

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Clarissa Finamor Delgado

**IMPLEMENTAÇÃO DE PLANILHA ELETRÔNICA PARA APLICAÇÕES DA
NORMA ABNT NBR 7190:2022 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.
PARTE 1: CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO**

Porto Alegre, RS

2023

CLARISSA FINAMOR DELGADO

**IMPLEMENTAÇÃO DE PLANILHA ELETRÔNICA PARA APLICAÇÕES DA
NORMA ABNT NBR 7190:2022 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.
PARTE 1: CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentado à Comissão de Graduação do
Curso de Engenharia Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos Requisitos
para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Enio Carlos Mesacasa Júnior

Porto Alegre, RS

2023

CLARISSA FINAMOR DELGADO

**IMPLEMENTAÇÃO DE PLANILHA ELETRÔNICA PARA APLICAÇÕES DA
NORMA ABNT NBR 7190:2022 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.
PARTE 1: CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aprovado em Porto Alegre, 13 de setembro de 2023, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Enio Carlos Mesacasa Júnior – **Orientador**
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Alexandre Rodrigues Pacheco
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Felipe Pinto da Motta Quevedo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, RS
Setembro, 2023

Dedico este trabalho à minha mãe Paula,
por ser a minha principal motivação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha gratidão à UFRGS pela oportunidade de acesso a uma universidade pública e ao ensino de alta qualidade. Também desejo estender meus agradecimentos a todos os professores e profissionais com os quais tive a honra de interagir e trocar ideias dentro da universidade, contribuindo significativamente para o meu desenvolvimento acadêmico. Em especial, quero destacar meu orientador, o Professor Enio, cuja abordagem didática despertou meu interesse pela madeira como material estrutural. Além disso, desempenhou um papel fundamental em todo o processo de elaboração do meu trabalho de conclusão, oferecendo apoio constante e encontrando soluções para os desafios que surgiram ao longo desse percurso. Agradeço profundamente por sua orientação e assistência.

Agradeço também aos meus irmãos, Tiago e Tatiana, que sempre me apoiaram e torceram pelo meu sucesso, permanecendo ao meu lado, independentemente das circunstâncias.

Meu sincero agradecimento também vai para o meu namorado, Lucas, que acompanhou de perto todo o processo de desenvolvimento deste trabalho, sempre disponível para me ajudar e me apoiar, e mostrando compreensão em todos os momentos. Muito obrigada!

Não posso deixar de mencionar a família que ganhei recentemente, mas que me acolheu em momentos difíceis. Eliane, Almir, Rafael e Ayanie, agradeço profundamente por estarem sempre presentes. Seu apoio é de grande importância para mim.

Quero dedicar meu agradecimento especial à minha avó Suely, Vera e à minha mãe Paula. Embora não estejam tão próximas de mim no momento, durante toda a minha jornada acadêmica, elas foram a razão para que eu chegasse até aqui e continuam a ser minha motivação. Obrigada por tudo.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação e minha jornada até este ponto, incluindo meus amigos, colegas e todas as outras pessoas envolvidas.

“O amor calcula as horas por meses,
e os dias por anos; e cada pequena
ausência é uma eternidade.”

John Dryden

RESUMO

A madeira é um material que tem ganhado crescente destaque no contexto estrutural devido à sua notável relação entre peso e resistência, sua capacidade de retardar a propagação do fogo por meio de tratamentos apropriados e, sobretudo, por ser uma fonte totalmente renovável, o que o torna um elemento essencial para a promoção da sustentabilidade. Essa tendência de crescimento pode ser observada na recente atualização da norma NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira, que foi realizada no ano anterior, em 2022. Com o objetivo de incentivar, principalmente estudantes da área, os procedimentos de cálculo estipulados por essa norma foram incorporados em uma ferramenta de interface simplificada e dinâmica. Essa ferramenta permite a realização de verificações relacionadas à tração, compressão, flexão, cisalhamento e estabilidade, bem como cálculos envolvendo contraventamentos, ligações e situações de incêndio. A criação desta ferramenta se deu em resposta à existência de programas atualmente disponíveis que não estão em conformidade com a nova norma e ainda seguem os padrões da versão anterior, sendo utilizados de forma comparativa ou para dimensionamento. O resultado desse esforço é uma planilha eletrônica desenvolvida no Microsoft Excel, que abrange tabelas de resistências, cálculos independentes e automatizados, além de fornecer avisos em caso de inconsistências e oferecer orientações para auxiliar o usuário durante sua utilização. Para comprovar a eficácia e validade da planilha, foram incluídos exemplos práticos relacionados a cálculos de flexão simples oblíqua, compressão, flambagem e dimensionamento de ligações.

Palavras-chave: Madeira, planilha eletrônica, cálculos normativos, dimensionamento

ABSTRACT

Lumber is a material that is gaining increasing prominence in the structural context due to its remarkable weight and strength ratio, ability to slow the spread of fire through appropriate treatments and, above all, for being a totally renewable source, which makes it an essential element for the promotion of sustainability. This lumber trend can be seen in the recent update of standard NBR 7190 – Design of Lumber Structures, which was carried out the previous year, in 2022, were incorporated into a streamlined tool interface. This tool allows verifications related to tension, compression, bending, shear and stability, as well as calculations involving bracing, connections and fire scenario. This tool was created in response to the existence of currently available programs that do not comply with the new procedures and still follow the procedures of the previous version, being used in a comparative way or for dimensioning. The result of this effort is an electronic spreadsheet developed in Microsoft Excel, which includes resistance tables, independent and automated calculations, in addition to providing warnings in case of inconsistencies and offering guidance to assist the user during its use. To prove the efficiency and validity of the spreadsheet, practical examples related to calculations of simple oblique bending, compression, dimensioning buckling and connection were included.

Keywords: Lumber, spreadsheet, normative calculations, design

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	15
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	15
3	DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES	16
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1	A MADEIRA E SUA FUNÇÃO ESTRUTURAL	17
4.2	TIPOS DE MADEIRAS E SUAS FORMAS DE UTILIZAÇÃO	20
4.2.1	MADEIRA ROLIÇA	20
4.2.2	MADEIRA SERRADA	21
4.2.3	MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC)	22
4.2.4	MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)	23
4.2.5	MADEIRA LAMINADA COLADA (LVL)	25
4.3	PROPRIEDADES FÍSICAS	25
4.3.1	ANISOTROPIA	26
4.3.2	HIGROSCOPIA	26
4.3.3	TEOR DE UMIDADE	27
4.3.4	DENSIDADE	28
4.3.5	RETRATIBILIDADE	30
4.3.6	RESISTÊNCIA AO FOGO	31
4.3.7	DEFEITOS	32
4.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	33
4.4.1	COMPORTAMENTO NA COMPRESSÃO	33
4.4.2	COMPORTAMENTO NA TRAÇÃO	34
4.4.3	COMPORTAMENTO NA FLEXÃO	35

4.4.4	COMPORTAMENTO NO CISALHAMENTO.....	36
4.4.5	COMPORTAMENTO NA TORÇÃO	37
4.4.6	RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	37
4.4.7	DUREZA E FENDILHAMENTO	37
4.5	AÇÕES ATUANTES E COMBINAÇÕES DE PROJETO.....	39
4.5.1	AÇÕES ATUANTES	39
4.5.2	CLASSES DE CARREGAMENTOS E COMBINAÇÕES.....	39
5	CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA	42
5.1	CLASSES DE RESISTÊNCIA.....	42
5.2	VALORES DE REFERÊNCIA	45
5.2.1	CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ.....	45
5.2.2	VALORES REPRESENTATIVOS	46
5.2.3	VALOR DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA	47
5.2.4	COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO	48
5.2.5	COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO DE RESISTÊNCIAS	50
5.3	RESISTÊNCIA A TENSÕES NORMAIS	51
5.3.1	COMPRESSÃO AXIAL	51
5.3.2	COMPRESSÃO PERPENDICULAR.....	52
5.3.3	TRAÇÃO AXIAL.....	53
5.3.4	TRAÇÃO PERPENDICULAR	54
5.3.5	RESISTÊNCIA DAS TENSÕES INCLINADAS EM RELAÇÃO ÀS FIBRAS DA MADEIRA	54
5.3.6	RESISTÊNCIA À FLEXÃO	55
5.3.7	FLEXÃO SIMPLES RETA.....	55
5.3.8	FLEXÃO SIMPLES OBLÍQUA.....	57
5.3.9	FLEXOTRAÇÃO	58

5.3.10	FLEXOCOMPRESSÃO.....	59
5.4	CISALHAMENTO.....	59
5.4.1	CISALHAMENTO NAS LIGAÇÕES.....	59
5.4.2	CISALHAMENTO LONGITUDINAL EM VIGAS	60
5.4.3	VIGAS ENTALHADAS DE SEÇÃO RETANGULAR	60
5.5	ESTABILIDADE	61
5.5.1	CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE DE PEÇAS COMPRIMIDAS E FLEXOCOMPRIMIDAS	64
5.5.2	ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS DE SEÇÃO RETANGULAR	66
5.6	CONTRAVENTAMENTO	68
5.6.1	CONTRAVENTAMENTO EM PEÇAS COMPRIMIDAS.....	68
5.6.2	ESTABILIDADE GLOBAL DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM PARALELO.....	70
5.7	LIGAÇÕES.....	71
5.7.1	CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO.....	72
5.7.2	EMBUTIMENTO.....	73
5.7.3	CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO POR PINOS METÁLICOS	75
5.7.4	MOMENTO RESISTENTE	75
5.7.5	EFEITO DE GRUPO.....	76
5.7.6	ESPAÇAMENTO MÍNIMO ENTRE ELEMENTOS DE LIGAÇÃO.....	77
5.7.7	PRÉ FURAÇÃO DAS LIGAÇÕES	78
5.7.8	RIGIDEZ AXIAL	79
5.7.9	LIGAÇÕES DE ELEMENTOS EM MADEIRA COM PINOS METÁLICOS ..	81
5.7.10	LIGAÇÕES DE ELEMENTOS DE MADEIRA E AÇO.....	85
5.7.11	LIGAÇÕES DE ELEMENTOS EM MADEIRA COM ANÉIS METÁLICOS ..	88
5.8	SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	90

6	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	92
6.1	EXEMPLO 1: TERÇA DE COBERTURA.....	92
6.1.1	DADOS DA TABELA.....	95
6.2	EXEMPLO 2: LIGAÇÃO DO BANZO INFERIOR DA TRELIÇA.....	101
6.2.1	DADOS DA TABELA.....	102
6.3	EXEMPLO 3: VERIFICAÇÃO DO PILAR	106
6.3.1	DADOS DA TABELA.....	107
6.4	EXEMPLO 4: PENDURAL TRACIONADO.....	113
6.4.1	DADOS DA TABELA.....	114
7	CONCLUSÃO.....	120
7.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
	REFERÊNCIAS.....	122
	ANEXO A.....	127

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia a madeira é um dos materiais mais utilizados, podendo ser empregada em diferentes tipos de ambientes, com distintas finalidades construtivas como, por exemplo, elementos estruturais e de vedação, em acabamentos internos como as esquadrias, forros e pisos, com destaque ao seu isolamento térmico e acústico e, ainda, com utilidade de uso temporário em formas de concreto, andaimes e escoramentos. No Brasil, conforme Calil Jr. et al., (2019), a madeira é empregada como material estrutural principalmente em cobertura, transposição de obstáculos, armazenamento, linhas de transmissão, obras pontuarias, dentre outras.

De acordo com Rebello (2011), as primeiras estruturas de madeira eram constituídas basicamente de vigas retas, sendo executadas com orientações de conhecimentos empíricos. A necessidade de cobrir espaços cada vez maiores tornou as estruturas mais complexas, sendo assim, as vigas retas foram substituídas por treliças, tendo grande utilização no período romano, principalmente na execução de grandes telhados. Já no Brasil, a madeira foi protagonista de boa parte da colonização. Antes da chegada dos colonizadores portugueses, os únicos habitantes em terras brasileiras eram os índios, que usufruíam do espaço disponível em forma diferente dos europeus.

De acordo com Correia (2009), a madeira tem se tornado um material de grande interesse para aplicações estruturais devido às suas notáveis propriedades de resistência e rigidez. Além disso, a madeira é um recurso natural amplamente disponível em diversas regiões do mundo. Ao contrário de outros materiais, a madeira possui a vantagem de ser renovável, o que contribui para a sustentabilidade.

Segundo Remade (2009), é de extrema importância possuir um sólido conhecimento do material para a realização de construções de qualidade. A madeira apresenta diversas características particulares devido à sua natureza anisotrópica e às variações nas propriedades mecânicas relacionadas ao teor de umidade do material e do ambiente circundante.

Visando mitigar os impactos ambientais decorrentes das emissões de dióxido de carbono, alguns países têm promovido o uso da madeira na indústria da construção. Esse estímulo tem sido implementado por meio de medidas legislativas que estabelecem metas para assegurar que as construções feitas com madeira contribuam para a diminuição desses impactos ambientais (JONSSON, 2009).

No entanto, atualmente, persiste um considerável preconceito em relação à adoção da madeira como elemento estrutural. Esse fenômeno encontra justificativa na carência de familiaridade com o material e na ausência de projetos específicos. É comum que as estruturas de madeira sejam concebidas por profissionais como pedreiros e carpinteiros, cuja formação geralmente não abrange a capacidade de projetar, mas sim de executar. A responsabilidade por essa problemática também é compartilhada pelas instituições de ensino superior, as quais frequentemente não preparam adequadamente os engenheiros civis para o desenvolvimento de projetos estruturais em madeira. Isso resulta em lacunas e descompasso na elaboração de projetos de estruturas de madeira, comprometendo o desempenho das construções em questão (GESUALDO, 2003).

Recentemente, norma brasileira ABNT NBR7190, que estava em vigor desde 1997, passou por um processo de revisão e atualização bastante significativo. A versão publicada em 2022 adotou como principal referência os procedimentos estabelecidos pelas normas europeias, em particular a EUROCODE 5.

No contexto educacional, existe uma variedade de programas destinados ao dimensionamento e à verificação de estruturas de madeira, como por exemplo o JWOOD. Muitos desses programas são disponibilizados gratuitamente para uso acadêmico, entretanto, a maioria desses programas não está em conformidade com a nova norma, o que pode comprometer a confiabilidade dos processos de cálculo.

A adoção de ferramentas e *software* deve ser considerado como um meio de facilitar o processo para estudantes, visando tornar as verificações menos custosas e exaustivas, ao mesmo tempo que promove o aprendizado prático sobre estruturas ao longo da formação acadêmica. Isso possibilita a integração entre a teoria e a prática, enriquecendo a compreensão do tema. Nesse contexto, o emprego de uma ferramenta que automatiza os cálculos estipulados pela ABNT NBR 7190 "Projeto de estruturas de madeira" de 2022 busca oferecer apoio aos alunos na sua familiarização com a norma atual e na transição para as suas orientações de maneira descomplicada e sem custo. Além de permitir que os alunos economizem tempo para também explorar as características particulares dos projetos em estruturas de madeira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho se resume na elaboração de uma planilha eletrônica utilizando a plataforma Excel da Microsoft, com o intuito principal de fornecer suporte tanto a alunos quanto a professores ao longo das etapas de verificação padronizadas pela norma técnica ABNT NBR 7190:2022-1.

2.2 Objetivo específico

- Analisar e compreender o procedimento de cálculo estabelecido na norma atual, bem como identificar as diferenças e variações em relação às verificações presentes na norma de 1997, visando viabilizar a implementação da ferramenta proposta.

- Desenvolver uma planilha de verificações que seja sistemática e bem organizada, englobando os principais procedimentos definidos pela norma, tais como a avaliação dos estados limites últimos em elementos de madeira de seção retangular (tração, compressão, flexão, cisalhamento e estabilidade), análise de contraventamento, cálculos de ligações por pinos e anéis metálicos, bem como a consideração de situações de incêndio. Adicionalmente, realizar testes para validar a eficácia e precisão da ferramenta proposta.

- Contribuir para o âmbito educacional ao oferecer suporte a estudantes na compreensão e realização das verificações exigidas pela norma. Essa ferramenta se destina a tornar as análises mais acessíveis e práticas, permitindo um melhor enfrentamento das exigências normativas.

- Adicionalmente, realizar a verificação e teste da planilha por meio de comparações com problemas encontrados em livros e/ou outras fontes de referência no âmbito do dimensionamento. Isso envolverá a análise da precisão dos resultados obtidos pela planilha em relação às soluções apresentadas em fontes reconhecidas, contribuindo para a verificação da confiabilidade e eficácia da ferramenta desenvolvida.

3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES

Algumas das delimitações deste trabalho se darão seguinte maneira:

- Os cálculos serão realizados exclusivamente para madeiras com seção retangular, conforme as classificações normativas estabelecidas na NBR 7190:2022-1. Portanto, os coeficientes aplicáveis a outras seções não serão abordados neste trabalho e nem calculados pela planilha;
- Neste trabalho, não serão abordadas verificações relacionadas aos estados limites de serviço, concentrando-se exclusivamente nos estados limites últimos.

As limitações deste trabalho incluem:

- Embora a planilha execute verificações e cálculos, é responsabilidade do usuário compreender quais são os valores corretos que devem ser inseridos para obter resultados precisos nas verificações. Em alguns casos, a planilha pode emitir avisos de inconsistência que não necessariamente precisam ser corrigidos.
- Algumas limitações, que variam de acordo com o tipo de ligação e o tipo de madeira, como o cálculo de rigidez e o valor específico k_{mod3} para MLC conforme descrito na norma, não são automaticamente gerenciadas pela planilha. O usuário deve estar ciente de que é necessário inserir dados manualmente, se necessário, e reportar quaisquer erros significativos, já que a planilha está em constante desenvolvimento visando a sua melhoria contínua.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A madeira e sua função estrutural

A madeira foi o primeiro material de construção e sua utilização influenciou nos estudos de materiais alternativos que acabaram por colocá-la em segundo plano no setor da construção civil. Todavia, com o aumento tecnológico e com novas técnicas de uso de diferentes tipos de materiais, a madeira tem se mostrado um material com alto teor de atratividade que podem posicioná-la novamente nos projetos arquitetônicos. (CORDEIRO JÚNIOR; SILVA; SOARES, 2017).

Nesse sentido, Melo (2002) salienta, também, que a madeira sempre se manteve presente na vida humana, sendo utilizada – na grande maioria das vezes – para construção de abrigo, fonte de energia e sustento. Foi por meio da madeira que se tornou viável o desenvolvimento das grandes civilizações para a construção de casas e abrigo. Para garantir a resistência e proteção as construções eram feitas com os troncos, a utilização da madeira na construção de abrigo se tornou fundamental para que pudesse constituir novas técnicas de construção para formar os povoados, atualmente conhecido como cidades.

A madeira é um material que suporta esforços de compressão e de tração, e conseqüentemente, também apresenta um excelente desempenho à flexão, possibilitando assim sua utilização como elemento estrutural mais comumente em vigas, pilares, asnas, grelhas, sendo utilizado como cofragem. (CORREIA, 2009).

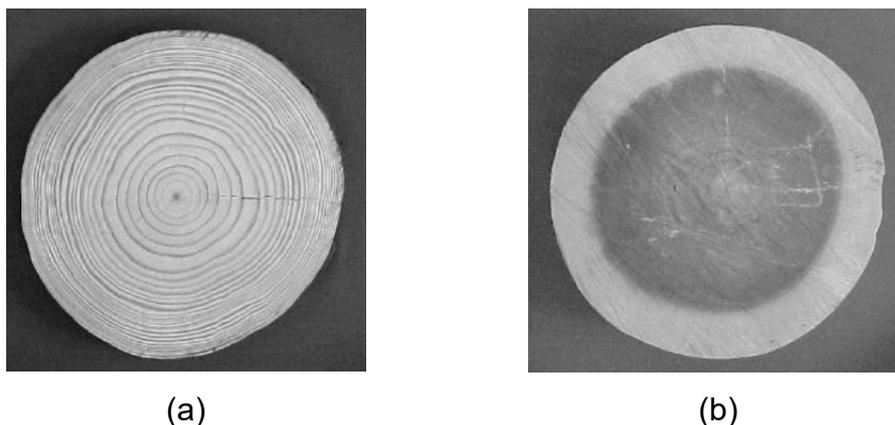
A madeira é um material originário do tecido vegetal com características intrínsecas definidas pela fisiologia da árvore e, conforme Pfeil e Pfeil (2003) pode ser considerado um material de construção muito antigo, pois é de fácil manipulação e de grande fartura na natureza. A madeira tem um processo de formação que se inicia nas raízes. A partir delas é recolhida a seiva bruta (água + sais minerais) que em movimento ascendente pelo alburno, atinge as folhas. Na presença de luz, calor e absorção de gás carbônico ocorre a fotossíntese havendo a formação da seiva elaborada. Esta, em movimento descendente (pela periferia) e horizontal para o centro vai se depositando no lenho, tornando-o consistente como madeira.

Nesse sentido, cabe salientar que a madeira é um recurso natural, sendo um material heterogêneo que contém múltiplos tipos de células que podem classificar diferentes materiais. Sendo assim, essas células são impressões e registros que uma planta contém no sentido radial, tangencial e longitudinal, ligadas entre si pela lignina,

formando o tecido lenhoso. Tais alterações, tanto nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira, são comuns e ocorrem em grande proporção em decorrência da idade, fatores genéticos e ambientais. (COSTA, 2003).

O crescimento primário das árvores é predominantemente vertical e contínuo, sujeito a variações decorrentes das condições climáticas e da espécie de madeira, conforme Calil Jr. et al., (2019). Além dessa expansão vertical, ocorre também um aumento no diâmetro do tronco, influenciado pelo crescimento das camadas periféricas, responsáveis pelo crescimento horizontal, conhecido como câmbio. Ao observar um corte transversal de um tronco de árvore, essas camadas são visíveis anualmente na forma de anéis de crescimento. Cada anel exibe uma madeira mais clara, menos densa e resistente, resultado do crescimento acelerado durante a primavera/verão, em contraste com o crescimento mais lento no outono/inverno. A Figura 1 ilustra essa diferenciação de forma mais acentuada nas coníferas, que se originam de regiões com marcadas variações sazonais. Além disso, a Figura 1 também evidencia que o cerne, a região mais escura formada pela acumulação de substâncias ao longo da vida da árvore, é mais proeminente nas dicotiledôneas (ou folhosas).

Figura 1 - Seções transversais de tronco de árvores das espécies (a) coníferas e (b) dicotiledôneas

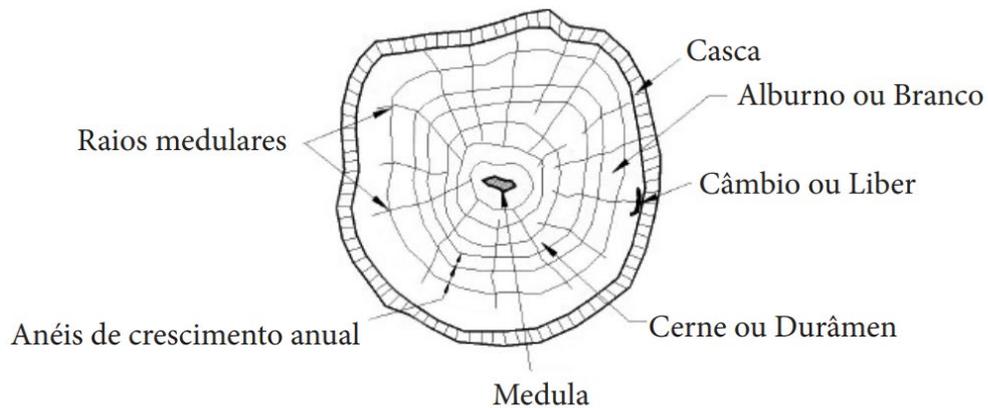


Fonte: Calil Jr et al., (2019)

No que se refere ao padrão de crescimento, de acordo com Calil Jr. et al., (2019), as árvores podem ser categorizadas como de crescimento endógeno ou exógeno. As árvores de crescimento endógeno são aquelas em que o desenvolvimento do caule ocorre de dentro para fora, como é o caso de bambus e

palmeiras. Por outro lado, as árvores de crescimento exógeno são aquelas em que o caule se desenvolve de fora para dentro, ao longo das estações, acumulando camadas externas sob a casca, como ilustrado na Figura 2. Essas árvores são as fontes de madeira utilizadas na construção.

Figura 2 - Tronco da árvore e suas camadas



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

A casca desempenha a função de proteção externa das árvores. O albúrnio, que é a região logo abaixo da casca, é mais suscetível à decomposição causada por fungos. No entanto, essa região é mais receptiva à penetração de substâncias protetoras, como açafraão e sais minerais. O cerne é formado pela inatividade das células vivas do albúrnio à medida que o tronco cresce. Ele possui uma coloração mais escura e tem a responsabilidade de proporcionar sustentação ao tronco. Devido a suas características de durabilidade superiores, é a parte preferencial para a obtenção de madeira de construção. A medula é o tecido central mais macio da árvore, ao redor do qual se inicia o crescimento inicial da madeira. Os troncos crescem por meio da adição de anéis em torno da medula, e contar esses anéis permite determinar a idade da árvore (PFEIL; PFEIL, 2003).

A composição primordial da madeira consiste principalmente em substâncias orgânicas. O composto orgânico preponderante é a celulose, que corresponde a aproximadamente 50% do conteúdo da madeira, formando os filamentos que conferem reforço às paredes das fibras longitudinais. Dois outros elementos de significativa importância são as hemiceluloses (com uma proporção de 20% a 25%) e a lignina (representando de 20% a 30%). É a lignina que oferece resistência e rigidez

à compressão nas paredes das fibras (PFEIL e PFEIL, 2003). Além disso, a madeira contém substâncias como resinas, óleos e ceras, que conferem as características distintas de coloração e aroma para cada espécie.

A estrutura da madeira exibe um comportamento anisotrópico. Os filamentos compostos de celulose atuam como reforço das fibras, enquanto a matriz de polímeros (constituída por hemiceluloses e lignina) tem a função de manter os filamentos unidos e conferir rigidez à compressão das fibras (WANGAARD, 1979).

4.2 Tipos de madeiras e suas formas de utilização

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), os tipos de madeira empregados na construção civil podem ser classificados em duas categorias: maciça (bruta ou roliça, serrada) e industrializada (lamelada colada, lamelada colada cruzada, microlaminada e etc.).

4.2.1 Madeira roliça

Na região centro-sul do país, a madeira roliça é majoritariamente proveniente de reflorestamentos, principalmente com diversas espécies de eucalipto (*Eucalyptus spp.*). (ZENID, 2009)

Frequentemente empregada em construções temporárias, como estruturas de cimbramento, conforme ilustrado na Figura 3. Ademais, pode ser adotada como estaca de fundação, conforme Figura 4, desde que seu diâmetro seja superior a 15 cm na ponta e 25 cm no topo, com a condição adicional de contar com uma ponteira de aço tanto na extremidade inferior quanto na superior. Em ambientes sujeitos a níveis de água, a madeira deve ser protegida contra ação de microrganismos. (PFEIL e PFEIL, 2003).

Figura 3 - Madeira roliça para escoramento



Fonte: <<https://www.madeiratratada.com/>>. Acesso em: 27 ago. 2023

Figura 4 - Madeira roliça para estacas



Fonte: <<https://www.ecologs.com.br/>>. Acesso em: 27 ago. 2023

4.2.2 Madeira serrada

De acordo com Zenid (2009), a produção de madeira serrada ocorre em instalações industriais conhecidas como serrarias, onde as toras são submetidas a processos mecânicos que transformam a peça originalmente cilíndrica em peças de formato quadrangular ou retangular de dimensões reduzidas.

Essa categoria de madeira é amplamente empregada em componentes estruturais na indústria da construção civil. Quando as árvores alcançam seu estágio de maturidade, são submetidas ao corte por meio de serras especializadas. Esse

procedimento contribui para a obtenção de uma qualidade superior da madeira a ser utilizada em elementos estruturais (PFEIL e PFEIL 2003).

Figura 5 - Madeira serrada

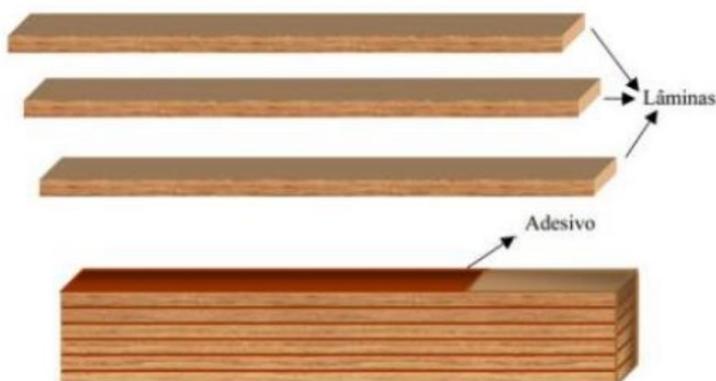


Fonte: <<https://www.madeiratrada.com/>>. Acesso em: 27 ago. 2023

4.2.3 Madeira lamelada colada (MLC)

De acordo com Calil Neto (2011), a Madeira Lamelada Colada (MLC) ou *Glue Laminated* (Glulam) é produzida através da colagem de lamelas (ou tábuas), em que as fibras são dispostas paralelamente, conforme Figura 6. Ao sobrepor as lamelas de madeira serrada, é recomendada a alternância na orientação dos anéis de crescimento durante a colagem, visando obter uma peça mais estável (DIAS, 2019; LUCENA, 2017).

Figura 6 - Composição da MLC



Fonte: Terezo e Szücs (2010)

Conforme apontado por Calil Neto (2011), as peças de MLC podem atingir comprimentos de até 30 metros, sendo a principal limitação determinada pelo tamanho da prensa utilizada no processo de fabricação dos elementos.

As peças produzidas podem apresentar formatos retos ou curvos. No caso da construção de vigas curvas, é essencial que a prensagem ocorra em moldes apropriados para alcançar o resultado desejado (ALMEIDA et al., 2011).

Figura 7 - Ponte construída em MLC



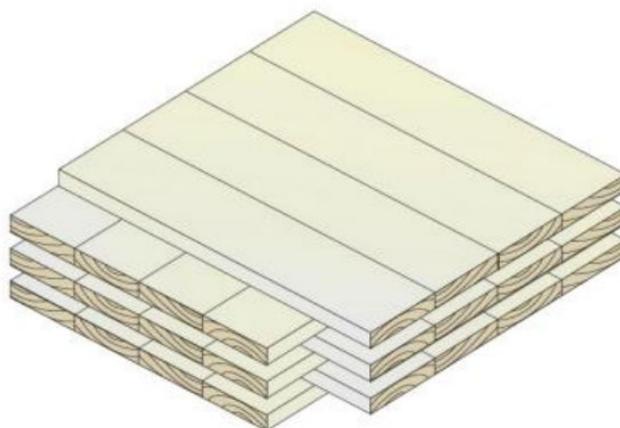
Fonte: <<https://www.pisossul.com.br/>>. Acesso em: 28 ago. 2023

4.2.4 Madeira lamelada colada cruzada (MLCC)

O painel de MLCC, ou *Cross-Laminated Timber* (CLT), pode ser composto por 3, 5 ou 7 camadas, resultando geralmente em peças de 3 metros de largura por 12 metros de comprimento. A logística de transporte e a capacidade de prensagem da empresa fabricante são os principais fatores limitantes para a produção de painéis de dimensões maiores. A colagem das lâminas é realizada após atingirem um teor de umidade em torno de 12%, visando evitar variações dimensionais e o surgimento de fendas superficiais. (CARRASCO et al., 2019).

A técnica de aplicação das lamelas em sentido cruzado minimiza os efeitos de retração e expansão causados pelo comportamento higroscópico da madeira (ECKER, 2017). A Figura 8 ilustra a configuração construtiva dos painéis de MLCC.

Figura 8 - Composição da MLCC



Fonte: Terezo e Szücs (2010)

A MLCC tem aplicações variadas, podendo ser utilizado como parede, placas de pavimento e até mesmo vigas e pilares, conforme Terezo et al., (2020). A sua estrutura versátil possibilita a construção de edifícios de madeira, abrangendo tanto elementos de laje e telhado quanto de parede (OLIVEIRA, 2018). Na Figura 9, são ilustradas algumas situações em que o painel de MLCC é empregada.

Figura 9 - Edificação construída em MLCC



Fonte: < <https://noahtech.com.br/>>. Acesso em: 28 ago 2023

4.2.5 Madeira laminada colada (LVL)

Material composto de lâminas de madeira orientadas na mesma direção conhecido como laminado de lâminas paralelas, ou *Laminated Vanner Lumber*, como exemplificado na Figura 10, é um produto de madeira constituído por finas lâminas de madeira, com espessura variando de 1 a 5 mm, que, após a secagem, são sobrepostas com as fibras alinhadas na direção longitudinal. Essas lâminas são então coladas sob pressão, com as juntas desalinhadas (PFEIL e PFEIL, 2003).

Seus usos principais são em paredes estruturais ou não estruturais, batente de portas e janelas, tampos de mesa, e estrutura de móveis em geral (REMADE, 2021).

Figura 10 - Placa de LVL com lâminas na vertical



Fonte: Green (2012)

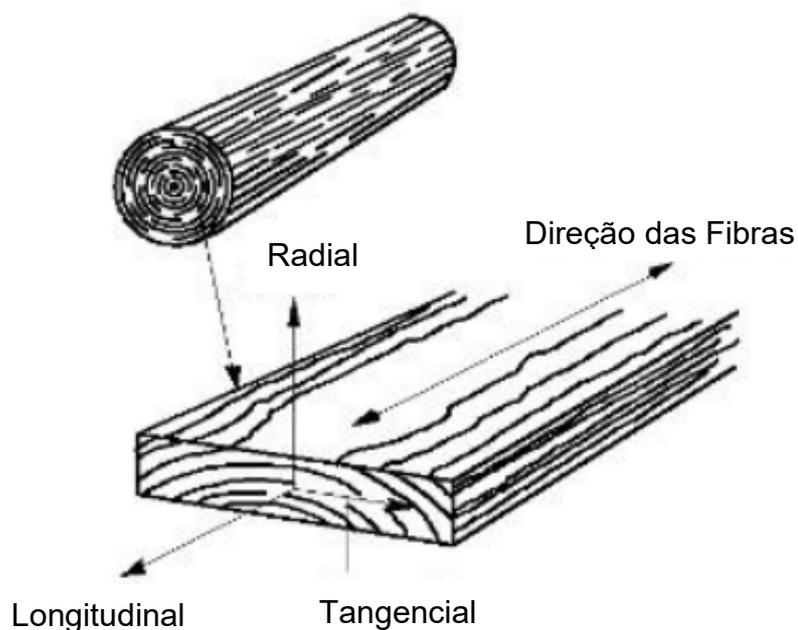
4.3 Propriedades físicas

As propriedades físicas da madeira exercem um impacto direto no desempenho e na resistência do material quando utilizado para fins estruturais. Segundo Calil Jr. et al., (2003), vários fatores contribuem para as características físicas da madeira, como clima, solo, tipo de madeira, a fisiologia das árvores, a anatomia do sistema lenhoso e variações químicas. Como resultado, os valores numéricos das propriedades da madeira, obtidos por meio de testes de laboratório, podem apresentar uma considerável variabilidade, conforme comentado nos itens a seguir.

4.3.1 Anisotropia

A anisotropia é uma característica física em que suas propriedades variam de acordo com a direção em função da orientação das células. No caso da madeira, as direções principais são a longitudinal, a radial e a tangencial. As propriedades são geralmente avaliadas em termos das variações entre as direções paralela e perpendicular às fibras, uma vez que as diferenças de propriedades entre as direções radial e tangencial são mínimas, conforme mencionado por Pfeil e Pfeil (2003).

Figura 11 - Direções principais da madeira



Fonte: Adaptado de Ritter (1990)

4.3.2 Higroscopia

Conforme mencionado por Esteves e Pereira (2009), higroscopicidade é o termo utilizado para descrever a capacidade dos materiais porosos de reter uma determinada quantidade de umidade presente no ambiente nos seus poros, até que um estado de equilíbrio seja alcançado quando estão em um estado seco. Isso desencadeia modificações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, com intensidade crescente à medida que seu teor de água diminui.

O domínio e a compreensão da higroscopicidade da madeira são fundamentais para uma utilização eficiente desse material, com especial atenção à prevenção de

questões relacionadas à retratibilidade, como deformações e fissuras. Isso ocorre porque a variação no teor de umidade influencia a conformação das peças e tem um impacto direto na resistência mecânica do material. (SILVA E OLIVEIRA 2003)

4.3.3 Teor de umidade

A madeira é um material higroscópico, ou seja, ela absorve ou libera umidade até alcançar um equilíbrio com o ambiente ao seu redor. Essa variação na quantidade de água pode ter impactos significativos na resistência, bem como no comportamento físico e mecânico do material, como mencionado por Almeida et al., (2014). De acordo com Correia (2009), quando aplicada em construções, a madeira deve apresentar um teor de umidade que se assemelhe o máximo possível à umidade de equilíbrio higroscópico das condições de uso. Isso é essencial para minimizar mudanças volumétricas excessivas. A umidade da madeira é determinada pela Equação 1:

$$U(\%) = \frac{P_i - P_s}{P_s} 100 \quad (1)$$

Onde:

P_1 = peso inicial da madeira (kg);

P_s = peso seco da madeira (kg).

Com o intuito de orientar a utilização estrutural da madeira e estabelecer categorias para diferentes espécies, a NBR 7190:2022-1 adota a umidade de 12% como ponto de referência para a realização de testes e definição de valores de resistência e rigidez utilizados em cálculos. Além disso, a norma define as classes de umidade em relação à umidade relativa do ar (U_{amb}) e ao equilíbrio da madeira (U_{eq}), como indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio máxima da madeira U_{eq}
1	$U_{amb} \leq 65 \%$	12 %
2	$65 \% < U_{amb} \leq 75 \%$	15 %
3	$75 \% < U_{amb} \leq 85 \%$	18 %
4	$U_{amb} > 85 \%$ durante longos períodos	$\geq 25 \%$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

4.3.4 Densidade

Dado o caráter característico da madeira, no qual surgem divergências nas propriedades mecânicas entre distintas espécies, a densidade se torna uma qualidade crucial ao selecionar madeiras de variadas espécies para fins específicos. Conforme Pfeil e Pfeil (2003), em geral, madeiras com maior densidade tendem a possuir maior resistência, devido à maior quantidade de material contida em cada unidade de volume.

A norma brasileira ABNT NBR 7190:2022 apresenta duas definições de densidade aplicáveis em estruturas de madeira: a densidade básica e a densidade aparente. A densidade básica da madeira refere-se à massa específica convencional, obtida dividindo-se a massa seca pelo volume saturado, conforme a Equação 2. A massa seca é estabelecida ao submeter os corpos de prova a uma estufa a 103°C até que sua massa alcance um estado constante. O volume saturado é determinado ao imergir os corpos de prova em água até que um peso invariável seja alcançado.

A densidade básica é determinada pela Equação 2:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{bas} = densidade básica (kg/m³);

m_s = massa seca da amostra da madeira (kg);

V_{sat} = volume da amostra da madeira saturada (m³).

A densidade aparente da madeira é a massa específica calculada pela divisão da massa pelo volume, ambos considerados sob a mesma umidade. Usualmente, essa umidade é a padrão de 12%.

A densidade aparente é determinada pela Equação 3:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (3)$$

Onde:

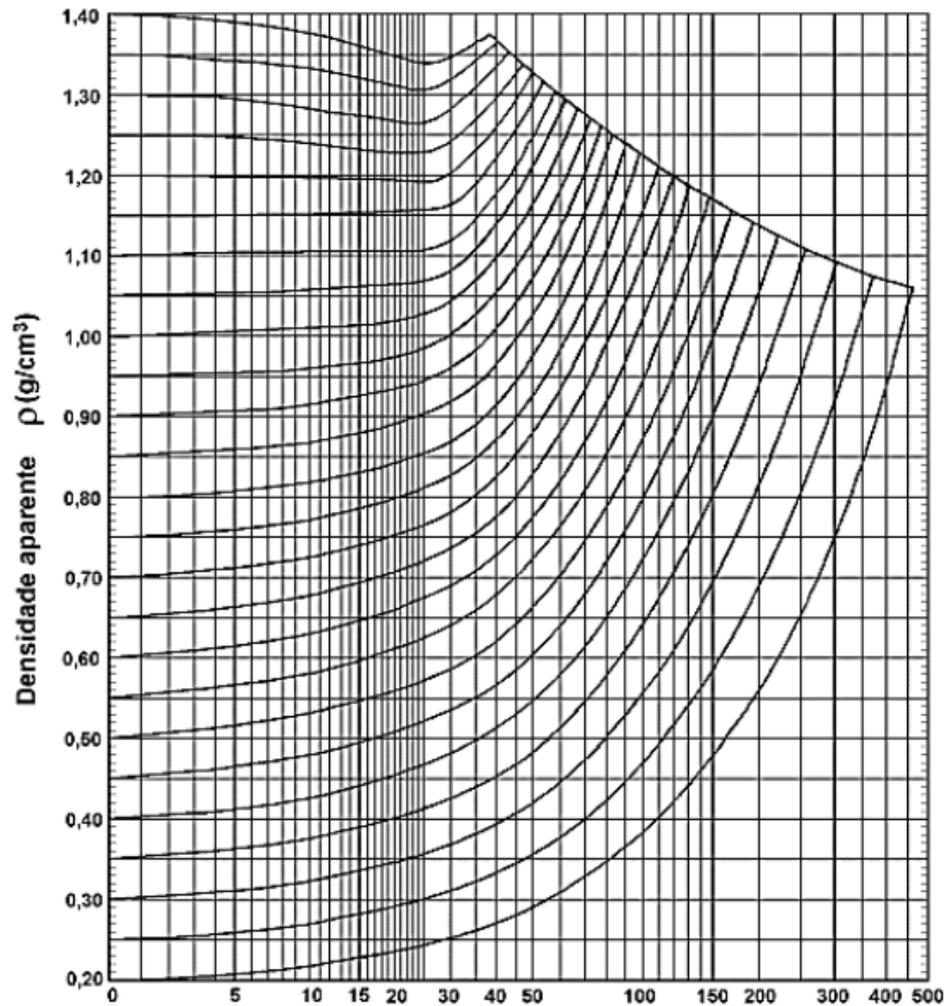
ρ_{bas} = densidade básica (kg/m³);

m_s = massa seca da amostra da madeira (kg);

V_{sat} = volume da amostra da madeira saturada (m³).

Nos testes realizados em ambiente laboratorial, atingir com absoluta precisão a umidade igual a 12% se torna complexo, e é por isso que o diagrama, empregado por Kollmann e Côté (1984), é usado para ajustar a diferentes níveis de umidade. Esse processo é realizado juntamente com as fórmulas estabelecidas por Logsdon (1998) para a correção do diagrama.

Figura 12 - Diagrama de Kollmann para correção da densidade aparente

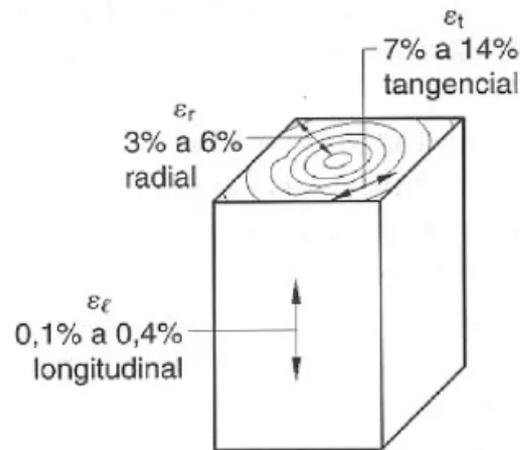


Fonte: Kollmann e Coté (1984)

4.3.5 Retratibilidade

Pfeil e Pfeil (2003) afirma que essa mudança ocorre de maneira linear devido à variação de umidade entre 0% e o ponto de saturação das fibras (30%). Essa retração pode se manifestar nas direções axial, tangencial ou radial, sendo a retração axial quase insignificante, enquanto a tangencial é o dobro da retração radial.

Figura 13 - Retração da madeira nas três direções principais

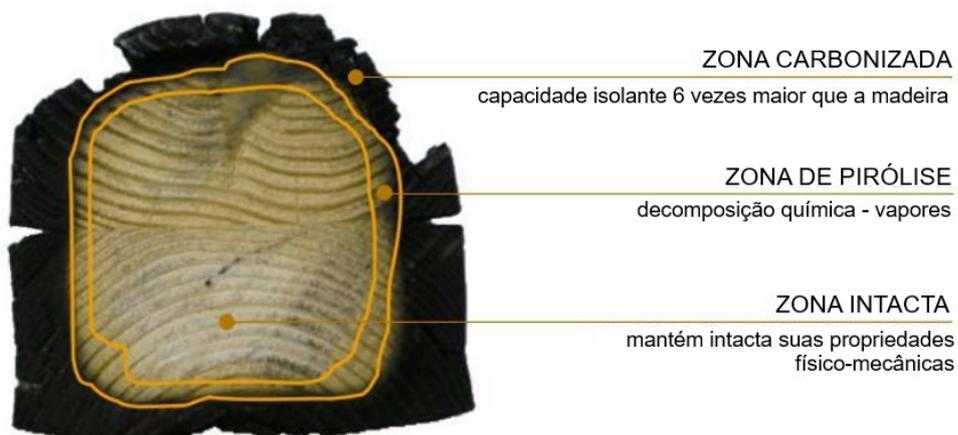


Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

4.3.6 Resistência ao fogo

A madeira é um material inflamável devido à sua composição orgânica, no entanto, de acordo com Martins (2010), estruturas de madeira adequadamente dimensionadas e tratadas podem oferecer uma resistência ao fogo superior àquelas construídas por outros materiais. Durante a exposição ao fogo, os elementos estruturais de madeira sofrem queima, mas permanecem como isolantes térmicos, retardando a transferência de calor para o interior da seção. Assim, o núcleo da estrutura permanece intacto, diminuindo a velocidade de degradação térmica e retardando o processo de carbonização, como explicado por Moraes e Figueroa (2009).

Figura 14 - Efeito da carbonização da madeira



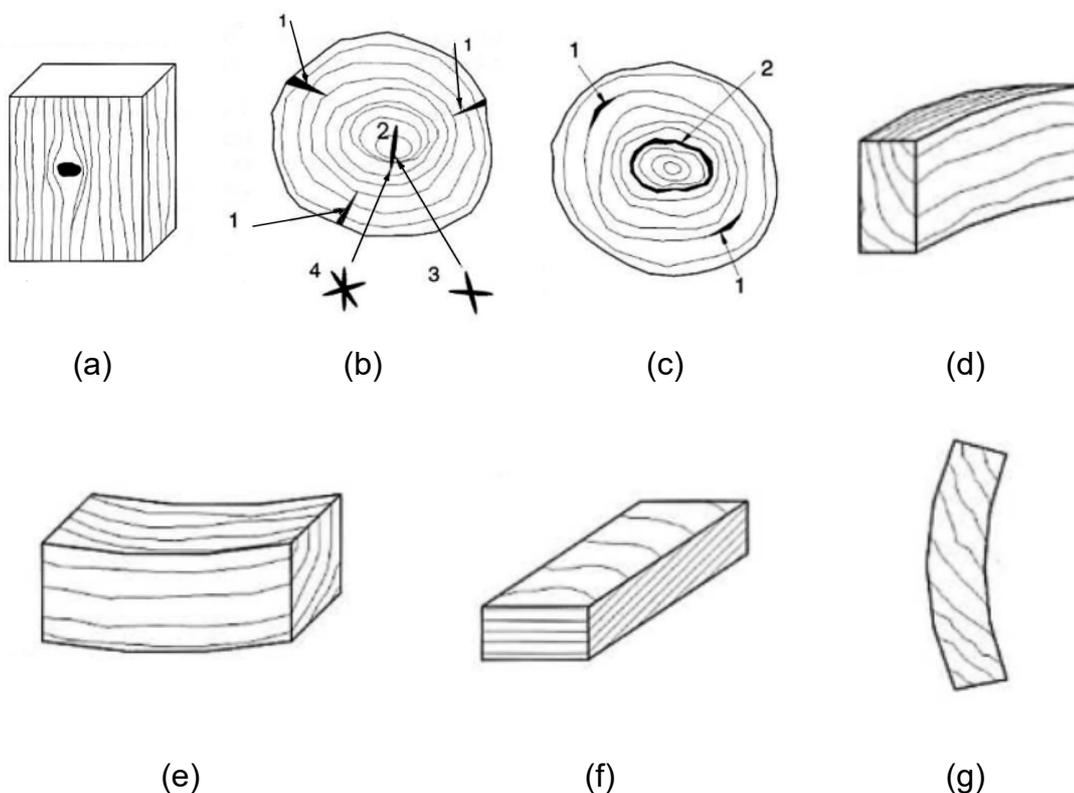
Fonte: Traduzido de <<https://www.maderea.es/maderayfuego/>>. Acesso em 16 ago. 2023

4.3.7 Defeitos

De acordo com Pfeil e Pfeil, em 2003, as peças de madeira empregadas em construções exibem diversos defeitos que podem comprometer sua resistência, aparência e durabilidade. Esses problemas derivam, sobretudo, da natureza intrínseca da madeira como material natural, o que resulta em imperfeições na estrutura do tronco ou durante o processo de preparação das peças. Entre os principais defeitos, destacam-se: a) a presença de nós, b) fendas, c) gretas, d) abaulamento, e) arqueamento, f) fibras reversas e g) empenamento de acordo com a ilustração da Figura 15.

Esses defeitos podem ser originados tanto da estrutura do tronco quanto do processo de preparação da peça e a sua existência pode comprometer a utilização da madeira em aplicações estruturais. Para mitigar o uso de peças comprometidas, são adotados procedimentos de triagem, visando a identificação e descarte de peças não conformes. Nesses cenários, métodos de classificação visual e mecânica são empregados conforme a NBR 7190:2022-2.

Figura 15 - Defeitos na madeira



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

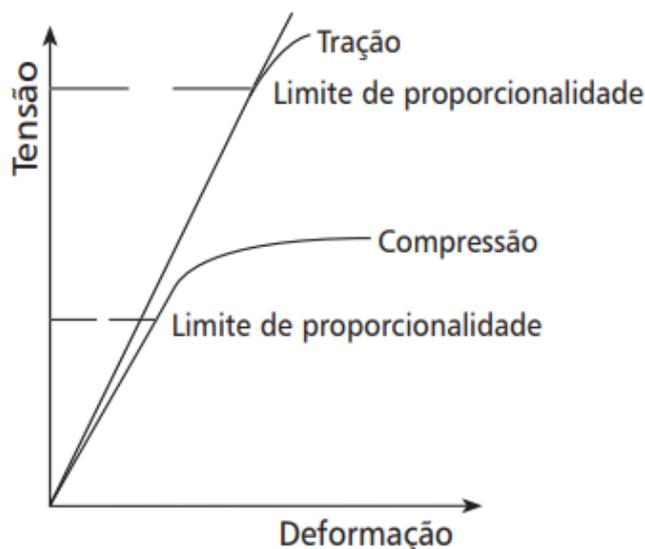
4.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas da madeira são determinadas pelo seu comportamento quando é solicitada por forças externas, sendo divididas em propriedades de elasticidade e de resistência, conforme Calil Jr. (1999).

Tanto as características de elasticidade quanto as de resistência apresentam variações conforme a orientação das fibras em relação à direção na qual a força é aplicada à madeira, devido à sua natureza anisotrópica mas, devido à orientação das fibras, considera-se um comportamento ortotrópico em relação às direções axial, radial e tangencial com relação ao tronco da peça que está sendo analisada.

Segundo Melo (2002), a madeira exibe um comportamento elástico linear em sua fase inicial, até atingir o limite de proporcionalidade, onde as deformações se anulam após a retirada da carga aplicada. A inclinação inicial da curva tensão-deformação demonstra que o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras é ligeiramente superior ao módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico de tração e compressão paralela às fibras da madeira



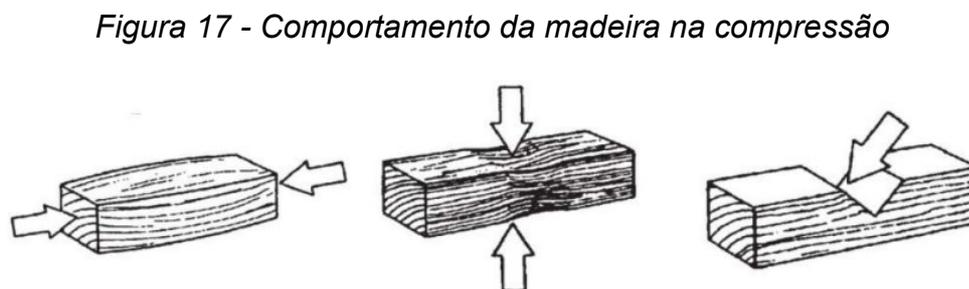
Fonte: Melo (2002)

4.4.1 Comportamento na compressão

As respostas da madeira quando sujeita a esforços de compressão exibem notáveis diferenças, que derivam da orientação da força aplicada em relação à direção

das fibras. A madeira pode ser submetida a compressão de três maneiras distintas: perpendicular, paralela ou em um ângulo inclinado em relação às fibras (CALIL JÚNIOR et al., 2000).

Quando a compressão é exercida perpendicularmente às fibras, a madeira revela valores menores (aproximadamente um quarto do valor da compressão paralela às fibras). Isso ocorre porque a força é aplicada na direção perpendicular ao comprimento das fibras, levando ao esmagamento delas, como pode-se perceber na Figura 17. Em casos de solicitações inclinadas em relação às fibras da madeira, com uma inclinação de até 6%, essa compressão é considerada paralela às fibras. Para inclinações acima de 6%, adotam-se valores intermediários calculados com base na Fórmula de Hankinson, conforme capítulo 4.3.5.



Fonte: Ritter (1990)

4.4.2 Comportamento na tração

A madeira pode ser submetida a duas formas distintas dessa solicitação, como indicado na Figura 18, são elas: a) tração paralela e b) tração perpendicular às fibras. As propriedades da madeira variam significativamente em função dessas orientações (CALIL JÚNIOR et al., 2000).

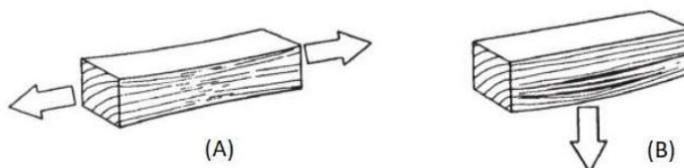
A resistência máxima à tração é evidenciada quando a força é aplicada paralelamente às fibras. No entanto, a realização de ensaios nessa condição é complexa e gera pouca confiabilidade, devido à chance de esmagamento das fibras do corpo de prova pelas garras do equipamento (MELO, 2002).

No que diz respeito à tração perpendicular às fibras, a madeira exhibe valores de resistência consideravelmente baixos. Como os esforços atuam com a tendência de separar as fibras, impactando a integridade estrutural da peça, os resultados de ensaios apresentam uma ampla gama de variações. Essa propriedade, que pode ser

até quarenta vezes menor que a resistência à tração paralela, e pode, entre outros casos, ser empregada em estruturas em formato de arco (FERNANDEZ-VILLEGA et al., 1983).

Quando a tração é aplicada em um ângulo inclinado em relação às fibras (com uma inclinação superior a 6%), é empregada a Fórmula de Hankinson, conforme item 4.3.5.

Figura 18 - Comportamento da madeira na tração

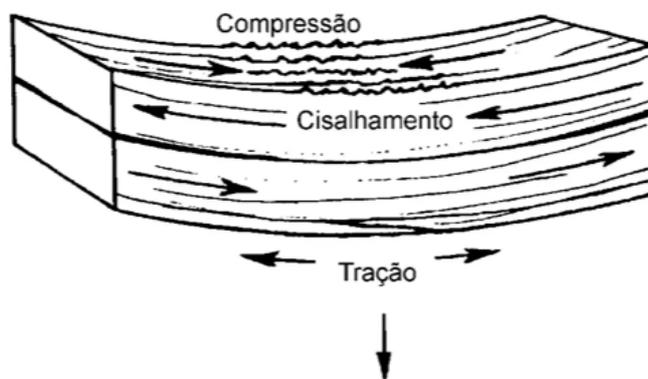


Fonte: Ritter (1990)

4.4.3 Comportamento na flexão

Quando a madeira é submetida à flexão, também conhecida como flexão simples, quatro tipos de esforços surgem: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e compressão perpendicular às fibras (que ocorre nos pontos de apoio), como ilustrado parcialmente na Figura 19.

Figura 19 - Comportamento da madeira quando submetida à flexão



Fonte: Ritter (1990)

A ruptura, no caso de flexão simples, acontece quando pequenas falhas de compressão surgem, seguidas pela formação de enrugamentos macroscópicos de compressão. Isso resulta no aumento da área sujeita à compressão na seção e, por

consequência, no aumento da área sob tração, levando à falha por tração. Devido a esse processo, a ruptura na flexão ocorre predominantemente na região de tração, sendo também denominada de tração na flexão (CALIL JÚNIOR et al., 2000).

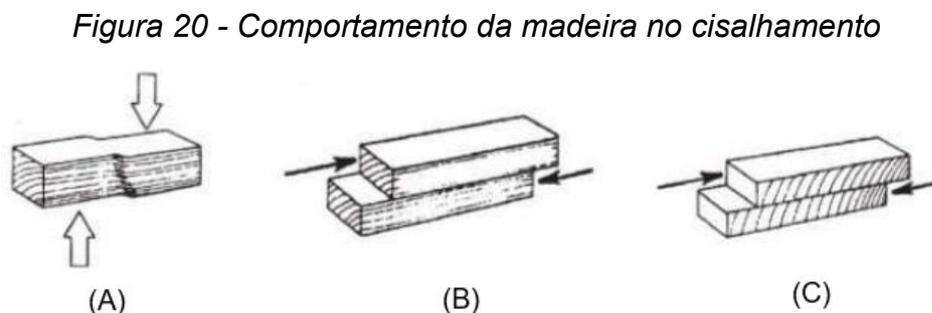
Conforme Melo (2002), as características relacionadas ao comportamento da madeira quando submetida à flexão têm aplicação no projeto de elementos sujeitos à flexão, como vigas, bem como na comparação entre diferentes espécies, análise de arqueamento, entre outros.

4.4.4 Comportamento no cisalhamento

São considerados três tipos de cisalhamento, conforme indicado na Figura 20, também chamado de esforço cortante, que agem em peças de madeira: a) no sentido perpendicular às fibras, b) paralelo às fibras no plano radial ou tangencial, e c) o cisalhamento “rolling” (CALIL JÚNIOR et al., 2000).

No cisalhamento perpendicular às fibras, que ocorre quando as tensões são aplicadas perpendicularmente à direção das fibras, a madeira se deforma na direção que é perpendicular ao eixo longitudinal. Nessa configuração, a madeira exibe elevada resistência e, antes de falhar pelo cisalhamento, apresentará falhas relacionadas à resistência na compressão normal às fibras. Pode ocorrer também a falha tipo “rolling” onde há tendência das células rolarem umas sobre as outras na direção transversal.

O cisalhamento que ocorre paralelamente às fibras é especialmente crucial e o mais comum, pois a separação e o deslocamento entre as células de madeira têm o potencial de resultar na fratura da peça.



Fonte: Ritter (1990)

4.4.5 Comportamento na torção

As características da madeira quando sujeita a torção são pouco conhecidas. De acordo com a norma brasileira, é aconselhável evitar a torção de equilíbrio em elementos de madeira devido ao perigo de ocorrer ruptura por tração perpendicular às fibras, que resulta do estado múltiplo de tensões em ação.

4.4.6 Resistência ao impacto

A capacidade de um material de absorver energia rapidamente por meio da deformação é denominada resistência ao impacto, sendo a madeira reconhecida como um material altamente competente nesse aspecto. Sua avaliação é conduzida por meio de dois tipos de testes: o teste de flexão dinâmica e o teste de tenacidade, que oferece dados mais confiáveis.

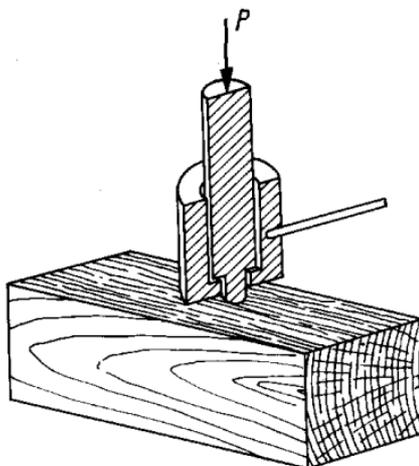
Segundo Melo (2002), é notável que o comportamento da madeira ao ser submetida a um impacto difere da sua reação ao suportar uma carga estática. No entanto, a norma brasileira requer a realização do teste de flexão dinâmica para quantificar essa resistência ao impacto.

4.4.7 Dureza e fendilhamento

No que diz respeito à avaliação da dureza, que é determinado a partir do ensaio de Dureza Janka¹, que é realizada ao introduzir uma semiesfera nas direções paralela e perpendicular às fibras da madeira. Essa é uma propriedade de grande relevância para a comparação entre diferentes espécies, além de ser crucial para a definição de usos específicos, como em pisos, onde é fundamental que a superfície da peça de madeira não seja suscetível a marcas provenientes de móveis e outros objetos.

¹ Gabriel Janka (1864 - 1932) propôs e desenvolveu uma modificação do ensaio da determinação da dureza Brinell para a madeira.

Figura 21 - Esquema do ensaio para a determinação da dureza

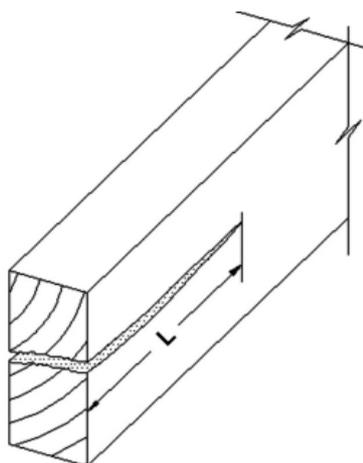


Fonte: <<https://makezine.com/article/workshop/woodworking/how-wood-hardness-is-measured/>>.

Acesso em 17 ago. 2023

O fendilhamento também possui importância significativa, pois mensura a capacidade da madeira em resistir a possíveis rachaduras no sentido longitudinal. Isso tem implicações na sua performance em relação à extração de pregos, entalhes em apoios de vigas e formação de fissuras (MELO, 2002).

Figura 22 - Fendilhamento em uma peça de madeira



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994)

A relação entre a dureza e o fendilhamento da madeira é que, geralmente, madeiras mais duras apresentam uma maior resistência à formação de rachaduras ou fissuras superficiais quando submetidas a tensões. No entanto, é importante destacar que madeiras mais duras não são imunes ao fendilhamento. A prevenção do

fendilhamento envolve considerar diversos fatores, incluindo a escolha adequada da madeira, o controle das condições de umidade e a aplicação de técnicas apropriadas de secagem e processamento.

4.5 Ações atuantes e combinações de projeto

4.5.1 Ações atuantes

Uma estrutura enfrenta múltiplas ações que provocam esforços e deformações, conforme a NBR 8681, e podem ser classificadas como:

- Ações permanente: ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção;
- Ações variáveis: ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção;
- Ações excepcionais: possuem duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção.

Cada uma dessas ações exerce pressões e forças específicas sobre a estrutura. Contudo, várias dessas ações podem coincidir de modo simultâneo, e suas combinações podem produzir resultados mais significativos sobre a estrutura do que quando consideradas de forma isolada. Portanto, para garantir a segurança, é necessário combinar essas ações de maneira adequada e representativa.

Os valores de cálculo das ações devem ser estabelecidos conforme o disposto na ABNT NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas - procedimentos, bem como nas normas associadas, incluindo a ABNT NBR 6120:2019 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações e a ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações.

4.5.2 Classes de carregamentos e combinações

Diversas combinações de ações que ocorrem simultaneamente resultam em diferentes cenários de carregamento, dependendo das formas variadas de agrupar essas ações. Entre esses cenários, escolhem-se aqueles que apresentam as condições mais desfavoráveis para ser adotado como o carregamento de projeto.

As classes de duração do carregamento são estabelecidas com base na duração acumulada estimada para a ação variável predominante na combinação analisada. Conforme especificado na norma NBR 7190:2022-1, essas categorias podem ser definidas como permanentes, de longa duração, de média duração, curta duração e instantânea como mostra na Tabela 2.

Tabela 2 - Definição de classes de carregamento

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica
Permanente	Permanente	Mais de dez anos
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana
Instantânea	Instantânea	Muito curta

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

A norma também estabelece que para cargas de curta duração, na verificação da segurança, permite a multiplicação por 0,75 nas solicitações dessa natureza, conforme já mencionado no item 3.4.6.

Para determinar os valores de cálculo das ações a fim de verificar os estados limites últimos, é essencial empregar as combinações últimas correspondentes, conforme a natureza de cada situação de projeto: seja para cenários de uso normal da estrutura (combinações últimas normais), situações transitórias (combinações últimas especiais ou de construção) ou ocorrências excepcionais (combinações últimas excepcionais).

No contexto das ações permanentes consideradas isoladamente, especialmente para elementos estruturais de madeira natural, é indicado adotar os valores da Tabela 3 para os coeficientes de ponderação (γ_g).

Tabela 3 - Coeficiente de ponderação para combinações últimas considerando ações permanentes separadamente

Combinações	Elementos estruturais de madeira em geral	Elementos estruturais industrializados de madeira
Últimas normais	1,3	1,25
Desfavoráveis especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,15	1,10

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Além disso, nas combinações de serviço, a carga variável principal da combinação em questão é considerada com o seu valor característico (F_k), enquanto as outras ações são consideradas como secundárias, operando com valores reduzidos, representados por ($\psi_0 F_k$), conforme indicado na Tabela 4.

Dado que a madeira apresenta características distintas em relação a outros materiais, tais como sua considerável deformação ao longo do tempo (fluência), as análises de segurança são realizadas mediante a adoção de cargas usuais correspondentes à combinação rara de serviço, por ser um critério mais restritivo em deslocamentos mais consideráveis. Os valores dos coeficientes de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis são derivados da norma ABNT NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas - procedimentos, como indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para ações variáveis.

Ações	ψ_0	ψ_1	ψ_2 ^{3), 4)}
Cargas acidentais de edifícios			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura			
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos			
Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
Pontes rodoviárias	0,7	0,5	0,3
Pontes ferroviárias não especializadas	0,8	0,7	0,5
Pontes ferroviárias especializadas	1,0	1,0	0,6
Vigas de rolamentos de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
¹⁾ Edificações residenciais, de acesso restrito. ²⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ³⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero. ⁴⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.			

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

5 CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

5.1 Classes de resistência

A norma NBR 7190-1:2022, em seu item 5.7, define a resistência das madeiras por meio de classes, com o objetivo de estabelecer um padrão que oriente as prioridades de resistência do material utilizado em projetos estruturais. É importante salientar que essa classificação é aplicada exclusivamente a lotes homogêneos, que considera um lote como homogêneo quando o coeficiente de variação da resistência à flexão é inferior a 20%.

Dentro desse contexto, para lotes homogêneos de madeira proveniente de florestas nativas, é permitido que a amostra seja composta por corpos de prova isentos de defeitos. Esses corpos de prova devem ser ensaiados conforme as

diretrizes descritas na NBR 7190:2022-3. A classe do lote é determinada pela resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), o que viabiliza a definição das propriedades de resistência e rigidez da madeira. Para referência, a NBR 7190:2022-1 apresenta a Tabela 5 com os valores indicativos de resistência.

Tabela 5 - Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos

Classes	f_{c0k} MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,med}$ MPa	Densidade a 12 % kg/m ³
D20	20	4	10 000	500
D30	30	5	12 000	625
D40	40	6	14 500	750
D50	50	7	16 500	850
D60	60	8	19 500	1 000

NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3.
 NOTA 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %.
 NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na ABNT NBR 7190-3:2022, Tabela A.1.

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Para lotes homogêneos de madeira proveniente de florestas plantadas, é necessário realizar a extração de uma amostra composta por peças estruturais, as quais serão submetidas a ensaios conforme as diretrizes da NBR 7190:2022-4. A classe do lote é determinada pela resistência característica à flexão ($f_{m,k}$), que por sua vez possibilita a definição das propriedades de resistência e rigidez da madeira. Como complemento, a NBR 7190:2022-1 disponibiliza a Tabela 6, que apresenta os valores indicativos de resistência.

Tabela 6 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

		Coníferas												Folhosas							
Símbolo		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência MPa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriedades de rigidez GPa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25
Densidade kg/m³																					
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1	Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																				
Nota 2	Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %																				

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Para espécies menos conhecidas que não estão incluídas nos grupos mencionados nas Tabelas 2 e 3, a NBR 7190:2022-3 fornece diretrizes para a realização de testes em corpos de prova livres de defeitos em madeiras provenientes de florestas nativas. Isso permite a determinação das propriedades necessárias para uma caracterização simplificada das resistências, como ilustrado na Figura 23. No caso do cisalhamento, a NBR 7190:2022-1 estabelece diferentes relações para coníferas e folhosas, quando não há dados experimentais específicos disponíveis.

Figura 23 - Relação de resistência para classificação simplificada

$$\begin{array}{lll} \frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 & \frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 & \frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,0 \\ \frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 & \frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,0 & \frac{f_{t90,k}}{f_{t0,k}} = 0,05 \\ \frac{f_{v0,d}}{f_{c0,d}} = 0,12 \text{ para coníferas} & \frac{f_{v0,d}}{f_{c0,d}} = 0,10 \text{ para folhosas} & \end{array}$$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-3 e 7190:2022-1

5.2 Valores de referência

5.2.1 Correção da resistência e rigidez

Os valores estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022-1, mostrados na Tabela 5 e 6 de resistência e rigidez da madeira correspondem à condição-padrão de resistência, que é determinada pelo teor de umidade de equilíbrio da madeira, fixado em 12%.

Ao avaliar essas propriedades, os resultados dos testes podem variar em relação ao teor de umidade (com variações entre 10% e 30%) e, quando necessário, devem ser ajustados de acordo com as equações fornecidas pela norma, para que sejam compatíveis com a condição-padrão.

Para a correção da resistência, deve-se utilizar a Equação 4.

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U - 12)}{100} \right] \quad (4)$$

Onde:

f_{12} = resistência à umidade padrão (MPa);

$f_{U\%}$ = resistência obtida no ensaio (MPa);

U = umidade da madeira medida no ensaio (%).

Para a correção da rigidez, deve-se utilizar a Equação 5.

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U - 12)}{100} \right] \quad (5)$$

Onde:

E_{12} = rigidez à umidade padrão (MPa);

$E_{U\%}$ = rigidez obtida no ensaio (MPa);

U = umidade da madeira medida no ensaio (%).

5.2.2 Valores representativos

Realizar ensaios laboratoriais para determinar as propriedades da madeira resulta na obtenção de valores médios (X_m) dessas propriedades através de análise estatística dos resultados.

Para empregar essas propriedades em cálculos estruturais de madeira, é necessário convertê-las em valores característicos (X_k), que então são usados para obter os valores de cálculo (X_d). Ao investigar espécies de madeira previamente examinadas por laboratórios confiáveis, os valores característicos de resistência são derivados a partir dos valores médios dos ensaios de esforços à tensões normais, usando a Equação 6.

$$X_k = 0,70 \cdot X_m \quad (6)$$

Onde:

X_k = resistência característica à tensão normal (MPa);

X_m = resistência média obtida através de ensaios (MPa).

Para esforços tangenciais, a relação entre o valor médio e característico é dado pela Equação 7.

$$X_k = 0,54 \cdot X_m \quad (7)$$

Onde:

X_k = resistência característica à tensão tangencial (MPa);

X_m = resistência média obtida através de ensaios (MPa).

Em casos de investigação direta da resistência para uma determinada espécie de madeira, os valores devem ser obtidos conforme a classificação adotada. Para uma classificação simplificada, é necessário realizar pelo menos 6 ensaios de compressão. Para caracterização mínima de espécies pouco conhecidas, são necessários 12 corpos de prova para cada resistência a ser determinada. Cada lote não deve exceder um volume de 12m³, e todos os valores devem ser expressos para umidade padrão.

Nesse caso, o valor médio é dado pela Equação 8.

$$X_k = \left(2 \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - X_{\frac{n}{2}} \right) \cdot 1,1 \quad (8)$$

Onde:

X_k = resistência característica para espécies não conhecidas (MPa);

n = número de corpos de prova ensaiados.

Os dados devem ser colocados em ordem crescente, eliminando-se o valor mais alto se o número de corpos de provas ensaiados for ímpar e não admitindo-se o valor característico menor que X_1 e nem 0,7 do valor médio.

5.2.3 Valor de cálculo da resistência

A NBR 7190:2022-1, item 6.2.6, determina o valor de cálculo da resistência da madeira f_d a partir da resistência característica f_k , conforme a Equação 9.

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_w} \quad (9)$$

Onde:

f_d = resistência de cálculo (MPa);

f_d = resistência característica (MPa);
 k_{mod} = coeficiente de modificação;
 γ_w = coeficiente de ponderação.

5.2.4 Coeficiente de modificação

Conforme o item 5.8.4 da NBR 7190:2022-1, o coeficiente de modificação determina as mudanças nas propriedades características de resistência da madeira relacionadas com a duração da carga e a umidade.

O coeficiente k_{mod1} está associado à capacidade de resistência da madeira ao longo do tempo de aplicação da carga. À medida que a carga permanece na estrutura, a resistência da madeira diminui, como ilustrado na Figura 24, e seus valores são apresentados na Tabela 7. Já o coeficiente k_{mod2} relaciona o aumento da umidade à redução da resistência, seguindo a mesma lógica da duração da carga, à medida que a umidade relativa da madeira aumenta, sua resistência diminui, conforme mostrado na Figura 25, e seus valores são especificados na Tabela 8. O coeficiente de modificação é calculado de acordo com a Equação 10.

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \quad (10)$$

Onde:

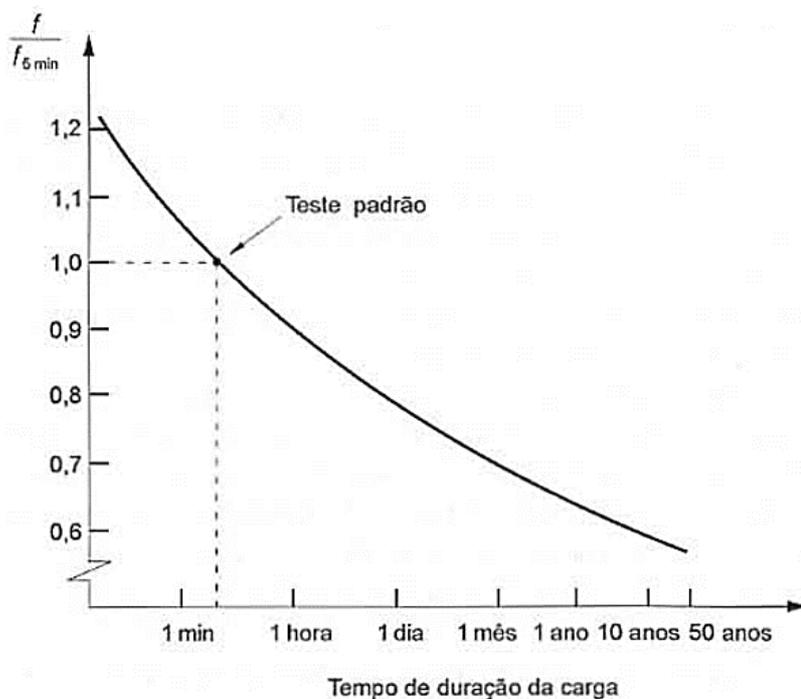
k_{mod} = coeficiente de modificação;
 k_{mod1} = coeficiente de modificação parcial 1;
 k_{mod2} = coeficiente de modificação parcial 2.

Tabela 7 - Valores de k_{mod1}

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Serrada Roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022-1

Figura 24 - Variação da resistência da madeira com o tempo de duração do carregamento



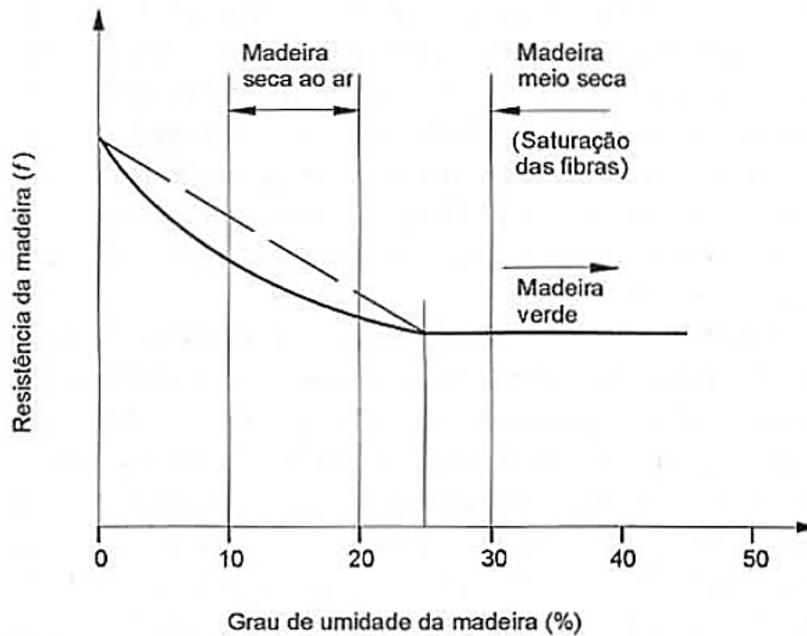
Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

Tabela 8 - Valores de k_{mod2}

Classes de umidade	Tipos de madeira	
	Serrada Roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70 (não permitido para MLCC)	0,90

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022-1

Figura 25 - Variação da resistência da madeira com o grau de umidade



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

5.2.5 Coeficiente de ponderação de resistências

O coeficiente de ponderação (γ_w), também referido como coeficiente de minoração, é um fator de segurança que considera todas as variações possíveis na resistência do material do lote utilizado. Essa variabilidade resulta na redução da

resistência das partes mais frágeis do material, que, em princípio, podem estar sendo aplicadas nos locais mais exigidos da estrutura.

Conforme os itens 5.8.5 e 5.8.6 da NBR 7190:2022-1, classifica os coeficientes de minoração para estados-limites últimos decorrentes de tensões normais e de ponderação para estados-limites últimos para tensões de cisalhamento e para os estados-limites de serviço. A Tabela 9 mostra o valor desses coeficientes para cada caso.

Tabela 9 - Coeficiente de ponderação

Coeficiente (γ_w)	Valor – ABNT NBR 7190:2022-1
ELU - Tração	1,4
ELU - Compressão	1,4
ELU - Cisalhamento	1,8
ELU - Ligações	1,4

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

5.3 Resistência a tensões normais

Quando peças são sujeitas a solicitações como esforço normal e flexão, suas seções estão sujeitas a tensões normais de tração ou compressão. A avaliação da segurança é realizada comparando a tensão em ação com a resistência de cálculo pertinente ao tipo de solicitação.

5.3.1 Compressão axial

Quando as barras estão sob compressão, a ruptura ocorre pelo esmagamento das fibras ou a perda de estabilidade resultante do efeito de flambagem, caracterizado por um deslocamento lateral. Conforme o item 6.3.3 da NBR 7190:2022-1, além da análise de estabilidade, a segurança em relação ao esmagamento devido à compressão axial é determinada, estando assegurada quando:

$$\sigma_{N_{c,d}} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d} \quad (11)$$

Onde:

$\sigma_{N_{c,d}}$ = tensão solicitante ao esforço de compressão normal às fibras (MPa);

$N_{c,d}$ = solitação da força normal de compressão (kN);

A = área bruta da seção (cm²);

$f_{c0,d}$ = resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa).

5.3.2 Compressão perpendicular

A resistência à compressão perpendicular às fibras é estabelecida com base na resistência à compressão paralela às fibras e no coeficiente α_n , o qual é apresentado no item 6.2.4 da NBR 7190:2022-1. Esse coeficiente está relacionado com a distância entre a aplicação da carga e a extremidade da peça.

$$\sigma_{90,d} \leq f_{c90,d} \quad (12)$$

$$f_{c90,d} \leq 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_n \quad (13)$$

Onde:

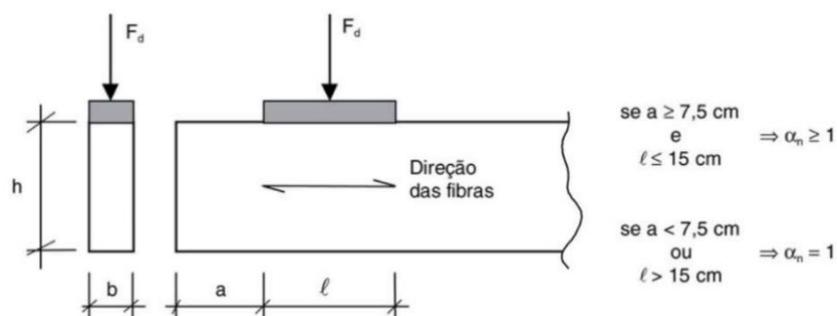
$f_{c90,d}$ = resistência de cálculo à compressão perpendicular às fibras (MPa);

$f_{c0,d}$ = resistência de cálculo referente à compressão normal às fibras (MPa);

α_n = coeficiente (Tabela 10).

Se a força estiver aplicada a menos de 7,5 cm da extremidade da peça ou o comprimento $a' \geq 15 \text{ cm}$ admite-se $\alpha_n = 1$. Para casos em que o comprimento a' não está apresentado na Tabela 10 deve-se interpolar para encontrar o valor de α_n .

Figura 26 - Compressão perpendicular



Fonte: Calil Jr. et al., (2019)

Tabela 10 - Coeficiente α_n

Extensão (a') do carregamento perpendicular às fibras, medida paralelamente a estas cm	Coeficiente α_n
1	2,00
2	1,70
3	1,55
4	1,40
5	1,30
7,5	1,15
10	1,10
15	1,00

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Além das condições de segurança mencionadas anteriormente, é essencial realizar a análise da estabilidade das peças submetidas a compressão, como previsto no item 5.4.

5.3.3 Tração axial

Ao calcular peças de madeira sujeitas a tração axial, os estados limites são caracterizados pela ruptura das fibras na seção líquida ou bruta, caso não haja furos, com um comportamento elasto-frágil. De acordo com o item 6.3.2 da NBR 7190:2022-1, a norma define a tensão de tração solicitada como:

$$\sigma_{Nt,d} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d} \quad (14)$$

Onde:

$\sigma_{Nt,d}$ = tensão solicitante ao esforço de tração normal às fibras (MPa);

$N_{t,d}$ = solitação da força normal de tração (kN);

A = área líquida da seção (cm²);

$f_{t0,d}$ = resistência de cálculo referente à tração paralela às fibras (MPa).

5.3.4 Tração perpendicular

Nenhuma peça de madeira deve depender diretamente da resistência à tração normal às fibras ($f_{t90,d}$), quando a tensão de tração normal puder atingir valores significativos. Deve-se empregar mecanismos que evitem a ruptura resultante dessas tensões. Entretanto, de acordo com o item 6.2.3 da NBR 7190:2022-1, é permitido considerar um valor mínimo de 6% da resistência à tração paralela às fibras ($f_{t0,d}$) para viabilizar o uso da Fórmula de Hankinson no cálculo da resistência à tração inclinada em relação às fibras.

$$f_{t90,d} = 0,06 \cdot f_{t0,d} \quad (15)$$

Onde:

$f_{t90,d}$ = resistência de cálculo referente à tração perpendicular às fibras (MPa).

$f_{t0,d}$ = resistência de cálculo referente à tração paralela às fibras (MPa).

5.3.5 Resistência das tensões inclinadas em relação às fibras da madeira

É aceitável desconsiderar a influência do ângulo α das tensões normais em relação às fibras da madeira até um ângulo de $\alpha = 6^\circ$. Contudo, em situações envolvendo ângulos maiores, como frequentemente observado em treliças de cobertura, é necessário considerar a diminuição da resistência. Essa redução é determinada mediante a aplicação da Equação 16, conhecida como fórmula de Hankinson:

$$f_\alpha = \frac{f_0 \times f_{90}}{f_0 \cdot \sin^2 \alpha + f_{90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (16)$$

Onde:

f_α = resistência na direção inclinada em relação às fibras (MPa);

f_0 = resistência paralela às fibras (MPa);

f_{90} = resistência perpendicular às fibras (MPa);

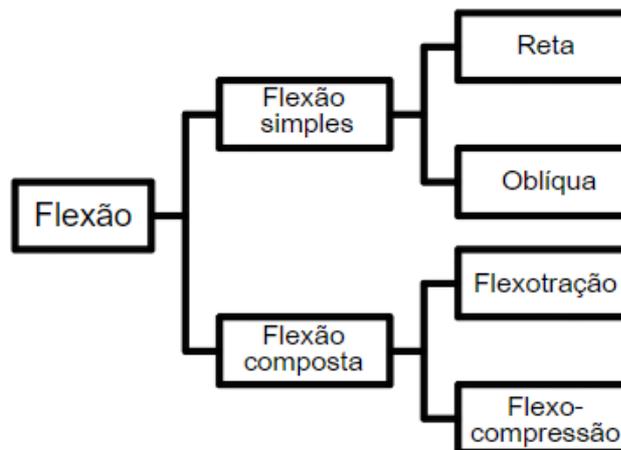
α = ângulo entre a direção das fibras e a direção do esforço inclinado ($^\circ$)

5.3.6 Resistência à flexão

Peças fletidas são elementos estruturais sujeitos a momentos fletores. Essa condição é prevalente em uma variedade de peças utilizadas na construção, como vigas, ripas de telhados, caibros e tabuleiros de pontes. Mesmo em componentes como as barras de treliças, onde a flexão não é o foco principal, pode acontecer de ter flexão significativa devido a alguma hipótese de treliça não ser satisfeita.

É comum que uma única seção transversal sofra efeitos de flexão em duas direções perpendiculares entre si, conhecida como flexão oblíqua. Além disso, podem ocorrer combinações de flexão com cargas axiais de compressão ou tração, gerando situações de flexocompressão ou flexotração.

Figura 27 - Organograma da flexão



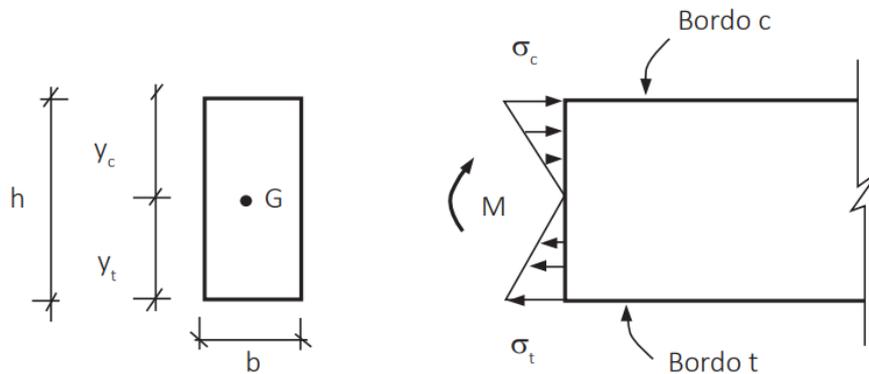
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A verificação das peças sujeitas a essas condições é realizada conforme as diretrizes da ABNT NBR 7190:2022-1, que são detalhadas a seguir.

5.3.7 Flexão simples reta

Nessa situação, em uma seção transversal sujeita a um momento fletor (M), haverá uma distribuição linear de tensão normal ao longo da altura da seção, resultando em compressão na parte superior e tração na parte inferior, como exemplificado na Figura 28.

Figura 28 - Seção transversal submetida à flexão simples reta



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

Conforme NBR7190-1 no item 6.3.4, no dimensionamento de elementos sujeitos a flexão reta, o vão teórico é definido como o menor valor entre a distância entre os eixos de apoio e o vão livre acrescido da metade da altura da seção transversal da peça no meio do vão, não se considerando acréscimo maior que 10 cm.

Em vigas sujeitas a momentos fletores, onde o plano de ação inclui um eixo central de inércia da secção transversal resistente, é necessário satisfazer a seguinte Equação 17.

$$\frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} = \frac{M_d}{W} \leq 1 \quad (17)$$

Onde:

$\sigma_{M,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão (MPa);

M_d = momento fletor solicitante de cálculo (kN.m);

W = módulo de resistência da seção transversal (cm³);

$f_{m,d}$ = resistência de cálculo referente à flexão (MPa), em caso de uso da

Tabela 2 considerar a igualdade $f_{m,d} = f_{c0,d}$.

O módulo de resistência é uma relação que depende da geometria da seção transversal. Para seções retangulares, o módulo é dado pela Equação 18.

$$w = \frac{bh^2}{6} \quad (18)$$

Onde:

W = módulo de resistência da seção transversal (cm³);

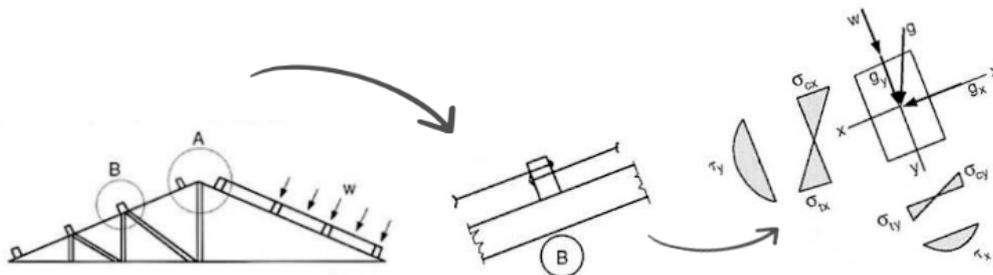
b = dimensão da base da seção transversal (cm);

h = dimensão da altura da seção transversal (cm).

5.3.8 Flexão simples oblíqua

Esta é uma situação frequente, especialmente em vigas de coberturas de telhados, como indicado na Figura 29. Nesse cenário, existem dois eixos nos quais os efeitos de flexão são significativos. A avaliação da segurança deve ser realizada para a condição mais desfavorável, tanto para o ponto mais comprimido quanto para o mais tracionado.

Figura 29 - Terça de cobertura trabalhando à flexão oblíqua



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

Essa avaliação é conduzida por meio das duas expressões a seguir, levando em consideração a situação mais crítica.

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (19)$$

$$K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (20)$$

Onde:

$\sigma_{Mx,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na em X (MPa);

$\sigma_{My,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na em Y (MPa);

$f_{m,d}$ = resistência de cálculo referente à flexão (MPa);

k_M = coeficiente de correção igual a 0,7 para seção retangular.

5.3.9 Flexotração

Na flexotração, a condição de segurança é determinada pela aplicação da Equação mais rigorosa entre as duas equações a seguir, considerando o ponto mais solicitado na borda mais tracionada. Essa análise leva em consideração a influência linear das tensões causadas pela força normal de tração.

$$\frac{\sigma_{Nt0,d}}{f_{t0,d}} + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (21)$$

$$\frac{\sigma_{Nt0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (22)$$

Onde:

$\sigma_{Nt0,d}$ = tensão solicitante ao esforço de tração normal às fibras (MPa);

$\sigma_{Mx,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na em X (MPa);

$\sigma_{My,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na em Y (MPa);

$f_{t0,d}$ = resistência de cálculo referente à tração normal às fibras (MPa);

$f_{w,d}$ = resistência de cálculo referente à flexão (MPa);

k_M = coeficiente de correção igual a 0,7 para seção retangular.

5.3.10 Flexocompressão

A condição de segurança referente à resistência das seções transversais sujeitas à flexocompressão é determinada pela Equação mais rigorosa entre as duas a seguir, aplicadas ao ponto mais crítico na borda mais comprimida. É importante notar que o efeito das tensões resultantes da força normal de compressão é representado de maneira quadrática.

$$\left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (23)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (24)$$

Onde:

$\sigma_{Nc0,d}$ = tensão solicitante ao esforço de compressão normal às fibras (MPa);

$\sigma_{Mx,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na em X (MPa);

$\sigma_{My,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na em Y (MPa);

$f_{c0,d}$ = resistência de cálculo referente à compressão normal às fibras (MPa);

$f_{w,d}$ = resistência de cálculo referente à flexão (MPa);

k_M = coeficiente de correção igual a 0,7 para seção retangular.

5.4 Cisalhamento

Quando as peças estão sujeitas a solicitações como o esforço cortante, suas seções estão sujeitas a tensões tangenciais. A verificação das peças sujeitas a essas condições é realizada conforme as diretrizes da ABNT NBR 7190:2022-1, que são detalhadas a seguir.

5.4.1 Cisalhamento nas ligações

Nas conexões sujeitas à força cortante, a segurança em relação às tensões tangenciais é definida pela Equação 25.

$$\tau_d = \frac{V_d}{A} \leq f_{v0,d} \quad (25)$$

Onde:

τ_d = tensão de cisalhamento na seção (MPa);

V_d = valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN);

A = área líquida ou bruta da seção (cm²);

$f_{v0,d}$ = resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa).

Na falta de determinação experimental, admite-se:

- $f_{v0,d} = 0,12f_{c0,d}$ para coníferas
- $f_{v0,d} = 0,10f_{c0,d}$ para folhosas

5.4.2 Cisalhamento longitudinal em vigas

Nas vigas de seção retangular sujeitas à flexão com força cortante, a segurança em relação às tensões tangenciais é definida pela Equação 26.

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{A} \leq f_{v0,d} \quad (26)$$

Onde:

τ_d = tensão de cisalhamento na seção (MPa);

V_d = valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN);

A = área bruta da seção (cm²);

$f_{v0,d}$ = resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa).

5.4.3 Vigas entalhadas de seção retangular

Em vigas com transições bruscas de seção transversal, a norma estipula que a tensão de cisalhamento na seção enfraquecida deve ser multiplicada pelo fator h/h_1 , conforme demonstrado na Equação 27. Esse fator é determinado pela relação entre

a altura da viga e a dimensão mais crítica da seção enfraquecida, o entalhe, sendo esse valor, no mínimo, igual a $0,75h$, como ilustrado na Figura 30a.

No caso de ter a relação menor ou igual a $0,75h$, é aconselhável utilizar parafusos verticais dimensionados para resistir à tração axial total da força cortante a ser transmitida. Alternativamente, é possível empregar variação de seção com mísulas de comprimento não menor que três vezes a altura do entalhe. Esses dois cenários estão representados na Figura 30b.

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{b \cdot h_1} \left(\frac{h}{h_1} \right) \quad (27)$$

Onde:

τ_d = tensão de cisalhamento na seção (MPa);

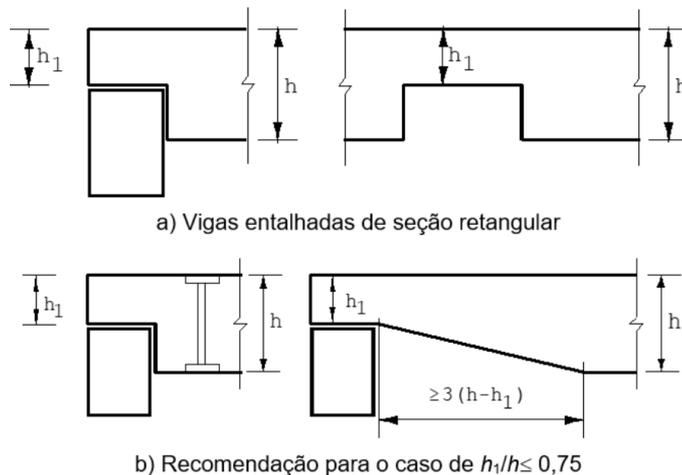
V_d = valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN);

b = dimensão da base da seção transversal (cm);

h = dimensão da maior altura da seção transversal da viga (cm).

h_1 = dimensão da menor altura da seção transversal da viga (cm).

Figura 30 - Vigas com entalhe



Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

5.5 ESTABILIDADE

A NBR 7190:2022-1 aborda a análise de estabilidade, verificando as condições de estabilidade de peças sujeitas à compressão, flexocompressão e flexão, o que inclui a estabilidade lateral em vigas.

Primeiramente, a norma leva em conta as considerações relacionadas ao alinhamento das peças. Em elementos que fazem parte de estruturas como pórticos, treliças, pilares ou vigas, nas quais a estabilidade lateral é uma condição importante, é necessário verificar a deflexão na direção axial da peça. Essa deflexão é medida no ponto localizado no centro da extensão entre os apoios e deve ser limitada a L/300 no caso de madeira serrada ou roliça, e a L/500 no caso de madeira laminada colada. Onde "L" representa o comprimento da peça analisada.

Os princípios de dimensionamento para a verificação da estabilidade são afetados pela esbeltez da peça, a qual é definida pelo índice de esbeltez. Quando o comprimento sujeito a flambagem varia em diferentes direções, é importante calcular a esbeltez em relação aos eixos x e y.

$$\lambda_x = \frac{L_{0,x}}{\sqrt{I_x/A}} \quad (28)$$

$$\lambda_y = \frac{L_{0,y}}{\sqrt{I_y/A}} \quad (29)$$

Onde:

λ_x, λ_y = índice de esbeltez em relação aos eixos x e y;

$L_{0,x}, L_{0,y}$ = comprimento de flambagem em relação aos eixos x e y (cm);

I_x, I_y = momento de inércia em relação aos eixos x e y (cm⁴);

A = área bruta da seção transversal (cm²).

O comprimento suscetível à flambagem, $L_{0,x}$ e $L_{0,y}$, é condicionado pelas vinculações das extremidades em cada direção, dependendo exclusivamente da condição de travamento daquela direção. O comprimento de flambagem é determinado pelas Equações 30 e 31 e o coeficiente associado às condições de apoio é especificado na Tabela 11.

$$L_{0,x} = K_E \cdot L_x \quad (30)$$

$$L_{0,y} = K_E \cdot L_y \quad (31)$$

Onde:

$L_{0,x}, L_{0,y}$ = comprimento de flambagem em relação aos eixos x e y (cm);

L_x, L_y = comprimento da peça em relação aos eixos x e y (cm⁴);

K_E = coeficiente de condição de vinculação em relação em cada comprimento de flambagem analisado, dado pela Tabela 11.

Tabela 11 - Valores do coeficiente K_E

Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Os índices de esbeltez relativa em duas direções são indicadores cruciais na avaliação da estabilidade de elementos estruturais sujeitos à compressão, como pilares. Quando o índice de esbeltez relativa é elevado, isso sinaliza que a peça é bastante delgada e, conseqüentemente, mais propensa à flambagem. Para peças com índice de esbeltez relativa igual ou inferior a 0,3 nas direções x e y simultaneamente, não é necessário realizar uma verificação de estabilidade adicional.

Nesse caso, basta verificar as condições de compressão conforme apresentado anteriormente no item 4.3.1 ou as condições de flexocompressão conforme apresentado no item 4.3.10. O índice de esbeltez relativa é calculado conforme as Equações 32 e 31.

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (32)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (33)$$

Onde:

$\lambda_{rel,x}, \lambda_{rel,y}$ = índice de esbeltez relativa em relação aos eixos x e y;

λ_x, λ_y = índice de esbeltez em relação aos eixos x e y;

$f_{c0,k}$ = resistência característica referente à compressão normal às fibras (MPa);

$E_{0,05}$ = rigidez característica na direção paralela às fibras (MPa), conforme item

5.8.7 da norma, é dado pela expressão: $E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{c0,med}$

5.5.1 Condição de estabilidade de peças comprimidas e flexocomprimidas

Quando o índice de esbeltez relativa excede 0,3 em qualquer direção, além das considerações anteriores, é necessário cumprir as exigências de estabilidade conforme as expressões 34 e 35.

$$\frac{\sigma N_{c,d}}{k_{c,x} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma M_{x,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma M_{y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (34)$$

$$\frac{\sigma N_{c,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma M_{x,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma M_{y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (35)$$

Onde:

$\sigma N_{c,d}$ = tensão de compressão normal à seção transversal (MPa);

$\sigma M_{x,d}$, $\sigma M_{y,d}$ = tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão em relação aos eixos x e y (MPa);

$f_{c0,d}$ = resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa);

$f_{m,d}$ = resistência de cálculo referente à flexão (MPa);

k_M = coeficiente de correção igual a 0,7 para seção retangular.

Os coeficientes k_{cx} e k_{cy} são calculados conforme as Equações 36 e 37.

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (36)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (37)$$

Sendo que k_x e k_y são obtidos a partir das Equações 38 e 39.

$$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2] \quad (38)$$

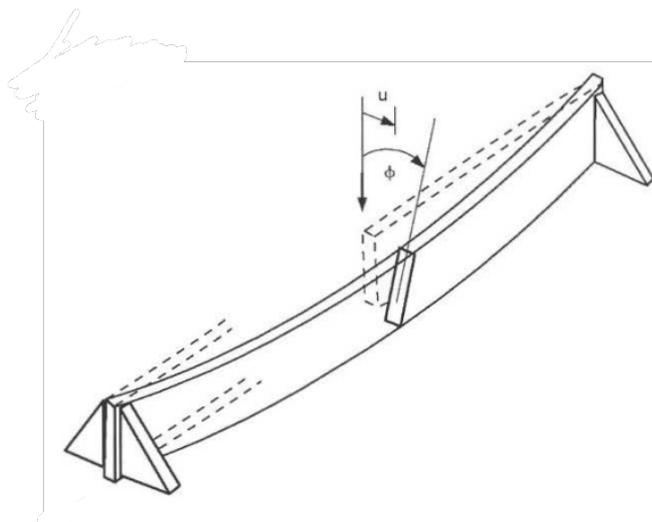
$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2] \quad (39)$$

Em que β_c é o fator que atende aos limites de divergência de alinhamento, sendo $\beta_c = 0,2$ para madeira maciça serrada e peças roliças; $\beta_c = 0,1$ para madeira lamelada (MLC e MLCC) e madeira laminada (LVL).

5.5.2 Estabilidade lateral das vigas de seção retangular

As vigas altas e esbeltas podem sofrer flambagem lateral, na qual a viga perde equilíbrio no plano principal de flexão e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotação de torção, conforme pode-se perceber na Figura 31.

Figura 31 - Flambagem lateral de vigas



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

Além de atenderem às condições de segurança conforme descritas em 4.3.7 as vigas submetidas à flexão simples reta devem ter sua estabilidade lateral examinada por uma teoria cuja eficácia tenha sido comprovada por meio de experimentos.

No entanto, essa verificação não é necessária para vigas de seção transversal retangular, com largura b e altura h medida no plano de aplicação da carga, contanto que cumpram os seguintes critérios:

- I. As rotações na extremidade da viga estão impedidas
- II. O comprimento L_1 , que é determinado como a distância entre pontos adjacentes da borda comprimida com restrição de deslocamento lateral (incluindo os apoios da viga e quaisquer pontos com contenção lateral, se presentes), satisfaz a seguinte relação:

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{0,ef}}{\beta_M \cdot f_{m,d}} \quad (40)$$

$$\beta_M = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\beta_E}{\gamma_f} \cdot \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{3/2}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{1/2}} \quad (41)$$

Onde:

L_1 = comprimento entre os pontos adjacentes da borda comprimida;

b = dimensão da base da seção transversal (cm);

h = dimensão da altura da seção transversal (cm);

$f_{m,d}$ = resistência de cálculo referente à flexão (MPa);

$E_{0,ef}$ = rigidez efetiva paralela às fibras (MPa), dada pela Equação 42.

β_M = coeficiente de correção;

β_E = coeficiente de correção igual a 4;

γ_f = coeficiente de ponderação igual a 1,4;

A rigidez efetiva, na verificação da estabilidade lateral, deve ser calculada conforme a seguinte Equação 42. Conforme item 5.8.7 da norma, para corpos de provas isento de defeitos, deve-se considerar igualdade $E_{0,ef} = E_{c0,med}$.

$$E_{0,ef} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot E_{0,med} \quad (42)$$

Onde os coeficientes k_{mod1} e k_{mod2} são determinados conforme o item 4.2.4, e $E_{0,med}$ é a rigidez média paralela às fibras que depende do tipo da madeira.

Para elementos em que a condição estabelecida para L_1 não é cumprida, a análise de estabilidade também pode ser dispensada, desde que, além de satisfazer as condições da flexão simples reta, o valor máximo calculado da tensão de compressão deve seguir o seguinte critério:

$$\sigma_{N_{c,d}} \leq \frac{E_{0,ef}}{\left(\frac{L_1}{b}\right) \cdot \beta_M} \quad (43)$$

Onde:

$\sigma N_{c,d}$ = tensão de compressão normal à seção transversal (MPa).

5.6 CONTRAVENTAMENTO

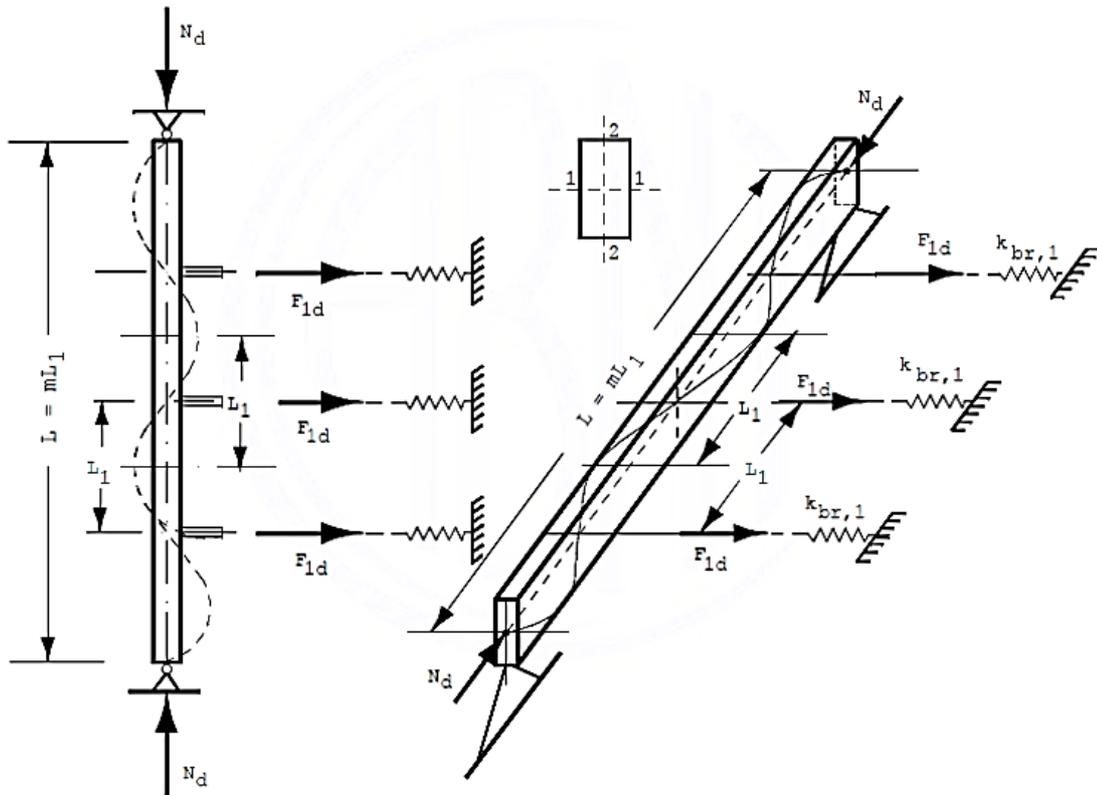
Conforme o item 6.6 da NBR 7190:2022-1, estruturas compostas por um sistema principal de elementos estruturais, alinhados de maneira mais rígida em planos paralelos, devem ser reforçadas por outros elementos estruturais posicionados de forma mais rígida em planos perpendiculares aos primeiros. Isso tem o propósito de evitar deslocamentos transversais excessivos no sistema principal e garantir a estabilidade global do conjunto.

Durante o processo de dimensionamento do reforço, é necessário considerar as imperfeições geométricas das peças, as inevitáveis excentricidades dos carregamentos e os efeitos de segunda ordem resultantes das deformações das peças fletidas. Quando a influência precisa desses fatores não é determinada, é permitido supor que, durante o cálculo, em cada nó do reforço, uma força F_{1d} atue. Essa força deve ser perpendicular ao plano de resistência dos elementos do sistema principal e ter uma magnitude convencional.

5.6.1 Contraventamento em peças comprimidas

Para peças comprimidas pela força de cálculo N_d , com articulações fixas em ambas as extremidades, que necessitam de contraventamento lateral por elementos separados a uma distância L_1 , conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 - Estabilidade lateral



Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

As forças F_{1d} atuando em cada nó do contraventamento podem ser assumidas com o valor mínimo convencional de $N_d/150$. Isso corresponde a uma curvatura inicial da peça, resultando em deflexões da ordem de $1/300$ do comprimento do arco correspondente.

A rigidez $K_{br,1}$ da estrutura de apoio transversal das peças de contraventamento deve garantir que a possível instabilidade teórica da barra principal comprimida corresponda a um eixo deformado composto por m semi ondas de comprimento L_1 entre nós fixos. A rigidez $K_{br,1}$ deve atender as seguintes condições mínimas.

$$K_{br,1,\min} = 2 \cdot \alpha_m \frac{(\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I_2)}{L_1^3} \quad (44)$$

$$\alpha_m = 1 + \cos \frac{\pi}{m} \quad (45)$$

Onde:

$K_{br,1,min}$ = rigidez mínima da estrutura de contraventamento (MPa);

$E_{c0,ef}$ = rigidez efetiva da peça principal contraventada (MPa), dada pela Equação 42.

I_2 = momento de inércia seção transversal da peça principal contraventada, para flexão no plano de contraventamento. (cm^4);

L_1 = distância entre elementos de contraventamento (cm);

m = número de segmentos contraventados, de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de α_m

m	2	3	4	5	∞
α_m	1	1,5	1,7	1,8	2

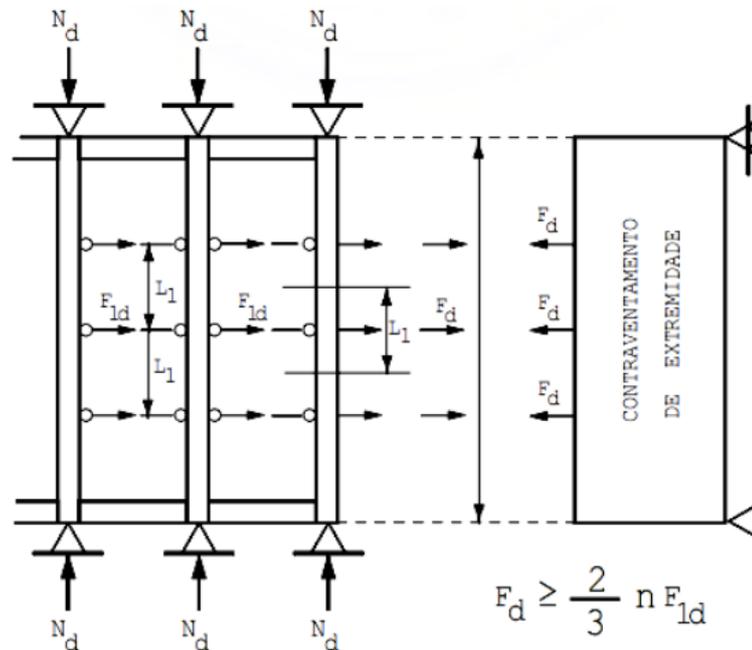
Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

5.6.2 Estabilidade global de elementos estruturais em paralelo

Conforme a NBR 7190:2022-1, para um sistema estrutural principal composto por uma série de n elementos estruturais planos em paralelo, nos quais a estabilidade lateral individual requer contraventamento, é necessário incorporar uma estrutura de contraventamento. Essa estrutura adicional é formada por elementos estruturais planos dispostos em planos perpendiculares ao plano dos elementos que estão sendo contraventados. Se a estrutura de contraventamento estiver sujeita a cargas externas durante a construção, os efeitos dessas cargas devem ser considerados junto com os efeitos resultantes da função de contraventamento.

As estruturas de contraventamento localizadas nas extremidades da construção, conforme ilustrado na Figura 33, e em possíveis posições intermediárias, se presentes, devem ser capazes de suportar, em cada nó, forças cujo valor calculado F_d seja pelo menos $2/3$ da soma das n forças F_{1d} que atuam na seção a ser estabilizada pela estrutura de contraventamento em questão.

Figura 33 - Arranjo horizontal de contraventamento



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022-1

A rigidez das estruturas de contraventamento deve ser dimensionada de modo a garantir que o nó mais sujeito a deslocamentos satisfaça o critério de rigidez mínima, que é calculado de acordo com a Equação 46.

$$K_{br} \geq \frac{2}{3} n \cdot K_{br,1,min} \quad (46)$$

Onde:

K_{br} = rigidez da estrutura de contraventamento (MPa);

$K_{br,1,min}$ = rigidez mínima da estrutura de contraventamento (MPa), conforme Equação 44;

n = número de nós da estrutura de contraventamento.

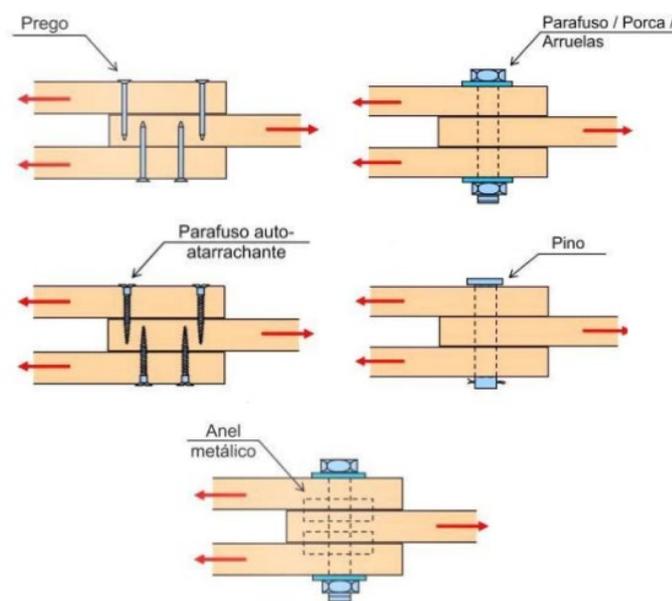
5.7 LIGAÇÕES

Nesta seção, será abordado o processo de cálculo para dois tipos tradicionais de ligações que ocorrem em elementos de madeira: as ligações por pinos metálicos e as ligações por anéis metálicos.

As ligações por pinos metálicos são influenciadas por um conjunto complexo de fenômenos, incluindo tanto a flexão do pino metálico quanto o embutimento do mesmo na madeira. Dentro dessa categoria, estão compreendidas ligações que utilizam parafusos passantes com a adição de porcas e arruelas (nos formatos hexagonais e franceses), parafusos de rosca soberba, pregos e pinos metálicos ajustados.

Este método se diferencia do anterior, no qual predominam os efeitos de flexão e embutimento. As ligações empregando anéis metálicos operam de maneira distinta, transmitindo as forças entre os elementos de madeira por meio de áreas de contato substanciais.

Figura 34 - Tipos de ligações estruturais em peças de madeira



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

5.7.1 Critério de dimensionamento

O dimensionamento dos elementos de ligação para os estados-limite últimos deve atender às condições de segurança de acordo com a Equação 47.

$$R_d \geq S_d \quad (47)$$

Onde:

R_d = resistência de cálculo da ligação, dado pela Equação 48;

S_d = valor de cálculo das solicitações atuantes.

$$R_d = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot \frac{R_k}{\gamma_{w,s}} \quad (48)$$

Onde:

R_k = resistência característica da ligação (MPa);

$\gamma_{w,s}$ = coeficiente de minoração para ligações como previsto no item 4.2.5.

5.7.2 Embutimento

A resistência ao embutimento ($f_{e,k}$) é definida por Rammer e Winistorfer (2001) como a capacidade da madeira de suportar compressão localizada ao redor de um pino, quando uma força é aplicada perpendicularmente ao seu eixo. Conforme observado por Almeida (1987), a pressão exercida pelo pino metálico resulta em um estado complexo de tensões na região adjacente ao furo, que tende a incorporar o pino na madeira.

Os esforços resistentes à compressão de pinos embutidos em orifícios da madeira são obtidos por meio de ensaio específico de embutimento, conforme a NBR 7190:2022-3. Na ausência de ensaios experimentais específicos, é possível empregar as equações que serão mostradas a seguir. Essas expressões de resistência de embutimento aplicam-se a ligações com pinos metálicos entre peças de madeira ou entre peças de madeira e chapas metálicas. No entanto, elas não são adequadas para ligações de pinos metálicos entre peças de madeira e painéis industrializados de madeira, como compensado e OSB (painel composto por tiras de madeiras dispostas na mesma direção).

A determinação da resistência de embutimento requer os valores da densidade característica. Quando informações precisas da caracterização mecânica não estão disponíveis, é possível utilizar uma relação entre a densidade média e a densidade característica, aplicável a elementos de madeira serrada e LVL, em qualquer ângulo em relação às fibras.

$$\rho_k = \frac{\rho_m}{1,2} \quad (49)$$

Onde:

ρ_k = densidade característica (kg/m³);

ρ_m = densidade média (kg/m³).

Para pregos com diâmetro menor que 8mm, aplicam-se as seguintes equações para o cálculo da resistência ao embutimento:

- Sem pré-furação:

$$f_{e,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \quad (50)$$

- Com pré-furação:

$$f_{e,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad (51)$$

Onde:

$f_{e,k}$ = resistência ao embutimento (MPa);

ρ_k = densidade característica (kg/m³);

d = diâmetro do prego (mm);

Para pregos com diâmetro maior que 8 mm e parafusos de até 30 mm de diâmetro, dispostos com ângulo α em relação às fibras, devem-se aplicar os valores característicos para o cálculo da resistência ao embutimento.

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (52)$$

$$f_{e0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad (53)$$

$$k_{90} = \left\{ \begin{array}{l} 1,35 + 0,015d \text{ (Para madeiras de coníferas)} \\ 1,30 + 0,015d \text{ (Para painéis de LVL)} \\ 0,90 + 0,015d \text{ (Para madeiras de folhosas)} \end{array} \right\} \quad (54)$$

Onde:

$f_{e\alpha,k}$ = resistência ao embutimento com ângulo α em relação às fibras (MPa);

$f_{e0,k}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras (MPa);

ρ_k = densidade característica (kg/m³);

d = diâmetro do prego (mm);

α = ângulo entre o esforço e a direção das fibras (°).

5.7.3 Características dos elementos de ligação por pinos metálicos

Os elementos de ligação utilizados em estruturas de madeira devem atender às seguintes dimensões e resistências mínimas.

Tabela 13 - Materiais usados em pinos metálicos

Especificação do pino metálico	Classificação	$f_{y,k}$ MPa	$f_{u,k}$ MPa	Diâmetro nominal mínimo
Prego liso com cabeça padrão ABNT NBR 6627	ABNT NBR 5589	-	635	$3,00 \geq \text{mm } d \geq 3,54 \text{ mm}$
		-	600	$3,55 \geq \text{mm } d \geq 4,99 \text{ mm}$
		-	490	$5,00 \geq \text{mm } d \geq 10,00 \text{ mm}$
Parafuso passante padrão o ASTM	A307	250	415	$d \geq 3/8 \text{ pol ou } d \geq 10 \text{ mm}$
	A325	635	825	
	A490	895	1 035	
Parafuso passante padrão ISO 898-1	Classe 4.6	235	400	$d \geq 10 \text{ mm}$
	Classe 8.8	640	800	
	Classe 10.9	900	1 000	
Parafuso de rosca soberba		250	415	$d \geq 3/8 \text{ pol ou } d \geq 9,5 \text{ mm}$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

5.7.4 Momento resistente

Conforme o item 7.1.4 da NBR 7190:2022-1, o momento resistente do pino metálico é dado pela Equação 55.

$$M_{yR,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (55)$$

Onde:

$M_{yR,k}$ = momento resistente do pino metálico (N.mm);

$f_{u,k}$ = resistência última característica à tração do aço do pino (MPa);

d = diâmetro nominal do pino metálico (mm).

5.7.5 Efeito de grupo

No contexto de ligações que envolvem até oito pinos alinhados em paralelo ao esforço a ser transmitido, a resistência total é obtida mediante a soma das resistências individuais de cada um dos pinos, conforme Equação 56.

$$\sum_{i=0}^n f_{i,k} = f_{1,k} + f_{2,k} + \dots + f_{8,k} \quad (56)$$

$$n_{ef} = n_c \quad (57)$$

Em situações em que o número de pinos em linha ultrapassa oito, é necessário considerar os pinos suplementares com apenas 2/3 de sua resistência individual. Nesse caso, a análise da ligação deve ser conduzida conforme a Equação 58. Nessa Equação, é crucial empregar o número efetivo de pinos resistentes.

$$\sum_{i=0}^n f_{i,k} = \frac{2}{3} \cdot (f_{9,k} + f_{2,k} + \dots + f_{n,k}) \quad (58)$$

$$n_{ef} = 8 + \frac{2}{3} \cdot (n_c - 8) \quad (59)$$

Onde:

$f_{i,k}$ = resistência característica do grupo de pinos metálico (MPa);

n_c = número de pinos na ligação;

n_{ef} = número efetivo de pinos resistentes na ligação.

5.7.6 Espaçamento mínimo entre elementos de ligação

As orientações referentes aos espaçamentos e distâncias mínimas recomendadas para ligações que envolvem pinos metálicos (como pregos com pré-furação, parafusos passantes com porcas e arruelas, parafusos de rosca soberba, parafusos ajustados e pinos lisos) e anéis metálicos estão apresentados na Tabela 14.

No contexto de ligações que conectam mais de três peças, é importante considerar a disposição dos pregos de forma que os espaçamentos sejam aderentes tanto nas peças internas quanto nas externas.

Nas ligações que empregam anéis metálicos, é necessário aplicar os espaçamentos em ranhuras pré-delineadas nas peças de madeira, utilizando ferramentas apropriadas. No contexto dos anéis metálicos, o parâmetro " d_a " representa o diâmetro efetivo do anel, sendo considerado como o diâmetro interno do mesmo.

Tabela 14 - Espaçamentos e distâncias mínimas para ligações com pinos e anéis metálicos.

Espaçamento ou distância	Ângulo α	Pregos com pré-furação	Parafusos passantes, parafusos de rosca soberba e parafusos ajustados	Pinos lisos	Anéis metálicos
Espaçamento a_1 (paralelo às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + 3 \cdot \cos \alpha) d$	$(4 + 3 \cos \alpha) d$	$(3 + 3 \cos \alpha) d$	$(1,2 + 0,8 \cos \alpha) d_a$
Espaçamento a_2 (perpendicular às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 6 \sin \alpha) d$	4 d	3.d	$1,2d_a$
Distância $a_{3,t}$ (extremidade carregada)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(7 + 5 \cos \alpha) d$	Maior entre 7 d e 80 mm	Maior entre 7 d e 80 mm	$2d_a$
	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	7 d	$(1 + 6 \sin \alpha) d$	Maior entre $[(a_{3,t} \sin \alpha) d]$ e d	$(0,9 + 0,6 \sin \alpha)d_a$

(continua)

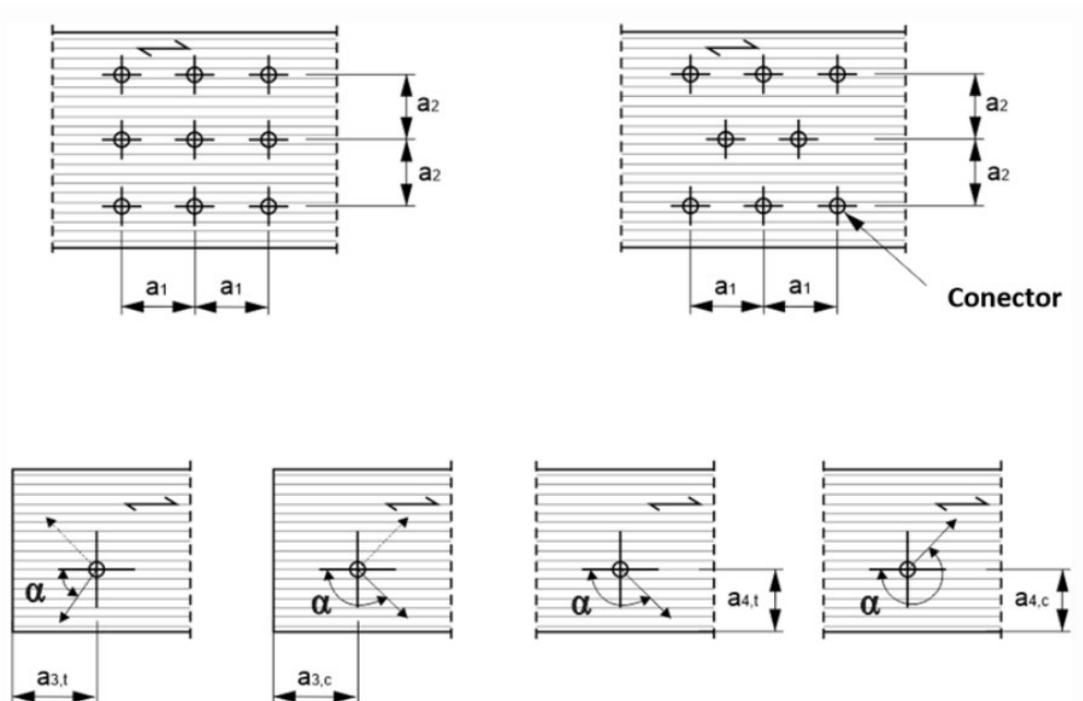
(continuação)

Distância $a_{3,c}$ (extremidade não carregada)	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	7d	4d	3d	$1,2d_a$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	7d	$(1 + 6 \text{sen } \alpha) d$	Maior entre $[(a_{3,t} \text{sen } \alpha)] d$ e d	$(0,9 + 0,6 \text{sen } \alpha) d_a$
Distância $a_{4,t}$ (borda lateral carregada)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	Para $d < 5 \text{ mm}$: $(3 + 2 \text{ sen } \alpha) d$ Para $d \geq 5 \text{ mm}$: $(3 + 4 \text{ sen } \alpha) d$	Maior entre $(2 + 2 \text{ sen } \alpha) d$ e 3 d	Maior entre $(2 + 2 \text{ sen } \alpha) d$ e 3 d)	$(0,8 + 0,2 \text{sen } \alpha) d_a$
Distância $a_{4,c}$ (borda lateral não carregada)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3d	3d	3d	$0,75d_a$

Fonte: Adaptado de NBR ABNT 7190:2022-1

Os espaçamentos da Tabela 14 estão representados na Figura 35.

Figura 35 - Distâncias das ligações com conectores metálicos



Fonte: ABNT NBT 7190:2022-1

5.7.7 Pré furação das ligações

De acordo com o item 7.1.11 da NBR 7190:2022-1, em estruturas temporárias, é permitido empregar ligações por pregos sem a necessidade de pré-furar a madeira, contanto que se utilizem madeiras de baixa densidade, onde $\rho_{ap} \leq 600 \text{ kg/m}^3$, que

possibilitem a penetração dos pregos sem o risco de causar fendilhamento. Além disso, os pregos empregados devem ter um diâmetro que seja no máximo 1/6 da espessura do elemento de madeira mais fino, e o espaçamento entre os pregos deve ser pelo menos 10 vezes o diâmetro.

A Tabela 15 apresenta o diâmetro de pré furação (d_0) para as ligações de pinos metálicos.

Tabela 15 - Pré-furação em ligações com pinos metálicos

Pino metálico	Diâmetro de pré-furação
Pregos	Coníferas $d_0 = 0,85 d$ Folhosas: $d_0 = 0,98 d$
Parafusos passantes	$d \leq d_0 \leq d + 1\text{mm}$
Parafusos com rosca soberba	$d_0 = 0,70 d$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

5.7.8 Rigidez axial

A determinação da rigidez axial das ligações deve seguir as diretrizes da ABNT NBR 7190-5. Caso não seja viável realizar o ensaio, é possível estimar a rigidez axial das ligações em elementos de madeira com base na Tabela 16. As equações são válidas somente para ligações com pinos metálicos que foram instalados de forma perpendicular às seções de corte.

Tabela 16 - Valores de K_{ser} para pinos e anéis metálicos

Conectores	K_{ser}
Pinos Parafuso de porca e arruela com ou sem folga ^a Parafuso Autoatarraxante Pregão (com pré-furação)	$\rho_{med}^{1,5} \frac{d}{23}$
Pregão (sem pré-furação)	$\rho_{med}^{1,5} \frac{d^{0,8}}{30}$
Anel Metálico	$\frac{\rho_{med} d_c}{80}$
^a A folga pode ser adicionada separadamente da deformação. Legenda K_{ser} é a rigidez de serviço de uma seção de corte de um pino metálico, expresso em Newton por milímetros (N/mm). ρ_{med} é a densidade específica média em kg/m ³ , dado pela multiplicação da densidade aparente característica pelo valor 1,20. d é o diâmetro efetivo do pino metálico, expresso em milímetros (mm).	

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Para o caso de ligações envolvendo elementos de madeira com densidades distintas, a densidade média ρ_{med} pode ser determinada utilizando seguinte Equação 60

$$\rho_{med} = \sqrt{\rho_{1,med} \cdot \rho_{2,med}} \quad (60)$$

Onde:

$\rho_{1,med}$ = densidade do primeiro elemento de madeira (kg/m³);

$\rho_{2,med}$ = densidade do primeiro elemento de madeira (kg/m³).

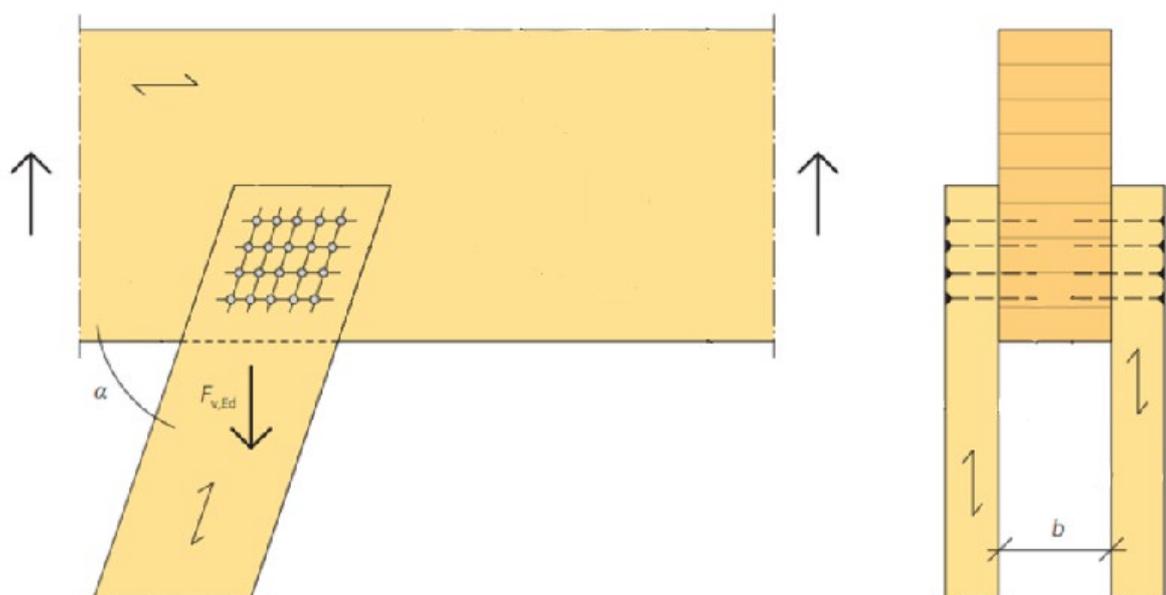
A rigidez em condições de serviço, representada por K_{ser} , é empregada na análise dos estados limites de serviço. Para os estados limites últimos, a rigidez final K_u deve ser utilizada, sendo calculada mediante a Equação 61.

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (61)$$

5.7.9 Ligações de elementos em madeira com pinos metálicos

Os pinos metálicos são cilindros de superfície lisa que são inseridos entre as peças de madeira. O diâmetro do furo deve ser igual ou menor que o diâmetro do pino. Os parafusos ajustados referem-se aos pinos metálicos instalados com ajuste preciso entre as peças para mantê-las na posição desejada. Em comparação com os parafusos instalados com folga, os pinos (e os parafusos ajustados) proporcionam conexões mais rígidas. Em termos de capacidade de resistência, pinos e parafusos com o mesmo diâmetro possuem a mesma capacidade de suporte. A Figura 36 ilustra a ligação entre madeira com pinos metálicos.

Figura 36 - Conexão de madeira com pinos metálicos



Fonte: Limträhandbok, Svenskt Trä Del 2 (2016)

A determinação da resistência de ligações utilizando pinos metálicos deve seguir as diretrizes estabelecidas na norma ABNT NBR 7190-5. Caso não seja viável realizar o ensaio, é possível estimar a resistência característica da ligação por meio da seguinte Equação:

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (62)$$

Onde:

R_k = força resistente característica da ligação com pinos metálicos (N);

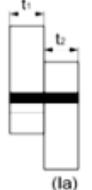
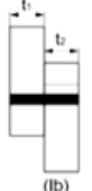
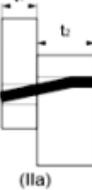
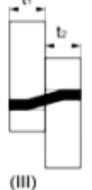
$F_{v,Rk}$ = força resistência característica de um pino em uma seção de corte (N);

n_{sp} = número de seções de corte por pino metálico;

n_{ef} = número efetivo de pinos por ligação, como previsto no item 7.4.

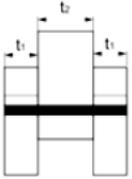
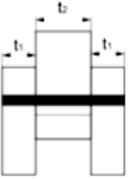
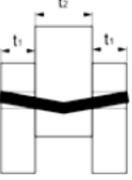
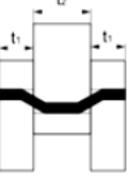
A resistência característica de uma seção de corte de um pino é calculada como o valor mínimo entre aqueles obtidos por meio das equações apresentadas nas Tabelas 17 e 18. Essas equações correspondem a diferentes modos de falha, levando em consideração a resistência de embutimento, a espessura dos elementos de madeira conectados, o momento resistente do pino metálico e o diâmetro efetivo do pino.

Tabela 17 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos (uma seção de corte).

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
 <p>(Ia)</p>	$F_{V,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d$
 <p>(Ib)</p>	$F_{V,Rk2} = f_{e1,k} t_2 d \beta$
 <p>(Ic)</p>	$F_{V,Rk3} = \frac{f_{e1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(IIa)</p>	$F_{V,Rk4} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(IIb)</p>	$F_{V,Rk5} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta) M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(III)</p>	$F_{V,Rk6} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
<p>$F_{V,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos seis modos de falha.</p>	

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Tabela 18 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos (duas seções de corte).

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
 <p>(Ia)</p>	$F_{V,RK1} = f_{e1,k} t_1 d$
 <p>(Ib)</p>	$F_{V,RK2} = 0,5 f_{e1,k} t_2 d \beta$
 <p>(II)</p>	$F_{V,RK3} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
 <p>(III)</p>	$F_{V,RK4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
$F_{V,RK}$ é o menor valor dentre os resultados dos quatro modos de falha.	

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

Onde:

d = diâmetro do pino (mm);

t_1 = menor espessura dos elementos de madeira laterais, para os casos em corte simples e corte duplo (mm);

t_2 = espessura do elemento de madeira central no corte duplo (mm);

$f_{e1,k}$ e $f_{e2,k}$ = resistências ao embutimento dos elementos de madeira (MPa);

$M_{y,Rk}$ = momento resistente do pino metálico (N.mm);

O valor β é a razão entre as resistências de embutimento das peças de madeira interligadas $f_{e1,k}$ e $f_{e2,k}$ dado por:

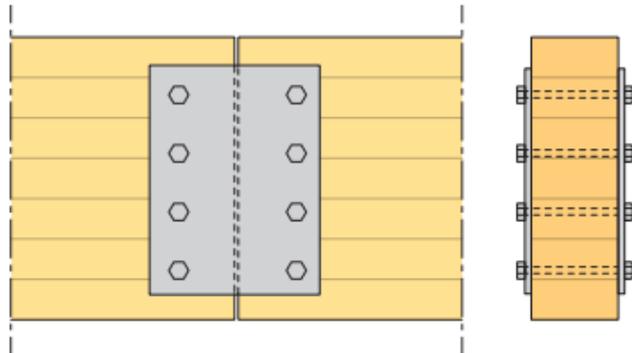
$$\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}} \quad (63)$$

O valor correspondente a $F_{ax,Rk}/4$ representa a influência do confinamento gerado pela compressão das arruelas nas bordas externas da ligação. Isso também abrange a resistência à tração na situação de pregos e parafusos de rosca soberba, ou o efeito de embutimento da cabeça de pregos ou parafusos de rosca soberba nas bordas externas das peças de madeira.

5.7.10 Ligações de elementos de madeira e aço

A fim de assegurar a estabilidade das conexões, empregam-se componentes de madeira em combinação com placas de aço, os quais são fixados por meio de parafusos, cavilhas ou elementos de ligação similares (Ohene, 2014). A Figura 37 ilustra esse tipo de ligação entre madeira com a chapa de aço e parafusos passantes.

Figura 37 - Conexão de madeira e placa de aço



Fonte: Limträhandbok, Svenskt Trä Del 2 (2016)

A resistência de ligações que envolvem parafusos passantes acompanhados por chapas de aço laterais ou uma chapa de aço central deve ser determinada de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma ABNT NBR 7190-5. Na situação em que a condução do ensaio padronizado não seja viável, é possível calcular a resistência característica da ligação utilizando a seguinte Equação:

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_0 \quad (64)$$

Onde:

R_k = força resistente característica da ligação com pinos metálicos (N);

$F_{v,Rk}$ = força resistente característica de um pino em uma seção de corte (N);

n_{sp} = número de seções de corte por pino metálico;

n_{ef} = número efetivo de pinos por ligação, como previsto no item 7.4.

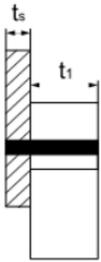
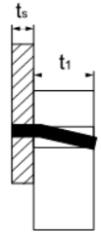
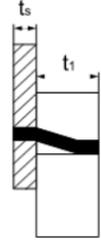
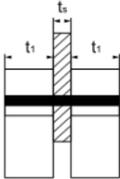
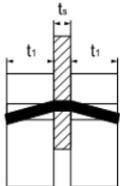
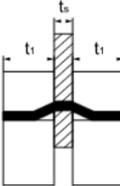
A força característica por plano de corte e por pino metálico deve ser selecionada como o valor mínimo obtido entre os resultados das equações apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira e aço com pinos metálicos.

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
Ligações com chapas finas em corte simples.	
a) 	$F_{v,Rk} = 0,4 \cdot f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$
b) 	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
Ligações com chapas grossas em cortes simples.	

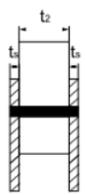
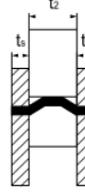
(continua)

(continuação)

c)		$F_{V,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$
d)		$F_{V,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
e)		$F_{V,Rk} = 2,3 \cdot \left[\sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
Ligações com chapa de aço central de qualquer espessura em dupla seção de corte.		
f)		$F_{V,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$
g)		$F_{V,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
h)		$F_{V,Rk} = 2,3 \cdot \left[\sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
Ligações com duas chapas laterais caracterizadas como finas em corte duplo.		

(continua)

(continuação)

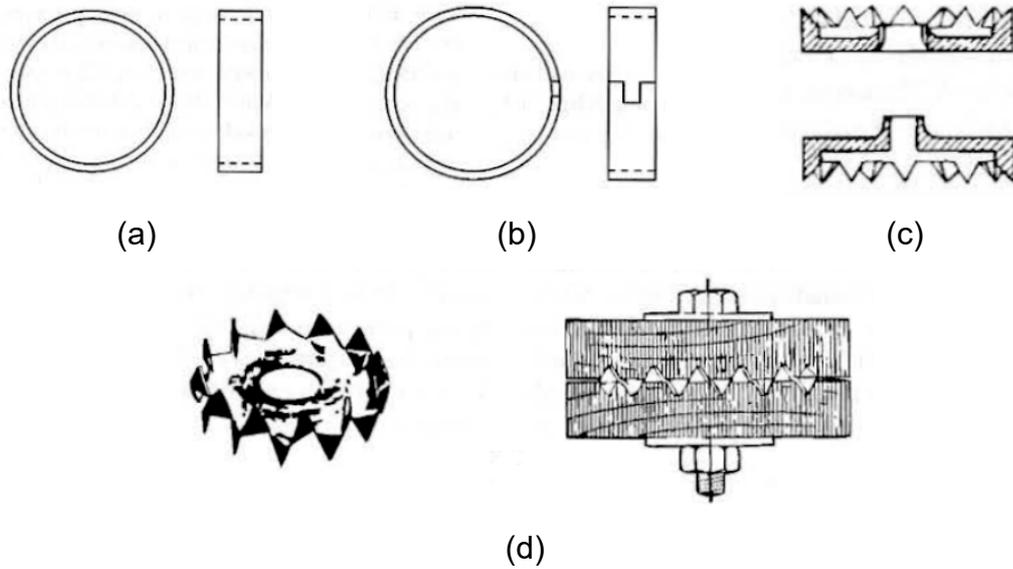
i)		$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{e2,k} \cdot t_2 \cdot d$
j)		$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{e2,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
Ligações com duas chapas laterais caracterizadas como grossas em corte duplo.		
k)		$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{e2,k} \cdot t_2 \cdot d$
l)		$F_{v,Rk} = 2,3 \cdot \left[\sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e2,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).(dados da ABNT NBR 7190:2022-1)

5.7.11 Ligações de elementos em madeira com anéis metálicos

A capacidade de resistência das conexões com pinos metálicos é restringida tanto pela tensão de apoio do pino na madeira quanto pela flexão. A fim de contornar essas limitações, foram desenvolvidos elementos rígidos conhecidos como conectores de anel, que proporcionam uma área ampla de contato com a madeira. Esses conectores de anel são componentes metálicos posicionados em encaixes nas interfaces das peças de madeira, sendo fixados no lugar por meio de parafusos. A Figura 38 mostra os tipos de conectores em formato de anel, sendo: a) anel inteiro, b) anel partido, c) anel macho-e-fêmea dentado e d) chapa estampada.

Figura 38 - Tipos de anéis metálicos de ligação



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

A resistência característica de ligações com anéis metálicos deve ser conforme a NBR 7190-5. Na situação em que a condução do ensaio padronizado não seja viável, é possível calcular a resistência característica da ligação utilizando a seguinte Equação:

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_a \quad (65)$$

Onde:

R_k = força resistente característica da ligação com anéis metálicos (N);

$F_{v,Rk}$ = força resistente característica do anel em uma seção de corte (N);

n_a = número de anéis utilizados na ligação;

A resistência de um anel metálico associada a uma determinada seção de corte na ligação entre duas peças de madeira é determinada com base nas resistências ao cisalhamento longitudinal $f_{v0,d}$ das duas madeiras conectadas.

O cálculo do valor de resistência ao cisalhamento da madeira relacionado a um anel metálico é realizado como segue e é determinado pelo menor valor entre as duas equações.

$$F_{v,Rk} = \frac{\pi \cdot d_a^2}{4} \cdot f_{v0,k} \quad (66)$$

$$F_{v,Rk} = t_a \cdot d_a \cdot f_{c\alpha,k} \quad (67)$$

Onde:

$F_{v,Rk}$ = força resistente característica do anel metálico (N);

d_a = diâmetro interno do anel;

t_a = profundidade de penetração do anel em cada peça de madeira;

$f_{v0,k}$ = resistência característica referente ao cisalhamento (MPa);

$f_{c\alpha,k}$ = resistência característica à compressão inclinada em relação às fibras, da madeira (MPa), como previsto no item 5.3.5.

5.8 SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A madeira queima de maneira lenta e superficial quando exposta ao fogo, atuando como isolante térmico para retardar a propagação do calor e conseqüente degradação. A exposição ao fogo reduz a seção transversal da madeira, diminuindo sua resistência e rigidez próxima à zona carbonizada.

Yang et al., (2007) destaca a importância de compreender a degradação térmica, incluindo a taxa de carbonização e a distribuição de temperatura, para calcular a capacidade de resistência da seção. A taxa de carbonização (β_n) indica a velocidade de avanço da carbonização.

Pinto et al., (2005) considera a taxa de carbonização crucial para avaliar a resistência ao fogo, pois a diminuição da área resistente causa falha nos elementos de madeira. Em resumo, os métodos de dimensionamento devem prever a espessura carbonizada do elemento estrutural de madeira em um período de exposição ao fogo.

Conforme o item 11.2.5 da NBR 7190:2022-1, o cálculo da seção transversal deve ser determinado desprezando-se a espessura efetiva (e_{ef}), calculada conforme a Equação 68.

$$e_{ef} = e_{carb,n} + k_0 e_0 \quad (68)$$

Onde:

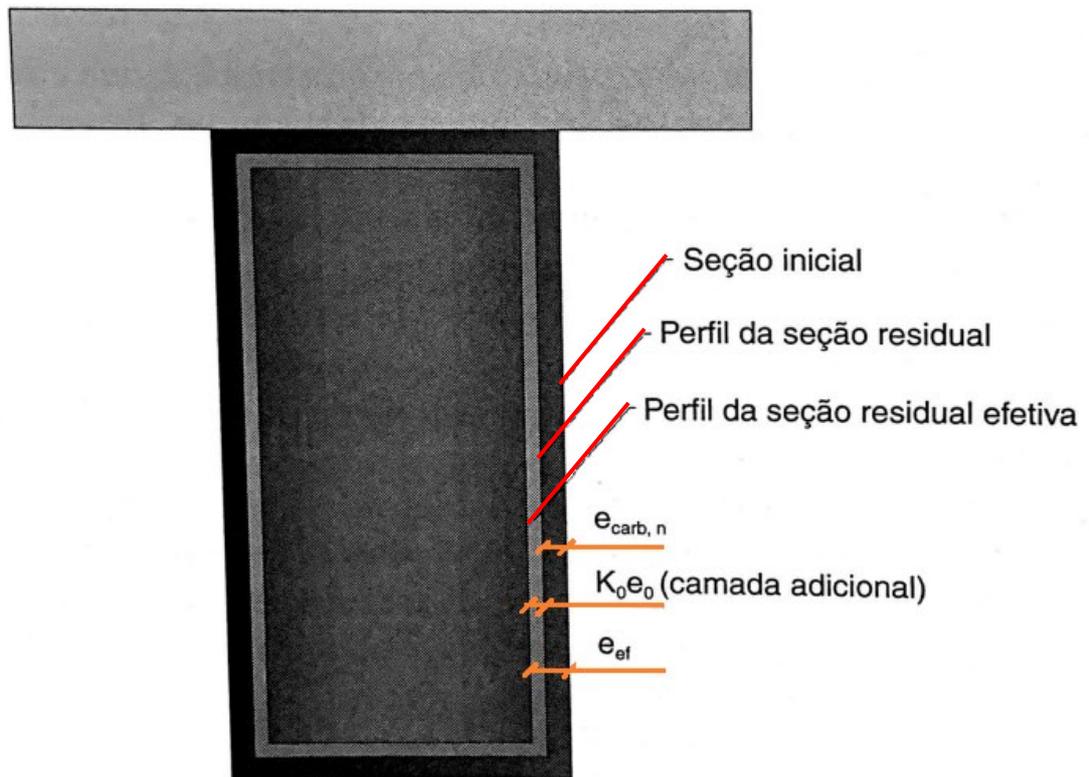
e_{ef} = espessura efetiva da madeira (mm);

$e_{carb,n}$ = espessura carbonizada nominal considerando o efeito de confinamento (mm);

K_0 = coeficiente para superfícies sem revestimento, dado pela Tabela 20;

$e_0 = 7$ mm.

Figura 39 - Seção residual da madeira em situação de incêndio



Fonte: Calil Jr. et al., (2019)

O coeficiente K_0 , depende do tempo de duração de exposição ao fogo da madeira, dado em minutos.

Tabela 20 - Coeficiente para superfícies em proteção

Minutos	K_0
$t < 20$	$t/20$
$t \geq 20$	1,00

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

O valor da espessura carbonizada $e_{carb,n}$, considerando o efeito de arredondamento do canto e fissuras, é dado pela Equação 69, sendo o valor da taxa de carbonização β_n dado pela Tabela 21.

$$e_{carb,n} = \beta_n t \quad (69)$$

Para elementos planos, deve-se substituir $e_{carb,n}$ pela espessura carbonizada básica $e_{carb,0}$ na Equação 70. De forma similar, o cálculo de $e_{carb,0}$ é dada pela Equação 71.

$$e_{carb,0} = \beta_0 t \quad (70)$$

Tabela 21 - Taxas de carbonização para superfícies sem revestimento

Material	Tipo	β_0	β_n
Coníferas	MLC, MLCC ou madeira serrada	0,65	0,70
Folhosas ^a	Baixa densidade	0,65	0,70
	Média e alta densidades	0,50	0,55
LVL	$\rho_{aparente} \geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Painéis ^b	Painéis de madeira Compensado e outros	0,9*	-
		1,0*	
		0,9*	
^a Aplica-se tanto para madeira serrada como para MLC. ^b Valores de β válidos para $\rho = 450 \text{ kg/m}^2$ e $h_p \geq 20 \text{ mm}$. Para outras densidades e espessuras, o valor de β_0 deve ser substituído por β , com ρ_k em kg/m^3 e h_p em mm			

Fonte: ABNT NBR 7190:2022-1

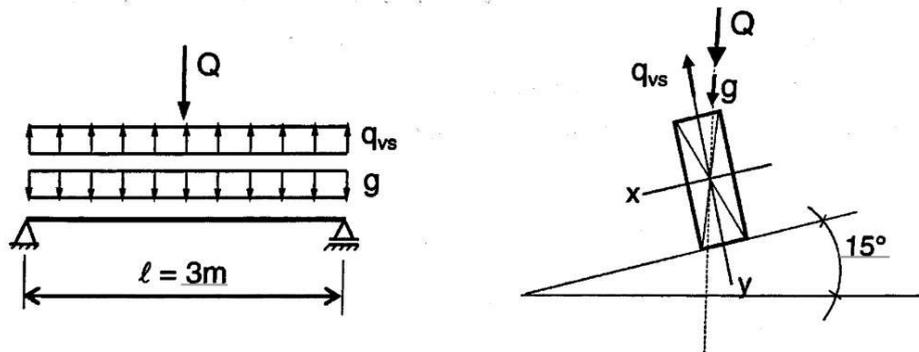
6 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

6.1 Exemplo 1: Terça de cobertura

Segundo Calil Jr. et al., (2019), neste exemplo, será analisada a verificação de uma terça de cobertura em um telhado com uma inclinação de 15°, conforme proposto pelo autor. Este exemplo será utilizado para fins de comparação e verificação do funcionamento da ferramenta. Embora o livro seja datado de 2019, o autor baseou

seus cálculos nas referências das revisões da norma NBR 7190 que estavam ocorrendo, o que pode ser um fator importante a considerar para eventuais diferenças nos valores discutidos, conforme necessário. A Figura 40 representa as cargas aplicadas à terço de cobertura.

Figura 40 - Forças atuantes e suas direções



Fonte: Calil Jr. et al., (2019)

Sendo:

$g = 500 \text{ N/m}$ - carga distribuída devida à ação permanente;

$Q = 1000 \text{ N}$ - sobrecarga do telhado para prever eventual manutenção;

$q_{vs} = -900 \text{ N/m}$ - carga distribuída devida à ação do vento de sucção.

Os valores característicos dos esforços são:

$$M_{g,k} = \frac{g \cdot l^2}{8} = \frac{500 \cdot 3^2}{8} = 562,5 \text{ N.m}$$

$$M_{Q,k} = \frac{Q \cdot l}{4} = \frac{1000 \cdot 3}{4} = 750 \text{ N.m}$$

$$V_{g,k} = \frac{g \cdot l}{2} = \frac{500 \cdot 3}{2} = 750 \text{ N}$$

$$M_{vs,x,k} = \frac{q_{vs} \cdot l^2}{8} = \frac{-900 \cdot 3^2}{8} = -1012,5 \text{ N.m}$$

$$Q_{vs,x,k} = \frac{q_{vs} \cdot l}{2} = \frac{-900 \cdot 3}{2} = -1350 \text{ N.m}$$

Informações complementares e essenciais para dados de entrada na planilha:

- Madeira serrada;
- Seção retangular 6x12 cm;

- Classe D40;
- Umidade da madeira de 12%.

Para análise do problema, deve-se considerar as combinações de ação que serão feitas. Nesse exemplo serão avaliadas duas combinações de ações que serão calculadas a partir dos esforços solicitantes, e nesse caso, será feita a consideração que a madeira apresenta um comportamento linear.

1) Ação permanente + sobrecarga: ($\gamma_g = 1,4$; $\gamma_Q = 1,4$)

$$M_{x,d} = \gamma_g \cdot M_{g,k} \cdot \cos 15^\circ + \gamma_Q \cdot M_{Q,k} \cdot \cos 15^\circ$$

$$M_{y,d} = \gamma_g \cdot M_{g,k} \cdot \sin 15^\circ + \gamma_Q \cdot M_{Q,k} \cdot \sin 15^\circ$$

$$V_{x,d} = \gamma_g \cdot V_{g,k} \cdot \sin 15^\circ + \gamma_Q \cdot M_{Q,k} \cdot \sin 15^\circ$$

$$V_{y,d} = \gamma_g \cdot V_{g,k} \cdot \cos 15^\circ + \gamma_Q \cdot M_{Q,k} \cdot \cos 15^\circ$$

2) Ação permanente + vento de sucção: ($\gamma_g = 1,0$; $\gamma_{vs} = 1,4$)

$$M_{x,d} = \gamma_g \cdot M_{g,k} \cdot \cos 15^\circ + \gamma_{vs} \cdot M_{vs,x,k}$$

$$M_{y,d} = \gamma_g \cdot M_{g,k} \cdot \sin 15^\circ$$

$$V_{x,d} = \gamma_g \cdot V_{g,k} \cdot \sin 15^\circ$$

$$V_{y,d} = \gamma_g \cdot V_{g,k} \cdot \cos 15^\circ + \gamma_{vs} \cdot M_{vs,x,k}$$

Sendo assim, os valores de cálculo para as combinações, assumem o valor de:

1) Ação permanente + sobrecarga:

$$M_{x,d} = 1,775 \text{ kN.m}$$

$$M_{y,d} = 0,476 \text{ kN.m}$$

$$V_{x,d} = 0,634 \text{ kN}$$

$$V_{y,d} = 2,367 \text{ kN}$$

2) Ação permanente + vento de sucção:

$$M_{x,d} = -0,874 \text{ kN.m}$$

$$M_{y,d} = -1,45 \times 10^{-6} \text{ kN.m}$$

$$V_{x,d} = 0,194 \text{ kN}$$

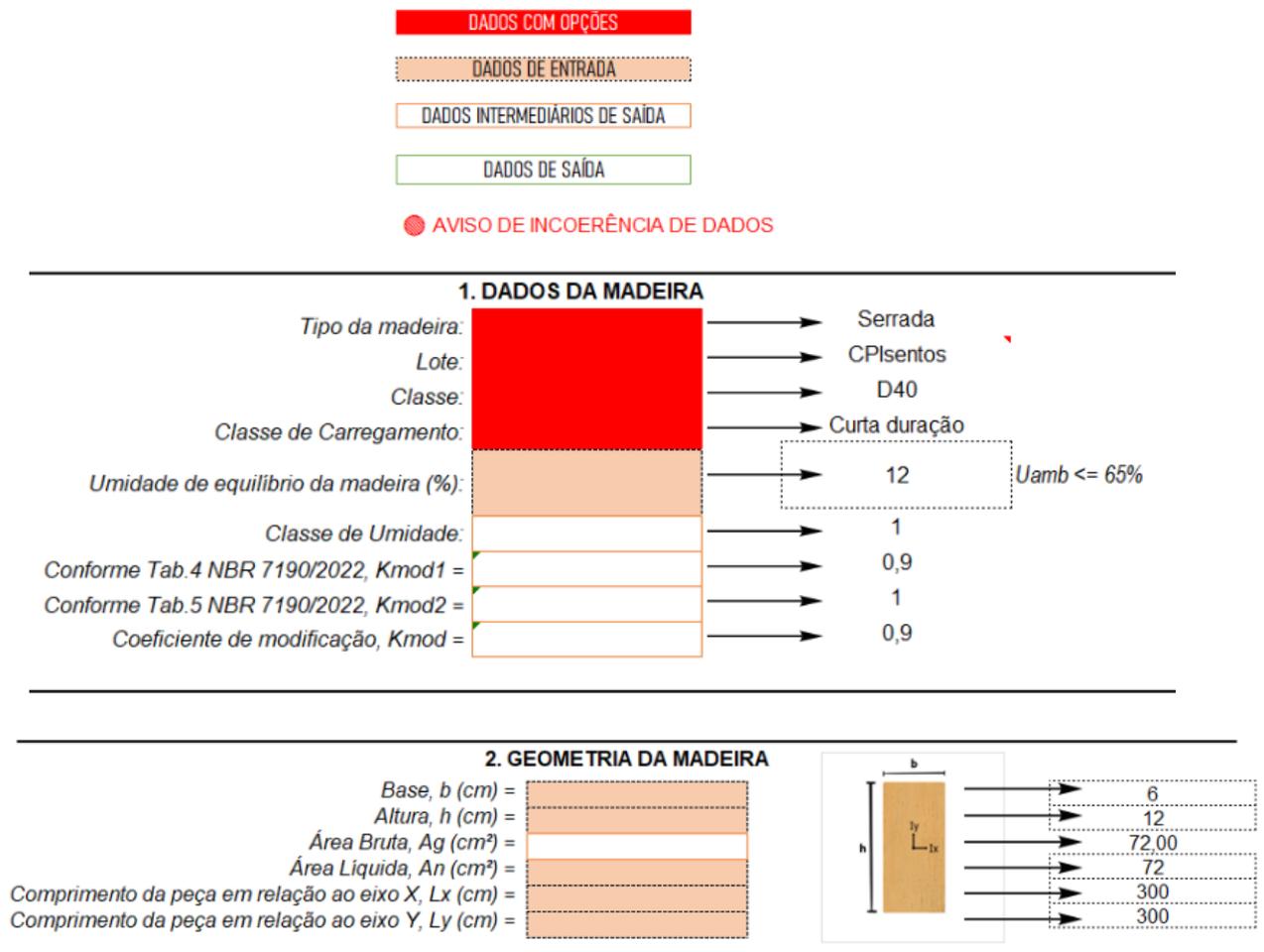
$$V_{y,d} = -1,16 \times 10^{-3} \text{ kN}$$

Os valores de cálculo para a segunda combinação são menos críticos; portanto, não seria necessário verificar esses dados se os valores da primeira combinação satisfizerem os critérios de estado limite último (ELU).

6.1.1 Dados da tabela

Para esse exemplo, o item da planilha que será usado será o “1. Madeira Seção Retangular” para inserção de dados e verificações.

Figura 41 - Inserção de dados na planilha para a primeira combinação



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Como foi escolhido utilizar dados para corpos de prova isentos de defeitos, conforme Tabela 5 (item 4.1), a planilha retorna os dados das propriedades mecânicas automaticamente.

Figura 42 - Dados da propriedade da madeira

3. PROPRIEDADES DA MADEIRA		
Usar dados de CP's Isentos de Defeitos (Tab. 2 NBR 7190/2022) e Classificação Simplificada de Espécies		
Resistência à flexão	$f_{m,k}$ (MPa) =	51,95
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0,k}$ (MPa) =	51,95
Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{t90,k}$ (MPa) =	2,60
Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0,k}$ (MPa) =	40,00
Resistência à compressão perpendicular às fibras	$f_{c90,k}$ (MPa) =	10,00
Resistência ao cisalhamento	$f_{v,k}$ (MPa) =	6,00
Rigidez média paralela às fibras	$E_{0,m}$ (MPa) =	14500,00
Rigidez característica paralela às fibras	$E_{0,05}$ (MPa) =	10150,00
Rigidez média perpendicular às fibras	$E_{90,m}$ (MPa) =	725,00
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m (MPa) =	906,25
Densidade característica	ρ_k (kg/m ³) =	625,00
Densidade média	ρ_m (kg/m ³) =	750,00

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Como o exemplo se trata de um problema de flexão oblíqua simples, serão verificadas as tensões normais devido ao momento fletor e de cisalhamento nos dois planos da terça.

Figura 43 - Verificação à flexão simples oblíqua da primeira combinação

13. FLEXÃO SIMPLES OBLÍQUA		
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma_{Mx,d}$ =	12,33
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma_{My,d}$ =	6,61
Coefficiente de correção para seção retangular	K_m =	0,7
Coefficiente de modificação	K_{mod} =	0,9
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m,k}$ =	51,95
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m,d}$ =	33,40
CONDIÇÃO 1		
$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$		0,51 ≤ 1 OK
CONDIÇÃO 2		
$K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$		0,46 ≤ 1 OK

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 44 - Verificação ao cisalhamento no eixo x da primeira combinação

17. CISALHAMENTO LONGITUDINAL		
Valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN)	$V_d =$	0,634
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	0,9
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} =$	40,00
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} =$	25,71
Resistência característica referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,k} =$	6,00
Resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,d} =$	3,00
Área que está atuando a tensão (cm ²)	$A =$	72
Tensão de cisalhamento na seção (MPa)	$\tau_d =$	0,1321
		$\tau_d \leq f_{v0,d}$ OK

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{A}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 45 - Verificação ao cisalhamento no eixo y da primeira combinação

17. CISALHAMENTO LONGITUDINAL		
Valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN)	$V_d =$	2,367
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	0,9
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} =$	40,00
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} =$	25,71
Resistência característica referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,k} =$	6,00
Resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,d} =$	3,00
Área que está atuando a tensão (cm ²)	$A =$	72
Tensão de cisalhamento na seção (MPa)	$\tau_d =$	0,493
		$\tau_d \leq f_{v0,d}$ OK

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{A}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023)..

Para confirmação, os mesmos passos para os valores de cálculo da segunda combinação serão feitos, considerando que o carregamento é instantâneo.

Figura 46 - Inserção de dados na planilha para a segunda combinação

1. DADOS DA MADEIRA	
Tipo da madeira:	Serrada
Lote:	CPIsentos
Classe:	D40
Classe de Carregamento:	Instantânea
Umidade de equilíbrio da madeira (%):	12
	<i>U_{amb} ≤ 65%</i>
Classe de Umidade:	1
Conforme Tab.4 NBR 7190/2022, K _{mod1} =	1,1
Conforme Tab.5 NBR 7190/2022, K _{mod2} =	1
Coefficiente de modificação, K _{mod} =	1,1

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 47 - Verificação à flexão simples oblíqua da segunda combinação

13. FLEXÃO SIMPLES OBLÍQUA	
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma_{Mx, d} = -6,07$
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma_{My, d} = 0,00$
Coefficiente de correção para seção retangular	$K_m = 0,7$
Coefficiente de modificação	$K_{mod} = 1,1$
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m, k} = 51,95$
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m, d} = 40,82$
CONDIÇÃO 1	
$\frac{\sigma_{Mx, d}}{f_{m, d}} + k_M \frac{\sigma_{My, d}}{f_{m, d}} \leq 1$	$-0,15 \leq 1 \text{ OK}$
CONDIÇÃO 2	
$k_M \frac{\sigma_{Mx, d}}{f_{m, d}} + \frac{\sigma_{My, d}}{f_{m, d}} \leq 1$	$-0,10 \leq 1 \text{ OK}$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 48 - Verificação ao cisalhamento no eixo x da primeira combinação

17. CISALHAMENTO LONGITUDINAL	
Valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN)	$V_d = 0,194$
Coefficiente de modificação	$K_{mod} = 1,1$
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} = 40,00$
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} = 31,43$
Resistência característica referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,k} = 6,00$
Resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,d} = 3,67$
Área que está atuando a tensão (cm ²)	$A = 72$
Tensão de cisalhamento na seção (MPa)	$\tau_d = 0,040$ $\tau_d \leq f_{v0,d}$ OK

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{A}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 49 - Verificação ao cisalhamento no eixo y da primeira combinação

17. CISALHAMENTO LONGITUDINAL	
Valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN)	$V_d = 0,00000116$
Coefficiente de modificação	$K_{mod} = 1,1$
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} = 40,00$
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} = 31,43$
Resistência característica referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,k} = 6,00$
Resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,d} = 3,67$
Área que está atuando a tensão (cm ²)	$A = 72$
Tensão de cisalhamento na seção (MPa)	$\tau_d = 0,000$ $\tau_d \leq f_{v0,d}$ OK

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{A}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Portanto, como era previsto, pode-se concluir que a seção de madeira serrada escolhida para a terça de cobertura da viga atende às condições de segurança em relação ao Estado Limite Último (ELU) para o primeiro carregamento e, conseqüentemente, atende também para o segundo carregamento por ser valores menos críticos.

No estudo realizado pelo autor do livro, os resultados obtidos para os casos de verificação da flexão oblíqua demonstram diferenças significativas, com valores de 0,68 e 0,55 para a primeira e segunda condição respectivamente. Essa disparidade pode ser atribuída à utilização de um material diferente considerado pelo autor, o que

consequentemente afetou as resistências características, resultando em valores aproximados.

No entanto, ao aplicar os dados fornecidos pelo autor na função "Usar dados manuais" da planilha, é possível observar que ao considerar com maior precisão os parâmetros e propriedades do material, neste caso, ao adotar exatamente os mesmos valores fornecidos pelo autor, as diferenças iniciais desaparecem. Essa equalização é ilustrada de maneira clara nas Figuras 50 e 51, evidenciando a importância da correta especificação dos dados e do material utilizado para obter resultados confiáveis e consistentes em análises de flexão oblíqua.

Dados usados pelo autor:

- $f_{c0,k} = 40$ MPa;
- $f_{v0,k} = 6$ MPa;

Figura 50 - Propriedade da madeira conforme indicado pelo autor

3. PROPRIEDADES DA MADEIRA			
Usar dados manuais			
Resistência à flexão	$f_{m,k}$ (MPa) =	→	35,95
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0,k}$ (MPa) =	→	
Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{t90,k}$ (MPa) =	→	
Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0,k}$ (MPa) =	→	40
Resistência à compressão perpendicular às fibras	$f_{c90,k}$ (MPa) =	→	
Resistência ao cisalhamento	$f_{v,k}$ (MPa) =	→	6
Rigidez média paralela às fibras	$E_{0,m}$ (MPa) =	→	
Rigidez característica paralela às fibras	$E_{0,05}$ (MPa) =	→	
Rigidez média perpendicular às fibras	$E_{90,m}$ (MPa) =	→	
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m (MPa) =	→	
Densidade característica	ρ_k (kg/m ³) =	→	
Densidade média	ρ_m (kg/m ³) =	→	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O autor do estudo também ressalta uma discrepância em relação ao valor de K_m que é considerado como sendo igual a 0,5, enquanto a norma estabelece o valor de 0,7 para seções retangulares. Esta discordância aponta para a existência de outro desafio na comparação dos valores.

Figura 51 - Verificação à flexão simples oblíqua conforme o autor

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{b,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{b,d}} = \frac{17,75 * 10^5}{1,44 * 10^5} + 0,5 * \frac{4,76 * 10^5}{0,72 * 10^5} = 0,68 \leq 1$$

$$k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{b,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{b,d}} = 0,5 * \frac{17,75 * 10^5}{1,44 * 10^5} + \frac{4,76 * 10^5}{0,72 * 10^5} = 0,55 \leq 1$$

Fonte: Calil et al., (2019)

No que diz respeito aos valores de cisalhamento, o autor obtém resultados idênticos aos apresentados no exemplo, como demonstrado na Figura 52.

Figura 52 - Verificação ao cisalhamento conforme autor

$$\tau_{y,d} = \frac{3 * V_{y,d}}{2 * b * h} = \frac{3 * 2.367}{2 * 60 * 120} = 0,49 \leq f_{v0,d} = 2,7 \text{ MPa}$$

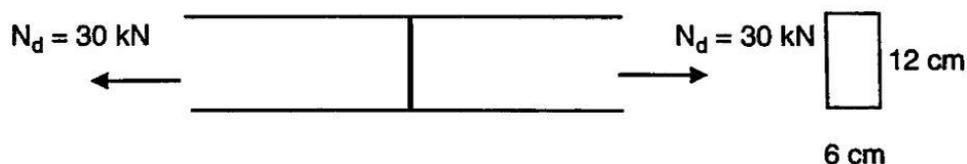
$$\tau_{x,d} = \frac{3 * V_{x,d}}{2 * b * h} = \frac{3 * 634}{2 * 60 * 120} = 0,13 \leq 2,7 \text{ MPa}$$

Fonte: Calil Jr. et al., (2019)

6.2 Exemplo 2: Ligação do banzo inferior da treliça

Segundo Calil Jr. et al., (2019), o autor propõe o cálculo do número de parafusos necessários para realizar a conexão de emenda entre as peças de uma treliça, especificamente o banzo inferior. É relevante comentar que estão presentes cobrejuntas laterais de 3 cm de espessura para a realização da conexão.

Figura 53 - Ilustração do banzo inferior



Fonte: Calil Jr et al., (2019)

Informações complementares e essenciais para dados de entrada na planilha:

- Madeira D60;
- $k_{mod} = 0,56$;
- $f_{yk} = 250$ MPa;
- $d = 10$ mm.

Trata-se de uma ligação entre madeira-madeira e painel de madeira em corte duplo. Sendo assim, será necessário o cálculo da força característica por plano de corte e do parafuso passante da ligação.

6.2.1 Dados da tabela

Para esse exemplo, o item da planilha que será usado será o “3. Ligações” para inserção de dados da ligação. Para o cálculo da resistência de embutimento, foi usado o item “1. Madeira seção retangular”.

Como o exemplo não especifica o tipo de madeira, apenas sua classe, para os cálculos seguintes foram feitas as seguintes considerações:

- Madeira serrada;
- Lote de corpos de prova isentos de defeitos;

Figura 54 - Dados da madeira considerados

1. DADOS DA MADEIRA	
Tipo da madeira:	Serrada
Lote:	CPIsentos
Classe:	D60
Classe de Carregamento:	
Umidade de equilíbrio da madeira (%):	
Classe de Umidade:	
Conforme Tab.4 NBR 7190/2022, $K_{mod1} =$	
Conforme Tab.5 NBR 7190/2022, $K_{mod2} =$	
Coefficiente de modificação, $K_{mod} =$	

Fonte: Elaborado pela autora (2023)..

Os dados “Classe de Carregamento” e “Umidade de equilíbrio da madeira (%)” não foram necessários preencher, porque o exercício indica o valor do k_{mod} .

Para calcular a resistência de embutimento, é necessário o valor da densidade característica da madeira (ρ_k), que é gerado automaticamente pela planilha.

Figura 55 - Propriedade da madeira

3. PROPRIEDADES DA MADEIRA		
Usar dados de CP's Isentos de Defeitos (Tab. 2 NBR 7190/2022) e Classificação Simplificada de Espécies		
Resistência à flexão	f_m, k (MPa) =	77,92
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0, k}$ (MPa) =	77,92
Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{t90, k}$ (MPa) =	3,90
Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0, k}$ (MPa) =	60,00
Resistência à compressão perpendicular às fibras	$f_{c90, k}$ (MPa) =	15,00
Resistência ao cisalhamento	f_v, k (MPa) =	8,00
Rigidez média paralela às fibras	$E_{0, m}$ (MPa) =	19500,00
Rigidez característica paralela às fibras	$E_{0, 05}$ (MPa) =	13650,00
Rigidez média perpendicular às fibras	$E_{90, m}$ (MPa) =	975,00
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m (MPa) =	1218,75
→ Densidade característica	ρ_k (kg/m ³) =	833,33
Densidade média	ρ_m (kg/m ³) =	1000,00

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 56 - Resistência ao embutimento

7. RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (FURAÇÃO)	
Densidade característica (kg/m ³)	$\rho_k = 833,33$
→ Pregos maior que Ø8mm → Parafusos menor que Ø30mm → Coníferas ou folhosas	
CLASSIFICAÇÃO:	Folhosas ●
PAINEL DE LVL:	NÃO
Ângulo de furação	α (°) = 0
	\varnothing (mm) = 10
(Item 6.2.5 NBR 7190/2022) k_{90}	= 2,4
$f_{e\alpha, k}$ (MPa)	= 61,50
$f_{e\alpha, k} = \frac{f_{e0, k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$	
$f_{e0, k}$ (MPa)	= 61,50
$f_{e0, k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k$	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para o cálculo da resistência na seção de corte, primeiro é necessário calcular o momento resistente do parafuso passante, conforme ilustrado na Figura 57.

Figura 57 - Momento resistente do pino metálico

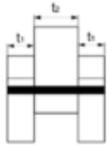
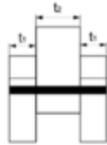
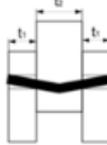
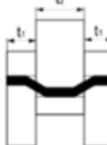
2. MOMENTO RESISTENTE DO PINO METÁLICO	
Resistência última característica do aço do pino metálico conforme NBR ISO 898-1 (MPa)	$f_{u,k} = 250$
Diâmetro nominal conforme NBR 8800 (mm)	$\varnothing = 10$
Momento resistente característico do pino metálico (N.mm)	$M_{yR,k} = 29858,04$

$$M_{yR,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 58 - Força característica da ligação

10. FORÇA CARACTERÍSTICA CALCULADA POR PLANO DE CORTE E POR PINO METÁLICO EM LIGAÇÕES DE MADEIRA	
Diâmetro nominal do pino (mm)	$\varnothing = 10$
Espessura da menor madeira (mm)	$t_1 = 30$
Espessura da maior madeira (mm)	$t_2 = 60$
Resistência ao embutimento (MPa)	$f_{e1,k} = 61,5$
Resistência ao embutimento (MPa)	$f_{e2,k} = 61,5$
Momento fletor atuante em y (kN.m)	$M_{y,k} = 29858$
Efeito de confinamento	$F_{ax,Rk/4} = 1$
Razão entre as resistências de embutimento das madeiras	$\beta = 1,00$

DOIS PLANOS DE CORTE			
			
Ia	Ib	II	III
$F_{v,Rk,n} = 18450,00$	$18450,00$	$12333,52$	$6970,17$
$F_{v,Rk} = 6970,17$			

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A solicitação será aplicada pelo parafuso na direção paralela às fibras da madeira. Sendo assim, a resistência de cálculo é ilustrada na Figura 59.

Figura 59 - Valor de cálculo dada pela seção de cálculo

1. VALOR DE CÁLCULO	
Tab.4 NBR 7190/2022	$k_{mod1} = 0,56$
Tab.5 NBR 7190/2022	$k_{mod2} = 1$
Valor característico da resistência da ligação	$R_k = 6970,17$
Valor de cálculo da resistência da ligação	$R_d = 2788,07$

$$R_d = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot \frac{R_k}{\gamma_{lig}}$$

Elaborado pela autora (2023).

Nesse sentido, a resistência do parafuso será $2R_d$ por ser duas seções de corte. Sendo assim, a resistência do parafuso será de 5,6 kN e será preciso 6 parafusos para resistir ao esforço $N_{t,d} = 30 \text{ kN}$, considerando uma madeira serrada D60.

O espaçamento dos parafusos deve ser previsto, conforme indicado na Figura 60.

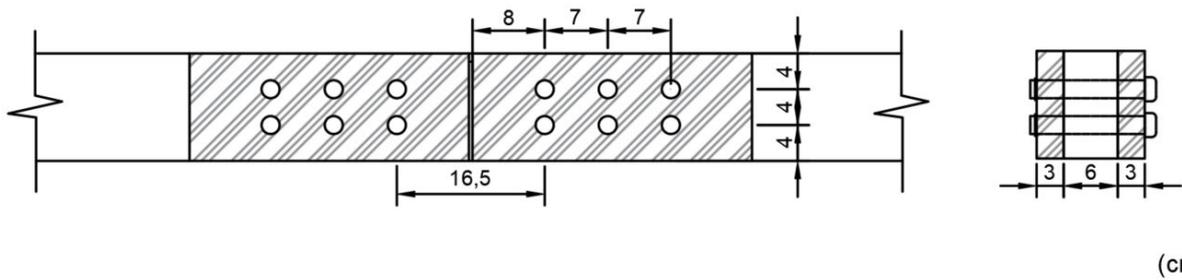
Figura 60 - Espaçamento entre os parafusos

6. ESPAÇAMENTO ENTRE ELEMENTOS DE LIGAÇÃO		TIPO DE LIGAÇÃO: Parafusos passantes		
Ângulo entre a força e a direção das fibras (°)	$\alpha = 0$			
Diâmetro nominal conforme NBR 8800 (mm)	$\emptyset = 10$			
Diâmetro interno do anel (mm)	$\emptyset' =$			

Ligação	Espaçamento	Pregos com pré-furação	Parafusos passantes; Parafusos de rosca soberba; Parafusos ajustados.	Pinos lisos	Anéis metálicos
a1 (mm)	$0 \leq 0^\circ \leq 360$		70,00		
a2 (mm)	$0 \leq 0^\circ \leq 360$		40,00		
a3,t (mm)	$90 \leq 0^\circ \leq 150$		80,00		
a3,c (mm)	$90 \leq 0^\circ \leq 150$		10,00		
	$150 \leq 0^\circ \leq 210$		40,00		
	$210 \leq 0^\circ \leq 270$		10,00		
a4,t (mm)	$0 \leq 0^\circ \leq 180$		30,00		
a4,c (mm)	$180 \leq 0^\circ \leq 360$		30,00		

Elaborado pela autora (2023).

Figura 61 - Representação da ligação



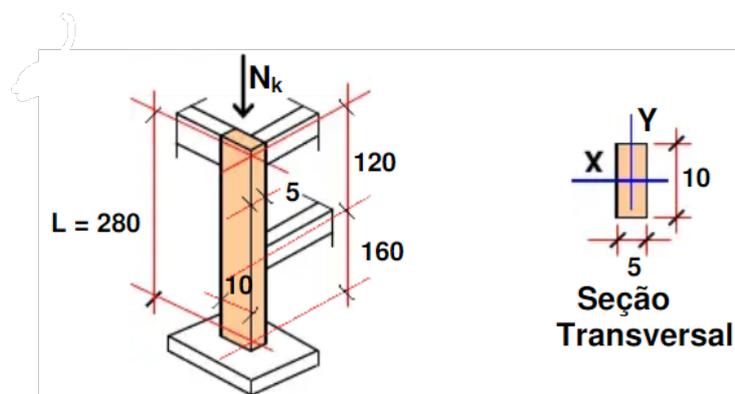
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O autor do livro, que apresenta o exemplo, obteve um valor próximo ao indicado, registrando uma resistência do parafuso de 5,51 kN. Esse valor apresentou uma diferença de cerca de 1,6%, o que permite ser considerável.

6.3 Exemplo 3: Verificação do Pilar

Conforme Hilgenberg (2009), será feita uma análise com o propósito de avaliar a resistência à compressão de um pilar, considerando diferentes comprimentos de flambagem. O objetivo é empregar esse exemplo como uma demonstração prática da utilização da planilha de cálculo e subsequente discussão dos resultados obtidos. A Figura 62 ilustra o respectivo pilar.

Figura 62 - Pilar comprimido



Fonte: HILGENBERG (2009)

O autor menciona a madeira como sendo uma espécie dicotiledônea chamada de Itaúba, mas não fornece informações sobre sua classe. Além disso, são indicados os valores da solicitação de cálculo para o esforço normal N_d e o momento fletor M_d .

O autor utiliza dados de outro exercício para estabelecer o valor da resistência de cálculo à compressão, assumindo $f_{c0,d} = 2,21 \text{ kN/cm}^2$ e o valor da rigidez $E_{c0,ef} = 1266,3 \text{ kN/cm}^2$. Portanto, os dados relacionados às propriedades mecânicas serão inseridos na planilha utilizando a função "Usar dados manuais" e, além disso, será atribuído o valor unitário para o k_{mod} . Também é indicado o valor das solicitações de cálculo, sendo a compressão igual a 28 kN , e o momento igual a $56,8 \text{ kN.cm}$.

6.3.1 Dados da tabela

Neste exemplo, será utilizado o item "1. Madeira Seção Retangular" da planilha para inserção de dados e realizar as verificações necessárias. Para os cálculos subsequentes, foram feitas as seguintes considerações, que serão adicionadas como dados de entrada na planilha:

- Madeira serrada e lote de peças estruturais;
- $f_{c0,k} = 30,94 \text{ MPa}$;
- $f_{t0,k} = 23,82 \text{ MPa}$ e $f_{m,k} = 23,82 \text{ MPa}$ considerando a relação da classificação simplificada, conforme item 4.1;
- $E_{c0,ef} = 12663 \text{ MPa}$;
- $E_{0,05} = 8864,1 \text{ MPa}$;
- $k_{mod} = 1$

Figura 63 – Inserção dos dados na planilha

1. DADOS DA MADEIRA	
Tipo da madeira:	Serrada
Lote:	PçEstruturais
Classe:	
Classe de Carregamento:	
Umidade de equilíbrio da madeira (%):	
Classe de Umidade:	
Conforme Tab.4 NBR 7190/2022, K_{mod1} =	
Conforme Tab.5 NBR 7190/2022, K_{mod2} =	
Coefficiente de modificação, K_{mod} =	

DADOS COM OPÇÕES

DADOS DE ENTRADA

DADOS INTERMEDIÁRIOS DE SAÍDA

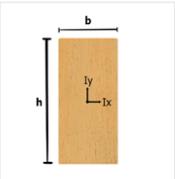
DADOS DE SAÍDA

● AVISO DE INCOERÊNCIA DE DADOS

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 64 - Inserção dos dados da geometria da madeira

2. GEOMETRIA DA MADEIRA	
Base, b (cm) =	5
Altura, h (cm) =	10
Área Bruta, A_g (cm ²) =	50,00
Área Líquida, A_n (cm ²) =	50
Comprimento da peça em relação ao eixo X, L_x (cm) =	280
Comprimento da peça em relação ao eixo Y, L_y (cm) =	160



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Figura 65 - Inserção das propriedades de resistência

3. PROPRIEDADES DA MADEIRA			
Usar dados manuais			
Resistência à flexão	f_m, k (MPa) =	→	23,8238
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0, k}$ (MPa) =	→	23,8238
Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{t90, k}$ (MPa) =	→	
Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0, k}$ (MPa) =	→	30,94
Resistência à compressão perpendicular às fibras	$f_{c90, k}$ (MPa) =	→	
Resistência ao cisalhamento	f_v, k (MPa) =	→	
Rigidez média paralela às fibras	$E_{0, m}$ (MPa) =	→	12663
Rigidez característica paralela às fibras	$E_{0,05}$ (MPa) =	→	8864,1
Rigidez média perpendicular às fibras	$E_{90, m}$ (MPa) =	→	
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m (MPa) =	→	
Densidade característica	ρ_k (kg/m ³) =	→	
Densidade média	ρ_m (kg/m ³) =	→	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 66 - Inserção dos dados do k_{mod}

6. COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO	
⚠ preencher caso o k_{mod} seja diferente do valor calculado no item 1. ⚠	
Coefficiente (Tab. 4 NBR 7190/2022)	$K_{mod1}' = 1$
Coefficiente (Tab. 5 NBR 7190/2022)	$K_{mod2}' = 1$
Coefficiente de modificação	$K_{mod}' = 1$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 67 - Determinação da tensão de compressão

10. COMPRESSÃO AXIAL (Ver estabilidade no item 22)	
Solicitação de cálculo da força normal de compressão (kN)	$N_{c0, d} = 28$
Área Líquida (cm ²)	$A = 50$
Coefficiente de modificação	$K_{mod} = 1$
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0, k} = 30,94$
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0, d} = 22,10$
Tensão de compressão normal à seção transversal (MPa)	$\sigma_{Nc0, d} = 5,6$
	$\sigma_{Nc0, d} \leq f_{c0, d}$ OK

$$\sigma_{Nc, d} = \frac{N_{c, d}}{A} \leq f_{c0, d}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

É necessário calcular a flexão simples reta para a obtenção da tensão devido ao momento fletor, conforme Figuras 68.

Figura 68 - Determinação da tensão devido ao momento fletor

13. FLEXÃO SIMPLES OBLÍQUA		
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma_{Mx, d} =$	6,82
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma_{My, d} =$	13,63

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

O autor também fornece os cálculos das tensões, conforme demonstrado na Figura 69. Vale ressaltar que, até o momento, os valores permanecem consistentes, mesmo que o autor supostamente tenha seguido a norma NBR 7190:1997 para seus cálculos.

Figura 69 - Cálculo de tensões conforme o autor

Determinação das tensões σ_{Nd} e σ_{Md} :

$$\sigma_{Nd} = \frac{N_d}{A} = \frac{28}{5.10} = 0,56 \text{ kN/cm}^2 ;$$

$$\sigma_{Md} = \frac{M_d}{W_y \left(= \frac{b \cdot h^2}{6} \right)} = \frac{56,8}{\frac{10 \cdot 5^2}{6}} = 1,36 \text{ kN/cm}^2 .$$

Fonte: HILGENBERG (2009)

Figura 70 - Determinação da esbeltez do pilar

20. ESBELTEZ				
	→ EM X		→ EM Y	
Inércia na direção analisada (cm ⁴)	$I_x =$	416,67	$I_y =$	104,17
Comprimento da peça (cm)	$L_x =$	280,00	$L_y =$	160,00
Coef. K_e (Tab. 7 NBR 7190/2022)	$K_e =$	1	$K_e =$	1
		MODO DE FLAMBAGEM:		MODO DE FLAMBAGEM:
Área da seção transversal (cm ²)	$A =$	50,00	$A =$	50,00
Comprimento de flambagem (cm)	$L_{0,x} =$	280,00	$L_{0,y} =$	160,00
Esbeltez na direção analisada	$\lambda_{x,y} =$	96,99	$\lambda_{x,y} =$	110,85

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 71 - Determinação da esbeltez relativa do pilar

21. ESBELTEZ RELATIVA				
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} =$	30,94		
Rigidez característica (MPa)	$E_{0,05} =$	8864,10		
	$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$		$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$	
	→ EM X		→ EM Y	
Esbeltez na direção analisada	$\lambda_{x,y} =$	96,99	$\lambda_{x,y} =$	110,85
Esbeltez relativa	$\lambda_{rel,x} =$	1,82	$\lambda_{rel,y} =$	2,08

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 72 - Determinação da esbeltez conforme o autor.

considerando o eixo X ($L_0 = 280$ cm) :

$$I_x = \frac{5 \cdot 10^3}{12} = 417 \text{ cm}^4 ; i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{417}{5,10}} = 2,89 \text{ cm} ; \lambda_x = \frac{L_x}{i_x} = \frac{280}{2,89} = 97$$

considerando o eixo Y ($L_0 = 160$ cm) :

$$I_y = \frac{10 \cdot 5^3}{12} = 104 \text{ cm}^4 ; i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{104}{5,10}} = 1,44 \text{ cm} ; \lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{160}{1,44} = 111$$

Fonte: HILGENBERG (2009)

Devido à esbelteza relativa do pilar ser superior a 0,3, torna-se necessário realizar uma verificação adicional para garantir a estabilidade sob compressão, além de cumprir os critérios estabelecidos para a compressão axial, como mostrado na Figura 73 e 74.

Figura 73 – Dados para a verificação da estabilidade devido a compressão

22. ESTABILIDADE DE PEÇAS COMPRIMIDAS E FLEXOCOMPRIMIDAS		
⚠ Somente para peças com $\lambda_{rel,x}$ ou $\lambda_{rel,y} > 0,3$ ⚠		
TIPO DE MADEIRA:	Serrada	
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma_{Mx,d} =$	6,82
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma_{My,d} =$	13,63
Tensão de compressão normal à seção transversal (MPa)	$\sigma_{Nc0,d} =$	5,60
Coefficiente de correção para seção retangular	$K_m =$	0,7
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	1
Fator para peças estruturais	$\beta_c =$	0,2
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m,k} =$	23,82
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m,d} =$	17,017
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} =$	30,94
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} =$	22,1

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 74 - Verificação da estabilidade devido a compressão

	→ EM X	→ EM Y
Esbelteza relativa em x,y	$\lambda_{rel,x} = 1,82$	$\lambda_{rel,y} = 2,08$
Coefficiente de alinhamento	$k_x = 2,20$	$k_y = 2,73$
	$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2]$	$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2]$
Coefficiente de alinhamento	$k_{cx} = 0,94$	$k_{cy} = 0,90$
	$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}}$	$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}}$
CONDIÇÃO 1:		
	$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$	$1,23 > 1$ NÃO PERMITIDO
CONDIÇÃO 2:		
	$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$	$1,36 > 1$ NÃO PERMITIDO

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Figura 75 - Verificação da estabilidade devido à compressão conforme o autor

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0,d}} = \frac{0,56}{2,21} + \frac{1,36}{2,21} = 0,87 < 1,0$$

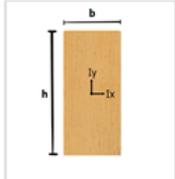
Fonte: HILGENBERG (2009)

Embora todos os cálculos realizados anteriormente estejam em conformidade com os métodos adotados pelo autor, a verificação de acordo com a atual norma NBR 7190 não atende aos critérios estabelecidos por ela, ultrapassando um pouco do limite permitido. É importante observar que o autor não utiliza o coeficiente de correção k_M e leva em consideração apenas a resistência à compressão, e não considera a resistência à flexão, o que resulta em diferenças significativas nos resultados. Uma solução para esse problema seria aumentar a seção da madeira ou considerar um tipo de madeira com propriedades mecânicas superiores.

Após realizar alguns testes de aumento na seção, foi possível identificar uma solução viável, aumentando a seção para 6x12 cm. Com essa modificação, a verificação quanto à instabilidade sob compressão passa a estar dentro dos limites estabelecidos pela norma.

Figura 76 – Inserção dos dados da nova geometria da madeira

2. GEOMETRIA DA MADEIRA	
Base, b (cm) =	6
Altura, h (cm) =	12
Área Bruta, Ag (cm²) =	72,00
Área Líquida, An (cm²) =	72
Comprimento da peça em relação ao eixo X, Lx (cm) =	280
Comprimento da peça em relação ao eixo Y, Ly (cm) =	160



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 77 - Verificação da estabilidade devido à compressão

CONDIÇÃO 1:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

0,73
≤ 1 OK

CONDIÇÃO 2:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

0,81
≤ 1 OK

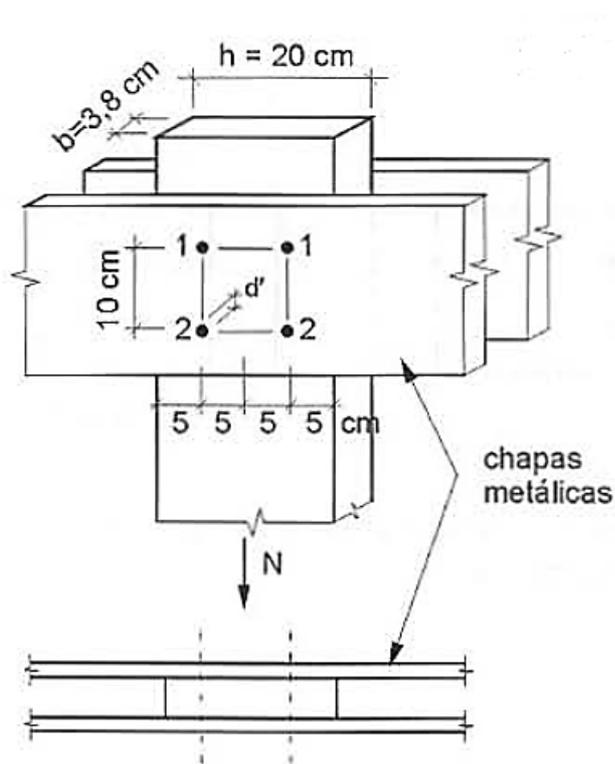
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Com essa pequena alteração, a madeira agora está em conformidade com os critérios de verificação estabelecidos pela norma NBR 7190:2022.

6.4 Exemplo 4: Pendural tracionado

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), o autor pretende fazer a verificação da segurança da tensão de tração paralela às fibras suportada por um pendural de pinho brasileiro devido às forças geradas da construção. Essas forças incluem $N_g = 15 \text{ kN}$ devido à carga permanente e $N_q = 10 \text{ kN}$ devido à carga variável, considerando cargas de média duração. Além disso, o autor menciona que o pendural está conectado a duas chapas laterais por meio de parafusos de 25 mm (d) e diâmetro do furo de 27 mm (d'), conforme ilustrado na Figura 78.

Figura 78 - Ilustração do pendural de pinho brasileiro



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

Além disso, o autor informa alguns dados complementares necessários para entrada na planilha, como:

- Classe de umidade 3
- Esforço solicitante de projeto, $N_d = 31,5 \text{ kN}$

O autor também menciona que a madeira é classificada como de 2ª categoria, uma condição estabelecida pela NBR 7190:1997. Esta classificação é relevante com base na antiga norma, pois determina o valor do k_{mod3} , embora não seja utilizado na versão mais recente. No entanto, é possível calcular o valor do k_{mod} com base nos dados complementares fornecidos pelo autor.

É fundamental ter conhecimento que o pinheiro brasileiro está incluído no grupo de espécies classificadas como coníferas, que têm origem em florestas plantadas. Essa informação é dada no capítulo 1.2 do livro utilizado neste exemplo.

Como o autor não especificou a classe de resistência da madeira e esta informação não se encontra no livro de referência, foi utilizada uma classe média para realizar o teste para uma resistência mínima que a madeira pode suportar na tração axial.

6.4.1 Dados da tabela

Neste exemplo, será utilizado o item "1. Madeira Seção Retangular" da planilha para inserção de dados e realizar a verificação do estado limite último na tração axial.

Com base nas informações fornecidas anteriormente e na classificação da madeira, assim como sua classe de resistência, é possível inserir todos esses dados na planilha para obter os valores das resistências características, como ilustrado nas Figuras 79 e 80.

Figura 79 – Inserção dos dados na planilha

1. DADOS DA MADEIRA	
Tipo da madeira:	Serrada
Lote:	PçEstruturais
Classe:	C20
Classe de Carregamento:	Média duração
Umidade de equilíbrio da madeira (%):	13
Classe de Umidade:	2
Conforme Tab.4 NBR 7190/2022, K_{mod1} =	0,8
Conforme Tab.5 NBR 7190/2022, K_{mod2} =	0,9
Coefficiente de modificação, K_{mod} =	0,72

Coníferas

65% < U_{amb} <= 75%

TESTE

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Figura 80 - Inserção dos dados da geometria na planilha

2. GEOMETRIA DA MADEIRA	
Base, b (cm) =	3,8
Altura, h (cm) =	20
Área Bruta, A_g (cm ²) =	76,00
Área Líquida, A_n (cm ²) =	55,48
Comprimento da peça em relação ao eixo X, L_x (cm) =	
Comprimento da peça em relação ao eixo Y, L_y (cm) =	

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Figura 81 - Dados das propriedades mecânicas da madeira

3. PROPRIEDADES DA MADEIRA		
<i>Usar dados de Peças Estruturais (Tab. 3 NBR 7190/2022)</i>		
Resistência à flexão	$f_{m,k}$ (MPa) =	20,00
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0,k}$ (MPa) =	12,00
Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{t90,k}$ (MPa) =	0,40
Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0,k}$ (MPa) =	19,00
Resistência à compressão perpendicular às fibras	$f_{c90,k}$ (MPa) =	2,30
Resistência ao cisalhamento	f_v,k (MPa) =	3,60
Rigidez média paralela às fibras	$E_{0,m}$ (MPa) =	9500,00
Rigidez característica paralela às fibras	$E_{0,05}$ (MPa) =	6400,00
Rigidez média perpendicular às fibras	$E_{90,m}$ (MPa) =	300,00
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m (MPa) =	600,00
Densidade característica	ρ_k (kg/m ³) =	330,00
Densidade média	ρ_m (kg/m ³) =	390,00

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Para a área líquida (A_n) que deve ser usada para a verificação na tração, deve-se colocar o valor da área bruta (A_g) descontado das áreas dos furos presente na seção e pode ser aproximado pela expressão $A_n = A_g - 2bd'$, onde d' é o diâmetro do furo. Então o valor da área líquida é de:

$$A_n = 76 - 2 \times 3,8 \times 2,7 = 55,48 \text{ cm}^2$$

Então, com isso, tem-se a verificação à tração da peça conforme ilustrado na Figura 82.

Figura 82 - Verificação à tração axial para uma madeira C20

9. TRAÇÃO AXIAL	
Solicitação de cálculo da força normal de tração (kN)	$N_{t,d} = 31,5$
Área Líquida (cm ²)	$A = 55,48$
Coefficiente de modificação	$K_{mod} = 0,72$
Resistência característica à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,k} = 12,00$
Resistência de cálculo referente à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,d} = 6,17$
Tensão de tração normal à seção transversal (MPa)	$\sigma_{Nt,d} = 5,677721702$
	$\sigma_{Nt,d} \leq f_{t0,d}$ OK

$$\sigma_{Nt,d} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Pode-se perceber que o valor da tensão de tração está próximo do limite admissível. Após realizar diversos testes, foi confirmado que a classe de resistência mínima adequada para essa situação é C20, o que pode ser verificado ao reduzir a classe para C18, como ilustrado na Figura 83. Embora, nesse caso, o valor da tensão seja praticamente igual ao valor da resistência, é aconselhável optar por uma resistência um pouco superior devido a outros fatores que podem influenciar na resistência de uma peça de madeira, visando aumentar a segurança.

Figura 83 - Verificação à tração axial para uma madeira C18

9. TRAÇÃO AXIAL	
Solicitação de cálculo da força normal de tração (kN)	$N_{t,d} = 31,5$
Área Líquida (cm ²)	$A = 55,48$
Coefficiente de modificação	$K_{mod} = 0,72$
Resistência característica à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,k} = 11,00$
Resistência de cálculo referente à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,d} = 5,66$
Tensão de tração normal à seção transversal (MPa)	$\sigma_{Nt,d} = 5,678$
	$\sigma_{Nt,d} > f_{t0,d}$ VERIFICAR

$$\sigma_{Nt,d} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Por fim, calculando o valor da solicitação resistente de cálculo, tem se:

$$N_{d,res} = A_n \cdot f_{t0,d} = 5548 \text{ mm}^2 \cdot 6,17 \text{ N/mm}^2 = 34.231,16 \text{ N} = 34,231 \text{ kN}$$

Ou seja, a madeira resiste a uma solicitação de até 34 kN para a classe de resistência C20, umidade classe 2 e carregamento de média duração. Neste caso, como a solicitação resistente é maior que a solicitante, assim como a tensão é menor

que a resistência, o pendural atende aos critérios de segurança definidos pela NBR 7190:2022, em termos de resistência à tração axial.

Em comparação com os resultados obtidos pelo autor, ele obteve um valor de solicitação resistente de 102,7 kN. Essa diferença se deve ao uso de uma resistência consideravelmente mais alta do que a que foi utilizada no exemplo, ou seja, a resistência mínima. Além disso, como mencionado anteriormente, no exemplo do autor, foram aplicados o coeficiente de modificação e o coeficiente de ponderação, ambos dados pela norma 7190:1997, conforme ilustrado na Figura 84.

Figura 84 – Resistência de cálculo à tração paralela calculada pelo autor

$$f_{td} = \overset{k_{mod1}}{0,80} \times \overset{k_{mod2}}{0,8} \times \overset{k_{mod3}}{0,8} \times \frac{0,70 \times 93,1}{1,8} = 18,5 \text{ MPa}$$

Resistência característica à compressão paralela às fibras

Coeficiente de ponderação
NBR 7190:1997

Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

Para estudar a funcionalidade e validação dos cálculos da planilha, será usado a resistência considerada pelo autor para análise da segurança, mas antes é preciso ter a resistência característica.

Um dos dados que é possível entrar manualmente para ser usado nos cálculos, além da resistência, é o valor do k_{mod} . Além disso, o valor da ponderação também é diferente de acordo com a nova norma, porém não é possível alterá-lo.

Para descobrir a resistência característica, é calculado da seguinte forma:

$$f_{t0,k} = \frac{18,5}{(0,8 \times 0,8 \times 0,8)} \times 1,4 = 50,68 \text{ MPa}$$

A função “Usar dados manuais” da planilha, permite adicionar o valor da resistência característica, como ilustrado na Figura 85. E o valor da k_{mod} é informado no item “6. COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO” e se dá pela multiplicação dos 3 termos usados pelo autor, como ilustrado na Figura 86.

Figura 85 - Inserção manual da resistência característica à tração paralela

3. PROPRIEDADES DA MADEIRA			
<i>Usar dados manuais</i>			
Resistência à flexão	$f_{m,k}$ (MPa) =	→	
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0,k}$ (MPa) =	→	50,68

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 86 - Inserção manual do valor do kmod

6. COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO	
⚠ preencher caso o kmod seja diferente do valor calculado no item 1. ⚠	
Coefficiente (Tab. 4 NBR 7190/2022)	$K_{mod1'}$ = 0,512
Coefficiente (Tab. 5 NBR 7190/2022)	$K_{mod2'}$ = 1
Coefficiente de modificação	$K_{mod'}$ = 0,512

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Figura 87 - Verificação à tração axial conforme dados do autor

9. TRAÇÃO AXIAL	
Solicitação de cálculo da força normal de tração (kN)	$N_{t,d}$ = 31,5
Área Líquida (cm ²)	A = 55,48
Coefficiente de modificação	K_{mod} = 0,512
Resistência característica à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,k}$ = 50,68
Resistência de cálculo referente à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,d}$ = 18,53
Tensão de tração normal à seção transversal (MPa)	$\sigma N_{t,d}$ = 5,678
	$\sigma N_{t,d} \leq f_{t0,d}$ OK

$$\sigma_{N_{t,d}} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Por fim, calcula-se o valor da solicitação resistente de cálculo:

$$N_{d,res} = A_n \cdot f_{t0,d} = 5548 \text{ mm}^2 \cdot 18,5 \text{ N/mm}^2 = 102.638,0 \text{ N} = 102,64 \text{ kN}$$

Como notado, ao utilizar os dados de resistência usados pelo autor no exemplo, os valores coincidem com os calculados pela planilha. Isso ocorre porque a resistência considerada pelo autor é praticamente três vezes maior do que aquela do teste

realizado com a madeira C20, resultando em uma solicitação resistente de cálculo com o valor alto, ou seja, resiste a uma força de tração maior.

Figura 88 - Cálculo da solicitação resistente conforme o autor

$$N_{d, res} = A_n f_{td} = 55,5 \times 1,85 = 102,7 \text{ kN} > N_d$$

Fonte: Pfeil e Pfeil (2003)

Caso o k_{mod} não fosse alterado, o valor da resistência de cálculo da tração seria maior ainda, como ilustrado na Figura 89.

Figura 89 - Verificação à tração axial

9. TRAÇÃO AXIAL	
Solicitação de cálculo da força normal de tração (kN)	$N_{t,d} = 31,5$
Área Líquida (cm ²)	$A = 55,48$
Coefficiente de modificação	$k_{mod} = 0,72$
Resistência característica à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,k} = 50,68$
Resistência de cálculo referente à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,d} = 26,06$
Tensão de tração normal à seção transversal (MPa)	$\sigma_{N_{t,d}} = 5,678$
	$\sigma_{N_{t,d}} \leq f_{t0,d}$ OK

$$\sigma_{N_{t,d}} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

E o valor da solicitação resistente de cálculo será de:

$$N_{d, res} = A_n \cdot f_{t0,d} = 5548 \text{ mm}^2 \cdot 26,06 \text{ N/mm}^2 = 144.580,88 \text{ N} = 104,58 \text{ kN}$$

7 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a ferramenta desenvolvida atende de forma eficaz às expectativas, proporcionando aos usuários a capacidade de realizar verificações e dimensionamentos, desde que os dados sejam inseridos corretamente, como demonstrado nos exemplos apresentados. A comparação entre os resultados obtidos pela planilha, em conformidade com a atual norma, e pelos métodos utilizados pelos autores, evidencia a confiabilidade da ferramenta que fornece valores aproximados e não apresenta erros de lógica.

Contudo, a compreensão técnica da norma NBR 7190:2022-1 desempenhou um papel crucial na automatização das fórmulas e é crucial o entendimento pelo usuário também exista para que seja possível a introdução dos dados corretamente. A simplicidade da interface da planilha, apresentada no Anexo A, inclui tabelas relevantes, como as de resistência, sem sobrecarregar a ferramenta com informações desnecessárias, contribui para uma forma mais clara de apresentação das diversas verificações da norma. Ainda mais, a tabela é capaz de identificar dados ausentes e inconsistências, fornecendo assistência ao usuário para facilitar a navegação e garantir a integridade das informações.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para pesquisas e desenvolvimentos futuros, sugere-se a criação de calculadoras adicionais que não foram abordadas neste estudo, como a inclusão de perfis compostos, como perfis em T, I e caixão, a automatização de dados para madeiras de pinus e eucalipto, bem como a elaboração de cálculos específicos destinados às madeiras MLC, MLCC e LVL.

Durante o processo de execução deste trabalho, surgiu uma necessidade de realizar cálculos adicionais que somente seriam possíveis com a utilização do Visual Basic for Application (VBA), uma linguagem de programação disponível no Excel. A limitação da lógica padrão do Excel tornou impraticável a realização desses cálculos adicionais ou demandaria um tempo substancialmente maior para sua conclusão, como por exemplo, as combinações de carga. Porém, a consideração e a implementação futura do VBA, ou de outra linguagem de programação, podem

representar uma área de aprimoramento significativa para estender ainda mais a funcionalidade da ferramenta desenvolvida.

Além disso, seria proveitoso realizar comparações entre verificações e cálculos utilizando a planilha que está em conformidade com a norma de 2022 e outro software que segue as diretrizes estabelecidas pela norma de 1997.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190/2022:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190/2022:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190/2022:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190/2022:** Projeto de estruturas de madeira – Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização para peças estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190/1997:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681/2003:** Ações e segurança nas estruturas – procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ALMEIDA, P.A.O. **Uniões pregadas de madeira**. 1987. 123f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

ALMEIDA, Diego H.; SCALIANTE, Ricardo M., MACEDO, Laurenn B. **Madeira laminada colada (MLC) da espécie Paricá**. Madeira: Arquitetura e Engenharia, v.12, n.30, p.71-82, 2011.

ALMEIDA, Diego H.; MOLINA, Júlio César; ALMEIDA, Tiago H.; CALIL JÚNIOR, Carlito; ALVES, Ana Clara L.; **DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE E**

DENSIDADE BÁSICA PARA ESPÉCIES DE PINUS E EUCALIPTO. Revista, 2014.

Disponível em: <<http://www.fait.revista.inf.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

CARRASCO, E. V. M.; BREMER, C. F.; MANTILLA, J. N. R. D. **Avaliação do desempenho estrutural de paredes de madeira laminada colada.** Mix Sustentável, Florianópolis, 6, n. 3, 2020. 83-90.

CALIL JÚNIOR, C.; BARALDI, L.T.; STAMATO, G. C.; FERREIRA, N. S. S. **Estruturas de madeira.** São Carlos: USP – Departamento de Engenharia de Estruturas, 2000.

CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira.** 1 ed. Manole Ltda. Barueri - São Paulo, 2003.

CALIL JÚNIOR, C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em Estruturas de Madeira: Exemplos de Cálculos.** 1 ed. São Paulo: Pini, 2010.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R.; MARTINS, G. C. A. **Estruturas de Madeira: Projetos, Dimensionamento e Exemplos de cálculo.** 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CALIL NETO, C. **MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC): CONTROLE DE QUALIDADE EM COMBINAÇÕES ESPÉCIE-ADESIVO-TRATAMENTO PRESERVATIVO.** Dissertação – Universidade de São Paulo, Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos, 2011

CORREIA, Emanuel André S. **ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.** 2009. 163 p. Relatório de Projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil (especialização em estruturas) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto - Portugal, 2009.

COSTA. **Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003 6a Edição.

DIAS, A. **Dossiê da Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT): Produção e Desenvolvimento.** Artigo – Madeira em Construção. Santa Catarina. 2019.

ECKER, Taienne W. P., MIOTTO, José Luiz, TURMINA, Gabriel. **PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA PARA LAJES: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL MECÂNICA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE CONSUMO DE ADESIVO.** Science & Engineering Journal v. 26, n. 1, p. 17 - 25 jan. – jun. 2017.

ESTEVES, B. M.; PEREIRA, H. M. **Wood modification by heat treatment: a review.** *BioResources* , Raleigh, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.

FERNÁNDEZ-VILLEGAS, F. R. & ECHENIQUE-MANRIQUE, R. **Estructuras de Maderas.** Ed. Limusa, Mexico, 1983.

GREEN, Michael. The Case for Tall Wood Buildings, 2012. Relatório. Disponível em: <<https://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-Tall->

[Wood.pdf?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com](#)>. Acesso em 28 ago. 2023.

CORDEIRO JÚNIOR; Carlos Roberto, SILVA, Wendna Cristina R.; SOARES, Paulo de Tarso M.. **USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL** v. 2 n. 4 – Revista Projectus, Rio de Janeiro, 2017.

JONSSON, R. **Prospects for timber frame in multi-storey house building in England, France, Germany, Ireland, the Netherlands and Sweden**. School of Technology and Design. Report n° 52, 2009.

LUCENA, R. C. **Análise teórica de rigidez e resistência à flexão de painéis de madeira lamelada colada cruzada**. Dissertação Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2017.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. vol. I. Solid Wood. Reprint. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. Springer-Verlag: 1968-1984. 1984.

Limträhandbok, **Projektering av limträkonstruktioner – Del 2**, 2016. TräGuiden – Disponível em: <<http://www.traguiden.se/>> Acesso em 18 ago. 2023.

LOGSDON, Norman Barros. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

LUCENA, R. C. **Análise teórica de rigidez e resistência à flexão de painéis de madeira lamelada colada cruzada**. Dissertação Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2017.

MARTINS, Tomás F. R. M. **Dimensionamento de Estruturas em Madeira - Coberturas e Pavimentos**. Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal / 2010.

MELO, Julio Eustaquio. **MADEIRA: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Brasília 2002.

HILGENBER NETO, Miguel Frederico. **Solicitações nas Barras das Estruturas de Madeira**. Apostila Estruturas de Madeira. Exercícios cap. 4 – UFPR, Departamento de Construção Civil, 2009.

MORAES, P. D. De, & FIGUEROA, M. J. M. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas**. Ambiente Construído. Porto Alegre: Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído (2009).

OHENE, A. A. **Modelling the Fire Performance of Hybrid Steel-Timber Connections**. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, 2014.

OLIVEIRA, G. L. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho**. São Paulo, 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèli. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americanas NDS e europeia EUROCODE 5 - 6. ed., rev., atual. e ampl. / 2003**.

PINTO, E. M. **Determinação de um Modelo de Taxa de Carbonização Transversal a Grã para o Eucalyptus Citriodora e Eucalyptus Grandis**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

RAMMER, D.R.; WINISTORFER S. G. **Effect of moisture content on nail bearing strength**. Res. Rap. FPL-RP-591. Madison, WI: EUA. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 22 p. (2001).

REBELLO, Yopanan C. P. **Bases para projeto estrutural na arquitetura**. 3º Edição. São Paulo. Zigurate Editora. Abril 2011.

REMADE – REVISTA DA MADEIRA. Disponível em <http://www.remade.com.br/madeiras>. Acesso em: 20 ago 2023.

RITTER, M. A. **Timber Bridges: design, construction, inspection, and maintenance**. Washington: United States Department of Agriculture Forest Service, 1990.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. **Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de Eucalyptus saligna Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar**. Revista Árvore, v.27, n.2, p.233-239, 2003.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. **Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de Paricá (Schizolobium Amazonicum Huber ex. Ducke)**. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 471-480, 2010.

TEREZO, R. F.; ROSA, T. O.; BOURSCHEID, C. B.; SAMPAIO, C. A. D. P.; KUHN, L. S.; JACINTO, R. C.; CIARNOSCHI, D. D. **Comparação do custo de produção de painel CLT produzido artesanalmente com outros materiais de construção convencionais / Comparison of the production cost of CLT panel produced by hand with other conventional construction materials**. Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 6, n. 9, p. 68584–68590, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n9-340. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/16640>. Acesso em 18 ago. 2023

ZENID, Geraldo José et al. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas–SVMA, 2009.

WANGAARD, F.F. **Wood: its structure and properties**. The Pennsylvania State University, USA, 1979.

YANG, T-H; WANG, S-Y; LIN, C-J; TSAI **Effect of laminate configuration on the modulus of elasticity of glulam evaluated using a strain gauge method.** Journal of Wood Science, Singapura, v. 53, n. 1, p. 31-39, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/S10086-006-0818-Z>>. Acesso em 5 ago. 2023.

ANEXO A

Essa planilha foi concebida como uma ferramenta integrante do projeto de Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, elaborado pela estudante Clarissa Finamor Delgado. O projeto foi realizado sob a orientação do professor Enio Carlos Mesacasa Júnior, que atuou como orientador durante todo o desenvolvimento da ferramenta.

O propósito fundamental dessa planilha é facilitar o cálculo das principais verificações de tensões e cálculos de acordo com a NBR 7190:2022 - Projeto de estruturas de madeira, destinado a estudantes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

É importante ressaltar que os resultados apresentados por este sistema dependem das informações inseridas pelo usuário, e os desenvolvedores não assumem qualquer responsabilidade por quaisquer consequências decorrentes do uso das informações ou dos resultados gerados. O usuário é integralmente responsável por revisar e validar os cálculos realizados pela planilha, além do conhecimento de normas e regulamentos aplicáveis.

Ao optar por utilizar a planilha, você concorda em aceitar a responsabilidade por todas as decisões tomadas e resultados obtidos por meio dessa ferramenta.

Versão 1.0 - Setembro, 2023

HELP

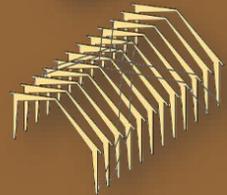


MENU PRINCIPAL

1. Madeira de Seção Retangular



2. Contraventamento



3. Ligações



4. Situações de Incêndio



1. DADOS DA MADEIRA

Tipo da madeira:

Lote:

Classe:

Classe de Carregamento:

Umidade de equilíbrio da madeira (%):

Classe de Umidade:

Conforme Tab.4 NBR 7190/2022, K_{mod1} =

Conforme Tab.5 NBR 7190/2022, K_{mod2} =

Coefficiente de modificação, K_{mod} =

DADOS COM OPÇÕES

DADOS DE ENTRADA

DADOS INTERMEDIÁRIOS DE SAÍDA

DADOS DE SAÍDA

● AVISO DE INCOERÊNCIA DE DADOS

2. GEOMETRIA DA MADEIRA

Base, b (cm) =

Altura, h (cm) =

Área Bruta, A_g (cm²) =

Área Líquida, A_n (cm²) =

Comprimento da peça em relação ao eixo X, L_x (cm) =

Comprimento da peça em relação ao eixo Y, L_y (cm) =

3. PROPRIEDADES DA MADEIRA

Resistência à flexão	$f_{m,k}$ (MPa) =	0,00
Resistência à tração paralela às fibras	$f_{t0,k}$ (MPa) =	0,00
Resistência à tração perpendicular às fibras	$f_{t90,k}$ (MPa) =	0,00
Resistência à compressão paralela às fibras	$f_{c0,k}$ (MPa) =	0,00
Resistência à compressão perpendicular às fibras	$f_{c90,k}$ (MPa) =	0,00
Resistência ao cisalhamento	$f_{v,k}$ (MPa) =	0,00
Rigidez média paralela às fibras	$E_{0,m}$ (MPa) =	0,00
Rigidez característica paralela às fibras	$E_{0,05}$ (MPa) =	0,00
Rigidez média perpendicular às fibras	$E_{90,m}$ (MPa) =	0,00
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m (MPa) =	0,00
Densidade característica	ρ_k (kg/m ³) =	0,00
Densidade média	ρ_m (kg/m ³) =	0,00

3.1 CARACTERIZAÇÃO SIMPLIFICADA DAS RESISTÊNCIAS DA MADEIRA DE ESPÉCIES USUAIS

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad \frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad \frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,0$$

$$\frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad \frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,0 \quad \frac{f_{t90,k}}{f_{t0,k}} = 0,05$$

$$\frac{f_{v0,d}}{f_{c0,d}} = 0,12 \text{ para coníferas} \quad \frac{f_{v0,d}}{f_{c0,d}} = 0,10 \text{ para folhosas}$$

4. CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA

Resistência medida no ensaio (MPa)
Resistência corrigida (MPa)

$f_{u\%} =$
 $f_{12} =$

5. CORREÇÃO DA RIGIDEZ

Rigidez medida no ensaio (Mpa)
Rigidez corrigida (Mpa)

$E_{u\%} =$
 $E_{12} =$

6. COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO

⚠ preencher caso o kmod seja diferente do valor calculado no item 1. ⚠

Coefficiente (Tab. 4 NBR 7190/2022)
Coefficiente (Tab. 5 NBR 7190/2022)
Coefficiente de modificação

$K_{mod1'} =$
 $K_{mod2'} =$
 $K_{mod'} =$

7. RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (FURAÇÃO)

Densidade característica (kg/m³)

$\rho_k =$

→ Pregos menores que Ø8mm

Ø (mm) =

Sem pré-furação

$f_{e,k} (MPa) =$

$$f_{e,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3}$$

Com pré-furação

$f_{e,k} (MPa) =$

$$f_{e,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k$$

→ Pregos maiores que Ø8mm
→ Parafusos menores que Ø30mm
→ Conféras, Folhosas ou Painel de LVL

CLASSIFICAÇÃO:

Ângulo de furação

$\alpha (^{\circ}) =$

Ø (mm) =

(Item 6.2.5 NBR 7190/2022) $k_{90} =$

$f_{e\alpha,k} (MPa) =$

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$f_{e0,k} (MPa) =$

$$f_{e0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k$$

8. RESISTÊNCIA ÀS TENSÕES NORMAIS INCLINADAS EM RELAÇÃO ÀS FIBRAS DE MADEIRA PARA INCLINAÇÕES MAIORES QUE 6°

Ângulo entre a direção das fibras e a direção do esforço inclinado (°)

$\alpha (^{\circ}) =$

Resistência paralela às fibras (MPa)

$f_0 =$

Resistência perpendicular às fibras (MPa)

$f_{90} =$

Resistência na direção inclinada em relação às fibras (MPa)

$f_{\alpha} =$

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 \times f_{90}}{f_0 \cdot \sin^2 \alpha + f_{90} \cdot \cos^2 \alpha}$$

9. TRAÇÃO AXIAL

Solicitação de cálculo da força normal de tração (kN)

$N_{t,d} =$

Área Líquida (cm²)

$A =$

INDICAR Área Líquida NO ITEM 2

Coefficiente de modificação

$K_{mod} =$

#N/D

Resistência característica à tração paralela às fibras (MPa)

$f_{t0,k} =$

0,00

Resistência de cálculo referente à tração paralela às fibras (MPa)

$f_{t0,d} =$

Tensão de tração normal à seção transversal (MPa)

$\sigma_{Nt,d} =$

INDICAR A SOLICITAÇÃO $N_{t,d}$

$$\sigma_{Nt,d} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d}$$

10. COMPRESSÃO AXIAL (Ver estabilidade no item 22)

Solicitação de cálculo da força normal de compressão (kN)

$N_{c0,d} =$

Área Líquida (cm²)

$A =$

INDICAR Área Líquida NO ITEM 2.

Coefficiente de modificação

$K_{mod} =$

#N/D

Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)

$f_{c0,k} =$

0,00

Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)

$f_{c0,d} =$

Tensão de compressão normal à seção transversal (MPa)

$\sigma_{Nc0,d} =$

INDICAR A SOLICITAÇÃO $N_{c0,d}$

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d}$$

11. COMPRESSÃO PERPENDICULAR

Coefficiente (Tab.6 NBR 7190/2022)

$\alpha_n =$

Coefficiente de modificação

$K_{mod} =$

#N/D

Resistência característica à compressão perpendicular às fibras (MPa)

$f_{c90,k} =$

0,00

Resistência de cálculo referente à compressão perpendicular às fibras (MPa)

$f_{c90,d} =$

Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)

$f_{c0,k} =$

0,00

Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)

$f_{c0,d} =$

INDICAR α_n

$$\sigma_{90,d} \leq f_{c90,d}$$

$$f_{c90,d} \leq 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_n$$

12. FLEXÃO SIMPLES RETA

	→ EM X		→ EM Y
Momento fletor solicitante de cálculo (kN.m)	$M_{d,x} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>		$M_{d,y} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>
Modulo de resistência da seção transversal (cm³)	$W_{,x} =$ INDICAR OS DADOS b,h NO ITEM 2		$W_{,y} =$ INDICAR OS DADOS b,h NO ITEM 2
Coefficiente de modificação		$K_{mod} =$	
Resistência característica da flexão (MPa)		$f_{m,k} =$	
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)		$f_{m,d} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	
	$\sigma_{M,d}/f_{m,d,x} =$ INDICAR A SOLICITAÇÃO $M_{d,x}$		$\sigma_{M,d}/f_{m,d,y} =$ INDICAR A SOLICITAÇÃO $M_{d,y}$

$$\frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} = \frac{M_d}{W} \leq 1$$

13. FLEXÃO SIMPLES OBLÍQUA

Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma_{Mx,d} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text" value="#VALOR!"/>
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma_{My,d} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text" value="#VALOR!"/>
Coefficiente de correção para seção retangular	$K_M =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text" value="#N/D"/>
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text" value="#N/D"/>
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m,k} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text" value="0,00"/>
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m,d} =$ <input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>

CONDIÇÃO 1

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text" value="#VALOR!"/>
<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text" value="#VALOR!"/>

CONDIÇÃO 2

$$K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>
--

14. FLEXOTRAÇÃO

Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma_{Mx,d} =$	<input type="text"/>
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma_{My,d} =$	<input type="text"/>
Tensão solicitante de tração normal à seção transversal (MPa)	$\sigma_{Nt0,d} =$	<input type="text"/>
Coefficiente de correção para seção retangular	$K_m =$	<input type="text"/>
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	<input type="text"/>
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m,k} =$	<input type="text" value="0,00"/>
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m,d} =$	<input type="text"/>
Resistência característica à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,k} =$	<input type="text" value="0,00"/>
Resistência à tração paralela às fibras (MPa)	$f_{t0,d} =$	<input type="text"/>

CONDIÇÃO 1

$$\frac{\sigma_{Nt0,d}}{f_{t0,d}} + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

CONDIÇÃO 2

$$\frac{\sigma_{Nt0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

15. FLEXOCOMPRESSÃO

Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma_{Mx,d} =$	<input type="text" value="#VALOR!"/>
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma_{My,d} =$	<input type="text" value="#VALOR!"/>
Tensão de compressão normal à seção transversal (MPa)	$\sigma_{Nc0,d} =$	<input type="text" value="INDICAR A SOLICITAÇÃO Nc0,d"/>
Coefficiente de correção para seção retangular	$K_m =$	<input type="text" value="#N/D"/>
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	<input type="text" value="#N/D"/>
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m,k} =$	<input type="text" value="0,00"/>
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m,d} =$	<input type="text"/>
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} =$	<input type="text" value="0,00"/>
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} =$	<input type="text"/>

CONDIÇÃO 1:

$$\left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

CONDIÇÃO 2:

$$\left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

16. CISALHAMENTO NAS LIGAÇÕES

Valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN)
 Coeficiente de modificação
 Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)
 Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)
 Resistência característica referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
 Resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
 Área que está atuando a tensão (cm²)
 Tensão de cisalhamento na seção (MPa)

Vd =
 Kmod = #N/D
 fc0,k = 0,00
 fc0,d =
 fv0,k = 0,00
 fv0,d =
 A = INDICAR Área Líquida NO ITEM 2
 rd = INDICAR A SOLICITAÇÃO Vd

$$\tau_d = \frac{V_d}{A} \leq f_{v0, d}$$

17. CISALHAMENTO LONGITUDINAL

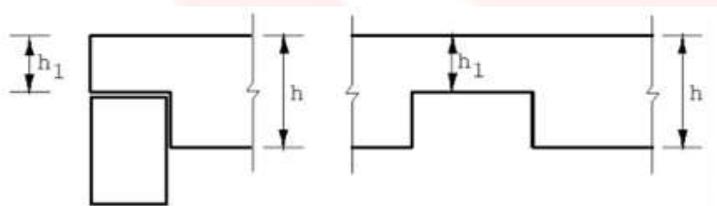
Valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN)
 Coeficiente de modificação
 Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)
 Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)
 Resistência característica referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
 Resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
 Área que está atuando a tensão (cm²)
 Tensão de cisalhamento na seção (MPa)

Vd =
 Kmod = #N/D
 fc0,k = 0,00
 fc0,d =
 fv0,k = 0,00
 fv0,d =
 A = INDICAR Área Líquida NO ITEM 2
 rd = INDICAR A SOLICITAÇÃO Vd

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{A}$$

18. CISALHAMENTO DE VIGAS ENTALHADAS

Valor solicitante de cálculo da força cortante atuante na seção (kN)	$V_d =$ <input type="text"/>	
Seção do entalhe da viga (cm)	$h_1 =$ <input type="text"/>	
Dimensão da base da viga (cm)	$b =$ INDICAR Base NO ITEM 2.	
Dimensão da altura da viga (cm)	$h =$ INDICAR Altura NO ITEM 2.	
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} =$	
Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} =$ <input type="text"/>	
Resistência característica referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,k} =$ <input type="text"/>	
Resistência de cálculo referente ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	$f_{v0,d} =$ <input type="text"/>	
Tensão de cisalhamento para vigas entalhadas (MPa)	$\tau_d =$ INDICAR A SOLICITAÇÃO V_d e h_1	$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{b \cdot h_1} \left(\frac{h}{h_1} \right)$



19. CONDIÇÃO DE ALINHAMENTO DAS PEÇAS

Peças de pórticos, treliças, pilares ou vigas

	→ EM X	→ EM Y
Comprimento da peça (cm)	$L_x =$ INDICAR Comprimento NO ITEM 2.	$L_y =$ INDICAR Comprimento NO ITEM 2.
Desvio máximo da peça (cm)	INDICAR Tipo da madeira NO ITEM 1 <input type="text"/>	INDICAR Tipo da madeira NO ITEM 1 <input type="text"/>

20. ESBELTEZ

→ EM X

→ EM Y

Inércia na direção analisada (cm⁴)

$I_x =$ INDICAR OS DADOS
b,h NO ITEM 2

$I_y =$ INDICAR OS DADOS
b,h NO ITEM 2

Comprimento da peça (cm)

$L_x =$ INDICAR L_x NO ITEM
2

$L_y =$ INDICAR L_y NO ITEM
2

Coef. K_e (Tab. 7 NBR 7190/2022)

$K_e =$

$K_e =$

$$L_{0,x} = K_E \cdot L_x$$

$$L_{0,y} = K_E \cdot L_y$$

Área da seção transversal (cm²)

$A =$ INDICAR Área Líquida
NO ITEM 2.

$A =$ INDICAR Área Líquida
NO ITEM 2.

Comprimento de flambagem (cm)

$L_{0,x} =$

$L_{0,y} =$

Esbeltez na direção analisada

$\lambda_{x} =$

$\lambda_{y} =$

$$\lambda_x = \frac{L_{0,x}}{\sqrt{I_x/A}}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{0,y}}{\sqrt{I_y/A}}$$

21. ESBELTEZ RELATIVA

Resistência característica à
compressão paralela às fibras (MPa)

$f_{c0,k} =$

Rigidez característica (MPa)

$E_{0,05} =$

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\sqrt{E_{0,05}}}$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\sqrt{E_{0,05}}}$$

→ EM X

→ EM Y

Esbeltez na direção analisada

$\lambda_{x} =$

$\lambda_{y} =$

Esbeltez relativa

$\lambda_{rel,x} =$

$\lambda_{rel,y} =$

22. ESTABILIDADE DE PEÇAS COMPRIMIDAS E FLEXOCOMPRIMIDAS

⚠ Somente para peças com $\lambda_{rel,x}$ ou $\lambda_{rel,y} > 0,3$ ⚠

TIPO DE MADEIRA:

Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção X (MPa)	$\sigma M_{x,d} =$	#VALOR!	
Tensão máxima solicitante de cálculo devido à flexão na direção Y (MPa)	$\sigma M_{y,d} =$	#VALOR!	
Tensão de compressão normal à seção transversal (MPa)	$\sigma N_{c0,d} =$	INDICAR o SOLICITANTE	
Coefficiente de correção para seção retangular	$K_m =$	#VALOR!	
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	#VALOR!	
Fator para peças estruturais	$\beta_c =$	INDICAR Tipo de Madeira NO ITEM 1	
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m,k} =$	#VALOR!	
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m,d} =$	#VALOR!	
Resistência característica à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,k} =$	0,0	
Resistência de cálculo referente à compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0,d} =$	#VALOR!	
		→ EM X	→ EM Y
Esbelteza relativa em x,y	$\lambda_{rel,x} =$	#VALOR!	$\lambda_{rel,y} =$ #VALOR!
Coefficiente de alinhamento	$k_x =$	#VALOR!	$k_y =$ #VALOR!
	$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2]$		$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2]$
Coefficiente de alinhamento	$k_{cx} =$	#VALOR!	$k_{cy} =$ #VALOR!
	$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}}$		$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}}$

CONDIÇÃO 1:

$$\frac{\sigma N_{c,d}}{k_{c,x} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma M_{x,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma M_{y,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

CONDIÇÃO 2:

$$\frac{\sigma N_{c,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma M_{x,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma M_{y,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

23. ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS

Coefficiente de ponderação	$y_f =$	1,4
Coefficiente de correção	$\beta_e =$	4
Coefficiente de correção (Tab. 8 NBR 78190/2022)	$\beta_m =$	#VALOR!
Distância entre os pontos adjacentes da borda comprimida com deslocamentos laterais impedidos (cm)	$L_1 =$	<input type="text" value="#VALOR!"/>
Dimensão da base da viga (cm)	$b =$	INDICAR Base NO ITEM 2.
Dimensão da altura da viga (cm)	$h =$	INDICAR Altura NO ITEM 2.
Coefficiente (Tab. 4 NBR 7190/2022)	$K_{mod1} =$	#N/D
Coefficiente (Tab. 5 NBR 7190/2022)	$K_{mod2} =$	#N/D
Coefficiente de modificação	$K_{mod} =$	#N/D
Rigidez média paralela às fibras (MPa)	$E_{0,med} =$	0,00
Rigidez efetiva paralela às fibras (MPa)	$E_{0,ef} =$	<input type="text" value="#N/D"/>
Resistência característica da flexão (MPa)	$f_{m,k} =$	0,00
Resistência de cálculo referente à flexão (MPa)	$f_{m,d} =$	<input type="text" value="#VALOR!"/>
	$L_1/b =$	<input type="text" value="#VALOR!"/>
	$E_{0,ef}/\beta_m \cdot f_{m,d} =$	<input type="text" value="#N/D"/>

$$\beta_M = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\beta_E}{\gamma_f} \cdot \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{3/2}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{1/2}}$$

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{0,ef}}{\beta_M \cdot f_{m,d}}$$

23.1 PEÇAS QUE NÃO ATENDEM A RESTRIÇÃO DE L1

$E_{0,ef}/(L_1/b) \cdot \beta_m =$

#VALOR!

- Verificação da flexão simples reta em X deve ser verificada e atendida
- Verificação da flexão simples reta em Y deve ser verificada e atendida

1. CONTRAVENTAMENTO DE PEÇAS COMPRIMIDAS

Distância entre os elementos de contraventamento (cm)	$L_1 =$	<input type="text"/>
Momento de inércia do eixo de menor inércia da seção transversal da peça contraventada (cm ⁴)	$I =$	<input type="text"/>
Rigidez efetiva da compressão paralela às fibras efetiva (MPa)	$E_{c0,ef} =$	<input type="text"/>
Número de intervalos de comprimento L_1	$m =$	<input type="text"/>
	$\alpha_m =$	<input type="text"/>
Rigidez mínima de contraventamento (MPa)	$K_{br,1,min} =$	<input type="text"/>

DADOS COM OPÇÕES

DADOS DE ENTRADA

DADOS INTERMEDIÁRIOS DE SAÍDA

DADOS DE SAÍDA

● AVISO DE INCOERÊNCIA DE DADOS

$$\alpha_m = 1 + \cos \frac{\pi}{m}$$

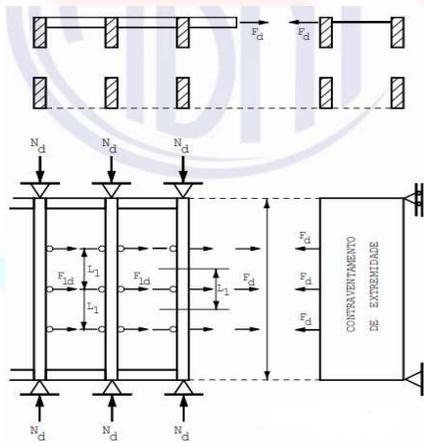
$$K_{br,1,min} = 2\alpha_m \frac{\pi^2 E_{c0,ef} I^2}{L_1^3}$$

2. ESTABILIDADE GLOBAL DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM PARALELO

Valor de cálculo da resultante de tensões atuantes no banzo comprimido (kN)	$N_d =$	<input type="text"/>
Número de nós da estrutura	$n =$	<input type="text"/>
Valor da força de cálculo em cada trecho (kN)	$F_{1d} =$	<input type="text"/>
Valor da força de cálculo total (kN)	$F_d =$	<input type="text"/>
Rigidez de contraventamento (MPa)	$K_{br} =$	<input type="text"/>

$$F_d \geq \frac{2}{3} n F_{1d}$$

$$K_{br} \geq \frac{2}{3} n K_{br,1,min}$$



1. VALOR DE CÁLCULO

Tab.4 NBR 7190/2022	$k_{mod1} =$	<input type="text"/>
Tab.5 NBR 7190/2022	$k_{mod2} =$	<input type="text"/>
Valor característico da ligação	$R_k =$	<input type="text"/>
Valor de cálculo da ligação	$R_d =$	<input type="text"/>

DADOS COM OPÇÕES

DADOS DE ENTRADA

DADOS INTERMEDIÁRIOS DE SAÍDA

DADOS DE SAÍDA

● AVISO DE INCOERÊNCIA DE DADOS

$$R_d = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot \frac{R_k}{\gamma_{lig}}$$

2. MOMENTO RESISTENTE DO PINO METÁLICO

Resistência última característica do aço do pino metálico conforme NBR ISO 898-1 (MPa)	$f_{u,k} =$	<input type="text"/>
Diâmetro nominal conforme NBR 8800 (mm)	$\emptyset =$	<input type="text"/>
Momento resistente característico do pino metálico (N.mm)	$M_{yR,k} =$	<input type="text"/>

$$M_{yR,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$$

3. EFEITO DE GRUPO PARA LIGAÇÕES COM ATÉ 8 PINOS EM LINHAPINOS:

Resistência última característica do aço do pino metálico conforme NBR ISO 898-1 (MPa)	$f_{u1,k} =$	<input type="text"/>
	$f_{u2,k} =$	<input type="text"/>

Resistência total (MPa)	$f_{uTOT,k} =$	<input type="text"/>
-------------------------	----------------	----------------------

$$\sum_{i=0}^n f_{i,k} = f_{1,k} + f_{2,k} + \dots + f_{n,k}$$

4. EFEITO DE GRUPO PARA LIGAÇÕES COM MAIS DE 8 PINOS EM LINHA

2/3 da resistência individual

PINOS SUPLEMENTARES:

Resistência última característica
do aço do pino metálico
conforme NBR ISO 898-1
(MPa)

$f_{u9,k} =$

$f_{u10,k} =$

Resistência total (MPa) $f_{uTOT,k} =$

$$\sum_{i=0}^n f_{i,k} = \frac{2}{3} \cdot (f_{1,k} + f_{2,k} + \dots + f_{n,k})$$

5. NÚMERO EFETIVOS DE PINOS NA LIGAÇÃO

Número de pinos na ligação $n_c =$

Número efetivo de pinos resistentes $n_{ef} =$

$$n_{ef} = 8 + \frac{2}{3} \cdot (n_c - 8)$$



7. DIÂMETRO DE PRÉ FURAÇÃO

TIPO DE LIGAÇÃO: [REDACTED]CLASSIFICAÇÃO: [REDACTED]Diâmetro nominal
conforme NBR 8800 (mm) $\varnothing =$ Diâmetro de pré furação
(Tab. 16 NBR 7190/2022) (mm) $d_0 =$

Pregos	Coníferas $d_0 = 0,85 d$ Folhosas: $d_0 = 0,98 d$
Parafusos passantes	$d \leq d_0 \leq d + 1\text{mm}$
Parafusos com rosca soberba	$d_0 = 0,70 d$

8. RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

TIPO DE LIGAÇÃO: [REDACTED]Densidade específica média
da madeira 1 da ligação (kg/m^3) $\rho_{1,med} =$ Densidade específica média
da madeira 2 da ligação (kg/m^3) $\rho_{2,med} =$ Densidade específica média (kg/m^3) $\rho_{med} =$ Diâmetro nominal
conforme NBR 8800 (mm) $\varnothing =$

Diâmetro interno do anel (mm)

 $\varnothing' =$

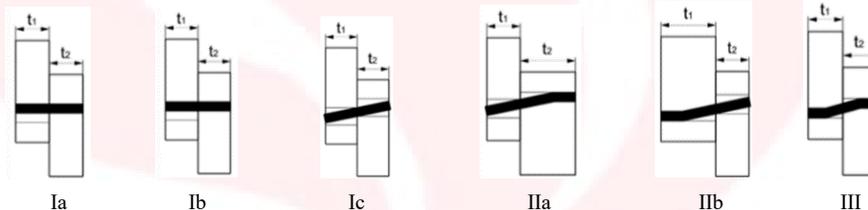
Ligação	Pinos Parafuso de porca e arruela com ou sem folga Parafuso autoatarraxante Prego (com pré-furação)	Prego (sem pré-furação)	Anel metálico
Rigidez (Mpa)	NÃO	NÃO	
K ELS (Tab. 17 NBR 7190/2022)			
K ELU			

Pinos Parafuso de porca e arruela com ou sem folga ^a Parafuso Autoatarraxante Prego (com pré-furação)	$\rho_{med}^{1,5} \frac{d}{23}$
Prego (sem pré-furação)	$\rho_{med}^{1,5} \frac{d^{0,8}}{30}$
Anel Metálico	$\frac{\rho_{med} d_c}{80}$

10. FORÇA CARACTERÍSTICA CALCULADA POR PLANO DE CORTE E POR PINO METÁLICO EM LIGAÇÕES DE MADEIRA

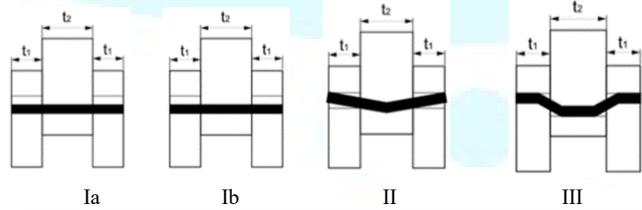
Diâmetro nominal do pino (mm)	$\varnothing =$	<input type="text"/>
Espessura da menor madeira (mm)	$t1 =$	<input type="text"/>
Espessura da maior madeira (mm)	$t2 =$	<input type="text"/>
Resistência ao embutimento (MPa)	$fe1,k =$	<input type="text"/>
Resistência ao embutimento (MPa)	$fe2,k =$	<input type="text"/>
Momento fletor atuante em y (kN.m)	$My,k =$	<input type="text"/>
Efeito de confinamento	$Fax,Rk/4 =$	<input type="text"/>
Razão entre as resistências de embutimento das madeiras	$\beta =$	<input type="text"/>

UM PLANO DE CORTE



Fv,Rk,n	<input type="text"/>					
$Fv,Rk (N)$	<input type="text"/>					

DOIS PLANOS DE CORTE



Fv,Rk,n	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
$Fv,Rk (N)$	<input type="text"/>			

11. FORÇA CARACTERÍSTICA CALCULADA POR PLANO DE CORTE E POR PINO METÁLICO EM LIGAÇÕES DE MADEIRA E CHAPAS DE AÇO

Diâmetro nominal do pino (mm)	$\varnothing =$	
Espessura da madeira (mm)	$t1 =$	
Espessura da madeira (mm)	$t2 =$	
Resistência ao embutimento (MPa)	$fe1,k =$	
Resistência ao embutimento (MPa)	$fe2,k =$	
Momento fletor atuante em y (kN.m)	$My,k =$	
Efeito de confinamento	$Fax,Rk/4 =$	

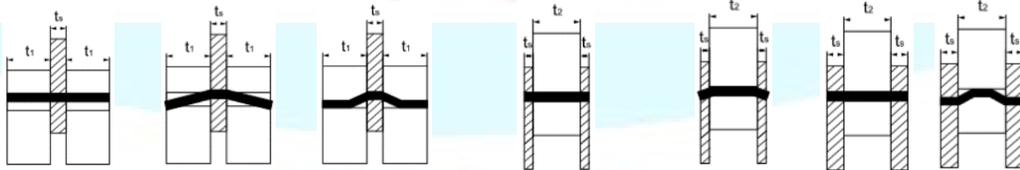
UM PLANO DE CORTE

	Chapas finas		Chapas grossas		
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Fv,RK,n					
Fv,Rk (N)					



DOIS PLANOS DE CORTE

	Chapa central			Duas chapas laterais			
	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)
Fv,RK,n							
Fv,Rk (N)							



12. RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES DE MADEIRA COM ANÉIS METÁLICOS

Quantidade de anéis empregados	$n_a =$	<input type="text"/>
Diâmetro interno do anel (mm)	$(d_a) \varnothing' =$	<input type="text"/>
Profundidade de penetração em cada peça de madeira (mm)	$t_a =$	<input type="text"/>
Valor característico da resistência à compressão inclinada (MPa)	$f_{ca,k} =$	<input type="text"/>
Resistência característica ao cisalhamento (Mpa)	$f_{v0k} =$	<input type="text"/>
Força característica do anel metálico (Mpa)	$F_{v,Rk} =$	<input type="text"/>
Força resistente característica da ligação (Mpa)	$R_k =$	<input type="text"/>

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_a$$

$$F_{v,Rk} = \frac{\pi \cdot d_a^2}{4} \cdot f_{v0k}$$

$$F_{v,Rk} = t_a \cdot d_a \cdot f_{ca,k}$$



Tempo requerido de resistência ao fogo (min)

TRF =

DADOS COM OPÇÕES
DADOS DE ENTRADA
DADOS INTERMEDIÁRIOS DE SAÍDA
DADOS DE SAÍDA

SEÇÃO TRANSVERSAL RESIDUAL DA MADEIRA - SEM REVESTIMENTO

