeita principalmente a esforços de flexão, opta-se por inserir na casca nervuras de forma a resistir aos momentos. Este tipo de casca consiste num certo número de nervuras unidas entre si por uma membrana. As cargas são então suportadas através de esforços de tracção, compressão e corte na membrana mas também pela flexão das nervuras.

O cálculo de cascas nervuradas é dominado pelo vão, a forma e as cargas exteriores (especialmente cargas assimétricas e a acção do vento).

Uma outra vantagem do uso de nervuras é que estas podem ser usadas como apoios para a aplicação dos restantes elementos da casca facilitando a sua construção.

As cascas em forma de abóbada podem ter uma secção transversal com forma circular, parabólica ou elíptica. A forma da casca é o principal parâmetro a considerar no cálculo da estrutura. As cascas compridas (cujo comprimento longitudinal é considerável) podem ser calculadas recorrendo à analogia com uma viga, mas as cascas cuja dimensão longitudinal é reduzida devem ser projectadas com teorias exactas de cascas anisotrópicas. Em cascas em abóbada longas, as cargas são suportadas principalmente pela resistência longitudinal à flexão da casca. Em cascas mais curtas as cargas são suportadas pela resistência à flexão em ambas as direcções (longitudinal e transversal). Desta forma, o cálculo da casca, depende essencialmente da rigidez da casca nas direcções transversal e longitudinal..

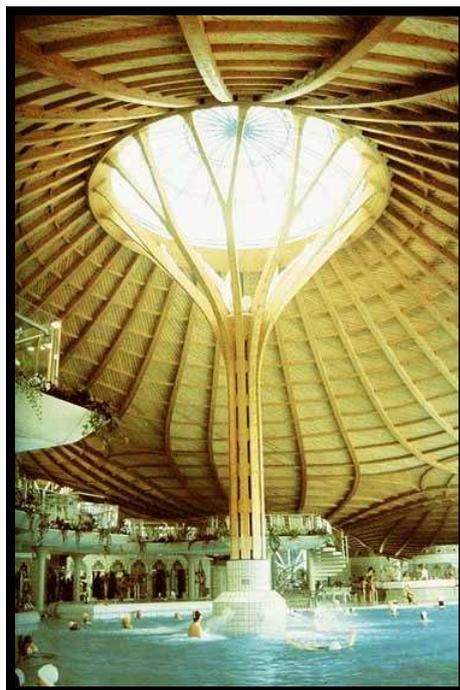


Figura 3.21 – Exemplo de casca (Bad Dür rheim - Alemanha)

As cascas conóides são formas geradas por linhas planas que unem os pontos de duas curvas em duas superfícies paralelas. As curvas geradas podem ser parabólicas, circulares, elípticas ou mesmo planas numa das extremidades.

Neste tipo de casca, as cargas são absorvidas pela estrutura em duas direcções gerando esforços axiais que são suportados por camadas de tábuas dispostas na diagonal. Os esforços axiais na casca são suportados pelos membros nas extremidades da casca nos locais em que estes estão ligados as fundações. Os elementos curvos podem ser construídos como arcos de duas ou três rótulas ou arcos em treliças de forma a não existirem esforços horizontais nos suportes.

Uma casca hiperbólica parabólica tem a forma de uma sela sendo esta gerada pela intersecção de uma série de linhas planas. É ao mesmo tempo uma superfície translacional de duas parábolas, uma côncava e outra convexa. A carga é transmitida para os membros nas extremidades por esforços de tracção entre dois pontos altos e compressivas entre dois pontos baixos. Os membros nas extremidades convergem estas cargas nos apoios, maioritariamente por compressão axial.

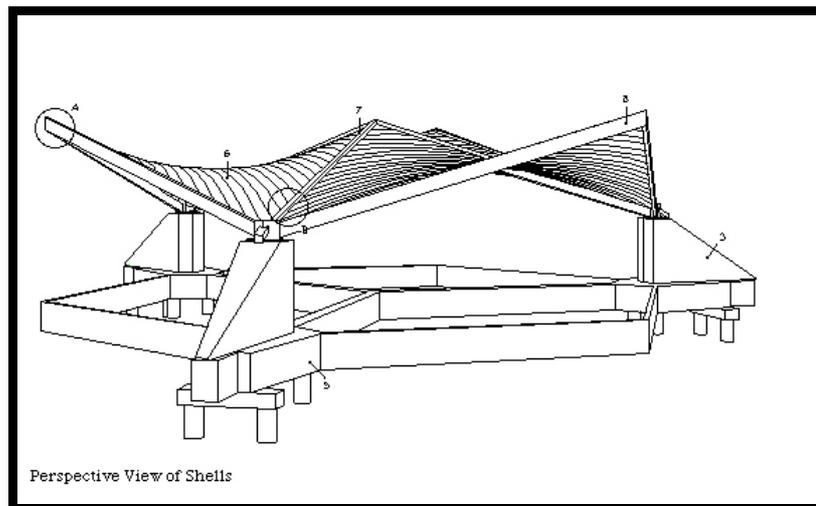


Figura 3.22 – Exemplo de casca hiperbólica parabólica

O cálculo da estrutura é dominado por esforços axiais na casca ou membros das extremidades e pelos esforços de corte ou flexão causados por cargas assimétricas perto das extremidades da casca.

3.3.8 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS EM FUNÇÃO DO VÃO

Conforme foi dito anteriormente, neste trabalho, pretende-se dar maior destaque ao estudo dos sistemas estruturais com capacidade de vencer grandes vãos. Tendo como base os trabalhos de Goetz *et al* [11] e TRADA [12] para estruturas de GLULAM, e o trabalho de Owens *et al* [16] para estruturas de aço, chegou-se à conclusão de que os vãos, para os vários sistemas estruturais, que conseguem vencer são idênticos para ambos os materiais. Assim, optou-se por não fazer distinção entre o aço e GLULAM na classificação dos sistemas estruturais em função do vão optando por considerar valores máximos e mínimos de vãos aceitáveis para ambos os materiais.

A classificação do vão foi efectuada tendo como base o vão máximo que uma determinada família de sistemas estruturais consegue vencer. Por exemplo, enquanto que uma viga simples consegue vencer no máximo 18m de vão, uma viga curva consegue chegar aos 30m. Neste caso considera-se o vão máximo possível de obter com um sistema estrutural do tipo viga como sendo de 30m.

O seguinte quadro resumo compila a informação obtida com base na análise dos trabalhos atrás referidos.

Quadro 3.1 – Resumo dos sistemas estruturais em função do vão em metros

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	180	200	
Vigas	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█													
Estruturas articuladas planas										█	█	█	█	█	█	█								
Arcos											█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
Pórticos										█	█	█	█	█	█									
Estruturas articuladas espaciais													█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
Cúpulas													█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Casca													█	█	█	█	█	█	█	█	█			

Desta forma, os sistemas estruturais que podem ser considerados de grande vão, isto é, capazes de vencer um vão superior a 50m são: (a) estruturas articuladas planas; (b) estruturas articuladas espaciais; (c) arcos; (d) cúpulas; (e) cascas.

Contudo, tendo em conta que este trabalho tem como um dos seus objectivos verificar a aplicabilidade deste tipo de estruturas em Portugal, decidiu-se excluir do estudo de estruturas de grande vão as estruturas articuladas planas e as cascas. Esta decisão prende-se com o facto de que as primeiras são usadas maioritariamente em vãos médios enquanto que as últimas, devido à sua dificuldade técnica, são de difícil aplicação no nosso país.

Deste modo, em capítulos posteriores, quando são referidas as estruturas de grande vão esta afirmação refere-se apenas a arcos, cúpulas e estruturas articuladas espaciais.

3.4 ESTRUTURAS EM AÇO OU GLULAM

Como já foi referido anteriormente, neste trabalho pretende-se estabelecer uma comparação entre as coberturas de grande vão em aço e em GLULAM. Com base no quadro do tópico anterior conclui-se que os sistemas estruturais que se enquadram neste âmbito são: (a) os arcos; (b) as estruturas articuladas espaciais; (c) as cúpulas.

Apesar de neste capítulo se terem abordado os sistemas estruturais de um ponto de vista mais focado na GLULAM, estes princípios aplicam-se igualmente às estruturas em aço. Na análise entre a GLULAM e o aço, apesar de todas as diferenças que os distinguem, verifica-se que para o tipo de estruturas consideradas possuem um comportamento muito semelhante. Efectivamente todas as estruturas referidas anteriormente, com algumas excepções pontuais, podem ser executados em aço ou em GLULAM sendo que a grande diferença se encontra ao nível das ligações entre elementos individuais e no modo de ligação às fundações.

Por este motivo faz-se uma abordagem a questão das ligações usadas na execução de estruturas quer em aço, quer em GLULAM, procurando fazer uma breve descrição das várias soluções possíveis.

3.4.1 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE GLULAM

O desenvolvimento das estruturas de madeira sempre esteve ligado aos avanços tecnológicos dos ligadores. Os métodos tradicionais de ligação nos quais os membros de madeira são unidos directamente não são uma solução viável para a criação de estruturas de médio ou grande vão em GLULAM pois a capacidade resistente desse tipo de ligações é muito baixa quando comparada com as ligações modernas nas quais se usam ligadores metálicos.

As ligações modernas são executadas recorrendo a placas de aço ou a outro tipo de elementos metálicos. As maiores vantagens deste tipo de ligadores são: (a) o facto de terem uma maior capacidade de carga; (b) a possibilidade de colocar os ligadores em interfaces relativamente reduzidos; (c) terem um fabrico preciso; (d) a simplicidade da sua montagem [18].

Os ligadores usados em estruturas de GLULAM dividem-se em: (a) ligadores do tipo cavilha; (b) ligadores tipo conectores. Os ligadores tipo cavilha são ligadores metálicos, usados para unir duas peças de madeira, que têm entre si o factor comum de serem constituídos por um corpo cilíndrico, com a direcção longitudinal bastante superior à transversal, que atravessa e une os elementos estruturais. Incluem-se neste grupo as cavilhas, os pregos, os parafusos de porca, os parafusos de enroscar e agrafos. Os ligadores do tipo conector são o conjunto formado pelos ligadores em anel, as placas circulares, as placas denteadas e as placas pregadas.

Contudo existem ligadores que não se enquadram nestes dois grupos como por exemplo os apoios ou os ligadores usados nas estruturas articuladas espaciais.

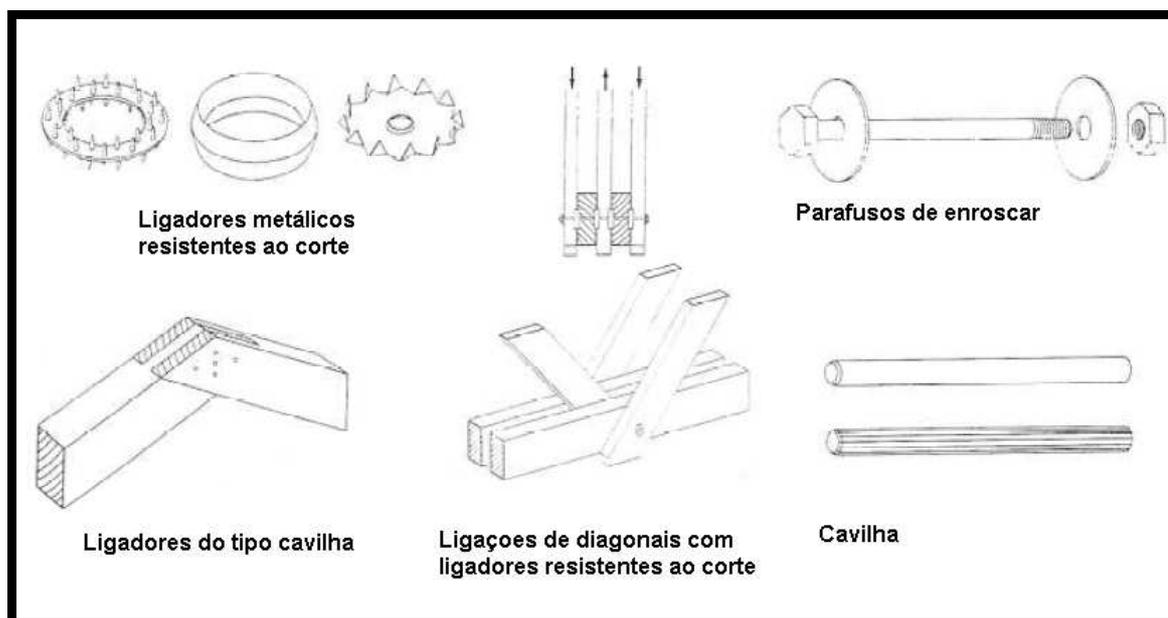


Figura 3.23 – Ligadores comuns em estruturas de madeira [11]

Os ligadores são um dos principais parâmetros a ter em conta aquando da fase de projecto sendo fundamentais para o correcto funcionamento da estrutura. Os principais parâmetros a ter em conta na especificação dos ligadores são: (a) escolha da capacidade estrutural do ligador; (b) durabilidade; (c) resistência ao fogo; (d) disposições construtivas.

3.4.1.1 Escolha da capacidade estrutural do ligador

Na escolha da capacidade estrutural do ligador o projectista deve ter em consideração principalmente dois aspectos: (a) a resistência do ligador; (b) a sua eficiência estrutural.

A resistência do ligador deve ser escolhida tendo em consideração a natureza da ligação. Efectivamente o ligador tanto pode estar sujeito a esforços puramente axiais ou de corte como a ambos simultaneamente. Deste modo deve-se procurar a aplicação de um ligador que tenha as suas características optimizadas para a ligação pretendida.

A eficiência estrutural pode ser descrita como a carga que pode ser transferida dividida pela área do ligador. Tendo em conta esta definição, podem considerar-se que os pregos ou cavilhas colocadas em orifícios prefabricados em placas metálicas constituem o tipo de ligação mais eficiente. Pregos em orifícios prefabricados são aproximadamente duas vezes mais eficientes do que qualquer outro ligador. Contudo em termos de custos, os parafusos com rosca podem ser mais económicos para um mesmo tipo de ligação.

Em suma, a escolha do ligador deve ser feita com base na sua capacidade resistente tendo em consideração o espaço disponível sendo que também se deve considerar a estética pretendida.

3.4.1.2 Durabilidade

Em estruturas de madeira, a questão da durabilidade está principalmente relacionada com o ataque biológico à madeira e a corrosão dos ligadores.

Quanto à corrosão ou ataque químico do ligador, podem-se evitar estas condições se o ligador estiver correctamente protegido tendo em conta o tipo de ambiente de utilização da estrutura. É comum os ligadores serem galvanizados ou então terem uma pintura protectora. Em ambientes altamente corrosivos como em fábricas que trabalhem com químicos, os ligadores têm que ser obrigatoriamente galvanizados ou em aço inoxidável.

Quanto ao ataque biológico da madeira, é importante, aquando da especificação da ligação garantir que esta, ao longo do tempo, não se torna um ponto frágil na estrutura. Isto consegue-se seguindo-se o seguinte conjunto de princípios:

- Deve-se garantir uma ventilação adequada de forma a evitar a acumulação de humidade na ligação;
- Deve-se evitar que os elementos estruturais estejam directamente em contacto com as fundações; Isto consegue-se recorrendo a apoios metálicos nas extremidades da estrutura que as isolem funcionando como uma barreira à humidade;
- Nos casos em que não se possa evitar a presença de humidade nos orifícios das ligações estes devem ser tratados com um tratamento preservador apropriado.

3.4.1.3 Resistência ao fogo

Em termos de resistência ao fogo, a principal preocupação recai nos ligadores metálicos uma vez que os elementos de GLULAM com uma secção transversal considerável são bastante resistentes ao fogo. Os ligadores metálicos, por outro lado, a altas temperaturas perdem rapidamente a sua resistência. Os ligadores também transmitem o calor muito rapidamente enquanto que na GLULAM, por sua vez, devido ao facto do processo de carbonização, o calor se transmite mais lentamente.

Em situações em que a resistência ao fogo da estrutura seja importante, os ligadores metálicos podem ser protegidos por uma pintura intumescente ou então embebendo os ligadores na GLULAM isolando-os assim do contacto directo com o fogo.

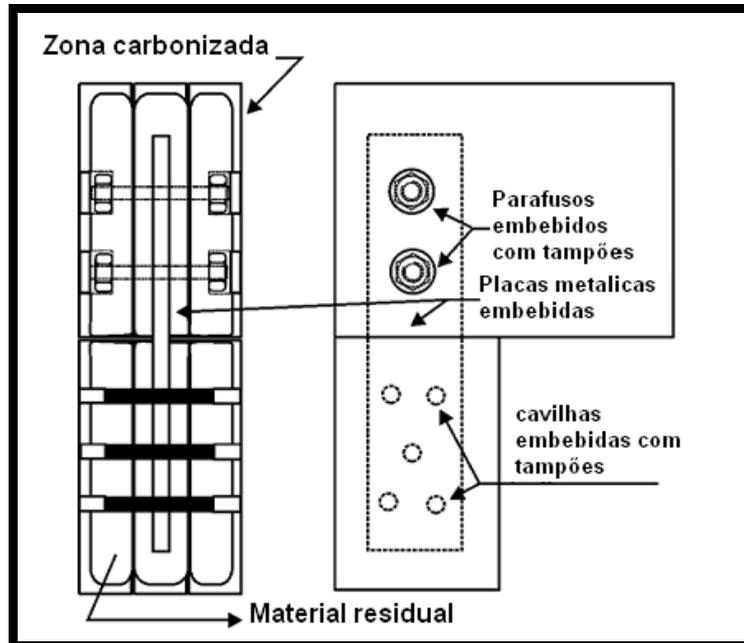


Figura 3.24 – Exemplo de ligação protegida contra o fogo

3.4.1.4 Disposições construtivas

Nos projectos de estruturas de madeira deve-se ter em consideração os seguintes factores na disposição dos ligadores: (a) alterações nas condições de humidade; (b) esforços de corte; (c) resistência na direcção perpendicular ao grão [19].

A variação da humidade do teor em água vai provocar ciclos de expansão e retracção. As variações de dimensão na direcção paralela ao grão podem ser bastante significativas especialmente se as variações no teor em água forem grandes. Nos casos em que os ligadores impeçam a retracção da madeira, pode acontecer a fendilhação do elemento de madeira.

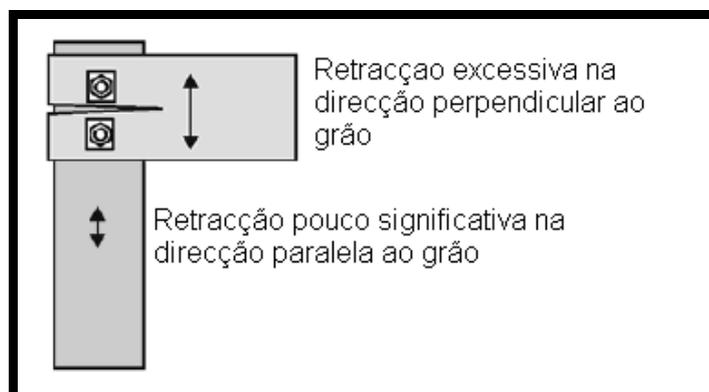


Figura 3.25 – Exemplo de patologia causada devido à retracção

Em relação a esforços de corte, a resistência a esforços na horizontal em elementos de madeira é normalmente um décimo da sua resistência à flexão. Esta característica pode levantar problema nos casos em que existe uma excentricidade entre uma carga pontual e o apoio. Este aspecto é ainda agravado quando o membro de suporte é danificado como por exemplo através da abertura de um orifício para a colocação de um ligador do tipo cavilha. Neste caso, a área que efectivamente recebe os esforços de corte fica bastante diminuída o que causa uma concentração excessiva de esforços de corte tornando mais fácil a rotura da estrutura.

Quanto à resistência na direcção perpendicular ao grão, na madeira, esta é relativamente baixa. Desta forma, qualquer ligação que provoque esforços nesta direcção terá que ser uma ligação de baixa resistência. A seguinte figura demonstra uma situação em que os ligadores provocam a separação das fibras.

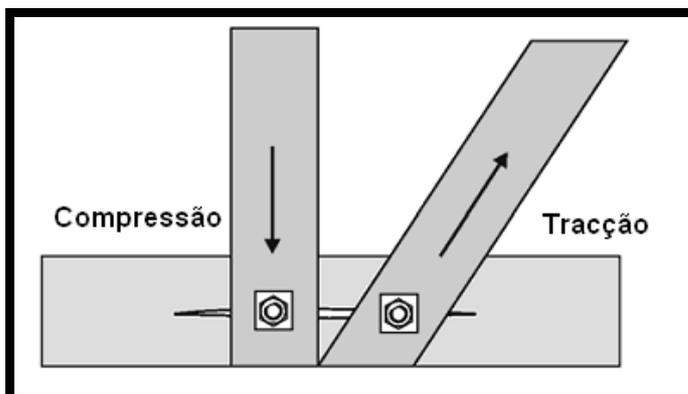


Figura 3.26 – Separação das fibras causada por esforços na direcção perpendicular ao grão

3.4.1.5 Exemplos de ligações por tipos de sistemas estruturais

Na execução dos sistemas estruturais atrás referidos são várias as opções de ligações disponíveis. Por esse motivo optou-se por dispor neste tópico algumas imagens de soluções frequentemente usadas para esses sistemas.

Nas vigas consideram-se os seguintes tipos de ligação: (a) ligação ao apoio; (b) ligação entre vigas.

A ligação ao apoio depende se este se trata de um apoio directo ou indirecto (apoio noutra viga), ou se é um apoio intermédio, como por exemplo um pilar, ou um apoio numa extremidade. Por norma, nos apoios das extremidades as vigas ficam apoiadas nuns suportes metálicos que são atravessados por um ligador do tipo cavilha ou então ligados por placas metálicas embebidas na viga atravessadas por ligadores do tipo cavilha. Em locais em que seja necessário garantir a continuidade entre vigas, pode-se recorrer novamente a placas metálicas embebidas atravessadas por ligadores do tipo cavilha ou então a placas denteadas como por exemplo o sistema Gang-Nail.

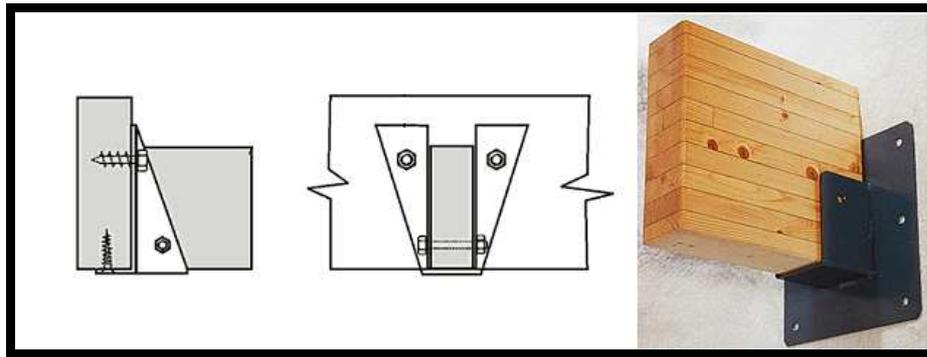


Figura 3.27 – Exemplo de ligações em vigas

Nas estruturas articuladas planas, as ligações teoricamente devem ser garantidas exclusivamente por ligadores que garantam a inexistências de transmissão de momentos. Enquadram-se nesta categoria os ligadores do tipo cavilha, como por exemplo os parafusos de porca. Contudo, na prática, e apesar de no cálculo da estrutura se considerarem rótulas nas ligações, também se usam frequentemente placas metálicas do tipo Gang-Nail para garantir a união dos elementos individuais. Aceita-se o uso destes elementos pois a transmissão de momentos é desprezável quando comparado com os outros esforços instaurados na estrutura.

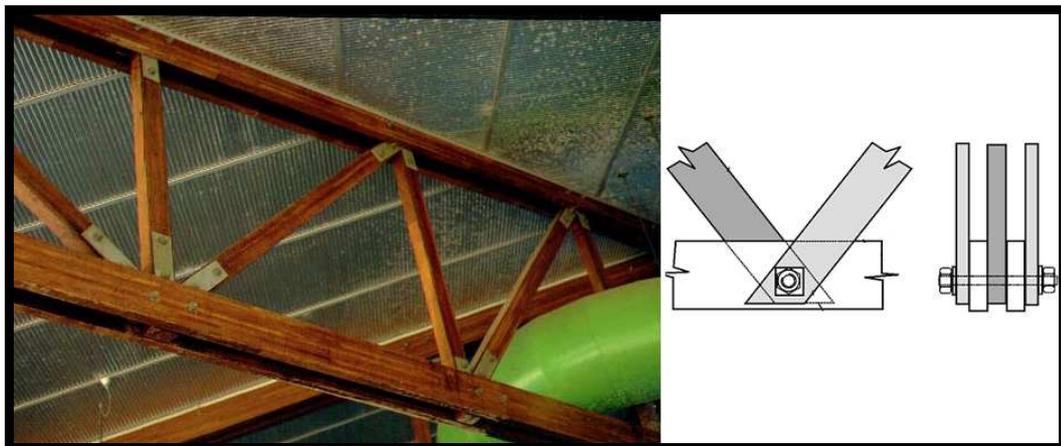


Figura 3.28 – Exemplo de ligações em estruturas articuladas planas

A especificação de ligações dos sistemas estruturais em pórtico ou em arco é muito idêntico com a excepção que nos pórticos existem ligações adicionais entre a perna e o elemento que vence o vão. Dependendo se se está a projectar um sistema de duas ou três rótulas temos um ou dois tipos de ligações. No caso de só existirem duas rótulas, as ligações a considerar são os apoios metálicos que ligam a superestrutura às fundações. Como se pode ver nas figuras seguintes, este tipo de ligações consiste num elemento metálico articulado, de forma a garantir a não transmissão de momentos entre a superestrutura e às fundações. No caso de se considerarem três rótulas, existe ainda um elemento metálico articulado a meio vão da estrutura.

Quanto à união entre perna e o elemento que vence o vão nos pórticos, normalmente esta ligação é garantida através de placas metálicas embebidas na madeira atravessados por ligadores do tipo cavilha que se encontram sujeitos maioritariamente a esforços de corte.

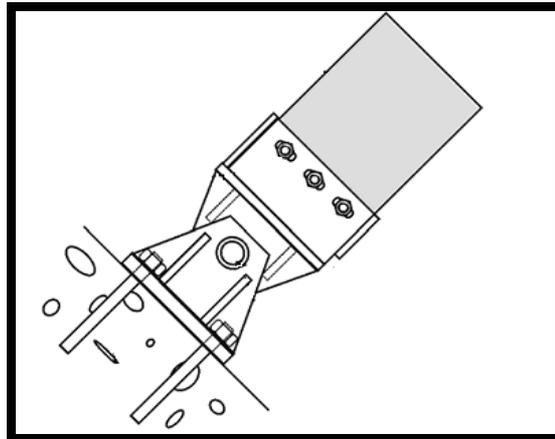


Figura 3.29 – Exemplo de ligação em arcos de duas rótulas

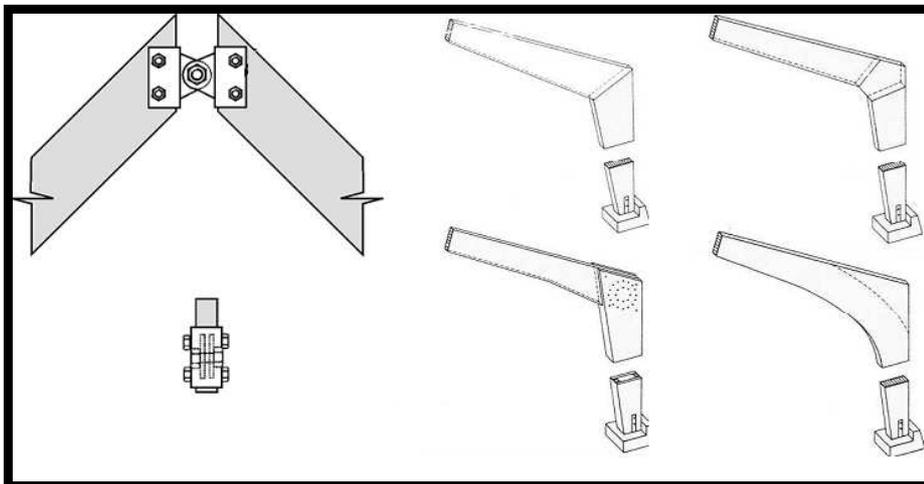


Figura 3.30 – Exemplo de ligações em pórticos

As ligações nas estruturas reticuladas espaciais são garantidas por elementos metálicos encastrados nas extremidades de cada uma das barras de GLULAM. Por sua vez estes elementos metálicos podem ser unidos em nós especiais ou então directamente à extremidade metálica de outra barra de GLULAM.

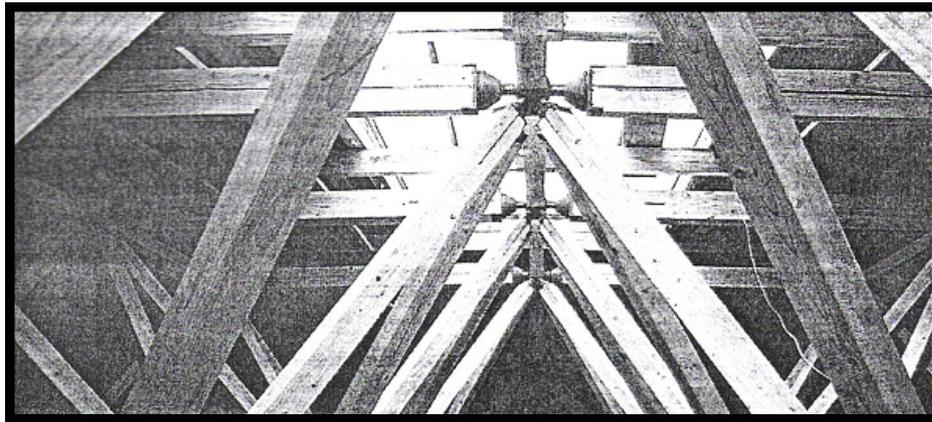


Figura 3.31 – Exemplo de ligações em estruturas articuladas espaciais

A ligação dos elementos individuais nas cúpulas pode ser feita quer por ligadores do tipo cavilha quer por conectores. Contudo a ligação que merece particular destaque é aquela que se realiza no topo da cúpula através de um anel de compressão. É neste anel que se unem as várias nervuras da cúpula. Deve realçar-se que apesar de no cálculo não se considerar a transmissão de momentos, o anel não funciona perfeitamente como rótula, não conseguindo garantir o funcionamento articulado perfeito.

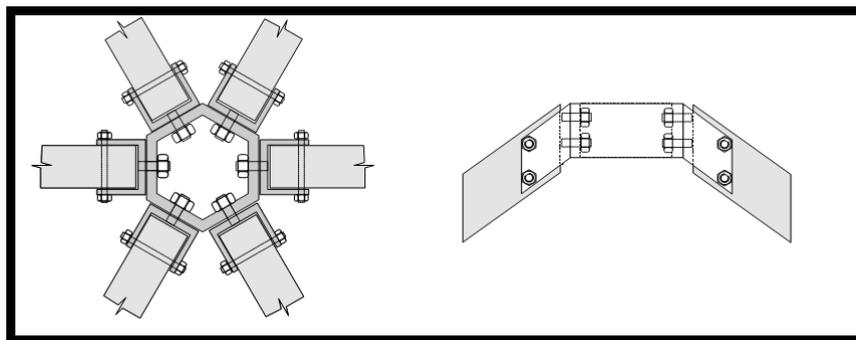


Figura 3.32 – Exemplo de ligações em cúpulas

Nas cascas é fundamental que seja garantida a continuidade entre os elementos individuais em todas as direcções e todas as camadas. Normalmente as ligações entre camadas são garantidas por pregos ou parafusos. Quando necessário, os nós são reforçados através do uso de placas metálicas.



Figura 3.33 – Exemplo de ligações em cascas

3.4.2 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO

Os elementos em aço podem ser unidos através de três métodos: (a) por soldadura; (b) por aparafusamento com parafuso de porca; (c) por rebiteagem. As ligações obtidas por aparafusamento e por rebiteagem, devido às suas semelhanças, podem ser consideradas como inseridas num único grupo designado por ligações com dispositivos de fixação mecânica.

A decisão de qual destes métodos usar depende de diversos factores como o tipo de concepção estrutural ou se a construção de toda a estrutura ou de alguma parte será feita em fábrica.

A soldadura pode ser obtida através de vários métodos sendo o mais usual a soldadura por arco eléctrico, quer aplicado manualmente, quer de forma automatizada. Dentro deste método existe ainda a divisão em soldadura por arco eléctrico com material de adição e sem material de adição. A diferença entre estes dois métodos consiste na adição ou não de um outro metal na execução do cordão de soldadura.

A soldadura é a forma mais económica de obter em fábrica ligações de elevada resistência. Contudo no estaleiro, as ligações normalmente são executadas com parafusos de porca devido ao facto da execução da ligação ser mais fácil, mais rápida e mais barata. Além disto, deve-se ter em consideração que a soldadura de elementos galvanizados ou pintados deve ser evitada por destruir o tratamento anti-corrosivo dado previamente.

A soldadura possui uma série de vantagens em relação aos outros métodos. Em primeiro lugar, conseguem unir-se duas peças de forma a criar efectivamente uma única peça. Por outro lado a ligação por soldadura é mais resistente a esforços de corte e à flexão do que os elementos que une. A soldadura ainda pode ser classificada de acordo com a forma como os elementos individuais são unidos. Assim podemos ter: (a) pingos de soldadura; (b) soldadura de ângulo; (c) soldadura de topo a topo. Ainda existem subdivisões em cada um destes tipos de soldadura.

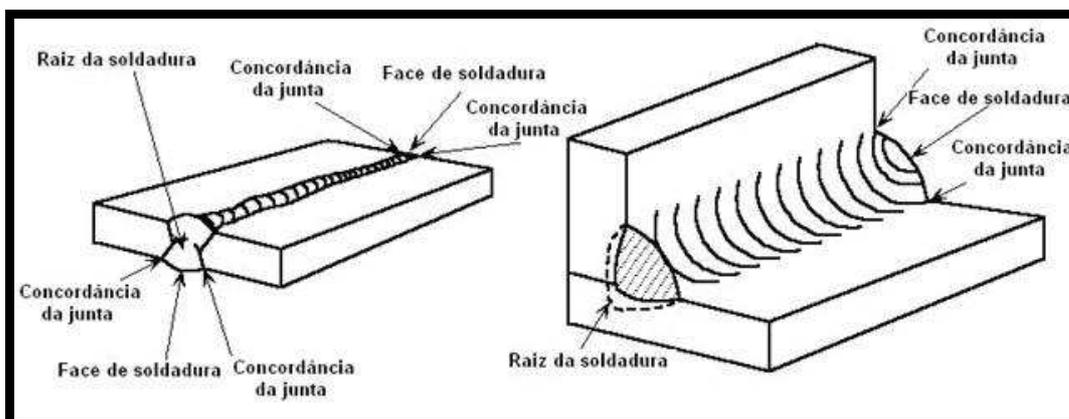


Figura 3.34– Exemplo de uma soldadura de topo a topo e uma soldadura de ângulo

Os pingos de soldadura destinam-se a imobilizar as peças de uma construção soldada num determinado alinhamento até à execução das soldaduras definitivas.

Uma soldadura de ângulo consiste basicamente numa soldadura em que o cordão de soldadura apresenta uma secção transversal aproximadamente triangular e destinada a unir duas peças aproximadamente perpendiculares entre si. É o tipo de soldadura mais frequente.

No caso da soldadura topo a topo, os dois elementos individuais a unir tem um alinhamento aproximado no mesmo plano.

As ligações aparafusadas são executadas através do conjunto formado por parafusos, porcas e anilhas.

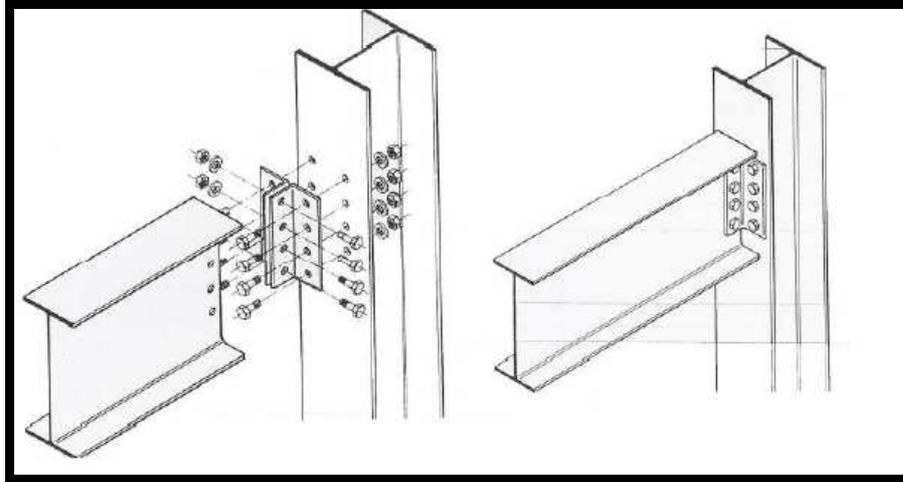


Figura 3.35 – Exemplo de uma ligação com parafusos antes e após a execução da ligação

Os parafusos são classificados por classes de qualidade que se encontram especificadas na norma europeia EN 20898-1:1992 – “*Mechanical properties of fasteners. Bolts, screws and studs*” e se encontram descritas no quadro abaixo indicado. Nesta classificação o primeiro algarismo diz respeito à resistência à rotura em N/mm^2 , e o segundo algarismo, expresso em décimas, diz respeito ao factor pelo qual é necessário multiplicar a resistência à rotura para obter o limite elástico.

Quadro 3.2 – Classes de qualidade dos parafusos

Classe do parafuso	f_{yb} (N/mm^2)	f_{yk} (N/mm^2)	Material e tratamento
4.6	240	400	Baixa ou média percentagem de carbono, total ou parcialmente recozido
5.6	300	500	
6.8	480	600	
8.8	640	800	Liga de aço com uma percentagem média de carbono, temperado – parafusos de alta resistência.
10.9	900	1000	

As juntas obtidas por ligações com dispositivos de fixação mecânica podem ser classificadas como: (a) juntas sobrepostas; (b) juntas de topo.

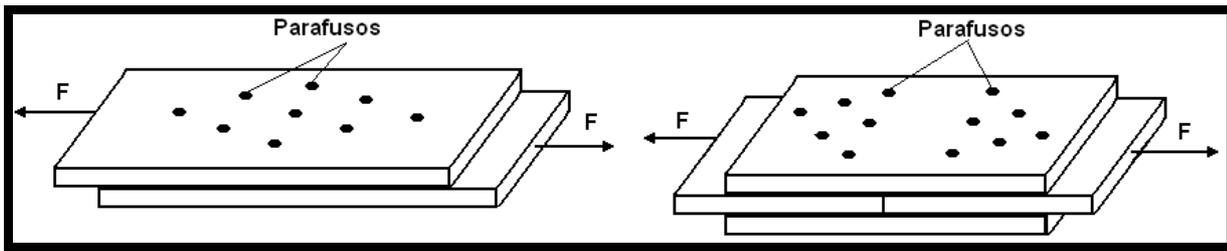


Figura 3.36 – Exemplo de uma junta sobreposta e um junta de topo

Em juntas sobrepostas coloca-se uma placa sobre a outra e unem-se as duas placas por meio de parafusos ou rebites. Por sua vez, numa junta de topo, as duas placas são encostadas, sendo então sobrepostas com mais uma ou duas placas e unidas por meio de parafusos ou rebites.

Em relação às ligações aparafusadas é de realçar que, mesmo quando a ligação é feita em obra, os orifícios são sempre executados na fábrica vindo já galvanizados.

4

ANÁLISE TÉCNICA DE COBERTURAS DE GRANDE VÃO EM GLULAM E AÇO

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O desempenho das estruturas de cobertura em GLULAM é afectado por diversos factores entre os quais os mais relevantes são o tipo de sistema estrutural, localização dos suportes, tipo de material usado nos elementos estruturais, os métodos para garantir a segurança da estrutura em caso de perda de estabilidade de forma pontual ou global, o impacto do escorregamento em juntas, condições relacionadas com o desempenho estrutural no que diz respeito à acção combinada da humidade e da duração das cargas [18]. Além disso, processos relacionados com a construção da estrutura como o transporte, execução dos trabalhos em obra, manutenção da estrutura e custos globais são também critérios relevantes aquando da execução deste tipo de estrutura.

Pretende-se neste capítulo fazer a análise técnica das coberturas de grande vão, nos dois materiais em estudo. Expõem-se duas perspectivas diferentes sobre esta temática. Inicialmente exploram-se as potencialidades de ambos os materiais procurando estabelecer uma comparação quando possível. Posteriormente analisar-se de forma directa a problemática da construção em aço e GLULAM numa perspectiva de desempenho funcional

4.2 ANÁLISE DOS MATERIAIS

O estudo das propriedades dos materiais vai incidir em três parâmetros: (a) propriedades mecânicas; (b) propriedade físicas; (c) sustentabilidade. No estudo destes parâmetros serão ainda criadas subdivisões mais específicas.

As propriedades mecânicas podem ser definidas como as propriedades de um material que medem a reacção do material à aplicação de uma força, como por exemplo a resistência à tracção, módulo de elasticidade, resistência à flexão, etc.

As propriedades mecânicas estão directamente relacionadas com o desempenho estrutural da estrutura, criando a ligação entre o material e o projecto estrutural. O desempenho estrutural pode ser medido tendo como base critérios como as cargas aplicadas, duração das cargas, esforços, resistência dos materiais, deformações e a elasticidade global da estrutura. Desta forma, através da definição do desempenho estrutural pretendido procede-se à selecção das características que o material deve ter.

Por sua vez, as propriedades físicas são as propriedades, além das propriedades mecânicas do material, que dependem da natureza do material. As propriedades físicas estão relacionadas com o desempenho da estrutura em todos os outros critérios que não sejam exclusivamente estruturais. Incluem-se neste campo parâmetros como por exemplo a resistência ao fogo, a durabilidade, isolamento térmico e acústico e resistência química.

O termo sustentabilidade está ligado à capacidade de um certo processo se manter indefinidamente. Quando aplicado num contexto relacionado com o ambiente, refere-se à forma como o material interage com o meio ambiente de modo a garantir a continuidade dos diferentes eco sistemas. Desta forma, considera-se que um material sustentável é um material cujo ciclo de vida tem o menor impacto possível no meio ambiente.

4.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Como foi dito anteriormente, as propriedades mecânicas estão relacionadas com desempenho estrutural pretendido para a estrutura. O desempenho estrutural por sua vez está ligado a dois tipos de parâmetros: (a) as propriedades mecânicas do material constituinte da cobertura; (b) o tipo de cargas aplicadas.

Os elementos de GLULAM geralmente têm as propriedades mecânicas semelhantes às da madeira na qual têm origem. Contudo, na GLULAM, é diminuída a influência dos defeitos, melhorando assim o comportamento mecânico. A madeira, como se sabe, é um polímero natural capaz de reter a maior parte da sua elasticidade tendo uma deformação reduzida para cargas de curta duração. Quando é sujeita a cargas de longa duração, a deformação acentua-se com o tempo. Por outro lado, existem vários factores que influenciam as características mecânicas da madeira, como por exemplo, a temperatura e a humidade. Para poder elaborar projectos que correspondam às necessidades de coberturas de grande vão é importante conhecer estas particularidades da madeira.

As propriedades do aço resultam de uma combinação da composição química, do processo de fabrico e do tratamento térmico usado. As propriedades normalmente usadas como base para a especificação do material são a resistência à tracção e a tensão de cedência, ambas obtidas a partir de ensaios realizados sobre pequenos provetes. Outras propriedades relevantes são a ductilidade, a soldabilidade e a tenacidade à fractura [20].

De forma a poder estabelecer uma comparação entre o desempenho estrutural de ambos os materiais, serão abordados neste tópico as seguintes características: (a) comportamento à compressão; (b) comportamento à tracção; (c) comportamento à flexão; (d) comportamento ao corte; (e) comportamento à torção; (f) módulo de elasticidade e (g) factores que influenciam as propriedades mecânicas da GLULAM e aço.

Será também feita uma breve exposição das cargas e de que forma a sua consideração afecta a escolha do material.

4.2.1.1 Cargas

As cargas usadas no cálculo de uma estrutura resultam de uma combinação de cargas permanentes e sobrecargas. Nas coberturas, as cargas permanentes são o peso dos elementos estruturais somado ao peso de outros elementos permanentes, como por exemplo, o material de revestimento da cobertura.

As sobrecargas, que são esforços de duração e intensidade variável, as outras variáveis que, no caso de coberturas não acessíveis, se resumem à acção do vento e da neve.

Em termos de cargas permanentes, quando comparamos estruturas de aço e de GLULAM, é obvio que o aço é mais pesado do que a GLULAM. Esta é uma das vantagens da GLULAM permitindo-lhe possuir um bom rácio de peso próprio por capacidade resistente. No aço, a forma de melhorar esse rácio, é através do uso de produtos de aço em tubos ou outras formas ocas.

Em relação às sobrecargas, este não é um factor que permita criar distinções entre a GLULAM e o aço, uma vez que à medida que as sobrecargas aumentam, quer em estruturas de aço, quer em estruturas de GLULAM, tem que se aumentar, na mesma proporção, a secção dos elementos constituintes de forma a aumentar a resistência da estrutura. Nas coberturas em que apenas se considere acção do vento e da neve é muito mais importante a forma da estrutura do que o material que a constitui.

4.2.1.2 Compressão

A compressão pode ser definida como o esforço que quando aplicado a um material provoca uma diminuição do seu volume. No caso da madeira, normalmente faz-se a distinção entre compressão paralela às fibras e compressão perpendicular às fibras. O melhor exemplo de compressão paralela às fibras dá-se nos pilares enquanto que a compressão perpendicular às fibras ocorre nas vigas de pavimento nos pontos em que têm cargas verticais.

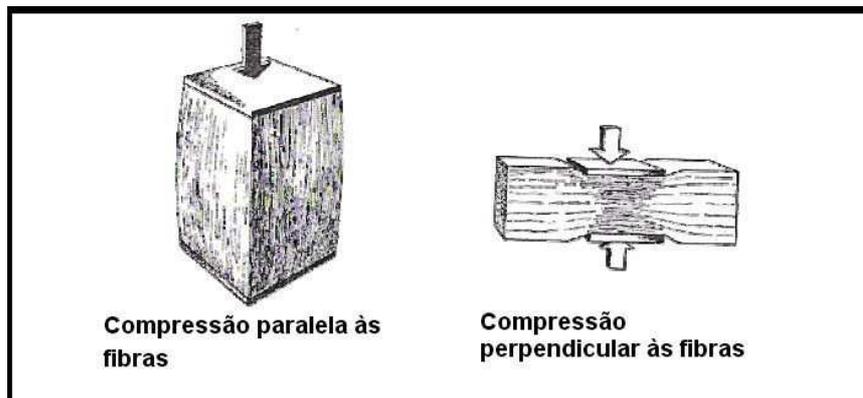


Figura 4.1 – Compressão da madeira na direcção perpendicular e paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras da madeira é elevada, alcançando valores característicos na madeira classificada de 16 a 23 MPa. O módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras é ligeiramente inferior à da tracção paralela às fibras. Deste modo verifica-se que a resistência à tracção é superior à resistência à compressão na madeira livre de defeitos. Contudo, na madeira classificada esta relação inverte-se, devido à maior influencia dos defeitos, principalmente dos nós, na resistência à tracção.

A resistência da madeira à compressão perpendicular às fibras é muito inferior à existente na direcção paralela. Os valores característicos da resistência variam entre 4,3 e 5,7 MPa, o que representa um quarto da resistência na direcção paralela às fibras [21].

Segundo Goetz *et al* [11] a resistência à compressão das coníferas pode variar entre os 30 e 90 MPa, dependendo das características de crescimento. A resistência das células tubulares à compressão é muito menor na direcção transversal do que na longitudinal.

Devido à sua natureza homogénea, o aço, possui um comportamento à tracção e compressão teoricamente iguais sendo esta questão abordada no tópico seguinte.

4.2.1.3 Tracção

A tracção, em oposição à compressão, está relacionada com o aumento de volume de um material. Da mesma forma, na madeira, divide-se em tracção paralela às fibras e tracção perpendicular às fibras.



Figura 4.2 – Tracção da madeira na direcção perpendicular e paralela às fibras

A madeira tem uma resistência à tracção paralela às fibras elevada. Na madeira livre de defeitos alcança valores superiores aos obtidos na flexão. Contudo, na madeira classificada, os valores característicos oscilam entre 8 e 18MPa. A relação entre tensão e deformação é praticamente linear até se atingir a rotura.

A resistência da madeira à tracção perpendicular às fibras é muito baixa, da ordem de 30 a 70 vezes menor que na direcção paralela. O valor característico da resistência à tracção perpendicular é de 0,3 a 0,4 MPa [21].

Nos aços, normalmente eles são classificados em função da sua resistência à tracção. Isto deve-se ao facto de se tratar de um material homogéneo e isotrópico. A resistência à tracção é determinada com base em ensaios em provetes sendo o comportamento do aço nestes ensaios semelhantes ao registado em elementos estruturais em aço em condições de carga estática. Como, para aço estrutural, os valores da resistência de tracção e compressão são quase idênticos, raramente são necessários ensaios de compressão. Segundo o Eurocódigo 3, os valores normalmente considerados para a resistência à tracção encontram-se no intervalo de 350 a 550 MPa.

4.2.1.4 Flexão

Na flexão de um elemento estrutural, ocorre compressão na parte interior da curva, tracção na parte exterior e esforços de corte no interior do elemento. À medida da deformação que ocorre chama-se flecha. A flexão pode ocorrer sob cargas estáticas ou por impacto. Se forem usadas cargas estáticas, à medida que aumenta a carga, aumenta igualmente a flecha. Esta proporção continua até se atingir o limite elástico do elemento. É possível aplicar sucessivos ciclos de cargas e descargas sem que a peça sofra deformações permanentes desde que este limite não seja ultrapassado. A partir desse ponto, o

elemento estrutural continua a poder suportar cargas adicionais mas ficará com deformações permanentes.

A resistência à flexão é muito elevada, sobretudo quando comparada com a sua densidade. Os valores característicos da resistência à flexão das coníferas, que são normalmente utilizadas nas estruturas, variam entre 14 e 30 MPa.

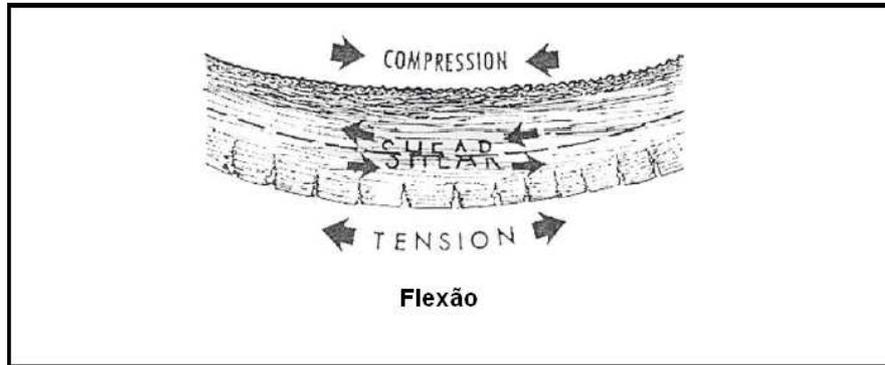


Figura 4.3 – Flexão de elemento de madeira

A flexão é causada por um momento flector, que produz na secção do elemento tensões de tracção e compressão paralelas à fibra, que têm os seus valores máximos nas fibras extremas e são nulas nas fibras neutras.

Na madeira, é preciso falar de resistência à flexão, apesar de esta ser formada pela combinação de tracções e compressões, já que o comportamento mecânico destas propriedades é diferente, tornando-se mais fácil referirmo-nos ao efeito conjunto de ambas sobre a forma de flexão [1].

Uma das vantagens da madeira, em caso de impacto, é poder resistir a uma flecha até duas vezes maior do que aquela que resiste sob o efeito de cargas estáticas.

Devido ao comportamento muito semelhante verificado para a tracção e compressão no aço, a resistência deste material à flexão é igual à resistência à compressão e tracção pura.

4.2.1.5 Corte

O corte é o resultado de forças de sentidos contrários aplicadas praticamente num mesmo local. O rácio entre a resistência ao corte e a deformação de um corpo devido ao esforço de corte define o chamado módulo (G). De acordo com a teoria da elasticidade, este parâmetro está relacionado com o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) segundo a seguinte fórmula:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (4.1)$$

O esforço de corte origina tensões tangenciais que actuam sobre as fibras da madeira de diferentes modos:

- Tensões tangenciais de corte – as fibras são cortadas transversalmente pelo esforço. O colapso dá-se por esmagamento.

- Tensões tangenciais de deslize – o colapso dá-se pelo deslize de umas fibras sobre as outras na direcção tangencial.
- Tensões tangenciais de rolamento – o colapso dá-se pelo rolamento de umas fibras sobre as outras.

Nos elementos estruturais sujeitos a esforços de flexão e de corte, as tensões que intervêm são simultaneamente as de corte e de deslizamento. A rotura dá-se pelo plano mais frágil, que é o de deslizamento.

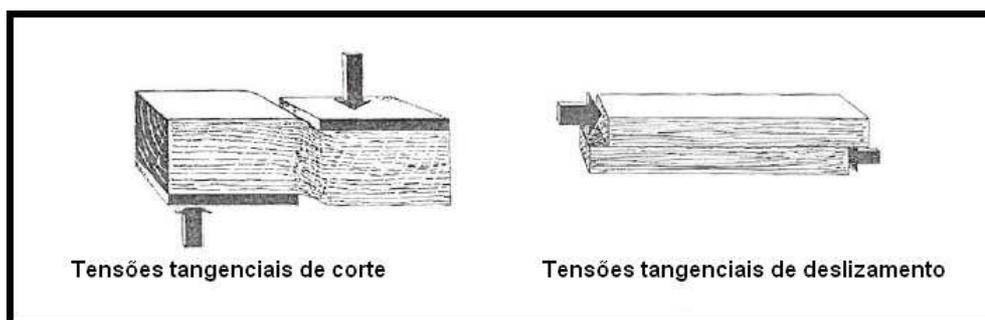


Figura 4.4 – Esforços de corte na GLULAM

Os valores característicos de resistência ao corte, por deslizamento, variam entre 1,7 e 3,0 MPa nas espécies e qualidades normalmente usadas na construção.

As tensões tangenciais por rolamento de fibras acontecem muito raramente sendo que o valor da resistência por rolamento das fibras é da ordem de 20 a 30% da resistência de deslizamento das fibras [1].

O valor mínimo do módulo de corte para aços estruturais é de 75000 MPa. O valor característico de cedência para esforços de corte é aproximadamente 0,57 vezes aquele verificado para esforços de tracção. A resistência ao corte, ou o esforço de corte na altura da rotura, varia entre dois terços e três quartos da resistência à tracção dos vários aços. Devido à relação consistente entre a resistência ao corte e a resistência à tracção, e devido à dificuldade em fazer ensaios ao corte consistentes, os ensaios de corte raramente são realizados.

Na madeira ou madeira lamelada colada, a resistência à compressão pode ser considerada igual à resistência ao corte. Para as coníferas, o valor da resistência à tracção varia entre 3.0 MPa e 5.0 MPa para a madeira e 4.0 e 7.0 MPa para a GLULAM. [11]

4.2.1.6 Torção

O esforço de torção resulta de movimentos rotacionais em sentidos diferentes num elemento estrutural. De todos os tipos de esforços atrás descritos, a torção é aquela que menos relevância tem nas estruturas de madeira ou derivados. Apesar de ocorrer frequentemente, pode ser considerada desprezável sendo normalmente desconsiderado em projecto.

4.2.1.7 Módulo de elasticidade

Goetz *et al* [11] afirma que a madeira se comporta praticamente como um corpo elástico para esforços de tracção aplicados em curtos períodos, até um certo limite. Isto significa que a deformação introduzida desaparece com a remoção da carga. Após ultrapassado o limite elástico, começam a surgir deformações plásticas que aumentam progressivamente até se atingir a rotura. A relação entre tensões e deformações é praticamente recta até à rotura. Para a compressão verifica-se o mesmo comportamento elástico até se atingirem entre 65 a 80% da resistência à compressão do elemento. Após este limite as deformações aumentam muito mais rapidamente que as tensões. Para a parte recta da relação tensões/deformações é aplicável a lei de Hooke:

$$\sigma = E \times \frac{\Delta l}{L} \quad (4.2)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade O módulo de Young ou módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. O módulo de elasticidade pode variar bastante entre espécies, e dentro de uma mesma espécie, sendo influenciado pelo teor em água. Dentro do intervalo higroscópico, o módulo de elasticidade diminui com o aumento do teor em água.

Segundo Alvarez *et al* [21], na madeira o módulo de elasticidade na direcção paralela à fibra, adopta valores diferentes se o elemento estiver sujeito a esforços de compressão ou de tracção. Na prática, utiliza-se um único valor para o módulo de elasticidade para a direcção paralela à fibra, adoptando o valor “aparente” do módulo de elasticidade em flexão, que resulta num valor médio entre o da tracção e o da compressão. O seu valor varia entre 7000 e 12000 MPa, dependendo da qualidade da madeira.

Na direcção perpendicular às fibras toma-se, de forma análoga, um único módulo de elasticidade cujo valor é 30 vezes inferior ao verificado para a direcção paralela às fibras.

Também nos aços, quando sujeitos a uma carga, verifica-se a existência de um intervalo no qual não ocorrem deformações permanentes. Desta forma, se a carga for removida, o elemento regressa às suas dimensões originais. O rácio entre a tensão a que o elemento está sujeito e a deformação que sofre define o módulo de elasticidade, que no caso dos aços estruturais é de aproximadamente 200000 MPa. Este valor é praticamente constante em todos os aços estruturais, sendo muito pouco usual a sua determinação por ensaios.

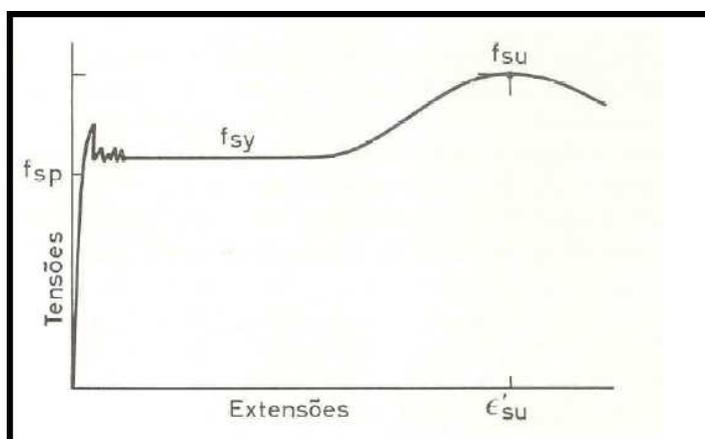


Figura 4.5 – Diagrama tensões-extensões de um aço laminado a quente

Tal como na madeira, existem deformações residuais permanentes no elemento estrutural, quando ultrapassado o limite de elasticidade.

4.2.1.8 Factores que influenciam as propriedades mecânicas da GLULAM e do aço

As propriedades mecânicas de elementos de GLULAM dependem essencialmente dos seguintes parâmetros: (a) propriedades mecânicas da espécie de madeira; (b) posição das lamelas; (c) distribuição, tamanho e número de nós; (d) inclinação das fibras; (e) eficiências e das juntas. Também é importante o teor em água, sendo este parâmetro analisado em pormenor em tópico próprio mais à frente.

Nas vigas de GLULAM é possível combinar lamelas com propriedades mecânicas distintas de forma a otimizar tanto a resistência como o custo. Desta forma, colocam-se as lamelas mais resistentes nas posições mais externas da peça enquanto que as lamelas menos resistentes se localizam no meio das peças. Deve-se ter o cuidado de as lamelas possuírem características semelhantes no que toca a variações dimensionais, de forma a não introduzir esforços internos.

Normalmente nos elementos de GLULAM, verifica-se a existência de nós. O material que constitui estes nós possui características diferentes do resto da madeira. A resistência à flexão e a rigidez das vigas são afectadas pelo número, tamanho e posição dos nós em relação ao eixo neutro.

A influência dos nós na resistência à compressão e tracção paralela às fibras depende unicamente da relação entre o tamanho máximo do nó e a dimensão menor da lamela.

O comportamento da GLULAM melhora claramente com as propriedades das lamelas externas. Desta forma é conveniente colocar as lamelas com as fibras rectas nas posições mais afastadas do eixo neutro. A inclinação das fibras é pouco relevante na resistência da peça quando nas lamelas próximas do eixo neutro.

Nos membros laminados de maior dimensão torna-se necessário unir as peças de madeira pelas suas extremidades de maneira a obter as lamelas com as dimensões pretendidas. Normalmente a existência de juntas diminui a resistência dos membros laminados, sendo a eficácia da ligação medida por um parâmetro designado por factor de junta. O factor de junta define-se como a relação, em percentagem, entre a resistência de uma lamela de material livre de defeitos e com fibra recta, e a sua resistência com a existência de uma junta. Este factor indica que o elemento de GLULAM não poderá ser submetido a um esforço maior que o esforço permitido num elemento de madeira maciça com as mesmas dimensões, multiplicado pelo factor de junta.

A influência das juntas deve ser tida em consideração em elementos submetidos a tracção, compressão ou flexão. Por outro lado, a presença de juntas não afecta a resistência à compressão perpendicular às fibras nem a resistência ao corte.

As propriedades mecânicas dos aços são afectadas maioritariamente pela sua composição química e pelo processo termomecânico através do qual se dá a forma final do material. Outros parâmetros relevantes são a geometria, a temperatura, o estado de tensões e a velocidade de deformação da estrutura [22].

Nos aços carbono comuns, os elementos Carbono e Manganês tem influência no controle da resistência, ductilidade e soldabilidade. A maior parte dos aços carbono estruturais tem mais de 98% de Ferro, de 0,2 a 1% de Carbono e aproximadamente 1% de Manganês (em peso). O Carbono

aumenta a dureza e a resistência, mas, por outro lado, afecta a ductilidade e a soldabilidade. Assim, pequenas quantidades de outros elementos de liga são utilizadas na melhoria das propriedades do aço, obtendo o máximo em propriedades de uma liga contendo um baixo teor de Carbono [22].

A influência de alguns dos elementos químicos normalmente encontrados pode ser visto no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Resumo da influência da composição química nas propriedades do aço

ELEMENTO	SOLUÇÃO SÓLIDA	FORMANDO CARBONETOS	TAMANHO DE GRÃO	TEMPERATURA DE TRANSFORMAÇÃO A ₁	TENACIDADE	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	RESISTÊNCIA À CORROSÃO	SOLDABILIDADE
Si	SIM	NÃO	↗	↗	↗	↗	↗	↘
Mn	SIM	NÃO	↗	↘	↗	↗	---	↘
Cr	PARTE	PARTE	↗	↗	↗	↗	↗	↘
Ni	SIM	NÃO	REFINA	↘	↗	↗	↗	↘
Cu	SIM	NÃO	REFINA	↘	↘	↗	↗	↘
V	NÃO	SIM	REFINA	↗	↗	---	---	---
W	NÃO	SIM	REFINA	↗	↗	---	---	---
Co	SIM	NÃO	IMPEDE AUMENTO	---	---	---	---	---
Mo	NÃO	SIM	IMPEDE AUMENTO	↗	↘	↗	↗	↗

O histórico termomecânico está relacionado com o processo através do qual se obtém a forma final do elemento estrutural. Como se sabe, o aço estrutural é normalmente laminado a quente ou enformado a frio. Se por um lado a laminagem a quente não altera significativamente as características mecânicas do aço a enformagem aumenta a tensão de cedência e a dureza do aço reduzindo a sua ductilidade.

4.2.1.9 Resumo

Na madeira, devido à sua origem orgânica e anisotropia, as propriedades mecânicas podem variar bastante mesmo dentro de uma mesma espécie. Por exemplo, o lenho outonal de uma conífera pode ser entre 3 a 5 vezes mais resistente que o lenho primaveril. A densidade e resistência da madeira crescem com o aumento da espessura da parede do traqueído e com o aumento da percentagem de lenho outonal. A GLULAM possui a mesma resistência que a madeira que lhe dá origem beneficiando da redução de defeitos, permitindo otimizar as características da madeira.

Por outro lado, o aço comporta-se como um material homogéneo e isotrópico possuindo características bem definidas e constantes para um mesmo tipo de aço.

Alvares *et al* [21] considerou os seguintes valores médios para a madeira e aço estruturais:

Quadro 4.2 – Comparação das tensões admissíveis em MPa na madeira e Aço [21]

Material	Flexão	Tração		Compressão		Corte	Módulo de elasticidade
		Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular		
Madeira	12	12	1,5	11	2,8	1,2	11000
Aço	170	170		170		100	210000

4.2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Apresentam-se neste tópico as seguintes características dos materiais: (a) densidade; (b) teor em água; (c) propriedades térmicas; (d) comportamento acústico; (e) comportamento ao fogo; (f) resistência química.

4.2.2.1 Densidade

Esta característica dos materiais pode ser confundida com outras duas muito semelhantes, o peso específico e a massa específica. Estes três termos são utilizados como sendo equivalentes. Na verdade, existe uma diferença mais conceptual do que prática. A massa específica corresponde à relação entre a massa e o volume do corpo, o peso específico, à relação entre o peso e o volume. Eles têm o mesmo valor numérico e são medidos em g/cm^3 ou gf/cm^3 . A densidade de um corpo é a relação entre a massa específica do corpo e a da água nas condições do ensaio. Como a massa específica da água é praticamente igual a 1, podemos confundir numericamente densidade, massa específica e peso específico. Pode-se então concluir que a densidade exprime uma relação entre massa e volume.

A GLULAM possui uma densidade muito semelhante à da madeira sendo a influência das colas e tratamentos praticamente desprezável. A densidade na madeira depende de dois factores: (a) da densidade básica da madeira, correspondente à madeira seca; (b) do teor em água. Um terceiro factor, a existência de minerais ou de outras substâncias passíveis de ser removidas, normalmente não é considerado pois só tem relevância num número limitado de espécies [3].

De modo a criar uma referência que permita a comparação entre espécies e/ou produtos, normalmente, calcula-se a densidade da madeira considerando um teor em água de 12%.

A densidade da madeira depende da espécie e é muito variável. Os seus valores podem ir dos 300kg/m^3 para espécies ligeiras como a madeira de balsa, até 1200kg/m^3 das madeiras pesadas como o lapacho. [21]

As coníferas mais utilizadas na construção têm uma densidade compreendida entre 400 e 500kg/m^3 e as folhosas entre 600 e 700kg/m^3 . A densidade real da madeira, a correspondente à parede celular, é constante para todas as espécies tendo o valor aproximado de 1500kg/m^3 . Isto significa que a diferença de densidade aparente entre as diferentes espécies se deve ao maior ou menor número de vazios no seu interior.

Por sua vez, o aço possui um valor médio de densidade 8000kg/m^3 .

Uma outra relação, ligada à densidade, que permite estabelecer uma comparação importante entre madeira e aço, é a relação peso/resistência.

Segundo Lopez *et al* [1], se considerarmos o rácio entre a densidade da madeira e a sua capacidade resistente com o valor unitário de 1.00 e compararmos com outros materiais de construção comuns, obtemos os valores de 1,50 para estruturas metálicas, 3,50 para o betão pré-esforçado e 5,00 para o betão armado.

Alvarez *et al* [21] afirma que a madeira sem defeitos é 3,6 vezes mais resistente que o aço, para um mesmo peso, considerando ambos em condições de rotura. Se comparados os valores das tensões admissíveis considerando na madeira a influencia dos defeitos ambos possuem valores semelhantes. Neste caso o uso da GLULAM permite diminuir os defeitos presentes na madeira, aproximando-se assim da relação de 3.6 que se verifica na madeira maciça, livre de defeitos.

Por sua vez a GLTA [4] indica que uma viga de aço pode ser 20% mais pesada que uma viga de GLULAM equivalente com a mesma capacidade resistente. Este comentário é reforçado pela seguinte figura retirada do trabalho de Marutzky [23].

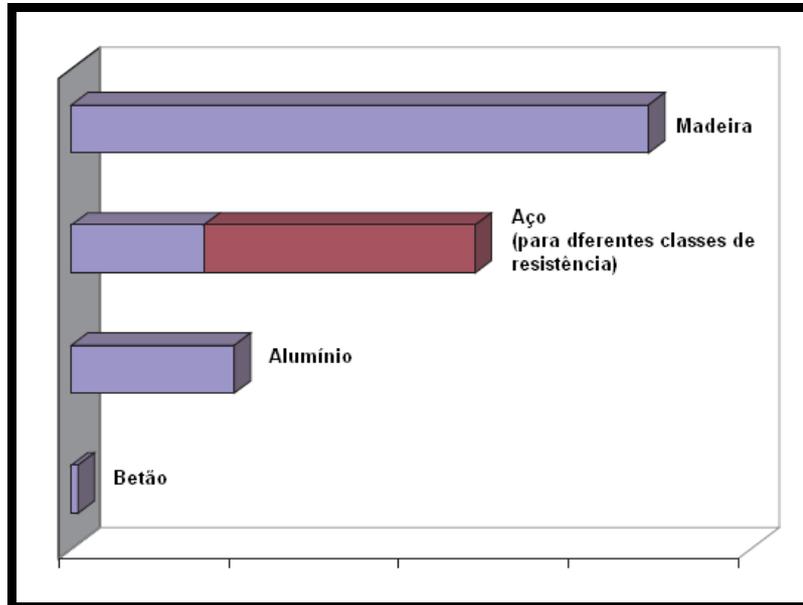


Figura 4.6 – Comparação relativa da resistência em função do peso de vários materiais de construção

O autor conclui que a GLULAM possui uma densidade inferior à do aço mas, ao contrário do que se poderia esperar, este facto não afecta as capacidades resistentes dos lamelados colados. Efectivamente, verifica-se que para elementos estruturais lineares semelhantes, com o mesmo peso, os elementos de GLULAM podem apresentar uma resistência 20% superior à dos elementos de aço.

4.2.2.2 Teor em água

O teor em água é um parâmetro apenas aplicável à madeira, contudo, é importante estudar o impacto que tem na GLULAM podendo constituir uma vantagem ou desvantagem relativamente ao aço.

Esta característica é importante na madeira por duas razões distintas. Se por um lado afecta as características da madeira, por outro está ligado à possibilidade de contaminação biológica. Ambos os problemas podem ser evitados se forem tomadas medidas adequadas para impedir a variação do teor em água.

Em relação às características da madeira, o teor em água está ligado a alterações nas dimensões dos elementos estruturais, propriedades mecânicas, físicas e tecnológicas da madeira e dos seus derivados [11].

A expansão e retraction da madeira em função do teor em água, pode causar variações desiguais das dimensões das peças levando a assentamentos desiguais e imprevisíveis nas estruturas. Estas duas características são reversíveis e variam em função das direcções dos anéis de crescimento e da direcção das fibras. As variações dimensionais notam-se principalmente na direcção tangencial aos anéis de crescimento, sendo reduzidos a metade na direcção radial, e são negligenciáveis na direcção longitudinal paralela às fibras.

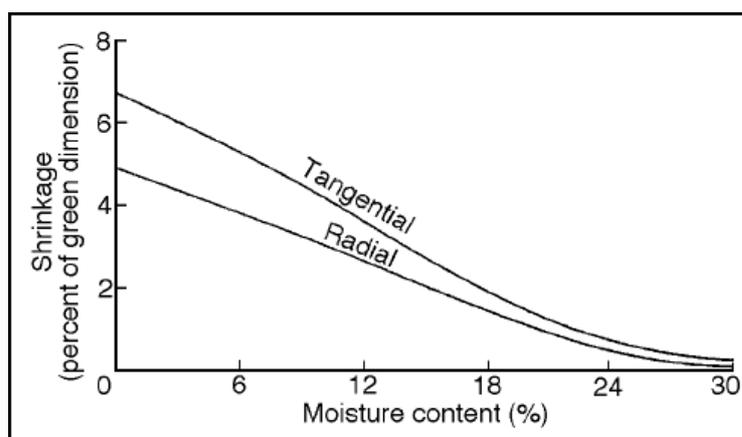


Figura 4.7. – Curvas de retracção da madeira em função do teor em água

Como se sabe, o teor em água, é um dos parâmetros que merece particular atenção no processo de fabrico da GLULAM, sendo controlado rigorosamente com secagem em estufa, procurando evitar assim possíveis deformações diferenciais das peças. Contudo a GLULAM continua sujeita a variações dimensionais, causadas pela humidade relativa das condições de serviço. São no entanto, estas deformações mais previsíveis e controláveis do que na madeira.

Deve-se considerar duas etapas distintas no ciclo de vida de um elemento de GLULAM: (a) armazenamento do material; (b) as condições de serviço.

Em relação ao armazenamento do material, se forem cumpridas algumas regras simples, consegue-se garantir que o teor em água se mantém próximo daquele estabelecido durante o processo de fabrico.

Normalmente, os perfis são protegidos com um invólucro vedante, um impermeabilizante ou um primário, quando deixam a fábrica, sendo também vedados os extremos dos perfis para os proteger da humidade. Este invólucro vedante deve ser mantido enquanto a peça não for usada na obra. Desta forma consegue-se proteger os elementos de GLULAM do contacto com a humidade, luz solar e sujidade. É também usual criar aberturas nos topos do invólucro de modo a garantir a boa ventilação e evitar a acumulação de humidade, resultante do processo de condensação.

Por seu lado, no armazenamento dos perfis no estaleiro, se forem garantidas boas condições de ventilação e drenagem, não haverá problemas de variações dimensionais.

Em relação às condições de serviço, quando são usadas disposições de projecto e construtivas adequadas, a madeira e os seus derivados são materiais de construção extremamente duráveis. Efectivamente, se a madeira for mantida com um teor em água abaixo dos 20% e se for protegida dos ataques biológicos, pode durar indefinidamente. Algumas das medidas mais comuns são as seguintes [24]:

- Garantir a protecção da madeira ou seus derivados das intempéries;
- Projectar as juntas de forma a evitar a condensação da humidade;
- Garantir uma correcta drenagem do local;
- Usar barreiras para-vapor quando adequado.
- Usar espécies de madeira adequadas ao local.

Deve-se ter um cuidado especial nas ligações de forma a evitar a fendilhação dos elementos perante a existência de ciclos de expansão e retracção. No cálculo das ligações deve-se considerar a possibilidade de expansão e retracção da madeira causados pela variação das condições de serviço. Esta consideração é análoga ao que acontece para estruturas metálicas para ciclos de expansão e retracção causados por variações de temperatura.

Contudo, nos casos em que o teor em água ultrapassa os 20%, a madeira tem maior tendência a sofrer ataques biológicos. Para este tipo de condições, o uso de tratamentos preservadores da madeira ou o uso de madeiras naturalmente mais resistentes é recomendável para aumentar o tempo de vida da estrutura.

Em suma, o autor do trabalho conclui que a ocorrência de variações dimensionais indesejadas pode ser evitada em estruturas de GLULAM desde que sejam tomadas as devidas precauções. Em relação ao ataque biológico da madeira associado a valores elevados do teor em água, desde que sejam usados os tratamentos preservadores adequados, o risco de degradação da GLULAM é inexistente. Deste modo os problemas associados a variações do teor em água em elementos de GLULAM podem considerar-se evitáveis garantindo assim a sua equidade com o aço.

4.2.2.3 Propriedades térmicas

Fundamentalmente pode-se caracterizar termicamente o aço e a GLULAM através de três características: (a) condutividade térmica; (b) calor específico; (c) expansão térmica.

A condutividade térmica pode ser descrita como a capacidade que um material tem para transmitir o calor e é essencial para a avaliação das capacidades isolantes dos materiais. É obtida através da medição da quantidade de calor que passa numa hora através de 1m² de material com uma espessura de 1m quando o diferencial de temperatura é de 1°C.

A condutividade térmica da madeira é afectada por uma série de factores básicos: densidade, teor em água, irregularidades estruturais, ângulo das fibras e temperatura. A condutividade cresce à medida que a densidade, teor em água e temperatura aumentam. A condutividade térmica é quase igual na direcção radial e tangencial em relação aos anéis de crescimento. A condutividade na direcção das fibras pode ser 1,5 a 2,8 vezes maior [3]. Contudo, pode-se considerar o teor em água como sendo o mais relevante. Como a condutividade térmica do ar é baixa e a da água é alta, quanto mais alto for o teor em água da madeira, maior a sua condutividade. De qualquer maneira, tendo em consideração a humidade relativa das condições de serviço na maior parte dos edifícios, a condutividade térmica da madeira é relativamente baixa quando comparada com materiais inorgânicos. Normalmente considera-se 0,14 W/m.K como sendo um valor médio para a condutividade térmica da madeira [11].

Por outro lado, para um aço com 0,2% de carbono em peso, pode-se considerar como valor médio para a condutividade térmica 53 W/m .K, sendo aproximadamente 375 vezes maior do que a condutividade térmica da madeira.

O calor específico é a grandeza física que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor. Pode ser definido como a quantidade de calor que é necessário fornecer a 1kg de material de forma a subir a sua temperatura 1°C. Este valor é usado para comparar a capacidade de armazenamento de calor de um material. Depreende-se deste conceito que é necessário mais energia para aumentar a temperatura de um material com um calor específico alto do que um material com um calor específico baixo.

Normalmente considera-se um valor médio de 1200 J/(Kg.K) para a madeira e 500 J/(Kg*K) para o aço [10]. Isto significa que é necessário fornecer 2,4 vezes mais energia à madeira para aumentar a sua temperatura quando comparada com a energia que é necessária fornecer ao aço para obter o mesmo aumento.

A expansão térmica está ligada à capacidade que um material possui para variar as suas dimensões com mudanças de temperatura. Quando uma substância é aquecida, os seus constituintes movem-se de forma vigorosa criando desta forma uma maior separação entre si. A divisão da variação de dimensão pela variação de temperatura indica o coeficiente de expansão de um determinado material.

Na madeira, consideram-se três tipos de coeficientes de expansão térmica dependendo da direcção considerada: (a) direcção longitudinal; (b) direcção tangencial; (c) direcção radial.

Na madeira estrutural apenas tem relevância o coeficiente de expansão térmica longitudinal sendo assumido um valor entre 3 e 6 x10⁻⁶. Em estruturas normais, a expansão térmica na madeira não é significativa. Esta característica é importante em situações em que ocorram temperaturas elevadas, como por exemplo em incêndios, mas mesmo nessas condições a madeira tem deformações insignificantes [11].

O aço, por seu lado, possui um coeficiente de expansão térmica entre 11 e 13 x10⁻⁶ sendo em média 2,5 vezes maior do que na madeira.

Quadro 4.3 – Resumo das propriedades térmicas de madeira e aço

	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (W/m.K)	Coeficiente de expansão térmica
Madeira	0,14	1200	3
Aço	53	500	11

Resumindo, a madeira possui um comportamento térmico bastante superior ao do aço. Do ponto de vista do isolamento térmico, devido à baixa condutividade térmica da madeira, quando comparada com o aço, esta tem um comportamento muito melhor reduzindo a ocorrência das pontes térmicas. Do ponto de vista de desempenho estrutural, o aço tem maiores variações estruturais do que a madeira devido aos efeitos da temperatura.

4.2.2.4 Comportamento acústico

Na acústica de edifícios, há duas perspectivas distintas de análise que importa distinguir [25]:

- Correção acústica, que se refere a corrigir um comportamento para o som aí emitido;
- Isolamento sonoro, que se refere a tratar um comportamento para sons de/para locais contíguos.

O primeiro caso refere-se a situações onde o som aí produzido e aí audível com qualidade é a principal razão do estudo acústico. O segundo caso refere-se a situações onde o som aí produzido não pode ser audível nos vizinhos contíguos.

A propriedade dos materiais que é relevante para a correção acústica é o coeficiente de absorção sonora. A absorção sonora é a propriedade que possuem certos materiais de poderem transformar parte

da energia sonora que sobre eles incide em outro qualquer tipo de energia, normalmente a térmica. O coeficiente de absorção sonora (α) é a relação existente entre a quantidade de energia que é absorvida por determinado material e aquela que sobre ele incide.

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (4.3)$$

Um dos parâmetros que permite comparar a capacidade de absorção dos materiais é o NRC (Noise Reduction Coefficient) que se define como a media aritmética dos valores de α nas bandas de oitava dos 250 aos 2000Hz. Nos casos da madeira e do aço, estes materiais apresentam respectivamente os valores de 0,05 a 0,15 e de 0,00 a 0,10 [26]. Por norma consideram-se materiais absorventes aqueles materiais que têm um α superior a 0,50.

Na teoria do isolamento sonoro torna-se necessário distinguir dois casos:

- Ruídos de percussão, em que há solicitação mecânica directa da fonte de irradiação sobre os elementos de construção;
- Ruídos de condução aérea, em que a transmissão é feita unicamente por vibração do ar.

Na questão do isolamento sonoro a ruídos aéreos o parâmetro caracterizador é o R (redução sonora em dB). A característica física mais importante na redução da transmissão de ruídos aéreos é a massa superficial do material. Considerando aplicável a lei da massa, a redução sonora pode ser calculada através da seguinte formula:

$$R = 20 \cdot \log(m \cdot f) - 47 \quad (4.4)$$

Onde m é a massa superficial do elemento e f a frequência. Da análise da fórmula vem que, para uma mesma frequência, quanto maior for a massa superficial do material, maior será a redução sonora. Os valores da massa superficial considerados aceitáveis para a madeira e o aço são, respectivamente, $0,5\text{g/m}^2$ e $7,7\text{kg/m}^2$ por mm de material. Desta forma depreende-se, que para este parâmetro, o aço tem um melhor comportamento que a madeira.

Quanto aos ruídos de percussão, não existe nenhum método de comparar directamente os materiais pois depende essencialmente da estrutura.

Em suma, no âmbito deste trabalho, o parâmetro acústico relevante é a absorção sonora pois permite estudar o uso dos espaços de grande vão como salas de espectáculos, como por exemplo o Pavilhão Atlântico no nosso país. Nesta perspectiva, a GLULAM apresenta um comportamento bastante melhor que o aço permitindo assim melhores condições acústicas.

4.2.2.5 Comportamento ao fogo

Em caso de incêndio num edifício, a natureza dos elementos e materiais que integram a sua construção influi no início, desenvolvimento e propagação do fogo e determina o tempo necessário à sua supressão ou escape. Devido ao diferente papel em caso de incêndio, convém fazer a distinção entre elementos e materiais de construção.

Os elementos de construção são os componentes da construção que têm uma função estrutural, sustentadora ou compartimentadora, tais como pilares, vigas coberturas, etc. O seu comportamento, em caso de incêndio, é estudado do ponto de vista da resistência ao fogo.

Os materiais de construção são componentes da construção que não têm função estrutural, tais como materiais de acabamento, isolamentos, etc. O seu comportamento ao fogo, é estudado do ponto de vista da reacção ao fogo. [27]

Pode-se definir, Reacção ao fogo como o potencial de um material para contribuir para o fogo em caso de incêndio. A Resistência ao fogo, por outro lado, corresponde ao intervalo de tempo durante o qual o elemento mantém a capacidade para desempenhar a sua função em caso de incêndio. Desta forma, o aço e a GLULAM vão ser analisados quanto à sua Resistência ao fogo.

O interesse da classificação dos elementos em função da sua Resistência ao fogo consiste em garantir que os ocupantes de um edifício têm tempo suficiente para o abandonar em segurança em caso de incêndio.

Tradicionalmente as estruturas de madeira e seus derivados são encaradas como tendo um mau comportamento ao fogo quando comparadas com as estruturas em aço. Isto deve-se ao facto de a madeira arder enquanto o aço não. Contudo é um facto de que durante um incêndio, se o aço não estiver correctamente protegido, este perde rapidamente a sua resistência levando ao colapso da estrutura enquanto que no caso de estruturas de GLULAM isto não se verifica.

Um incêndio normal em edifícios pode atingir entre 700°C a 900°C [24].

A combustão é a combinação de componentes inflamáveis da madeira que quando combinados com oxigénio produzem calor, fumo e, em certas condições, chamas. Normalmente a madeira não entra em combustão até atingir os 240°C e uma vez atingido esse estado a madeira carboniza de uma forma homogénea e constante à taxa de 6mm a 7mm por minuto por cada face exposta ao fogo. Inicialmente o aumento de temperatura provoca a evaporação da água da madeira, e enquanto permanecer humidade na madeira esta não passa os 100°C. Quando a temperatura sobe entre os 150°C e os 210°C, a madeira já seca, muda de cor e fica carbonizada. A camada carbonizada funciona como um isolante aumentando a temperatura a que a madeira se consegue resistir. Desta forma, num incêndio de 30min, para um elemento estrutural em madeira, terá sido consumida aproximadamente 2cm de cada uma das faces expostas, deixando intacta grande parte da secção original. A parte da secção que não se encontra carbonizada conserva todas as suas capacidades estruturais continuando a contribuir para a estabilidade do edifício.

Assim, o cálculo da resistência ao fogo de uma estrutura em GLULAM é feito calculando qual a secção necessária para suportar os esforços aplicados na estrutura e posteriormente adiciona-se uma espessura suplementar de forma a resistir durante o tempo pretendido em caso de incêndio. Por exemplo, se determinado elemento estrutural correctamente dimensionado tiver uma secção transversal de 5cm por 10cm e se for pretendido que em caso de incêndio esta resiste durante pelo menos 30min, o elemento estrutural deve ser fabricado com uma secção de 9cm por 14cm.

Além disto, os elementos estruturais em madeira ou derivados, não sofrem deformações assinaláveis durante um incêndio pois, devido a possuírem uma dilatação térmica baixa, a expansão causada pelo calor vai ser anulada pela retracção causada pela evaporação da água.

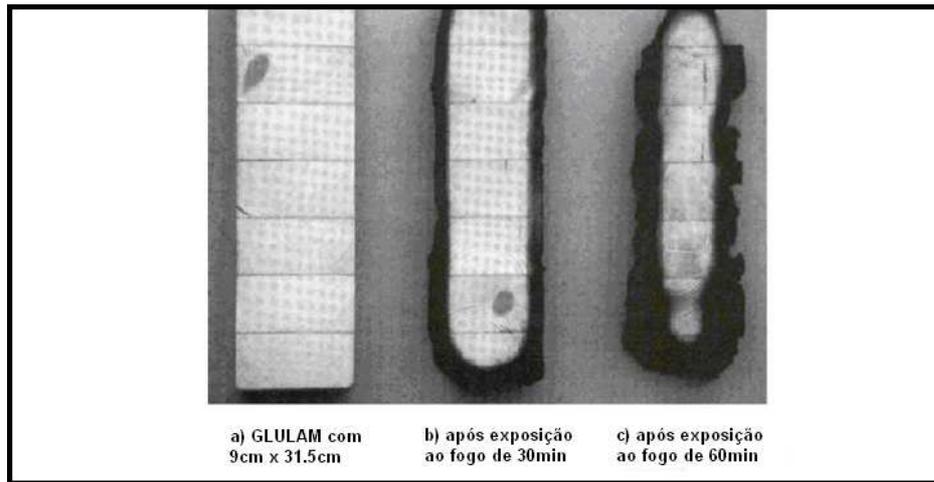


Figura 4.8 – Carbonização de um elemento em GLULAM ao longo do tempo

Por outro lado, o aço começa a perder de forma acentuada a sua capacidade resistente ao serem atingidos 200°C. Esta diminuição estabiliza por volta dos 700°C sendo que a esta temperatura o aço possui apenas 10% da sua resistência inicial. Além disso, o módulo de elasticidade diminui com o aumento de temperaturas. Deste modo, para as mesmas tensões vão existir deformações maiores na estrutura. Deve-se também referir o facto de que a condutividade térmica do aço é elevada levando a que toda a secção do elemento em aço seja afectada rapidamente pela acção do calor.

A seguinte figura estabelece a comparação entre a variação da capacidade resistente do aço e da madeira em função da temperatura:

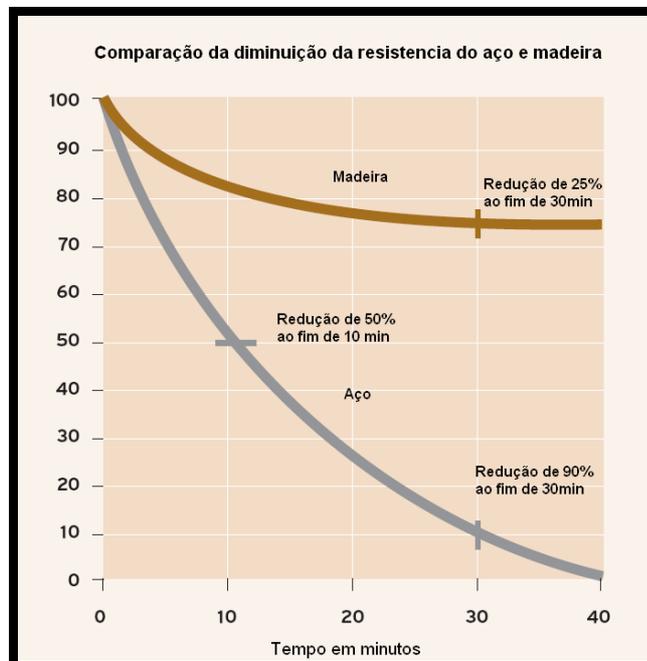


Figura 4.9 – Comparação entre a redução em resistência do aço e madeira

Como se pode observar no gráfico, o comportamento da madeira face ao fogo é bastante superior ao do aço. Aliás, a madeira possui a característica de ser o único material de construção que pode ser perfeitamente dimensionado em função da resistência ao fogo pretendida.



Figura 4.10 – Vigas de aço deformadas pela acção do fogo sobre viga de GLULAM carbonizada

Normalmente, a resistência ao fogo de estruturas de aço é melhorada revestindo os elementos estruturais com materiais isolantes como o gesso de forma a diminuir a temperatura a que se encontra o aço e dessa forma aumentar a sua resistência.

4.2.2.6 Resistência química

A madeira geralmente tem uma resistência excepcional a ataques químicos mesmo quando em atmosferas agressivas ou quando em contacto directo com químicos. Efectivamente, a madeira é frequentemente utilizada em situações consideradas agressivas como para armazenar produtos químicos ou em processos muito agressivos ambientalmente como curtir o couro. Uma aplicação recente é na construção de celeiros para armazenar sal para aplicação no descongelamento das estradas.

As colas sintéticas aplicadas no fabrico da GLULAM são igualmente resistentes à maioria dos químicos.

Contudo, a GLULAM não é totalmente imune a agentes oxidantes. Por exemplo os sulfitos ou álcalis podem ter uma acção de liquefacção levando a uma diminuição da resistência. Mas estas são condições de serviço muito raras. [4]

Segundo Szucs *et al* [7] em alguns casos, a madeira pode sofrer danos devido ao ataque de ácidos ou bases fortes. O ataque de bases provoca o aparecimento de manchas esbranquiçadas decorrentes da acção sobre a lenhina e a hemicelulose da madeira. Os ácidos também atacam a madeira causando uma redução no seu peso e na sua resistência.

Nos casos em que se justifique, a madeira deve ser protegida com os tratamentos químicos apropriados. O tratamento deve ser aplicado sobre toda a superfície exposta. A sua eficácia depende do tipo de tratamento, da qualidade do produto e do grau de penetração na madeira. Este tipo de

tratamento é aplicado essencialmente sobre estruturas de madeira após a conclusão dos outros trabalhos. No caso dos trabalhos posteriores à aplicação do tratamento, como por exemplo na abertura de orifícios, as superfícies expostas devem ser novamente tratadas.

No caso dos lamelados colados, devem ser garantidos tratamentos que tornem os elementos impermeáveis de modo a impedir que a humidade alcance as linhas de cola.

Recomenda-se também uma protecção adequada contra insectos e fungos de forma a garantir uma maior resistência e durabilidade em situações em que se unam atmosferas agressivas, temperaturas superiores a 40°C, com humidades relativas de 80 a 100% [1]

A maioria dos aços, incluindo a maioria dos aços estruturais mais comuns são afectados pela corrosão quando expostos à humidade e oxigénio. Se qualquer um destes elementos, ou ambos, forem impedidos de contactar com o aço ele normalmente não sofrerá de corrosão.

A corrosão no aço é causada por um complexo processo electroquímico entre o aço e o oxigénio que é facilitado pela presença de humidade. Em certas circunstâncias, a corrosão pode ser exacerbada por poluentes ou outro tipo de contaminante na água. Nestes contaminantes encontra-se incluído o sal (cloreto de sódio) e muitos químicos industriais. Em ambientes em que estas substâncias estejam presentes torna-se necessário a aplicação de tratamentos protectores apropriados [20].

Normalmente o aço é protegido através de esquemas de pinturas ou pelo processo de galvanização.

A galvanização consiste em cobrir o aço com uma camada de zinco, ou em alguns casos com quantidades significativas de outro material, de forma a providenciar uma barreira protectora. Neste caso o metal de recobrimento é que será corroído deixando o aço intacto.

De qualquer maneira todos os esquemas de protecção contra a corrosão possuem um tempo útil de vida limitado sendo necessária a sua correcta manutenção.

O autor conclui que quando se compara a madeira e o aço em termos de resistência química, a madeira é afectada por menos químicos que o aço. A maior parte dos ácidos e bases afecta as capacidades do aço enquanto que no caso da madeira normalmente isto só ocorre com ácidos e bases bastante fortes. A susceptibilidade do aço ao fenómeno da corrosão é de tal ordem que condições atmosféricas consideradas normais poderão ser suficientes para dar início à corrosão e danificar o aço.

4.2.3 SUSTENTABILIDADE

Existe na nossa sociedade uma consciencialização crescente quanto à temática da construção sustentável. Nunca antes se falou tanto dos problemas ambientais e em como o sector da construção deve obrigatoriamente evoluir para diminuir o impacto negativo que tem no ambiente.

De facto, verifica-se entre os projectistas e os construtores uma procura por sistemas construtivos que usem a menor quantidade de energia possível durante a construção e que tenham por base materiais sustentáveis.

Pretende-se neste tópico verificar o comportamento da GLULAM e do aço como materiais de construção sustentáveis e estabelecer uma comparação entre eles. Vão ser abordados os seguintes aspectos: (a) a capacidade de fixação de carbono da madeira; (b) avaliação do ciclo de vida; (c) Energia incorporada; (d) durabilidade; (e) eficiência energética.

4.2.3.1 A madeira como fixador natural do carbono

O reconhecimento de que os níveis de CO₂ na atmosfera irão afectar o clima mundial impulsionou a comunidade científica a investigar meios para controlar e diminuir a quantidade de carbono produzido. Os principais motivos deste aumento de CO₂, além das causas naturais, são o uso de combustíveis fósseis e a mudança no uso do solo.

Enquanto o esforço para reduzir as emissões de CO₂ continua existem outras maneiras de controlar a quantidade deste gás na atmosfera como por exemplo a fixação de carbono. Este processo consiste basicamente na captura e retenção de carbono a longo prazo.

Uma das formas de fixação de carbono consiste em aumentar a área de floresta e usar a madeira produzida de forma a reter o carbono a longo prazos.

Uma árvore inclui na sua constituição essencialmente oxigénio, hidrogénio e carbono sendo que o carbono perfaz 50% da composição da madeira seca [28].

Enquanto que os sais minerais são extraídos do solo, as árvores vão buscar o carbono à atmosfera. O processo é simples, a árvore para se desenvolver, recorrendo à fotossíntese, capta o CO₂, fixa o carbono e liberta oxigénio para a atmosfera. Para produzir 1kg de madeira, uma árvore absorve 1,47kg de CO₂ e liberta 1,07kg de O₂ para a atmosfera [8].

Contudo a capacidade de uma árvore absorver carbono declina com a idade à medida que o crescimento abranda e após a sua morte e posterior decomposição este é novamente libertado para a atmosfera.

A solução para este problema passa por um abate da árvore, após esta ter atingido a sua maturidade, e por uma utilização da madeira a longo prazo. É por isso importante uma gestão eficaz das florestas.

Efectivamente, o rejuvenescimento das florestas garante uma maior taxa de fixação de carbono. Um hectare de floresta consegue fixar entre uma a dez toneladas de carbono por ano durante um período de 30 anos. O ciclo de abate e reflorestação garante assim a continuidade desta capacidade de fixação.

Com uma política de gestão das florestas equilibrada associada a uma indústria de construção que use derivados de madeira é possível conseguir manter uma taxa de fixação de carbono elevada nas florestas e ao mesmo tempo garantir que o carbono das árvores abatidas não é libertado novamente para a atmosfera.

Como exemplo de uma política de gestão florestal bem sucedida pode referir-se o caso dos Estados Unidos da América onde, desde 1940, existe um saldo positivo entre a replantação e o abate de árvores e ao mesmo tempo existe uma grande aposta na madeira como material de construção sendo usada na estrutura em 60% das habitações construídas. Assim, nesse país, a indústria da madeira tornou-se uma importante actividade económica, obrigando a haver um política de reflosteramento pró-activa. O facto de o uso de madeira na construção se ter tornado um processo lucrativo garantiu o interesse dos agentes económicos em proceder a uma correcta gestão do espaço florestal.

Em conclusão, se a madeira produzida pelas florestas não for aplicada em soluções que consigam fixar a madeira durante um largo período de tempo este é libertado novamente para a atmosfera. Quando isto acontece, apesar da existência de grandes manchas florestais estas não estão a contribuir de uma forma eficaz para a diminuição do CO₂ na atmosfera. Pode-se então afirmar que a promoção do uso da madeira e seus derivados na construção, no qual se inclui a GLULAM, é um apoio directo ao combate ao aquecimento global.

4.2.3.2 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Como foi referido anteriormente, os atributos ambientais de um material ou processos de construção estão a assumir um papel importante na especificação de materiais. Contudo, a complexidade dos produtos modernos torna difícil criar uma medida de sustentabilidade. No entanto, começa a ser consensual efectuar essa medição com base na avaliação do ciclo de vida (ACV).

A ACV fornece uma medida global dos impactos ambientais desde a recolha da matéria-prima até ao processo de fabrico, distribuição, uso, manutenção e fim de vida. Esta obtém-se pela determinação, para o ciclo de vida completo, da energia total gasta e do total de emissões de resíduos gasosos, líquidos e sólidos para o meio ambiente [29].

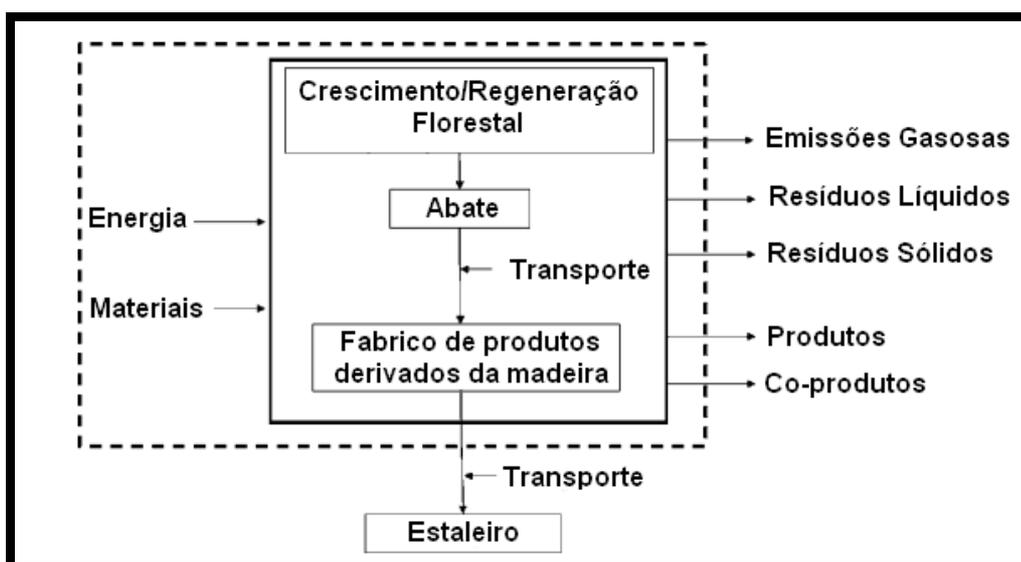


Figura 4.11 – Esquema da avaliação do ciclo de vida dos produtos derivados da madeira

O CORRIM (Consortium for Research on Renewable materials) fez em 2004 um estudo [29] acerca da ACV de materiais derivados da madeira. Neste estudo, estabeleceu-se uma comparação entre a construção de uma casa em estrutura de derivados de madeira e outra em estrutura metálica.

O quadro 4.4 serve como resumo do estudo e indica o valor das variáveis em estudo.

Quadro 4.4 – Índices de desempenho ambiental de edifícios residenciais

	Estrutura de madeira	Estrutura metálica	Diferença	Aço vs Madeira (%)
Energia incorporada (GJ)	398	461	63	16%
Potencial de aumento de efeito de estufa (kg de CO ₂)	21367	28004	6637	31%
Índice de emissões gasosas	4893	6007	1114	23%
Índice de emissões líquidas	7	7	0	0%
Resíduos sólidos (kg)	7442	11269	3827	51%

O estudo revelou que o potencial de aumento de efeito de estufa (GWP – Global Warming Potencial) de um edifício com estrutura em madeira ou derivados de madeira é de 37,047kg de emissões globais de carbono, enquanto que a da casa com estrutura metálica é de 46,826kg. Como se pode constatar, o uso de derivados de madeira tem uma libertação de carbono 26% inferior ao uso de aço.

O estudo concluiu que o uso de produtos de madeira é consideravelmente menos prejudicial para o ambiente do que o uso de produtos metálicos.

4.2.3.3 Energia incorporada

Outro método de quantificar a capacidade ambiental de um material tem a ver com a determinação da sua energia incorporada (“*embodied energy*”)

A energia incorporada quantifica a energia total necessária para transformar matéria-prima em materiais prontos a usar. É expressa em giga Joules por tonelada (GJ/t) ou por mega Joules por quilograma (MJ/kg) [8].

A energia incorporada representa uma parte importante do consumo energético durante o ciclo de vida do material. A energia incorporada engloba:

- A energia necessária para obter a matéria-prima, transformá-la e produzir o material;
- A energia usada no transporte;
- A energia usada na construção.

A matéria-prima dos produtos derivados da madeira é obviamente a madeira proveniente das árvores. A luz solar fornece a energia necessária para iniciar o processo biológico para produzir madeira. Como esta é uma fonte natural, sem efeitos negativos para o ambiente, ela é desprezada para o cálculo da energia incorporada.

Uma vez colhida, é necessária relativamente pouca energia para transformar os troncos em produtos de madeira. Por exemplo, a energia, proveniente de combustíveis fósseis, necessária para produzir madeira serrada é de 1,5 MJ/kg enquanto que a energia necessária para produzir alumínio é de aproximadamente 435 MJ/kg [30]. No caso da GLULAM, são necessários aproximadamente 4,6 MJ/kg.

Quadro 4.5 – Energia de combustíveis fósseis necessário para produzir quatro materiais de construção

Material	Energia de combustíveis fósseis (MJ/kg)	Energia de combustíveis fósseis (MJ/m ³)
Madeira serrada	1,5	750
Aço	35	266000
Betão	2	4800
Alumínio	435	1100000

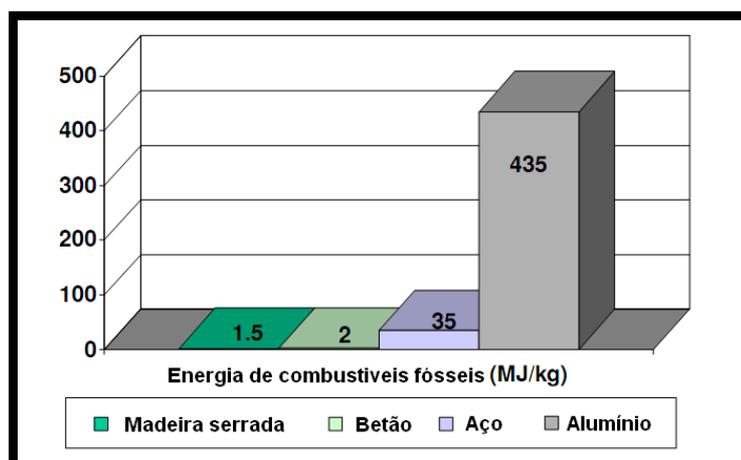


Figura 4.12 – Energia de combustíveis fósseis necessário para produzir quatro materiais de construção

Como se pode ver no gráfico, a madeira é claramente o material que necessita de menos energia proveniente de combustíveis fósseis. Além disso, a madeira armazena até 15 vezes a quantidade de CO₂ necessário para o seu fabrico enquanto que os outros materiais armazenam quantidades desprezáveis.

A quantidade de CO₂ libertada e armazenada durante o fabrico dos quatro materiais considerados, encontra-se resumida na seguinte tabela:

Quadro 4.6 – Quantidades de carbono armazenadas e libertadas durante o fabrico de quatro materiais de construção

Material	Carbono libertado (kg/t)	Carbono libertado (kg/m ³)	Carbono armazenado (kg/m ³)
Madeira serrada	30	15	250
Aço	700	5320	0
Betão	50	120	0
Alumínio	8700	22000	0

A etapa da construção inclui a construção em estaleiro mas também o transporte do material desde a fábrica do produtor até à obra. O maior impacto desta etapa é causado pela energia usada no transporte, pelo equipamento de construção e pelos resíduos sólidos gerados.

A energia usada no estaleiro para estruturas de madeira ou aço é virtualmente igual.

Contudo, as estruturas em aço geram menos resíduos sólidos do que as de madeira.

A quantidade de resíduos sólidos gerados em estruturas de madeira depende muito do sistema construtivo usado e da gestão do material por parte do construtor.

4.2.3.4 Durabilidade

Quanto maior for a durabilidade de um material, maior será a sua vida útil diminuindo assim o seu impacto ambiental.

No caso da durabilidade de estruturas de glulam, esta depende dos seus quatro principais componentes (madeira, colas, ligadores metálicos e tratamentos de acabamentos superficiais) e da maneira como estes interagem.

De acordo com o guia do projectista da Glued Laminated Timber Association [4] na maior parte das aplicações estruturais, se forem cumpridas as disposições construtivas adequadas para o tipo de aplicação, o tempo de vida útil da glulam pode ser considerado virtualmente ilimitado. O uso de colas fenólicas modernas também garante um tempo indefinido de duração de ligação entre as lamelas.

A principal ameaça ao tempo de serviço da glulam é um aumento no teor em água para mais de 22% - 25% durante um período de tempo prolongado. Contudo, com um correcto processo de manutenção bem como com um bom projecto inicial é possível evitar estas situações

4.2.3.5 Eficiência energética

De acordo com a Agencia internacional de Energia, em média, um terço da energia usada em países desenvolvidos é gasta no aquecimento, arrefecimento, iluminação e em aparelhos associados a edifícios não industriais. Estas estimativas não têm em consideração a energia incorporada nos materiais construtivos e o seu impacto ambiental.

Assim, a eficiência energética dos edifícios tornou-se um assunto de destaque no esforço de reduzir o consumo energético.

O uso de materiais com um índice de isolamento térmico elevado leva a uma redução na quantidade de energia necessária para aquecer e arrefecer um edifício.

Como foi referido anteriormente, a madeira é um bom isolante natural. Devido à sua estrutura celular, a madeira contém bolsas de ar que diminuem a sua condutividade térmica aumentando assim a sua capacidade isolante. Estudos demonstram que o aço tem uma condutividade térmica 400 vezes superior à da madeira. Este facto elevado aumenta o número de pontes térmicas sendo então necessário maiores gastos energéticos para aquecimento e arrefecimento, ou custos acrescidos com materiais adicionais.

4.2.3.6 Resumo

Com esta tese, pode concluir-se que a GLULAM é um material de construção com um bom comportamento, ao nível da sustentabilidade. Efectivamente, quando comparada com o aço, e baseando-nos na análise do ciclo de vida, esta tem um comportamento muito superior.

Efectivamente, de todos os produtos usados na construção de edifícios, os produtos derivados da madeira conseguem um bom desempenho ambiental, pois provêm de uma matéria-prima com características especiais como por exemplo ser biodegradável, renovável e reciclável.

Se considerarmos ainda o facto de que a GLULAM ser um fixador natural de carbono, tet um comportamento térmico excelente e possuir uma durabilidade adequada para grandes períodos úteis de vida, conclui-se que a utilização da GLULAM na execução de estruturas de coberturas de grande vão pode contribuir para uma construção mais sustentável, do ponto de vista ambiental.

4.3 ANÁLISE DO PROCESSO CONSTRUTIVO

Na altura da decisão de que material escolher para executar a estrutura, não se devem usar como base exclusivamente as características do material. É também necessário considerar critérios relacionados com a execução em obra como por exemplo a técnica de construção, a velocidade da montagem da estrutura, o transporte de materiais até ao estaleiro e a manutenção da estrutura em obra e em serviço. É a soma de todos estes critérios com os restantes avaliados neste capítulo que estabelece qual a solução mais viável para determinada estrutura.

A análise do processo construtivo assenta em três pontos essenciais: (a) execução da estrutura em obra; (b) transporte; (c) manutenção.

4.3.1 EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA E AÇO

A construção de estruturas em madeira lamelada colada possui uma série de procedimentos de montagem independentes do tipo de sistema estrutural. Referem-se neste tópico os procedimentos essenciais apresentando-se, onde relevante, algumas regras para cada sistema em particular.

Os elementos de GLULAM devem ser aplicados na estrutura com um teor em água próximo do que é expectável para as condições de serviço. A montagem deve ser feita por profissionais com experiência na montagem de estruturas de GLULAM e deve ser executada com base num plano de montagem tendo em conta a distribuição de esforços na estrutura. O modo de montagem pode influenciar a escolha do sistema estrutural, dos elementos estruturais e dos pormenores construtivos. Durante a montagem, devem ser colocados apoios e contraventamentos temporários adequados pois a estrutura só se torna completamente estável depois de todos os elementos estarem montados [11]. Devido à facilidade que se tem em trabalhar e manusear, e devido ao seu peso reduzido, o tempo de montagem pode ser inferior ao necessário para estruturas de aço. As estruturas provisórias de sustentação podem ser facilmente removidas com ferramentas de mão.

As estruturas de GLULAM são projectadas e fabricadas com base em especificações exactas. Contudo isto não é suficiente para garantir o bom desempenho da estrutura. O transporte, a montagem, e acima de tudo, o contraventamento da estrutura são de extrema importância. Dependendo do tamanho da estrutura, da altura do apoio e das condições de trabalho, é possível montar a cobertura manualmente, com uma empilhadora ou recorrendo a uma grua.

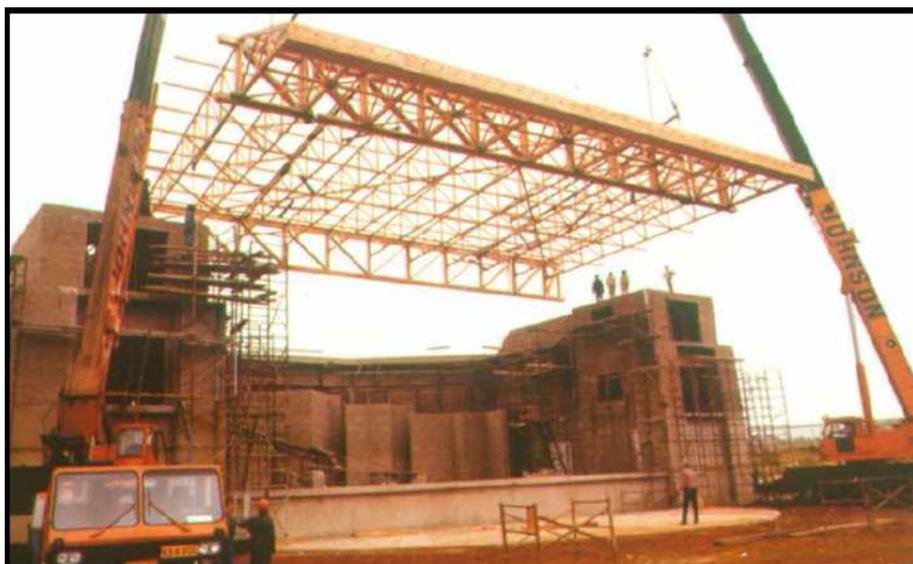


Figura 4.13 – Estrutura de cobertura com 25m x 30m a ser colocada sobre os apoios com a ajuda de uma grua

As estruturas articuladas planas devem ser erguidas na vertical, de forma a evitar a introdução de esforços adicionais que possam danificar a estrutura. Estruturas articuladas planas prefabricadas são armazenadas de forma a evitar danos na estrutura. A espessura das estruturas articuladas planas é maior nos pontos onde os conectores metálicos estão colocados. Deste modo, aquando do transporte e armazenamento deve-se ter cuidados especiais para evitar introduzir deformações nesses pontos.



Figura 4.14. – Armazenamento de estruturas articuladas planas antes da montagem da estrutura

Os pórticos e os arcos, devido às suas dimensões, normalmente são enviados para obra divididos em elementos, sendo posteriormente montados em obra. Podem ser erguidos de duas formas: (a) as ligações são executadas com a estrutura disposta horizontalmente no solo sendo posteriormente colocada com a ajuda de guias; (b) os elementos são unidos já na posição vertical. Durante a montagem são colocados contraventamentos temporários de forma a manter os arcos na posição

correcta até completar a execução da estrutura, garantindo o seu contraventamento e tridimensionalidade.



Figura 4.15 – Parte central de arco de duas rótulas a ser erguido em obra com a ajuda de uma grua

Durante a montagem, deve-se proteger a estrutura do sol e da chuva procurando deixar aberturas suficientes para permitir a ventilação. A luz solar pode causar tantos danos a elementos de madeira como a chuva.

A montagem de estruturas em aço necessita também de um plano de montagem de forma a garantir um correcto desempenho da estrutura. Durante a montagem da estrutura, normalmente, usa-se apenas o número de parafusos necessários para aguentar o peso próprio da estrutura e os esforços desenvolvidos durante a montagem. As ligações permanentes apenas são executadas quando o alinhamento da estrutura está dentro das tolerâncias especificadas. Os parafusos usados nas ligações durante a montagem não estão apertados de forma a atingir a tensão mínima especificada devendo ser novamente apertados no fim da montagem, para atingir então os valores de cálculo.

A montagem soldada de estruturas metálicas também exige um plano de soldadura, onde se indica a sequência a seguir, de forma a controlar a distorção causada pelo calor da soldadura. Normalmente, um maior fluxo de calor num curto período de tempo causa uma distorção maior. Desta forma é aconselhável soldar por etapas, com tempo suficiente entre cada etapa de maneira a garantir a dispersão do calor.

Em conclusão, a montagem de estruturas de madeira deve ter em consideração factores como o teor em água dos elementos estruturais, contraventamentos e apoios temporários, e a protecção da estrutura das condições climáticas, durante a montagem. A GLULAM tem a vantagem de ser mais leve que o aço permitindo uma maior velocidade de execução e uma maior facilidade de manuseamento do material.

Em estruturas metálicas em que seja necessário proceder a soldaduras em obra, devido à necessidade de ter que soldar por etapas, o tempo de execução pode ser bastante superior ao de estruturas de GLULAM. Por outro lado, nos casos em que a estrutura de GLULAM seja constituída por um ou dois

elementos, como por exemplo nos arcos de três rótulas, o tempo de montagem é extremamente reduzido.

4.3.2 TRANSPORTE

O transporte de elementos de aço ou de GLULAM é muito semelhante sendo necessário apenas alguns cuidados específicos para cada estrutura. Efectivamente é necessário proteger ambos os tipos de materiais da água pois no aço existe o risco de corrosão enquanto que na GLULAM a variação do teor em água pode ter efeitos indesejáveis sobre a durabilidade e as dimensões e formas das peças. Desta forma, em ambos os materiais, é inaceitável o seu armazenamento, desprotegido ou não isolado, ao ar livre.

Durante o transporte, os elementos de GLULAM devem estar protegidos por invólucros de forma a protegê-los da humidade e sujidade [11].

O custo do transporte pode ter uma influência significativa na escolha do sistema estrutural. Por exemplo, arcos de duas rótulas têm que ser divididos em várias partes, pois é impossível transportar um arco completo devido às suas elevadas dimensões. Por exemplo, em Portugal, para poder transportar cargas com mais de 20 metros de comprimento ou 3,5 metros de largura, é necessário ter uma autorização específica.



Figura 4.16 – Camião a transportar asnas de GLULAM

A forma de ultrapassar os limites impostos para as dimensões máximas possíveis de transportar é usar estruturas possíveis de desmontar. Em casos em que seja necessário desmontar uma estrutura complexa, deve-se proceder à marcação dos vários elementos e elaborar um plano de montagem. A desmontagem da estrutura pode ser vantajosa em termos económicos, principalmente quando se faz o transporte para localidades com más acessibilidades.

Contudo, existem estruturas que não é possível desmontar limitando assim a sua aplicabilidade. Por exemplo, o transporte de asnas está também limitado pela sua altura, não podendo ultrapassar os 4m. Isto significa que asnas para vãos médios, devido às suas dimensões, têm que ser parcialmente desmontadas. Contudo, as asnas feitas em fabrica normalmente não são apropriadas para serem desmontadas tornando o transporte uma questão difícil de ultrapassar. Neste caso, para possibilitar a desmontagem, deve-se fabricar as asnas com parafusos de rosca, aumentando assim o seu custo de produção.

Em suma, o transporte de elementos de GLULAM ou aço é essencialmente limitado pela forma, tamanho e peso dos elementos estruturais. Em ambos os materiais, quando não for possível o transporte entre a fábrica e o estaleiro, a estrutura pode ser produzida e montada em obra. Normalmente, a estrutura é composta por elementos, mais pequenos passíveis de serem transportados de forma independente e unidos em obra. Um dos exemplos mais visíveis desta característica são as estruturas articuladas espaciais que normalmente são formadas por módulos que se repetem no espaço.

Uma vez que a GLULAM possui um peso inferior ao do aço para um mesmo volume o seu custo de transporte é inferior.

Durante o transporte, é importante a protecção de ambos os materiais de agentes indesejáveis. No caso da GLULAM, deve ser protegida da água, vapor, insectos e fungos. Por outro lado, o aço, deve ser mantido afastado da água e de químicos capazes de provocar a corrosão do metal.

4.3.3 MANUTENÇÃO

A escolha da estrutura pode também estar relacionada com o custo da sua manutenção. Ambos os materiais necessitam de manutenção, sendo que o intervalo em que ocorre depende da natureza do material, das condições de serviço e do tipo de tratamento. Um dos factores que os distingue é que, enquanto na GLULAM normalmente se usam elementos maciços de grandes dimensões, no aço usa-se frequentemente elementos treliçados, o que aumenta a superfície a tratar.

A GLULAM, apesar de ser naturalmente resistente a atmosferas corrosivas, acima de 20% de teor em água corre o risco de ataque biológico mas com o tratamento correcto, este tipo de problema pode ser evitado. Efectivamente, em situações em que não haja o risco de o teor em água exceder esse valor, não é necessária a aplicação de qualquer tratamento preservador [13].

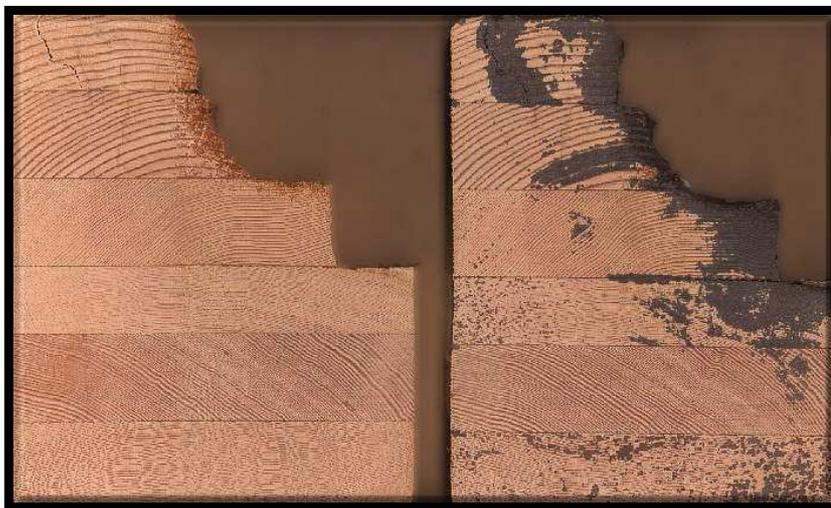


Figura 4.17 – GLULAM a sofrer de ataque biológico

Como foi referido anteriormente, na construção em aço, utiliza-se com frequência os elementos treliçados sendo que, se por um lado aumenta a área sujeita a corrosão, por outro aumenta a dificuldade da pintura. Em ambientes altamente corrosivos, em termos de custo global, pode ser mais económico usar ligas de alumínio em vez de aço de forma a reduzir o custo de manutenção, mesmo sendo o custo do aço mais baixo que o do alumínio. No aço, pode também ocorrer corrosão galvânica

resultante do contacto entre dois metais. Desta forma não se devem colocar em contacto com o aço metais como o cobre ou o níquel. No caso em que metais diferentes estejam em contacto, devem ser isolados, sendo usual aplicar esquemas de pinturas adequadas.



Figura 4.18 – Exemplo de aço oxidado

Em conclusão, é recomendável que a GLULAM e o aço sejam sujeitos a manutenção, dependendo a periodicidade desta das condições de serviço. No aço, a grande preocupação é o facto de este oxidar facilmente sendo recomendado a sua pintura frequente, com a periodicidade dependente do ambiente em serviço e da finalidade do sistema inicialmente aplicado. No caso da madeira, o maior problema de manutenção relaciona-se com as condições de humidade. Estas devem ser controladas e não devem afastar-se muito dos valores considerados em projecto.

A aplicação de estruturas de GLULAM em ambientes exteriores não protegidos tem implicações significativas ao nível da durabilidade e da necessidade frequente de tratamento de manutenção preventiva e eventualmente correctiva. Nestas condições, a pormenorização construtiva cuidada é fundamental para permitir um bom desempenho da estrutura em termos de durabilidade.

Como principais medidas preventivas, haverá que garantir a correcta auto-drenagem das superfícies expostas, a boa ventilação de todas as superfícies e a desejável inexistência de condensações superficiais com carácter relativamente frequente.

5

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES DE GLULAM E AÇO

5.1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo uma avaliação económica de soluções estruturais de coberturas em aço e GLULAM e, num tópico separado, procede-se à síntese das principais características decorrentes da análise técnica e económica das estruturas de cobertura de grande vão em GLULAM e em aço.

A metodologia estabelecida para realizar a avaliação económica assenta na criação de uma série de fichas de custos nas quais os vários parâmetros são avaliados em termos de simulações numéricas considerando a informação recolhida no mercado e o estudo de algumas soluções existentes e que se encaixam no âmbito deste estudo.

5.2 FICHAS DE CUSTOS

Uma ficha de custos reflecte o custo directo que o executar de uma determinada tarefa tem para o empreiteiro. É uma forma fácil e organizada de, através da fixação dos vários parâmetros envolvidos na tarefa, conseguir determinar o custo e ao mesmo tempo conseguir fazer previsões para situações em que sejam necessárias ligeiras variações.

Normalmente uma ficha de custos toma a seguinte forma:

Quadro 5.1 – Exemplo da estrutura de uma ficha de custos

Estrutura de cobertura em GLULAM				Ficha de custo nº 1	
				Data - Junho 2008	
Recurso	Un.	Quantidade	Custo Simples	Totais	%
...

Os recursos costumam ser divididos em materiais, mão-de-obra, equipamentos e subempreitadas.

A quantificação de cada um dos parâmetros obriga a uma divisão em recursos. É natural que existam outros recursos além dos que se referem neste trabalho, entendendo-se no entanto que se consideram os factores de custo mais relevantes.

Os recursos considerados são muito semelhantes em ambos os casos podendo ser organizados da seguinte forma:

1. Matéria-prima, que inclui os custos dos perfis, de GLULAM ou aço, e desperdícios.
2. Ligadores metálicos, incluindo a sua aplicação na estrutura.
3. A pintura, que inclui a aplicação de tratamentos anticorrosivos e de protecção contra o fogo no caso do aço e tratamentos de preservação, fogo e acabamento no caso da GLULAM.
4. Mão-de-obra necessária para o fabrico.
5. Mão-de-obra necessária para a montagem.
6. Equipamento usado no fabrico.
7. Equipamento usado na montagem.

A grande diferença nas fichas de custo associa-se às unidades usadas em cada um dos recursos.

Desta forma, o aspecto de uma ficha de custos de uma estrutura de cobertura em aço é o seguinte:

Quadro 5.2 – Exemplo de uma ficha de custos de uma cobertura em aço [31]

Estrutura de cobertura em Aço				Ficha de custo nº 2	
				Data - Junho 2008	
Recurso	Un.	Quantidade	Custo Simples	Totais	%
<u>MATERIAIS</u>					
Perfil "x"	Kg/kg	...	...	...	...
Ligações metálicas	kg/kg	...	...	...	...
Tratamento por pintura	m ² /kg	...	...	...	...
Total de materiais				...	...
<u>MÃO-DE-OBRA</u>					
Fabrico	H/kg	...	...	...	...
Montagem	H/kg	...	...	...	...
Total de mão-de-obra				...	...
<u>EQUIPAMENTOS</u>					
Fabrico	H/kg	...	...	...	...
Montagem	H/kg	...	...	...	...
Total de equipamentos				...	...
Total Global		€/kg	...	...	100,00%

No caso das coberturas em GLULAM, o aspecto de uma ficha de custos é o seguinte:

Quadro 5.3 – Exemplo de uma ficha de custos de uma cobertura em GLULAM

Estrutura de cobertura em GLULAM				Ficha de custo nº 3	
				Data - Junho 2008	
Recurso	Un.	Quantidade	Custo Simples	Totais	%
<u>MATERIAIS</u>					
GLULAM	m ³ /m ³	...	...	...	...
Ligações metálicas	kg/m ³	...	...	...	...
Tratamento por pintura	m ² /m ³	...	...	...	...
Total de materiais				...	...
<u>MÃO-DE-OBRA</u>					
Fabrico	H/m ³	...	...	...	...
Montagem	H/m ³	...	...	...	...
Total de mão-de-obra				...	...
<u>EQUIPAMENTOS</u>					
Fabrico	H/m ³	...	...	...	...
Montagem	H/m ³	...	...	...	...
Total de equipamentos				...	...
Total Global	€/m ³	...	...	...	100,00%

Como se pode observar nas fichas, os recursos considerados nas estruturas de aço vêm em função dos kg de aço usados na estrutura enquanto que no caso da GLULAM os recursos vêm em função dos metros cúbicos de GLULAM usados. Isto traduz o rendimento dos diferentes parâmetros em função da quantidade de matéria-prima usada.

Esta diferença de unidades torna impossível a comparação directa entre os custos sendo necessário a determinação de um coeficiente que transforme os custos em euros por metro quadrado de área coberta (€/m²). Isto é, nas estruturas de aço considera-se um factor que indica os kg de aço por m² de área coberta e no caso das estruturas de GLULAM estabelece-se um coeficiente que relaciona os m³ de GLULAM por m² de área coberta. Multiplicando os respectivos custos em €/m³ por este factor consegue-se então relacionar os custos dos dois tipos de materiais considerados (€/m²).

Este coeficiente, que iremos designar como rendimento do material estrutural traduz uma medida de “eficiência” do projecto e dispersando-se assim por um intervalo de valores relativamente extenso. Isto deve-se ao facto deste coeficiente estar dependente de vários factores como por exemplo o sistema estrutural usado, o projectista, o tipo de perfis, etc.

Para a determinação dos vários parâmetros limitou-se a pesquisa a estruturas com sistema estrutural em arco ou pórtico com vãos entre 40 e 75m.

Os custos relacionados com equipamentos e mão-de-obra revelaram-se particularmente difíceis de obter sendo que os valores obtidos se referem à globalidade destes parâmetros. Os valores para os custos de equipamentos e mão-de-obra, obtidos com base na pesquisa de mercado, encontram-se no intervalo de 20 a 25% para estruturas de GLULAM e 35 a 45% para estruturas de aço.

5.2.1 FICHAS DE CUSTOS DE ESTRUTURAS DE GLULAM

5.2.1.1 Determinação dos rendimentos e custos unitários dos recursos.

A obtenção dos rendimentos e custos unitários fez-se recorrendo à consulta de mercado tendo incidido essa pesquisa em três parâmetros: (a) rendimento e custo unitário da GLULAM; (b) rendimento e custo unitário dos ligadores metálicos; (c) rendimento e custo unitário do tratamento da GLULAM.

Considera-se o rendimento da GLULAM, considerando desperdícios, como sendo da ordem dos 1,05 m³/m³. O custo unitário da GLULAM é dos parâmetros que mais varia sendo que, após o contacto com algumas empresas de GLULAM, se chegou ao intervalo de 430 a 650 €/m³.

Os ligadores metálicos, na pesquisa de mercado, costumam ser indicados como uma percentagem em função do custo final. O valor indicado para o custo unitário dos ligadores variou ente 3 a 7% do custo final. O rendimento dos ligadores encontra-se no intervalo de 15 a 25 kg/m³.

Os tratamentos da GLULAM podem ser de várias naturezas sendo que para o caso de uma cobertura com condições de humidade dentro dos parâmetros normais (inferior a 20%) apenas se considera uma pintura de acabamento. Neste parâmetro já vêm incluídos os custos da mão-de-obra. Os rendimentos obtidos, para diferentes tipos de projecto, variam entre os 10 e os 17 m²/m³. O custo unitário varia entre 10 e 15 €/m².

5.2.1.2 Avaliação dos rendimentos dos materiais estruturais

Este coeficiente revelou-se difícil de obter com base no mercado sendo que se optou por proceder à medição de projectos de coberturas de grande vão em GLULAM descritos em Goetz *et al* [11], para poder aferir intervalos representativos.

Foram escolhidos três projectos de coberturas representativas do pretendido para este trabalho: (a) o pavilhão multifunções de Leidon; (b) o ringue de patinagem em Langnau; (c) o pavilhão multifunções em Biebesheim.

O pavilhão de Leidon consiste numa estrutura em arco com um vão de 75m. Os arcos encontram-se espaçados de 6,4m, têm aproximadamente 85m de comprimento e uma secção transversal média de 0,28m por 1,6m. As vigas secundárias encontram-se espaçadas de 0,9m com uma secção transversal de 0,07m por 0,18m. Considerou-se uma área coberta de 75m por 12,8m.

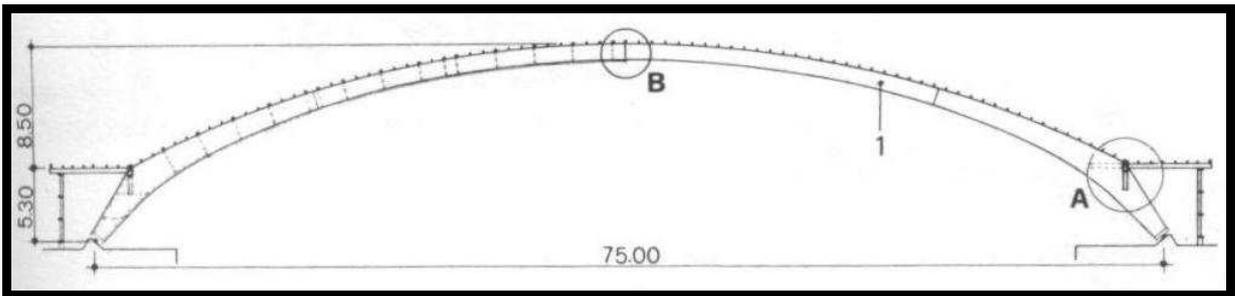


Figura 5.1– Pavilhão multifunções em Leindon (Holanda)

Os resultados obtidos das medições foram os seguintes:

Quadro 5.4 – Medições do pavilhão de Leidon

Elemento	Quantidade [un]	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Volume [m ³]
Arcos	3	85	0,28	1,6	114
Vigas secundárias	83	12,8	0,07	0,18	13
				Total	128

Desta forma obtém-se um índice de $0,13 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

O Ringue de patinagem de Langnau consiste igualmente numa estrutura em arco com um vão de 50m. Os arcos encontram-se espaçados de 8,3m, têm aproximadamente 60m de comprimento e uma secção transversal média de 0,18m por 0,94m. As vigas secundárias encontram-se espaçadas de 0,9m com uma secção transversal de 0,10m por 0,24m. Considerou-se uma área coberta de 16,4m por 50m.

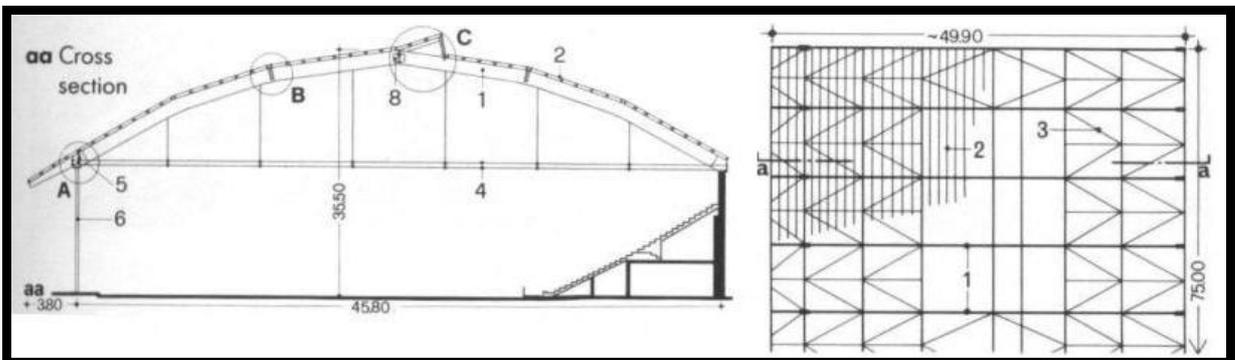


Figura 5.2 – Ringue de patinagem em Langnau (Suíça)

Os resultados obtidos das medições foram os seguintes:

Quadro 5.5 – Medições do Ringue de patinagem de Langnau

Elemento	Quantidade [un]	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Volume [m ³]
Arcos	3	60	0,18	0,94	30
Vigas secundárias	55	16,6	0,1	0,24	22
Total					52

Desta forma obtém-se um índice de 0,06 m³/m².

O pavilhão multifunções de Biebesheim consiste também numa estrutura em arco com um vão de 50m. Os arcos encontram-se espaçados de 6,6m, têm aproximadamente 58m de comprimento e uma secção transversal média de 0,55m por 1.40m. As vigas secundárias encontram-se espaçadas de 9m com uma secção transversal de 0,10m por 0,28m. Considerou-se uma área coberta de 13,2m por 50m.

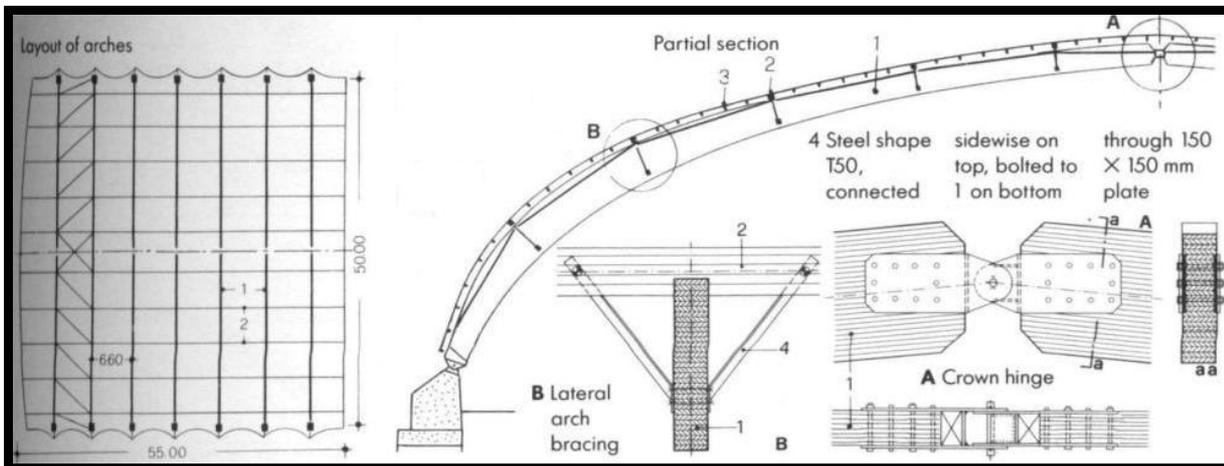


Figura 5.3 – Pavilhão multi usos de Biebesheim (Alemanha)

Os resultados obtidos das medições foram os seguintes:

Quadro 5.6 – Medições do pavilhão de Bielbsheim

Elemento	Quantidade [un]	Comprimento [m]	Largura [m]	Altura [m]	Volume [m ³]
Arcos	3	58	0,55	1,4	134
Vigas secundárias	10	13,2	0,1	0,28	4
Total					138

Desta forma obtém-se um índice de 0,23 m³/m².

Conclui-se então que o coeficiente de estrutura, para coberturas em GLULAM é muito variável tendo-se obtido valores entre 0,06 e 0,23 m³/m².

5.2.2 FICHAS DE CUSTOS DE ESTRUTURAS DE AÇO

5.2.2.1 Avaliação dos custos unitários dos recursos

A determinação dos custos unitários de estruturas de cobertura em aço fez-se tendo como base um estudo de mercado e o trabalho realizado por Santos *et al* [32] sobre o estudo da viabilidade económica de enformados a frio em pórticos industriais com travessas inclinadas. Tal como para estruturas de GLULAM, o levantamento de mercado assentou na determinação de rendimentos e custos unitários de três parâmetros: (a) o aço; (b) os ligadores metálicos; (c) o tratamento anticorrosivo dos aços.

Considerou-se o rendimento do aço, incluindo desperdícios, com sendo da ordem dos 1,05 kg/kg. O custo unitário do aço em perfilados apresenta-se relativamente estável em torno dos 1,35 €/kg.

Os ligadores metálicos, tal como na GLULAM, na pesquisa de mercado, foram sempre fornecidos como uma percentagem do custo global, sendo que o valor referido foi o de 5% a 8%. Os rendimentos obtidos, para diferentes tipos de projecto, variam assim entre 0,05 e 0,08 kg/kg.

Os tratamentos anticorrosivos dos aços também são dados em função do custo final, com a mão-de-obra incluída, estando o custo unitário entre 15% a 20% do custo final. Os rendimentos obtidos, variam entre os 0,04 e 0,06 m²/kg.

5.2.2.2 Avaliação dos rendimentos do material estrutural

O rendimento do aço obtido pela análise de mercado, para o tipo de estrutura considerado, encontra-se num intervalo entre 15 e os 60 kg/m². De forma a confirmar este valor optou-se por analisar uma estrutura de cobertura com um vão de 40m, constituída por pórticos em perfis IPE 360, espaçados de 4m, com contraventamento longitudinal por perfis IPE 120, espaçados de 2m. Apenas se consideram as travessas como sendo parte da cobertura sendo as pernas consideradas como pilares. As travessas têm uma inclinação constante de 10°. A área considerada é de 40m por 12m.

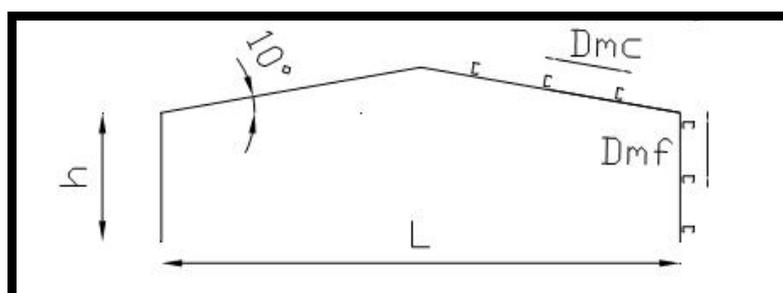


Figura 5.4 – Esquema do pórtico

Os resultados obtidos das medições foram os seguintes:

Quadro 5.7 – Medições do pórtico

Elemento	Quantidade [un]	Comprimento [m]	Peso [kg]
Arcos	3	40	6852
Vigas secundárias	21	8	1360.8
Total			8213

Desta forma obtém-se um coeficiente de estrutura de 25,6 kg/m². Este valor encontra-se de acordo com o intervalo indicado na pesquisa de mercado. Segundo uma empresa do sector, este coeficiente aumenta de acordo com o vão e a complexidade da estrutura. Este dado é confirmado pelo valor do índice obtido na web relativo ao Grande Teatro Nacional da China [33]. Esta estrutura possui um vão de 143m e o seu sistema estrutural assenta numa série de arcos em treliça. O rendimento desta estrutura é de 172 kg/m². Este valor sai claramente do intervalo fornecido e não será considerado uma vez que esta estrutura, pela sua complexidade e tamanho, não se encontra no âmbito desta análise. Esta referência serve apenas para confirmar a tendência do aumento do coeficiente de estrutura com o vão e a complexidade da estrutura ajudando a reforçar o valor que iremos considerar de 15 a 60 kg/m².

5.2.3 RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.2.3.1 Resultados

De forma a poder comparar os custos, em €/m², de estruturas de cobertura em aço e GLULAM foram feitas duas simulações nas quais se minoraram e majoraram os vários rendimentos. Deste modo, obteve-se um intervalo dentro do qual irão variar os custos para as estruturas de aço e GLULAM. É obvio que estes limites são meramente indicativos pois é muito pouco provável num projecto os parâmetros estarem simultaneamente todos minorados ou majorados.

Os valores obtidos apresentam-se nos quadros 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, abaixo indicados.

Quadro 5.8 – Ficha de custos de estruturas de GLULAM com rendimentos minorados

Estrutura de cobertura em GLULAM				Ficha de custo nº 4	
				Data - Junho 2008	
Recurso	Un.	Quantidade	Custo Simples	Totais	%
<u>MATERIAIS</u>					
GLULAM	m ³ /m ³	1,05	430 €/m ³	451,50 €/m ³	62,36%
Ligações metálicas	kg/m ³	15,00	1,5 €/kg	22,50 €/m ³	3,11%
Tratamento por pintura	m ² /m ³	10,00	10 €/m ²	100,00 €/m ³	13,81%
Total de materiais				574,00 €/m ³	79,28%
<u>MÃO-DE-OBRA</u>	H/m ³	*	*	150 €/m ³	20,72%
<u>EQUIPAMENTOS</u>	H/m ³	*	*		
Total de mão-de-obra e equipamentos				150 €/m ³	20,72%
Total Global				724,00 €/m ³	100,00%
Rendimento 0,06 m³/m²				43,44 €/m²	

* Valores não determinados

Quadro 5.9 – Ficha de custos de estruturas de GLULAM com rendimentos majorados

Estrutura de cobertura em GLULAM				Ficha de custo nº 5	
				Data - Junho 2008	
Recurso	Un.	Quantidade	Custo Simples	Totais	%
<u>MATERIAIS</u>					
GLULAM	m ³ /m ³	1,05	650 €/m ³	682,50 €/m ³	49,28%
Ligações metálicas	kg/m ³	25,00	3,9 €/kg	97,50 €/m ³	7,04%
Tratamento por pintura	m ² /m ³	17,00	15 €/m ²	255,00 €/m ³	18,41%
Total de materiais				1.035,00 €/m ³	74,73%
<u>MÃO-DE-OBRA</u>	H/m ³	*	*	350 €/m ³	25,27%
<u>EQUIPAMENTOS</u>	H/m ³	*	*		
Total de mão-de-obra e equipamentos				350 €/m ³	25,27%
Total Global				1.385,00 €/m ³	100,00%
Rendimento 0,2 m³/m²				277,00 €/m²	

* Valores não determinados

Quadro 5.10 – Ficha de custos de estruturas de aço com rendimentos minorados

Estrutura de cobertura em Aço				Ficha de custo n° 6	
				Data - Junho 2008	
Recurso	Un.	Quantidade	Custo Simples	Totais	%
<u>MATERIAIS</u>					
Perfis	kg/kg	1,05	1,35 €/kg	1,42 €/kg	48,17%
Ligações metálicas	kg/kg	0,05	2,5 €/kg	0,13 €/kg	4,25%
Tratamento por pintura	m ² /kg	0,04	10 €/m ²	0,40 €/kg	13,59%
Total de materiais				1,94 €/kg	66,02%
<u>MÃO-DO OBRA</u>	H/kg	*	*	1 €/kg	33,98%
<u>EQUIPAMENTOS</u>	H/kg	*	*		
Total de mão-de-obra e equipamentos				1 €/kg	33,98%
Total Global				2,94 €/kg	100,00%
Rendimento				15 kg/m²	44,14 €/m²

* Valores não determinados

Quadro 5.11 – Ficha de custos de estruturas de aço com rendimentos majorados

Estrutura de cobertura em Aço				Ficha de custo n° 7	
				Data - Junho 2008	
Recurso	Un.	Quantidade	Custo Simples	Totais	%
<u>MATERIAIS</u>					
Perfis	kg/kg	1,05	1,35 €/kg	1,42 €/kg	31,10%
Ligações metálicas	kg/kg	0,08	3 €/kg	0,24 €/kg	5,27%
Tratamento por pintura	m ² /kg	0,06	15 €/m ²	0,90 €/kg	19,75%
Total de materiais				2,56 €/kg	56,12%
<u>MÃO-DE-OBRA</u>	H/kg	*	*	2 €/kg	43,88%
<u>EQUIPAMENTOS</u>	H/kg	*	*		
Total de mão-de-obra e equipamentos				2 €/kg	43,88%
Total Global				4,56 €/kg	100,00%
Rendimento				60 kg/m²	273,45 €/m²

* Valores não determinados

Desta forma, chegou-se a um intervalo de aproximadamente 45 a 280 €/m² para estruturas de cobertura em GLULAM e 45 a 275 €/m² para estruturas de cobertura em aço.

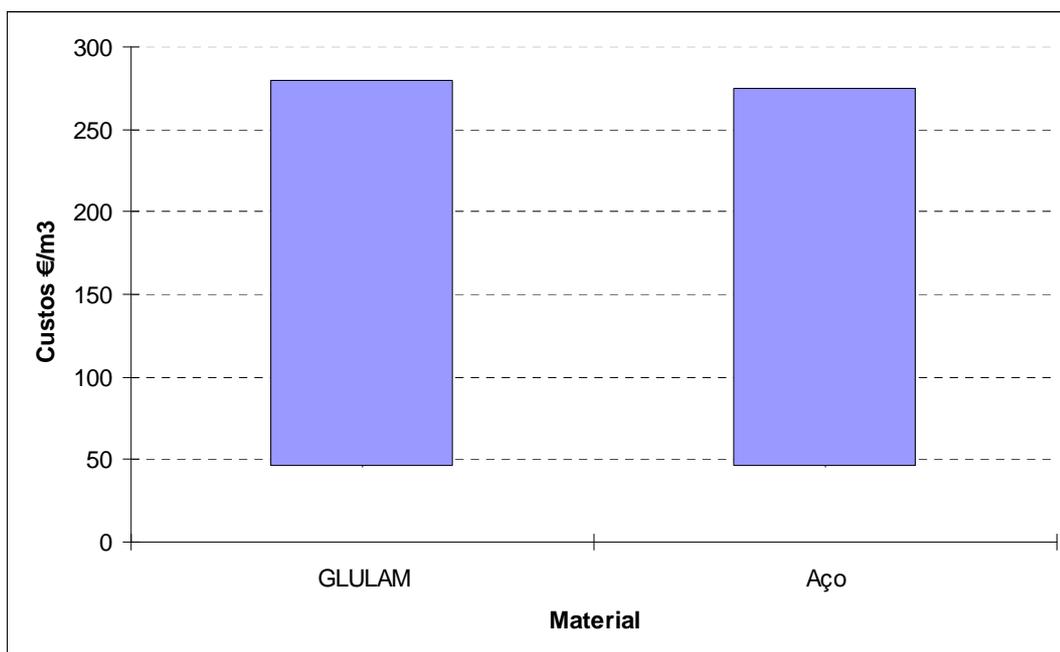


Figura 5.5 – Gráfico resumo dos custos de estruturas de cobertura em aço e GLULAM

Durante a pesquisa de mercado, não foi possível obter valores muito precisos para o custo unitário em €/m². Contudo uma empresa portuguesa afirmou que para estruturas de cobertura com grande vão em GLULAM o custo pode variar entre os 70 e os 300 €/m². Este dado vem a reforçar a validade dos valores obtidos através das fichas de custos.

No caso das estruturas em aço, o único valor indicativo fornecido por uma empresa de construção em estruturas metálicas foi o de 190000€ para uma área de 29m por 69m, isto é, aproximadamente 95 €/m², estando dentro do intervalo obtido.

5.2.3.2 Conclusões

Ao longo da pesquisa de mercado foi prementória a diferença do nível de desenvolvimento entre a indústria da construção em aço e a indústria da construção em GLULAM. Logo no início, aquando da definição das empresas a contactar, ao realizar uma pesquisa nas páginas amarelas, apenas se obteve 7 referências para estruturas de madeira enquanto que para estruturas metálicas se obtiveram 276. Esta diferença está igualmente patente na dimensão das empresas em questão pois verifica-se a presença de empresas com grande dimensão no sector das estruturas metálicas, como a Martifer por exemplo, enquanto que nas estruturas de GLULAM apenas se verifica a existência de algumas empresas de dimensão média. O facto de a amplitude do intervalo dos custos de construção de estruturas de cobertura em GLULAM ser praticamente o dobro é um reflexo das diferenças entre os dois mercados.

O mercado de GLULAM revelou-se bastante especulativo, principalmente no que diz respeito à matéria-prima. Efectivamente verificou-se uma variação de quase 50% no preço da GLULAM dependendo da empresa contactada. Numa das empresas contactadas, no espaço de uma semana,

verificou-se uma alteração de 432 €/m³ para 479 €/m³ sem que houvesse aparentemente algum motivo que o justificasse. Isto não se verifica para o aço, onde apesar de o preço do aço estar em franca subida, o preço de venda não varia além de 5%.

Outra característica do mercado de GLULAM é a quase inexistência de produção nacional. Efectivamente, durante a pesquisa, verificou-se que grande parte da GLULAM tem origem ou em Espanha ou em outros países europeus com destaque para os escandinavos. Isto leva ao encarecimento do material, devido ao custo associado ao transporte e ao aumento de intermediários, e a uma diminuição da qualidade do produto pois há um menor controlo de qualidade.

Verifica-se também um relativo desconhecimento do projecto de estruturas de GLULAM, estando as soluções existentes limitadas a uma série de soluções tipificadas, revelando o mercado uma dificuldade na execução de estruturas não convencionais.

O mercado de GLULAM revela ser um mercado pouco regulado, onde existe uma quase exclusividade de concepção/construção. Não há uma prática consolidada, levando a que cada caso seja um caso tornando o processo menos claro e criando espaço para uma maior especulação.

Por seu lado, o mercado de estruturas metálicas, e especialmente o de estruturas em aço, revela ser um mercado muito mais consolidado, sendo que na comparação com outros materiais estruturais apenas fica atrás do mercado do betão armado.

Efectivamente, ao longo da pesquisa, observou-se uma maior oferta de estruturas pré-fabricadas em aço, tanto em termos de forma com em termos vão. Esta maior oferta de estruturas pré-fabricadas leva à diminuição dos custos, ao mesmo tempo que se atinge um maior equilíbrio nos preços.

Outra característica observada é que, ao contrário da construção em GLULAM, existe uma maior prática de construção com projecto exterior. Este facto funciona como indicador não só de um mercado mais desenvolvido mas revela também um maior conhecimento por parte dos intervenientes, sobretudo projectistas.

Em conclusão, considera-se que o custo de construção de estruturas de cobertura em aço e GLULAM, para um mesmo sistema estrutural e um mesmo vão, é semelhante.

A grande largura do intervalo dos valores de custo encontrados pode justificar-se com base no mercado relativamente pouco concorrencial existente em Portugal, e na enorme influência que os parâmetros da concepção ao nível da forma e dos sistemas estruturais adoptados tem sobre o custo unitário das soluções.

5.3 SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE CADA UM DOS MATERIAIS

Apresenta-se de seguida uma síntese das principais características de aço e GLULAM em relação aos parâmetros estudados no quarto e quinto capítulos deste trabalho.

De modo a permitir uma maior facilidade na interpretação, os dados são agrupados em três tabelas segundo os seguintes temas: (a) Propriedades mecânicas dos materiais; (b) propriedades físicas; (c) sustentabilidade; (d) processo construtivo; (e) custos.

Quadro 5.12 – Quadro resumo das propriedades mecânicas dos materiais

Propriedades físicas dos materiais	GLULAM	Aço
1) Cargas	- A GLULAM possui um peso próprio inferior ao do aço, o que leva a uma redução das cargas consideradas em projecto	
2) Compressão	- Resistência à compressão paralela às fibras de 16 a 23 MPa. - Resistência à compressão perpendicular às fibras de 4,3 a 5,7 MPa.	- O aço estrutural, segundo o Eurocódigo 3, possui uma resistência à tracção, compressão e flexão entre 350 e 550 MPa. - O módulo de elasticidade é de cerca de 210000 MPa
3) Tracção	- Resistência à tracção paralela às fibras de 8 a 18 MPa. - Resistência à tracção perpendicular às fibras de 0,3 a 0,4 MPa.	
4) Flexão	- Resistência à flexão entre 14 e 30 MPa.	
5) Módulo de elasticidade	- Varia entre 7000 e 12000 MPa	
6) Factores que influenciam as propriedades mecânicas dos materiais	- A GLULAM é influenciada pelos seguintes factores: (a) propriedades mecânicas da espécie de madeira; (b) posição das lamelas; (c) distribuição, tamanho e número de nós nas lamelas; (d) inclinação das fibras nas lamelas; (e) eficiências das juntas.	- O aço é influenciado principalmente pela composição química e pelo processo termomecânico através do qual se dá a forma final material.

Quadro 5.13 – Quadro resumo das propriedades físicas dos materiais

Propriedades mecânica dos materiais	GLULAM	Aço
1) Densidade	- A GLULAM possui uma densidade de aproximadamente 400 a 500 kg/m ³ .	- O aço possui uma densidade relativamente fixa de aproximadamente 8000 kg/m ³ . - Para um mesmo projecto, as estruturas de GLULAM são, globalmente, mais pesadas que as estruturas de aço. Contudo numa peça linear de resistência equivalente, o aço é 1,2 a 3 vezes mais pesado que a GLULAM
2) Teor em água	- A madeira sofre variações dimensionais em função do teor em a. - Acima dos 20% de teor em água é necessário ter cuidados especiais de forma a impedir a degradação da madeira.	
3) Propriedades térmicas	- Condutividade térmica de 0,10 a 0,20 W/m.K. - Calor específico de 1200 J/(Kg.K). - Coeficiente de expansão térmica de 3 a 6 x10 ⁻⁶ .	- Condutividade térmica de 53 W/m.K, relativamente fixa. - Calor específico de 500 J/(Kg.K). - Coeficiente de expansão térmica de 11 a 13 x10 ⁻⁶ . - O aço possui um comportamento térmico bastante inferior ao da madeira. Não só sofre alterações dimensionais significativas com a variação de temperatura, como transmite o calor muito mais depressa que a madeira, o que o torna num mau isolante térmico.
4) Comportamento acústico	- Possui um NRC entre 0,05 a 0,15. - Para o uso em pavilhões	- Possui um NRC entre 0,00 a 0,10.

	multifunções, a GLULAM possui um comportamento acústico superior.	
5) Comportamento ao fogo	<ul style="list-style-type: none">- Carboniza a aproximadamente 6mm por minuto.- A secção não carbonizada mantém a sua resistência.- Pode ser dimensionada de forma a obter a resistência ao fogo pretendida (sobredimensionamento).	<ul style="list-style-type: none">- Começa a perder a sua capacidade resistente aos 200°C.- Aos 700 °C só possui 10% da sua capacidade resistente inicial.
6) Resistência química	<ul style="list-style-type: none">- Resiste a grande parte dos ácidos, não sendo afectada pelos cloretos que são o principal químico presente em piscinas.	<ul style="list-style-type: none">- O aço é afectado pelos ácidos, deteriorando a sua forma e resistência.- Na presença de humidade dá-se o fenómeno da corrosão.

Quadro 5.14 – Quadro resumo das propriedades relacionadas com a sustentabilidade dos materiais

Propriedades mecânica dos materiais	GLULAM	Aço
1) Fixação de carbono	- Para produzir 1kg de madeira, uma árvore absorve 1,47kg de CO ₂ e liberta 1,07kg de O ₂ para a atmosfera	- O aço não fixa carbono.
2) Avaliação do ciclo de vida	- Na construção de um edifício em madeira tem-se uma libertação de carbono 26% inferior à da construção em aço.	
3) Energia incorporada	- Possui uma energia incorporada de 4,6 MJ/kg.	- Possui uma energia incorporada de 35 MJ/kg.
4) Durabilidade	- Com uma correcta manutenção tem um tempo útil de vida apropriado à maior parte das estruturas.	- Semelhante à GLULAM.
5) Eficiência energética		- Estudos demonstram que o aço tem uma condutividade térmica 400 vezes superior à da madeira. Este facto leva à existência de pontes térmicas sendo então necessário maiores gastos energéticos para aquecimento e arrefecimento.

Quadro 5.15 – Quadro resumo das propriedades relacionadas com processo construtivo e com custos

Propriedades mecânica dos materiais	GLULAM	Aço
1) Execução da estrutura	<ul style="list-style-type: none"> - Devido a um peso próprio menor torna-se mais fácil o seu manuseio em obra. - A GLULAM deve ser protegida do sol, chuva e humidade, precisando de um cuidado especial com o transporte e armazenamento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Devido ao seu peso elevado, são necessárias guias para mover os perfis em obra. São necessárias ferramentas específicas, especialmente para soldar. - Apesar de os perfis não sofrerem deformações, são necessárias medidas especiais no armazenamento para evitar a corrosão.
2) Transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Os custos de transporte são baixos devido ao peso relativamente reduzido. - Os elementos de grande comprimento podem ser divididos em várias partes e unidos em obra. 	<ul style="list-style-type: none"> - Os custos de transporte são elevados. Um mesmo camião transporta menos m³ de aço que de GLULAM.
3) Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> - A madeira necessita de tratamentos periódicos contra as condições de humidade e o ataque biológico. 	<ul style="list-style-type: none"> - O aço precisa de pinturas de manutenção periódicas de forma a impedir a corrosão dos perfis.
4) Custos	<ul style="list-style-type: none"> - O custo de construção de estruturas de cobertura em GLULAM varia entre 45 a 280 €/m² dependendo do tipo de sistema estrutural, forma e vão. 	<ul style="list-style-type: none"> - O custo de construção de estruturas de cobertura em aço varia entre 40 a 180 €/m².

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A escolha do material e do sistema estrutural a adoptar numa cobertura de grande vão constitui, na grande maioria dos casos, o ponto crítico do projecto da estrutura. Têm sido usados diferentes técnicas e materiais para vencer a distância entre apoios, contudo a procura da solução mais eficiente continua a ser correntemente a principal dificuldade dos projectistas. Ao longo dos vários capítulos desta tese pretendeu-se apresentar os principais critérios que poderão ser usados na comparação de soluções estruturais em aço e em madeira lamelada colada para coberturas de médio e grande vão, procurando dessa forma sintetizar o conhecimento neste campo.

Na definição do sistema estrutural, as variáveis mais importantes são a forma da cobertura, o vão a vencer e o material estrutural, sendo a conciliação deste três factores essencial para o bom desempenho da estrutura. Efectivamente, existem várias maneiras de vencer um determinado vão. Contudo, os vários sistemas possuem um intervalo para o qual representam as soluções mais interessantes, quer do ponto de vista técnico, quer económico. Fora deste intervalo, apesar de ser possível a sua execução, tornam-se tecnicamente desajustadas e economicamente menos vantajosas. Por exemplo, conforme se demonstra neste trabalho, enquanto que um pórtico é uma excelente solução para um vão de 30m, é desaconselhável para vãos superiores a 40m devendo nesse caso pensar-se em outro tipo de sistema estrutural. Assim, torna-se importante uma colaboração, desde o início do projecto, entre o engenheiro e o arquitecto. Constitui uma obrigação profissional fundamental do engenheiro de estruturas passar este tipo de conhecimento ao arquitecto, de forma a auxiliá-lo na concepção da forma, procurando otimizar ao máximo os recursos disponíveis.

Como resultado do estudo efectuado, tendo em consideração as limitações ao nível do conhecimento técnico que o nosso país possui na área do lamelado colado concluiu-se que, para a construção de coberturas de grande vão em Portugal, os sistemas estruturais mais adequados são os arcos, as cúpulas e as estruturas articuladas planas.

Em termo de qualidade arquitectónica dos espaços projectados, a GLULAM possui claras vantagens intrínsecas sobre o aço. A GLULAM conserva a aparência da madeira contribuindo para a criação de um ambiente mais quente e visualmente mais agradável. Mesmo em termo de forma, com a GLULAM, é possível obter perfis com vários tipos de formas, sendo o limite a imaginação do arquitecto.

Além da forma e do sistema estrutural escolhido, é também importante a relação deste com o material estrutural. Enquanto que a execução de um arco em GLULAM de alma cheia é uma solução excelente

pois permite tirar o máximo aproveitamento das características do material, o mesmo já não se aplica ao uso de um perfil de aço. Isto deve-se à dificuldade inerente ao fabrico e transporte de um elemento em aço com esta forma, e que torna o seu custo incontrolável. Uma maneira de ultrapassar este problema pode ser, por exemplo, o uso de arcos com elementos articulados, reduzindo assim os respectivos pesos e custo de fabrico. Desta forma, além de um conhecimento profundo dos sistemas estruturais, é também necessário conhecer bem o material.

Neste trabalho, comparou-se a GLULAM e o aço em 3 campos diferentes: (a) o estudo das propriedades mecânicas; (b) o estudo das propriedades físicas; (c) a avaliação da sustentabilidade.

As propriedades mecânicas dos dois materiais, encontram-se bem definidas de acordo com as mais recentes normas europeias, garantindo a respectiva qualidade. No parâmetro do peso próprio, a GLULAM revela-se mais vantajosa possuindo um valor bastante mais baixo do que o aço. Contudo, o aço é muito mais resistente do que a madeira em relação aos diferentes esforços estudados. Por outro lado, o valor da resistência não é suficiente para avaliar a melhor ou pior qualidades de uma dada solução. É também importante a relação entre a capacidade resistente e o peso da estrutura. Das obras de referência consultadas foi possível chegar à conclusão que o GLULAM pode ser 20% mais leve do que o aço para uma mesma capacidade resistente podendo, em alguns casos, este valor ainda ser mais elevado. Contudo, para a GLULAM poder igualar a resistência do aço têm que ser usadas secções de maiores dimensões. O que se verifica no mercado é que os produtores fornecem tabelas onde são indicadas as capacidades resistentes em função da secção transversal. Resumindo, na fase de projecto é igualmente possível o uso do aço e de GLULAM desde que se considerem as limitações inerentes a cada um dos dois materiais, principalmente em termos de dimensões.

Na comparação das propriedades físicas dos materiais, não foi possível concluir que um dos materiais seja melhor que o outro, possuindo ambos vantagens e desvantagens. As propriedades analisadas incluem a densidade, o teor em água da madeira, o comportamento térmico e acústico, o comportamento ao fogo e a resistência química.

Uma das desvantagens da GLULAM resulta do facto de os elementos estruturais em serviço sofrerem variações dimensionais significativas resultantes da variação dos teores de humidade e temperaturas dos locais bem como poderem experimentar processos de apodrecimento precoce em ambientes com humidade relativa elevada. Contudo, estes problemas poderão ser resolvidos se a GLULAM for colocada na estrutura com o teor em água adequado às condições de serviço e for aplicável um tratamento protector apropriado nas situações de ambientes muito agressivos do ponto de vista higrotérmico.

Em termos de comportamento térmico, a GLULAM revelou possuir melhores propriedades que o aço. Efectivamente a madeira revelou ser um bom isolante térmico e ao mesmo tempo não sofrer de variações significativas de dimensões resultantes apenas de mudanças de temperatura. Por seu lado, o aço tem uma condutividade térmica elevada, além de sofrer variações dimensionais consideráveis com as mudanças de temperatura. Uma maneira de evitar problemas com os ciclos de retracção e expansão térmica do aço consiste em prever folgas, na fase de projecto, que permitam à própria estrutura absorver esse tipo de deslocamentos de forma a evitar a introdução de novos esforços de origem geométrica.

O comportamento acústico, neste estudo, apenas é relevante nos casos em que o edifício se destine a ser usado por actividades que necessitem de boas características acústicas tal como, por exemplo, uma sala de concertos. Neste caso, um bom indicador de desempenho é, por exemplo, o NRC que está directamente ligado ao coeficiente de absorção sonora. Em princípio, quanto mais absorvente for um

material, melhores serão as suas capacidades acústicas. Tendo em consideração que o NRC da madeira varia entre 0,05 e 0,15 e o do aço entre 0,00 e 0,10, facilmente se pode concluir que a madeira possui um melhor comportamento. De qualquer maneira, um material apenas pode ser considerado absorvente quando possui um coeficiente de absorção sonora superior a 0,5 logo, tanto a madeira como o aço, poderão necessitar de ser complementados por acabamentos e revestimentos absorventes ou correctores acústicos adicionais.

Quanto ao comportamento ao fogo, verifica-se uma diferença significativa nos materiais sendo que a GLULAM demonstra ser mais segura em caso de incêndio. A GLULAM, ao contrário do aço, arde e sofre um processo relativamente lento de carbonização. A carbonização desenvolve-se assim a velocidade constante e adicionando isto ao facto de a parte não carbonizada manter as características estruturais intactas torna possível, na GLULAM, determinar precisamente quanto tempo esta mantém a sua integridade estrutural num incêndio. O aço por seu lado começa a perder resistência aos 200 °C e, aos 700 °C, só já possui 10% das suas capacidades iniciais. Isto leva a que, perante um incêndio, o aço perca as suas características muito rapidamente o que conduz ao rápido colapso de estruturas de aço sem protecção ao fogo adicional. De forma a corrigir esta situação, normalmente opta-se por envolver os elementos de aço com um material isolante, intumescente ou não.

Na resistência química, a GLULAM volta a ter um comportamento melhor. Enquanto que o aço é facilmente afectado pelos ácidos e bases a GLULAM apenas tem problemas com os ácidos e bases fortes. Isto torna-a especialmente indicada para situações de atmosferas muito agressivas como, por exemplo, piscinas ou armazéns de produtos químicos. Neste tipo de situações, o aço necessita de tratamentos especiais bastante mais dispendiosos bem como de operações de manutenção e limpeza frequentes e muito rigorosas.

Em termos da contribuição para uma construção mais sustentável, a GLULAM apresenta um melhor desempenho, quando comparada com o aço. Os lamelados colados são fabricados a partir de madeira que é um material reciclável, renovável e biodegradável. Além disso, a madeira é um fixador natural de carbono enquanto que o aço não possui esta característica. A reforçar esta conclusão, pode apontar-se também o facto de, nos vários indicadores considerados, não haver um em que a GLULAM tenha um desempenho inferior ao aço. Pode-se então concluir que a GLULAM demonstra ser um material ecológico com um excelente desempenho ambiental.

Além das características atrás referidas, também se apresenta neste trabalho o processo construtivo correntemente adoptado para cada um dos dois materiais. Deu-se particular destaque ao fabrico, ao transporte, à montagem e à manutenção das estruturas.

Neste âmbito, a GLULAM pode ter um melhor comportamento que o aço, dependendo das características do local. A aplicação e transporte da GLULAM é mais fácil devido ao seu peso inferior. Além disso, as ligações são mais fáceis de executar do que no aço. Se no aço for necessário proceder à soldadura é necessário dividir a tarefa em diversas zonas, aumentando assim significativamente o tempo de montagem. As estruturas de GLULAM podem ser divididas em peças de menores comprimento, e assim facilitar significativamente o seu transporte. Por exemplo, é comum dividir os arcos em vários segmentos que se montam rapidamente em obra. Em termos de manutenção, este critério não influencia na escolha uma vez que ambos os materiais precisam de manutenção periódica adequada.

Do estudo económico efectuado, concluiu-se que as estruturas de GLULAM podem ser competitivas com as de aço desde que o mercado se desenvolva de maneira a garantir um maior dinamismo, transparência e conhecimento da construção em GLULAM. Neste momento, a natureza especulativa

do mercado leva a que, muitas vezes, o custo de uma estrutura de GLULAM possa ser mais cara que a correspondente estrutura em aço podendo atingir, em alguns casos, quase o dobro do valor do aço. Contudo, nos casos mais correntes, o aço e a GLULAM apresentam preços bastante semelhantes.

Em suma, as estruturas de GLULAM e de aço revelam ambas serem excelentes soluções para estruturas de cobertura de grande vão. Ambas possuem vantagens e desvantagens inerentes à sua natureza contudo, pode concluir-se dos estudos efectuados que o uso da GLULAM acaba por ser mais interessante pelos seguintes motivos: (a) a GLULAM possui uma excelente qualidade estética natural que lhe confere um valor arquitectónico superior; (b) numa época de crescente sensibilização ambiental, a GLULAM é claramente um material mais sustentável; (c) o comportamento ao fogo da GLULAM é muito bom; (d) o tempo de execução da obra pode ser bastante encurtado se for usada uma solução com uma forte componente de prefabricação.

6.2 DIFICULDADES SENTIDAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi relativamente difícil obter informação sobre a construção em GLULAM. Enquanto que na parte de cálculo existe bastante oferta bibliográfica, no campo dos processos construtivos, sistemas construtivos e custos, verifica-se a quase completa inexistência de publicações. Isto acaba por ser um entrave ao desenvolvimento do mercado pois os projectistas têm dificuldade em validar e justificar as opções tomadas, ao mesmo tempo que não conseguem desenvolver e complementar o seu conhecimento de forma sustentada.

O mesmo foi sentido na análise de mercado aplicando-se com grande representatividade o velho ditado de que *“o segredo é a alma do negócio”*. Efectivamente, durante os diversos contactos efectuados verificou-se uma grande resistência em revelar os indicadores solicitados tendo sido apenas possível obter alguns valores como resultado de uma enorme persistência por parte do autor.

Espera-se que este trabalho permita adicionar um pouco mais de conhecimento e valor à construção em GLULAM, quer pelo conteúdo do trabalho, quer pelas referências bibliográficas recolhidas que poderão servir como ponto de partida para quem pretenda desenvolver um pouco mais o estudo do tema.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rincón, G., López, M. *Caracterización del comportamiento en flexión de vigas laminadas con pino Caribe*. Maio de 2003. <http://www.gusmarquez.info/laminado.pdf> (Acedido em Março de 2008)
- [2] Cruz, H., *Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, nº1 julho de 2007, pag. 45 a 56, LNEC, Lisboa.
- [3] Forest Products Laboratory. *Wood Handbook – Wood as an engineering material*. U.S. Department of Agriculture, Madison, WI, 1999.
- [4] Glued Laminated Timber Association. *Specifiers Guide*. <http://www.glulam.co.uk/specifiersGuide.htm> (Acedido em Março de 2008)
- [5] Botelho, J. *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [6] Rodrigues, R. *Construções antigas de Madeira: Experiência de obra e reforço estrutural*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2004.
- [7] Szucs, C., Terezo, R., Valle, A., Moraes, P. *Estruturas de Madeira*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [8] Timber Building in Australia, *Timber as a sustainable building material*, <http://oak.arch.utas.edu.au/tbia/default.asp> (Acedido em Março de 2008)
- [9] Pfeil, W., Pfeil, M. *Estruturas de Madeira*. LTC Editora, Rio de Janeiro, 2003.
- [10] <http://en.wikipedia.org> (Acedido em Abril de 2008)
- [11] Goetz, K., Hoor, D., Moehler, K., Natterer, J. *Timber Construction Sourcebook*. McGraw-Hill. New York, 1989.
- [12] Timber Research and Development Association (TRADA). *Wide span wood sports structures*. <http://www.puuinfo.ee/pdf/WideSpanWoodSports.pdf> (Acedido em Abril 2008)
- [13] Svenskt Limträ. *GLULAM Handbook on-line*. <http://www.svensktlimtra.se> (Acedido em Abril de 2008).
- [14] Cismasiu, I. *Apontamentos da cadeira de Estática*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa., Lisboa, 2006. http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/docentes/ildi/EST04/Aulas (Acedido em Abril de 2008)
- [15] Sousa, A., Melo, J. *Estruturas metálicas especiais*. Trabalho da cadeira de Tecnologia dos sistemas construtivos. Porto, FEUP, 2005.
- [16] Owens, G., Knowles, P. *Steel designer's manual*. Blackwell Science. Cambridge, 1992.
- [17] Vendrame, A. *Contribuição ao estudo das cúpulas treliçadas utilizando elementos tubulares em aço*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1999.

- [18] Straka, B. *Conclusions from theoretical analysis, construction and behaviour of timber spatial structures*. Agosto de 2000. <http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/6-1-1.pdf> (Acedido em Maio de 2008)
- [19] Burdzik, W. *Timber Design SIB310*. University of Pretoria, Pretoria, 2007.
- [20] Chen, W., Liew, J. *Civil Engineering Handbook*. CRC Press LLC, Boca Raton, 2003.
- [21] Alvarez, R., Martitegui, F. *Estructura de madera – Diseño y Calculo AITIM*, Madrid, 2000.
- [22] Pannoni, F. *Aços estruturais*. http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/A%C3%A7os_estruturais.pdf (Acedido em Maio de 2008)
- [23] Marutzky, R. *Glue-laminated timber*. <http://www.purbond.com/doc/literature/en/fraunhofer.pdf> (Acedido em Fevereiro de 2008)
- [24] AITC (American Institute of Timber Construction). *Superior Fire Resistance*. 2003. <http://www.aitc-glulam.org/shopcart/Pdf/superior%20fire%20resistance.pdf> (Acedido em Maio 2008)
- [25] Carvalho, A. *Sebenta da Disciplina de Acústica Ambiental e de Edifícios*. FEUP, Porto, 2006.
- [26] <http://www.nrcratings.com> (Acedido a Junho 2008)
- [27] *Apontamentos da Disciplina de Física da Construção*. FEUP, Porto, 2003.
- [28] Temperate Forest Foundation. 2007. <http://www.forestinfo.org/products/eco-links/16-2ClimateChange.pdf> (Acedido a Maio 2008)
- [29] Puetzman, M., Wilson, James. *Life-cycle analysis of wood products: cradle-to-grad LCI*. 2006. <http://www.corrim.org/reports/2005/swst/18.pdf> (Acedido a Maio 2008)
- [30] Timber Building in Australia. *Embodied Energy of timber*. http://oak.arch.utas.edu.au/tbia/view_article.asp?articleID=107 (Acedido em Maio de 2008)
- [31] Faria, J. Amorim. *Apontamentos da Disciplina de Gestão de obras*. FEUP, Porto, 2003.
- [32] Santos, F., Silva, L. *Estudo de viabilidade económica dos enformados a frio em pórticos industriais com travessas inclinadas*. http://www.cmm.pt/gcom/publicacoes/conf_nac/cn_181.pdf (Acedido em Junho de 2008)
- [33] <http://www.constructalia.com> (Acedido em Junho de 2008)