



VICTOR REZENDE CARVALHO

**PROJETO DE UMA COBERTURA EM MLC PARA A
QUADRA POLIESPORTIVA DO COMPLEXO DE
ALOJAMENTOS ESTUDANTIS DA UFLA**

LAVRAS – MG

2019

VICTOR REZENDE CARVALHO

**PROJETO DE UMA COBERTURA EM MLC PARA A QUADRA POLIESPORTIVA
DO COMPLEXO DE ALOJAMENTOS ESTUDANTIS DA UFLA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Civil, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof.º Dr. André Luiz Zangiácomo
Orientador

**LAVRAS – MG
2019**

VICTOR REZENDE CARVALHO

**PROJETO DE UMA COBERTURA EM MLC PARA A QUADRA
POLIESPORTIVA DO COMPLEXO DE ALOJAMENTOS ESTUDANTIS DA
UFLA**

**DESIGN OF A GLULAM ROOF FOR THE SPORTS COURT OF UFLA'S
STUDENTS ACCOMMODATIONS COMPLEX**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Curso
de Engenharia Civil, para a obtenção do
título de Bacharel.

APROVADO em 30 de outubro de 2019.
Dr. André Luiz Zangiácomo – UFLA
Dr. Rodrigo Allan Pereira – UFLA
Dra. Luciana Barbosa de Abreu – UFLA



Prof.º Dr. André Luiz Zangiácomo
Orientador

**LAVRAS – MG
2019**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Daniel e Gislana, por terem me educado e ensinado os principais valores da vida, e por me apoiarem ao longo de todos os anos em que estive distante de casa.

Aos meus irmãos, Vinicius e Mariana, pelo carinho e pela amizade de sempre.

Aos meus padrinhos, tios, primos e avós, por cuidarem de mim e demonstrarem sempre a importância da família em minha vida.

Aos companheiros e amigos de república, por se tornarem minha “família lavrense” e compartilharem comigo momentos inesquecíveis.

A todos os colegas de UFLA, em especial aos amigos da civil, pelo companheirismo e pela presença ao longo de todos esses anos de graduação.

Ao João Victor Ruckert, por toda atenção e todos os esclarecimentos no desenvolvimento do projeto estrutural.

Aos colegas de Constru Jr, em especial ao Vinycius, ao Gustavo e ao Carlos, pela disposição e ajuda na elaboração da modelagem 3D.

Ao NEMATENC, por expandir meus horizontes e me fazer conhecer mais sobre o uso da madeira como elemento estrutural.

À Universidade Federal de Lavras, por me acolher como aluno e me proporcionar diversas oportunidades de aprendizado e crescimento pessoal.

À todos os professores, em especial ao professor André Luiz Zangiácomo, pela atenção, paciência e serenidade durante a orientação deste trabalho.

RESUMO

Apesar de ser um material amplamente empregado na construção civil, o uso da madeira como elemento estrutural ainda é restrito no Brasil, fato colaborado pela escassa mão de obra especializada, desconhecimento técnico de profissionais e competitividade em termos de custo com outros materiais de construção. A aplicação de produtos engenheirados de madeira em estruturas, como a Madeira Laminada Colada (MLC), apresenta diversos benefícios ambientais e construtivos, salientando-se como uma importante alternativa para o futuro da Engenharia Civil. Tendo como premissa a possibilidade de criar um espaço democrático e inovador no *campus* da Universidade Federal de Lavras (UFLA), o autor pretendeu, com este trabalho, projetar uma cobertura em MLC para a quadra poliesportiva do complexo de alojamentos estudantis da UFLA, em Minas Gerais, popularmente conhecida como “Quadra do Brejão”, a partir do uso de *softwares* de modelagem tridimensional e de dimensionamento estrutural, além de especificações retiradas de normas técnicas. Para isso, realizou-se inicialmente um estudo do local e das dimensões da estrutura visando a elaboração do projeto arquitetônico, e, para a análise estrutural, considerou-se as características dos materiais empregados e as devidas ações atuantes na cobertura, tornando possível dimensionar os elementos de MLC e suas ligações metálicas. Com relação às dimensões finais dos elementos de MLC, as seções transversais variáveis dos pilares sofreram uma alteração de 120/60x20 cm para 144/54x20 cm, e as seções das terças e dos arcos foram modificadas de 15x8 cm para 18x10 cm e de 60x20 cm para 54x20 cm, respectivamente. Ao final, realizou-se uma análise de custos do projeto, comparando orçamentos apresentados por diferentes empresas nacionais especializadas, e foi constatado que o preço do projeto pode variar consideravelmente de acordo com a empresa contratada e com a sua complexidade.

Palavras-chave: Estruturas de Madeira. Análise estrutural. Modelagem arquitetônica.

ABSTRACT

Despite being a widely applied material in civil construction, the use of wood as a structural component is still restricted in Brazil, which is collaborated by the scarce specialized workforce, unfamiliarity of professionals about the material and cost competitiveness with other building materials. The application of engineered wood products structures, such as glued laminated timber (glulam), presents several environmental and constructive benefits, standing out as an important alternative for the future of the Civil Engineering. Having as justification the possibility of creating a democratic and innovative space on the campus of the Federal University of Lavras (UFLA), in Minas Gerais, the author intended, with this work, to design a glulam roof for a sports court of the university students accommodations complex, popularly known as “Quadra do Brejão”, with the use of 3D modeling and a structural sizing softwares, beyond concepts drawn from specific norms. For this, a study of the place and the dimensions of the structure was initially carried out for the elaboration of the architectural project, and, for the structural analysis, the characteristics of the materials and the appropriate actions on the roof structure were considered, making possible to size the glulam elements and their steel connections. Regarding the final dimensions of the glulam elements, the variable cross sections of the pillars changed from 120/60x20 cm to 144/54x20 cm, and the common rafters and arches sections were reduced from 15x8 cm to 18x10 cm and from 60x20 cm to 54x20 cm, respectively. At the end, a cost analysis of the project was performed, comparing the budgets presented by different specialized national companies, and it was found that the project price can vary considerably according to the company and its complexity.

Keywords: Wood structures. Structural analysis. Architectural modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Porcentagem dos componentes dos RCD.....	15
Figura 2 – Representação de uma viga de MLC	17
Figura 3 – Tipos de emenda nas peças de MLC.....	18
Figura 4 – Cobertura do Ginásio Jones Minosso.....	22
Figura 5 – Acúmulo de água na quadra poliesportiva do “Brejão”	24
Figura 6 – “Quadra do Brejão”.....	25
Figura 7 – “Quadra do Brejão”.....	26
Figura 8 – Dimensões da Quadra.....	26
Figura 9 – Representação dos parâmetros geométricos dos arcos.....	27
Figura 10 – Geometria e dimensões da Telha AM TO17 (mm).....	29
Figura 11 – Representação da sapata tipo BSA Lisa.	30
Figura 12 – Geometria do arco e detalhe dos chanfros.....	33
Figura 13 – Desenho da estrutura em 3D no Cype3D®.	34
Figura 14 – Modelagem 3D: vista geral da cobertura e seu entorno.	36
Figura 15 – Modelagem 3D: vista interna da cobertura.....	37
Figura 16 – Modelagem 3D: vista interna da cobertura.....	37
Figura 17 – Modelagem 3D: vista lateral a partir da quadra secundária.	38
Figura 18 – Modelagem 3D: vista lateral a partir da rua.	38
Figura 19 – Modelagem 3D: vista geral da cobertura e seu entorno.	39
Figura 20 – Montagem da estrutura no Cype3D®	39
Figura 21 – Resultado da análise estrutural no Cype3D®.....	41
Figura 22 - Centro de eventos Iporanga.....	58
Figura 23 - Centro de eventos Iporanga.....	58
Figura 24 - Parque de Exposições Granja do Torto.....	59
Figura 25 - Parque de Exposições Granja do Torto.....	59
Figura 26 - Cobertura do Shopping Iguatemi Fortaleza	60
Figura 27 - Cobertura do Shopping Iguatemi Fortaleza	60
Figura 28 – Esquema de um arco tri-articulado.	63
Figura 29 – Disposição do contraventamento na estrutura.	64
Figura 30 – Ângulo de inclinação da carga aplicada nos pilares.....	72
Figura 31 – Direção das cargas aplicadas na ligação entre os semiarcos.	72
Figura 32 – Momento fletor atuante na chapa vertical.	77
Figura 33 – Esforços solicitantes na placa de base.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Energia gasta na produção de diferentes materiais de construção.	13
Tabela 2 – Parâmetros geométricos dos arcos.....	28
Tabela 3 – Classe de resistência C30 para dicotiledôneas	28
Tabela 4 – Classe de umidade 1	29
Tabela 5 – Propriedades de resistência das chapas e parafusos	31
Tabela 6 – Alteração das seções transversais e aproveitamento dos elementos de MLC.....	40
Tabela 7 – Resistência dos elementos de MLC aos esforços de compressão.	42
Tabela 8 - Definição do número de parafusos nas ligações entre pilares e semiarcos.	42
Tabela 9 – Verificações de resistência das ligações superiores.....	43
Tabela 10 – Solicitações e verificações nas ligações de base.	43
Tabela 11 – Quantitativo de MLC elaborado pelo Cype3D®.....	44
Tabela 12 – Orçamento do projeto.	45
Tabela 13 – Dimensões da estrutura de cobertura (m).....	62
Tabela 14 – Coeficientes de pressão externa.....	62
Tabela 15 – Pressões dinâmicas efetivas do vento (KN/m ²).....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo geral.....	11
1.2 Objetivos específicos	11
1.3 Justificativa	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 O gasto energético e a emissão de gases poluentes na construção civil	11
2.2 A geração de resíduos na construção civil.....	14
2.3 O cenário da indústria madeireira no brasil.....	16
2.4 A Madeira Laminada Colada	17
2.4.1 O uso de adesivos em peças de MLC	19
2.4.2 A produção de mlc no brasil e no mundo	20
2.4.3 Exemplos de projetos em mlc no brasil	22
2.5 Aspectos sociais e culturais relacionados ao projeto	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Concepções iniciais do projeto.....	25
3.1.1 Dimensões da quadra	25
3.1.2 Parâmetros geométricos dos arcos de MLC.....	27
3.1.3 Definição da madeira	28
3.1.4 Definição do material de cobertura	29
3.1.5 Definição das ligações.....	30
3.2 Ações consideradas.....	31
3.2.1 Ações permanentes	31
3.2.2 Ações variáveis	32
3.3 Projeto arquitetônico	32
3.4 Análise estrutural.....	34
3.5 Dimensionamento das ligações.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Modelagem arquitetônica	36
4.2 Verificação dos elementos de MLC	39
4.3 Verificação das ligações	41
4.4 Análise de custos do projeto.....	44
5 CONCLUSÃO	45

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS.....	47
ANEXO A – Tabelas e figuras da ABNT NBR 6123:1988	52
ANEXO B – Tabelas e figuras da ABNT NBR 7190:1997.....	56
ANEXO C – Informações sobre os elementos das ligações	57
APÊNDICE A – Exemplos de projetos em MLC no brasil	58
APÊNDICE B – Ações do vento na estrutura: procedimento	61
APÊNDICE C – Análise estrutural: verificações do <i>software</i> Cype3D®.....	63
APÊNDICE D – Dimensionamento das ligações: procedimento.....	71
APÊNDICE E – Detalhamento das peças estruturais de MLC.....	79
APÊNDICE F – Detalhamento das ligações.....	82

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos mais importantes setores da economia, contribuindo tanto na melhoria da infraestrutura quanto na disponibilização de serviços à sociedade. Apesar de sua importância, a atuação do setor impacta o meio ambiente, sendo responsável pelo consumo massivo de recursos naturais não renováveis e pelo descarte de milhares de toneladas de resíduos ao ano.

Visando apresentar propostas para diminuir ou mesmo mitigar os impactos ambientais relacionados aos materiais e processos construtivos convencionais, uma das alternativas eficientes é a industrialização dos processos de produção das peças estruturais de madeira, que resultam nos denominados produtos engenheirados, dos quais encontra-se a Madeira Laminada Colada (MLC).

Destacam-se como benefícios proporcionados pela aplicação de MLC em estruturas a rapidez e sustentabilidade nas etapas de fabricação e montagem, além do baixo peso próprio do material. Apesar do exposto, no entanto, o atual cenário da construção civil brasileira apresenta-se limitado ao uso de produtos engenheirados de madeira, tornando necessária a sua difusão não somente nas universidades, mas em toda a sociedade.

Com vistas a um incremento do emprego dessas estruturas em território nacional e ante a uma necessidade específica identificada no *campus* da UFLA, propõe-se o presente estudo. A quadra poliesportiva do complexo de alojamentos estudantis da Universidade Federal de Lavras, conhecida popularmente como “Quadra do Brejão”, é uma área de integração entre a comunidade estudantil e os moradores da cidade. O ambiente, todavia, possui alguns problemas quanto à sua utilização, como o acúmulo de água no piso em dias chuvosos e a inviabilidade de uso do espaço em dias muito ensolarados.

Assim, ante a problemática mencionada e ciente do reconhecimento internacional da UFLA pela sustentabilidade em sua gestão, bem como dos benefícios do emprego da Madeira Laminada Colada em estruturas, este trabalho objetiva o projeto de uma cobertura em MLC para a “Quadra do Brejão”, contendo o dimensionamento dos elementos estruturais e suas ligações, além de toda a concepção arquitetônica, a partir do uso de *softwares* específicos e conceitos retirados de normas técnicas, possibilitando também a exposição de um novo material e sua correspondente técnica construtiva na região.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi elaborar o projeto de uma cobertura para a quadra de esportes do complexo de alojamentos estudantis da UFLA, com arcos e pilares em Madeira Laminada Colada e ligações metálicas.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

1. Realizar o estudo e o projeto da estrutura de cobertura por meio de *softwares* a serem utilizados para a modelagem arquitetônica e a análise estrutural, além de conteúdos obtidos de normas técnicas;
2. Realizar uma análise de custos do projeto, visando comparar os orçamentos apresentados por diferentes empresas que atuam na área de estruturas de madeira.
3. Apresentar um projeto inovador para a universidade, que poderá demonstrar e elucidar a possibilidade da utilização das estruturas em MLC na região.

1.3 Justificativa

Este trabalho justifica-se pela necessidade de uma cobertura para a quadra poliesportiva do complexo de alojamentos da Universidade Federal de Lavras, possibilitando a representação de uma construção sustentável, confortável e esteticamente contemporânea, que favoreça tanto a comunidade acadêmica quanto a sociedade como um todo, reforçando o caráter da UFLA como uma universidade ambientalmente amiga.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O Brasil é um país com grande beleza natural, conhecido por suas imensas florestas e pela diversidade de sua fauna e flora. Entretanto, é possível perceber que muitos setores da economia não apresentam grandes avanços com relação à modernização de seus processos, e não acompanham a crescente necessidade de se buscar propostas que garantam o desenvolvimento sustentável e a consequente conservação da biodiversidade nacional.

Importante componente do eixo econômico de um país, a construção civil pode ser caracterizada também por impactar agressivamente o meio ambiente, fato esse que impulsiona o emprego de materiais e técnicas menos danosas. Nesse sentido, os países desenvolvidos têm como característica a sua industrialização aliada à uma renovação constante dos métodos construtivos, que nos últimos anos valorizam o emprego de materiais e de técnicas consideradas ambientalmente sustentáveis. Já no Brasil, o desenvolvimento industrial e técnico da construção civil ainda depende de uma quebra de preconceitos existentes e de uma mudança com relação aos velhos hábitos.

Paralelamente, no *campus* da Universidade Federal de Lavras, uma das áreas de prática esportiva e integração social mais importantes é a “Quadra do Brejão”. Conhecendo os problemas relacionados à utilização do espaço em dias chuvosos e ensolarados, torna-se necessária a realização de um projeto que melhore o conforto e o bem-estar de quem usufrui do local.

2.1 O gasto energético e a emissão de gases poluentes na construção civil

Na atualidade, convive-se com inúmeros problemas ambientais, que se intensificam conforme crescem a população e, portanto, as necessidades de todo o sistema consumidor. O aquecimento global, constantemente divulgado pelos meios de comunicação e pelos centros de ensino, destaca-se como um dos grandes inconvenientes no cenário mundial, sendo uma das motivações para a realização deste trabalho.

Nos últimos anos, diversos debates envolvendo governos, cientistas e sociedade vêm sendo realizados com o objetivo de controlar e estudar o impacto das atividades humanas no consumo energético e, conseqüentemente, nas mudanças climáticas ao redor do mundo. Dentre as atividades com mais responsabilidade por essas mudanças, estão os processos industriais e os métodos construtivos atribuídos à construção civil.

Apesar da importância social e econômica, o campo da construção civil salienta-se negativamente como um importante emissor de gases do efeito estufa (GEE's). As emissões oriundas do setor estão ligadas aos processos de obtenção das matérias-primas utilizadas nos materiais de construção e na fabricação dos mesmos, à energia gasta no ciclo de vida das obras, à operação e manutenção das edificações, além do transporte e disposição final dos resíduos de construção (BESSA, 2010).

O dióxido de carbono (CO₂) é considerado como o principal gás causador do efeito estufa. A emissão de CO₂ e a demanda energética possuem uma relação elástica, ou seja, o aumento da emissão potencializa o aumento do consumo de energia (PAO & TSAI, 2010). Logo, com a constante evolução do setor da construção civil, a demanda energética se torna cada vez maior, ocasionando a redução de recursos naturais não renováveis e o aumento da emissão de gases que influenciam no fenômeno do aquecimento global.

Deste modo, a produção industrial destinada à construção, ainda que indiretamente, contribui em massa para a emissão de GEE's e para o alto consumo de energia, uma vez que apesar do país possuir matrizes energéticas consideradas limpas, as indústrias de materiais contam com grande parcela de fontes não renováveis em sua cadeia produtiva (LOBO, 2010).

Gustavsson et al. (2006) realizaram uma importante pesquisa comparando a emissão de CO₂ relacionada à processos construtivos utilizando madeira e concreto, em edifícios situados na Suécia e na Finlândia. O processo de medição abrangeu as emissões devidas ao uso de combustíveis fósseis na produção de materiais de construção, à substituição de combustíveis fósseis por resíduos de biomassa derivados do processamento da madeira, às mudanças nas reservas de carbono nas florestas e edifícios e às reações originadas do processo de obtenção do cimento. Na ocasião, o resultado apresentado foi semelhante ao obtido anos antes por Buchanan e Honey (1993), onde houve a verificação de que o processo de produção dos materiais para construção em madeira requer menos energia e reduz consideravelmente as emissões de CO₂, quando comparados aos processos construtivos dos materiais utilizados em uma construção em concreto.

A Tabela 1 contém informações obtidas de Calil Jr & Dias (1997), que corroboram com o que os autores mencionados anteriormente apresentam.

Tabela 1 – Energia gasta na produção de diferentes materiais de construção.

Material	Energia para produção (MJ/m³)
Concreto	1920
Aço	234000
Madeira Conífera	600
Madeira Dicotiledônia	630

Fonte: adaptado de CALIL JR & DIAS (1997)

Miotto (2009) ainda destaca como uma grande vantagem da madeira a sua capacidade de fixar o carbono, além de ser um material reaproveitável e renovável, reunindo aspectos essenciais para atenuar os impactos ambientais promovidos pela construção civil nas últimas décadas.

Deste modo, observa-se que o uso de madeira como elemento estrutural pode abreviar o alto gasto energético atribuído à obtenção dos materiais de construção convencionais, além de contribuir na redução da emissão de CO₂ gerada pelos processos de produção e construção, bem como representar uma estocagem de carbono durante a vida útil da edificação.

2.2 A geração de resíduos na construção civil

Outro grande inconveniente atribuído à construção civil no país e no mundo é a demasiada geração de resíduos sólidos. Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) ou Resíduos da Construção Civil (RCC) são definidos como materiais provenientes de construções, reformas e demolições de obras de construção civil ou resultantes de atividades de escavação. Tijolos, concreto, metais e plásticos, entre outros materiais, são alguns dos componentes dos RCD que podem ser grandes contaminantes para o meio ambiente, principalmente quando depositados em locais inapropriados (DHAPEKAR & MISHRA, 2017).

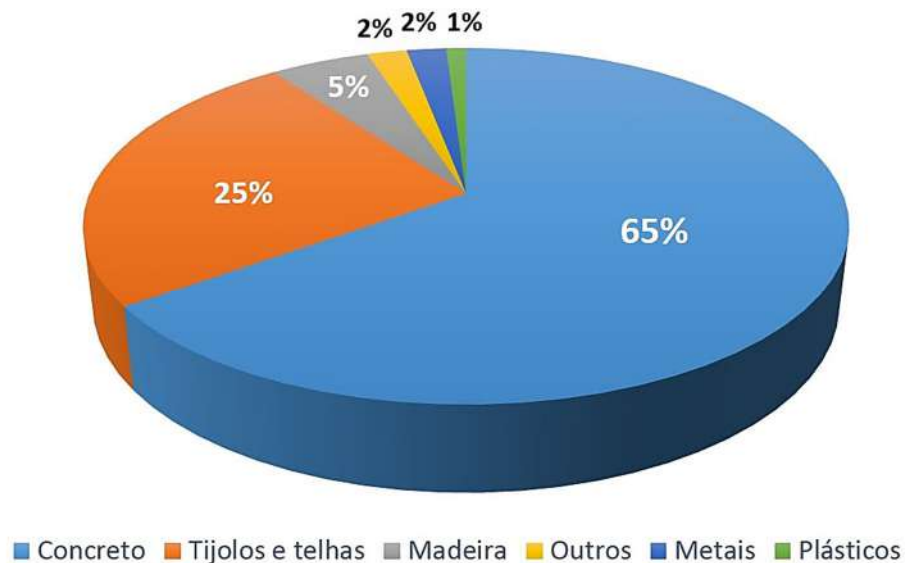
A cadeia produtiva da construção civil é, muitas vezes, responsável pela acumulação de resíduos em rios, vias e logradouros públicos, criando locais de deposição irregular. Os resíduos colaboram na poluição visual, dificultam o tráfego de pedestres e veículos, e também interferem na obstrução do sistema de drenagem urbano, além de contaminarem o solo e a água e servirem de locais para proliferação de vetores de doenças. Outro aspecto negativo é o custo da remoção dos resíduos irregulares, que aumentam os gastos municipais e interferem no correto desenvolvimento da gestão dos RCD (KARPINSKI et al., 2009).

No Brasil, Os Resíduos de Construção e Demolição têm grande participação no total dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Pesquisas indicam que os RCD já apresentam cerca de 50% dos RSU nas cidades brasileiras, com uma taxa média de geração em torno de 0,52 tonelada.habitante⁻¹.ano⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2011; CABRAL, 2007) (Figura 1).

Diante desse cenário, a identificação da composição dos resíduos deve ser aplicada a todos os canteiros de obras, e as políticas ambientais relacionadas ao tema devem focar-se no gerenciamento adequado, visando uma possível redução, reutilização, reciclagem e posterior deposição desses resíduos (TAM & TAM, 2006; KARPINSKI et al., 2009).

Na Figura 1 é possível observar que a geração de resíduos de concreto é amplamente superior em relação aos outros materiais. Conhecendo a popularidade do material no Brasil, o emprego de técnicas construtivas que gerem menos resíduos mostra-se como uma alternativa importante para a redução dos problemas discutidos anteriormente.

Figura 1 – Porcentagem dos componentes dos RCD



Fonte: adaptado de Dhapekar & Mishra (2017)

O uso da madeira na construção em substituição ao concreto tem como uma de suas grandes vantagens a baixa geração de RCD nos canteiros de obras, visto que as peças utilizadas normalmente já estão prontas para serem montadas *in loco*. A Madeira Laminada Colada, quando comparada à madeira maciça, ainda traz como benefício o melhor aproveitamento do material nos processos industriais, reduzindo ainda mais a geração de resíduos.

Amplamente utilizados em estruturas de cobertura, os materiais metálicos apresentam baixa geração de resíduos nos seus processos construtivos (Figura 1). Além disso, assim como as estruturas em madeira, as estruturas metálicas também possuem rapidez de fabricação e montagem (SILVA, 2009).

Outro aspecto importante da madeira é a sua possibilidade de reaproveitamento. Gustavsson et al. (2006) assumem que em atividades de demolição, 90% dos materiais em madeira são reaproveitáveis, sendo que um dos possíveis destinos é a sua utilização para a produção de biomassa.

Tendo em vista os fatores citados, nota-se que o uso de MLC em estruturas pode reduzir significativamente a geração de resíduos tanto nos processos de fabricação, quanto nas etapas de construção, contribuindo para a atenuação do consumo de matéria prima – e consequente desperdício – e melhoria da gestão de resíduos sólidos do setor construtivo.

2.3 O cenário da indústria madeireira no Brasil

O Brasil possui aproximadamente 500 milhões de hectares de florestas naturais e plantadas, representando a segunda maior área florestal do planeta. Segundo dados do Serviço Florestal Brasileiro (2016), as florestas plantadas, associadas principalmente aos plantios dos gêneros Pinus e Eucalipto, correspondem a apenas 1,5% de toda a área de florestas do país, totalizando cerca de 7,8 milhões de hectares.

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (2017), o setor brasileiro de árvores plantadas é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e 6,2% do PIB industrial do país, sendo também um dos segmentos com maior potencial para a contribuição na construção de uma economia verde.

Apesar do grande potencial florestal, o Brasil ainda enfrenta dificuldades com relação à utilização da madeira na construção civil. A aplicação para fins industriais ainda é voltada principalmente para a produção de papel e celulose, que equivale a cerca de 35% de todo o consumo do material no país (LEITE et al., 2017).

Um dos fatores mais importantes para a fabricação de elementos de madeira serrada com qualidade e eficiência estrutural é a idade da madeira, sendo necessário o emprego de madeiras adultas, com ciclos superiores à 15 anos de duração. Deste modo, observa-se que o maior mercado consumidor também influencia na qualidade da matéria prima ofertada, sabendo que para os setores de celulose e papel e carvão vegetal são utilizadas florestas de curta rotação, visto sua produção requer plantios com árvores jovens e ciclos mais curtos (LEITE, 2009).

Azambuja (2006) reitera a importância do corte diferenciado das toras de madeira, que proporcionam maior aproveitamento da madeira adulta, com mais densidade e maiores índices de resistência. Dadas as circunstâncias, grande parte da matéria-prima adquirida pelo segmento da madeira serrada não possui as qualidades necessárias para a produção de peças ou componentes atribuídos à construção civil. Quando apresentadas as características ideais, a comercialização do material se volta naturalmente ao mercado externo, pois o mesmo exige

maior controle de qualidade e certificação, além de oferecer melhores preços pelo produto (LEITE et al. 2017).

De acordo com Granato (2011), o cenário ideal para o setor de madeira serrada seria a maior utilização de espécies oriundas de florestas de longa duração. Neste caso, a matéria-prima apresentaria maior estabilidade dimensional, diminuindo possíveis defeitos atribuídos aos processos de obtenção das toras.

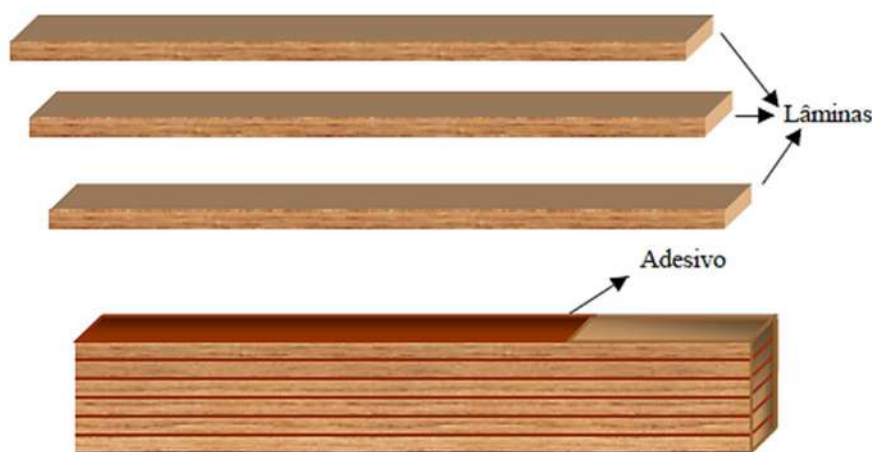
Tendo em vista os fatores mencionados acerca do mercado da madeira serrada no Brasil, pode-se considerar a Madeira Laminada Colada como uma promessa no emprego de árvores mais jovens para o uso estrutural, levando em consideração a possibilidade de aplicação de madeiras com menor densidade e a eliminação dos defeitos das peças nos processos de montagem.

Torna-se evidente, portanto, que o aumento da demanda por produtos engenheirados de madeira pode criar uma mudança na atual conjuntura de subaproveitamento do material oriundo de plantios florestais para fins industriais.

2.4 A madeira laminada colada

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um produto manufaturado, fabricado a partir da associação de lâminas de madeira através da aplicação de adesivos, de modo que as fibras nas lâminas se direcionem paralelamente ao comprimento da peça obtida (Figura 3). Na construção civil, os elementos de MLC possuem grande versatilidade, podendo ser empregados sob variadas formas estruturais e arquitetônicas como coberturas, pontes e edifícios.

Figura 2 – Representação de uma viga de MLC



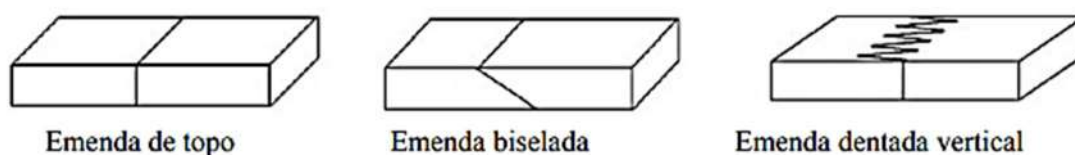
Fonte: ZANGIÁCOMO (2003)

A utilização de MLC teve início na Alemanha, ao final do século XIX, quando o mestre carpinteiro suíço Otto Karl Frederich Hetzer, substituindo as ligações mecânicas por cola, obteve a primeira patente relacionada a este processo de fabricação, conhecida na época como *Hertzer Sistem* (CARVALHO, 2009). Um dos problemas iniciais da aplicação de MLC foi a limitação do material às intempéries, especialmente com relação ao seu contato com a água. No entanto, após o fim da Segunda Guerra Mundial, o sistema construtivo apresentou seu primeiro grande progresso, a partir do desenvolvimento de adesivos sintéticos (CALIL, 2011).

Durante o processo de fabricação, as espessuras das lâminas são previamente determinadas, não excedendo 50 mm. A dimensão do elemento estrutural produzido é limitada pelos métodos de manufatura e sistemas de transporte, representando assim grande variabilidade geométrica e liberdade construtiva (MIOTTO, 2009).

A união longitudinal das lâminas de madeira é um fator fundamental para a continuidade dos elementos em MLC. De acordo com Teles (2009), a união pode ser feita de três diferentes maneiras, sendo elas a emenda de topo, a emenda biselada e a emenda dentada, também conhecida como *finger joint* (Figura 4).

Figura 3 – Tipos de emenda nas peças de MLC



Fonte: TELES (2009)

No entanto, como prescrito na ABNT NBR 7190:1997, devem ser realizados ensaios mecânicos para o uso das emendas biseladas, como comprovação da eficiência da união. Além disso, a norma também caracteriza as emendas dentadas como emendas de usinagem vertical ou horizontal, e desconsidera a utilização das emendas de topo para a fabricação de peças estruturais de Madeira Laminada Colada.

Uma observação importante com relação ao material é o fato de que praticamente todas as espécies de madeira podem ser utilizadas em sua fabricação, desde que o processo de colagem das lâminas seja apropriado e as propriedades físicas e mecânicas devidamente satisfeitas (MOODY et al., 1999). Além disso, existe a possibilidade da utilização de lâminas de melhor qualidade nas regiões de alta sollicitação e lâminas de qualidade inferior nas regiões

de menor solicitação, característica que possibilita a fabricação de elementos estruturais com mais qualidade e confiabilidade que as madeiras que não possuem classificação prévia (AZAMBUJA, 2006).

Um dos fatores que dificultam a difusão do uso de MLC no Brasil, segundo Granato (2011), é o preconceito de grande parte da população pelo material, resultado da falta de informação e do *lobby* realizado pelas grandes empresas do ramo de cimento e aço. Como consequência, pode-se observar a escassa mão de obra especializada e o elevado custo do material quando comparado aos elementos construtivos convencionais.

De acordo com Zangiácomo (2003), dentre as principais vantagens atribuídas à Madeira Laminada Colada, destacam-se: a grande variedade de formas e efeitos arquitetônicos, a possibilidade de aplicação de contra flechas, a facilidade na construção de grandes estruturas, a redução de defeitos usuais em peças de madeira com grandes dimensões, a possibilidade de combinação de distintas espécies de acordo com as necessidades construtivas, a baixa relação peso/resistência e o bom desempenho do material quando submetido ao fogo.

Carvalho (2009) ainda acrescenta que as estruturas em MLC preservam o aspecto natural da madeira, favorecendo a criação de um ambiente mais quente e visualmente mais agradável.

Dessa forma, verifica-se que o material pode oferecer diversos benefícios quando devidamente fabricado e empregado, se mostrando como uma boa alternativa no atual cenário da construção civil, e como uma tecnologia com grande potencial de desenvolvimento no Brasil.

2.4.1 O uso de adesivos em peças de MLC

Os adesivos têm fundamental importância na confecção de peças de MLC. Eles são responsáveis pela união das lâminas de madeira entre si, tornando possível a grande liberdade construtiva do produto engenheirado. Segundo a ABNT NBR 7190:1997, os adesivos que são empregados em peças estruturais de MLC devem promover ligações de resistência e durabilidade tais que a qualidade e as características da ligação se mantenham por toda a vida útil da estrutura, sendo a resistência da junta colada igual ou maior que a resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira.

Para escolher corretamente o adesivo a ser utilizado, devem ser levados em conta aspectos como o teor de agressividade e umidade do ambiente, e também o tempo de cura do

adesivo. Para peças que necessitem de algum tempo para o processo de pega entre a cola e a madeira, deve ser evitada qualquer solicitação no material até que o mesmo esteja apto a ser utilizado.

A revisão da ABNT NBR 7190:1997 (2011) apresenta uma série de recomendações sobre o processo de prensagem das lâminas de madeira, estabelecendo pressões mínimas de colagem nas juntas de cola e nas ligações de continuidade das lâminas. As preconizações da norma servem para que a fabricação do material seja realizada de maneira controlada e padronizada, mesmo na ausência de recomendações do fabricante dos adesivos.

No Brasil, os adesivos mais utilizados na fabricação de MLC são os poliuretanos e os adesivos à base de resorcinol, ambos apresentando alta resistência à umidade, tornando possível sua utilização em ambientes externos (CALIL, 2011).

2.4.2 A produção de MLC no Brasil e no mundo

Apesar de não ser uma tecnologia com vasta aplicação no país, a produção de MLC no Brasil teve seu início na década de 30, na região sul.

Em 1934, com a tecnologia trazida por imigrantes alemães, foi criada a primeira fábrica de produção de MLC do Brasil, localizada no estado do Paraná. A partir da década de 60, o estado de São Paulo recebeu a primeira fábrica da região Sudeste, que utilizava o Pinho Araucária como matéria prima (ZANGIÁCOMO, 2003).

Segundo levantamento realizado por Leite et al. (2017), existem atualmente 07 empresas produtoras de peças em MLC no Brasil, distribuídas entre os estados da região Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país. A ITA Construtora Ltda. e a Esmara Estruturas de Madeira Ltda. são as duas maiores produtoras do país, e se destacam amplamente no mercado nacional, produzindo em torno de 1.200 e 500 m³/ano, respectivamente.

Apesar de empresas localizadas em diferentes estados e regiões do país, a produção nacional de MLC ainda é modesta quando comparada à produção Europeia, que gira em torno de 1.200.000 m³/ano. O Chile, país com PIB consideravelmente inferior ao brasileiro, produz cerca de 12.000 m³/ano de MLC, evidenciando ainda mais o déficit de aproveitamento do material no Brasil (GRANATO, 2011).

Miotto (2009) divide sucintamente o processo de fabricação da MLC em quatro etapas, sendo elas: secagem e classificação das lâminas, execução das emendas, colagem das lâminas e acabamentos finais.

1. Na etapa de secagem, as lâminas são levadas à estufa, onde perdem umidade e garantem poucas modificações dimensionais do produto. Posteriormente, as lâminas são classificadas mecânica e visualmente, conforme os requisitos normativos.
2. A execução das emendas trata-se da união das extremidades das peças de madeira serrada, etapa necessária para garantir a geometria desejada dos elementos de MLC, tendo em vista as limitações de comprimento das lâminas.
3. O terceiro processo de fabricação consiste na disposição e colagem das lâminas ao longo da altura das seções, utilizando-se, usualmente, sistemas mecânicos e hidráulicos para a prensagem das lâminas até o início da ação dos adesivos. Para a realização desta fase, as propriedades mecânicas das lâminas devem ser previamente avaliadas.
4. Por último, as peças de MLC são submetidas por um processo de aplainamento, que visa a remoção do excesso de adesivo que escorre durante a prensagem e das irregularidades geométricas nas laterais das lâminas. Com isso, são realizados os cortes finais e os furos utilizados nas ligações, e em seguida são adicionados os conectores e aplicados os últimos acabamentos.

A revisão da NBR 7190:1997, ainda em andamento, traz uma série de recomendações para a elaboração de peças em MLC, dentre as quais destacam-se as apresentadas a seguir:

- As lâminas devem ter densidade entre 0,40 e 0,75g/cm³, considerando um teor de umidade de 12%;
- As lâminas e a peça final devem ser submetidas aos tratamentos preservativos para garantir a qualidade e durabilidade do material;
- É importante que as lâminas estejam secas durante o processo de produção, podendo atingir no máximo 18% de teor de umidade na etapa de colagem;
- As lâminas precisam passar por um processo de classificação visual e do módulo de elasticidade antes do processo produtivo;
- A continuidade das lâminas deverá ser assegurada pela união longitudinal entre as mesmas. A emenda deve ser executada por colagem de entalhes múltiplos, e ser do tipo dentável ou *finger joint*;
- A espessura das lâminas não pode ultrapassar 5cm;
- Os adesivos utilizados devem ser do tipo estrutural, e precisam apresentar propriedades compatíveis às condições ambientais a que os elementos estruturais estarão submetidos.

Nota-se que a produção nacional de MLC, apesar de limitada, possui grande potencial de crescimento e desenvolvimento devido aos estudos já realizados, à abundância de matéria prima no país e aos processos industriais já conhecidos. No entanto, torna-se necessário o desenvolvimento dos padrões normativos específicos para o uso do material.

2.4.3 Exemplos de projetos em MLC no Brasil

O ginásio Jones Minosso, erguido em 2002, é o maior exemplo de aplicação de MLC em ginásios poliesportivos no país. Localizado na cidade de Lages-SC, o local foi uma das maiores estruturas lamelares do mundo na época de sua construção, sendo o primeiro ginásio com cobertura em madeira da América Latina (Figura 5). Com capacidade para até 5 mil espectadores, o local recebe importantes competições esportivas de nível nacional e internacional.

Figura 4 – Cobertura do Ginásio Jones Minosso.



Fonte: Correio Lajeano (2013).

O Brasil ainda possui outros grandes exemplos de projetos em MLC, como a cobertura do Shopping Iguatemi Fortaleza (Fortaleza-CE), o Centro de Eventos Iporanga (Guarujá-SP) e o Parque de Exposições Agropecuárias Granja do Torto (Brasília-DF). No Apêndice A desse texto todos estes projetos encontram-se apresentados e comentados.

2.5 Aspectos sociais e culturais relacionados ao projeto

Nos últimos anos, a Universidade Federal de Lavras vem se destacando por sua preocupação com as questões ambientais, sendo reconhecida em 2016 com o selo *Blue University*, que conduziu a Instituição ao *status* de universidade mais sustentável do País e exemplo internacional de gestão ambiental (DCOM UFLA, 2016).

Apesar do reconhecimento pela sustentabilidade em sua administração, praticamente todas as edificações do campus, já finalizadas ou em processo de construção, possuem métodos construtivos convencionais, fazendo com que a ideia de universidade sustentável, contemporânea e ambientalmente consciente não seja completamente percebida por sua comunidade ou simplesmente por quem a visita. A partir do momento que a instituição começar a tornar prática comum a presença de edifícios considerados ambientalmente corretos, aumentará substancialmente a percepção dos usuários acerca do assunto, o que pode levar inclusive à quebra de paradigmas socioculturais, no que diz respeito a tradicionais metodologias construtivas.

A relação entre a cidade de Lavras e a universidade é outra questão a ser debatida. A UFLA, que tem como característica a realização de diversos eventos abertos ao público, ainda pode ampliar o seu vínculo com aqueles que não fazem parte da instituição, criando uma maior interação entre os moradores da região e a comunidade acadêmica.

Atualmente, no *campus* universitário, um dos espaços de lazer abertos à população é a quadra poliesportiva do complexo de alojamentos da universidade, popularmente denominada “Quadra do Brejão”. Apesar de sua importância, a quadra possui alguns inconvenientes quanto à sua utilização: em épocas de chuva, o espaço torna-se inutilizável, o que se estende para os dias subsequentes, visto que a quadra permanece por algum tempo com acúmulo de água na forma de poças (Figura 2). Outro aspecto a se considerar é a utilização do espaço em dias muito ensolarados, nos quais as atividades esportivas se tornam praticáveis apenas nos horários de menor insolação ou, alternativamente, à noite.

Figura 5 – Acúmulo de água na quadra poliesportiva do “Brejão”



Fonte: Autor (2019)

Constata-se, portanto, que a remodelação da “Quadra do brejão” por meio de um projeto contemporâneo e ambientalmente responsável pode otimizar o uso do espaço público e também favorecer as boas práticas de caráter extensionista, além de servir como mais um importante exemplo de conscientização ambiental da universidade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A concepção deste trabalho originou-se com a identificação de uma necessidade estrutural no *campus* da UFLA, ou seja, de uma adequação a um espaço de lazer poliesportivo da universidade. A partir dessa observação, tomou corpo a ideia de uma cobertura em MLC para a quadra poliesportiva do “Brejão”. Para isso foram executados os procedimentos necessários para a elaboração do projeto arquitetônico e, posteriormente, do projeto estrutural para a referida estrutura. Menciona-se que após avaliações de formatos arquitetônicos que pudessem atender a essa demanda, optou-se então pelo desenvolvimento de estudos de uma estrutura espacial de arcos e pilares em MLC.

É importante destacar que para o desenvolvimento dos referidos projetos foram utilizadas as versões de teste dos *softwares* Cype3D® e Lumion®, além das versões estudantis dos *softwares* Revit® e Autocad®.

3.1 Concepções iniciais do projeto

Para dar início ao trabalho foi realizada uma série de verificações e considerações sobre o local onde situa-se o projeto e os aspectos visuais e construtivos da estrutura de cobertura, bem como a escolha dos materiais que serão empregados na mesma.

3.1.1 Dimensões da quadra

A princípio, foi realizada uma visita inicial ao complexo esportivo dos alojamentos estudantis da UFLA (Figuras 6 e 7). No local, com o auxílio de uma trena, foram obtidas as dimensões da quadra poliesportiva principal e de toda a área a ser coberta.

Figura 6 – “Quadra do Brejão”.



Fonte: Autor (2019).

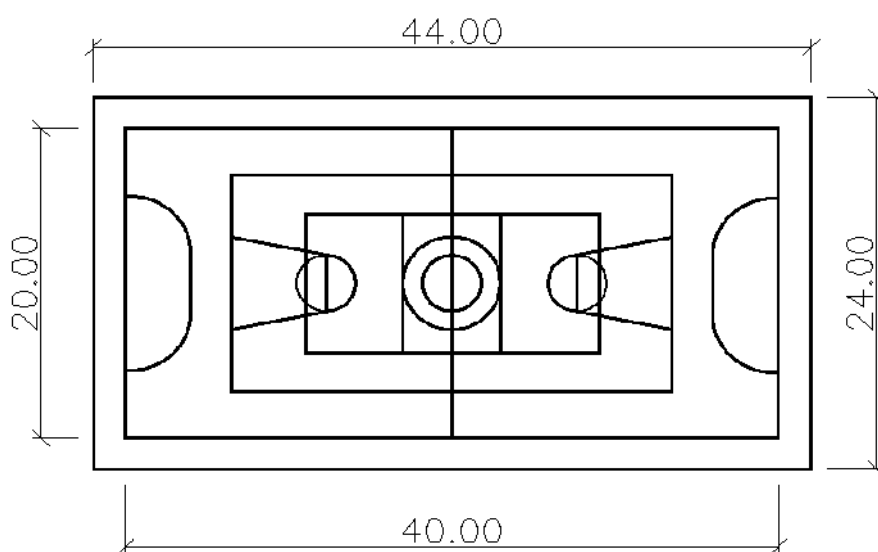
Figura 7 – “Quadra do Brejão”.



Fonte: Autor (2019).

Após as medições, verificou-se que a “Quadra do Brejão” possui as medidas oficiais de uma quadra de futsal, como reconhecido pela CBFS (Confederação Brasileira de Futebol de Salão – Futsal). Sendo assim, o espaço de jogo dispõe de 40 metros de comprimento e 20 metros de largura, além de ter o espaçamento adicional mínimo de 2 metros com relação às linhas demarcatórias das laterais e dos fundos, respeitando a segurança dos usuários do local (Figura 8).

Figura 8 – Dimensões da Quadra.



Fonte: Autor (2019).

3.1.2 Parâmetros geométricos dos arcos de MLC

A estrutura espacial é composta por arcos e pilares. Conhecendo as dimensões da área a ser coberta foi possível projetar a configuração dos arcos de MLC. Os pilares de sustentação estarão dispostos a cada 4,9 metros, totalizando 10 arcos ao longo de todo o comprimento de 44 metros. As características geométricas da estrutura de cobertura foram obtidas seguindo o procedimento realizado por Nunes (2015), por meio das seguintes expressões:

$$R = \frac{(F)^2 + \left(\frac{V}{2}\right)^2}{2F} \quad (1)$$

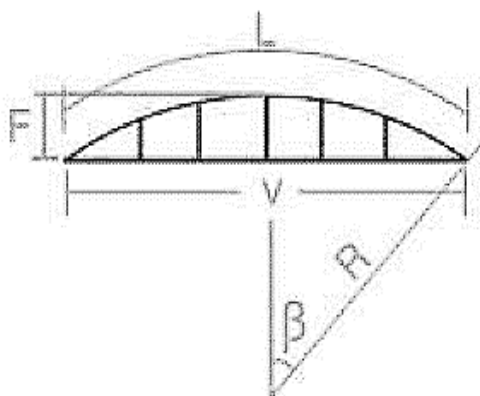
$$\beta = \text{arc sen} \left(\frac{V}{2R} \right) \quad (2)$$

$$L = \frac{\pi R \beta}{90} \quad (3)$$

Na Figura 9 são correlacionados os parâmetros geométricos utilizados em cada expressão, sendo:

- R o raio da curvatura;
- V o vão entre cada pilar;
- β o ângulo desenvolvido;
- L o comprimento do arco.

Figura 9 – Representação dos parâmetros geométricos dos arcos.



Fonte: NUNES (2015).

Os parâmetros encontrados pelas expressões 1, 2 e 3, bem como as dimensões pré-estabelecidas no projeto, são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros geométricos dos arcos

V (m)	F (m)	R (m)	B	L (m)
24,00	2,77	30,05	23,54°	24,70

Fonte: Autor (2019).

3.1.3 Definição da madeira

Para a escolha da madeira a ser utilizada no projeto deve-se levar em conta as características dos processos de produção de MLC na região onde o mesmo será executado. Considerando as espécies de madeira encontradas no Brasil, mais especificamente na região Sudeste, podemos destacar as grandes áreas plantadas de eucaliptos, sobretudo no estado de Minas Gerais.

Outro fator importante é a verificação da matéria prima utilizada pelas empresas de MLC no Brasil. A Ita Construtora Ltda., como exemplo, utiliza apenas madeira de eucalipto para a fabricação de suas peças, com espessura padrão das lâminas de 30mm.

Sendo assim, a madeira escolhida para o projeto foi do gênero *Eucalyptus*, de média densidade, com classe de resistência C30 e classe de umidade 1. As propriedades características do material foram obtidas na ABNT NBR 7190:1997 e apresentadas nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Classe de resistência C30 para dicotiledôneas

Classe	f_{c0k} (MPa)	f_{v0k} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C30	30	5	14500	650	800

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:1997.

Em que:

- f_{c0k} é o valor característico de resistência à compressão paralela às fibras;
- f_{v0k} é o valor característico de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;
- $E_{c0,m}$ é o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras;

- $\rho_{bas,m}$ é a densidade básica da madeira;
- $\rho_{aparente}$ é a densidade aparente da madeira.

Tabela 4 – Classe de umidade 1

Classe de Umidade	Umidade relativa do ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio da madeira (U_{eq})
1	$U_{amb} \leq 65\%$	12%

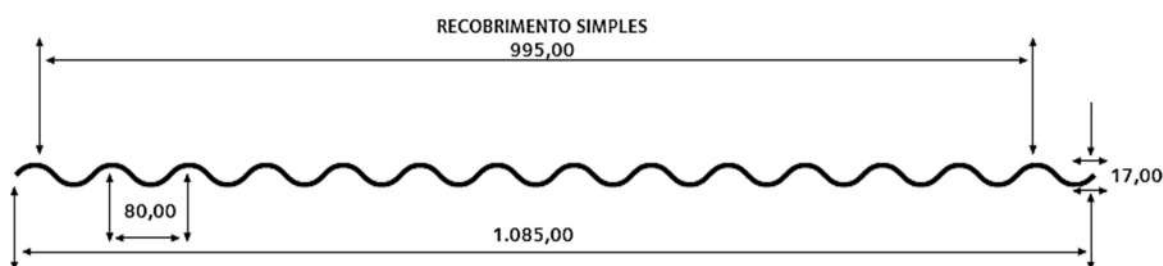
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:1997.

É importante destacar que a caracterização das propriedades da Madeira Laminada Colada é feita a partir dos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola, tração normal à lâmina de cola e resistência das emendas dentadas e biseladas. Os ensaios permitem atribuir aos elementos de MLC as mesmas propriedades da madeira das lâminas (ABNT NBR 7190:1997).

3.1.4 Definição do material de cobertura

O material escolhido para cobrir a quadra foi a Telha Ondulada AM TO17 da ArcelorMittal®, de aço, indicada para a aplicação em superfícies curvas devido à sua flexibilidade (a geometria e as dimensões da telha podem ser observadas na Figura 10).

Figura 10 – Geometria e dimensões da Telha AM TO17 (mm).



Fonte: Catálogo de Telhas ArcelorMittal®.

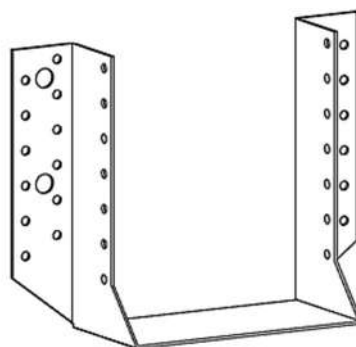
Após consulta no catálogo do fabricante, a espessura escolhida foi a de 0,43mm, com massa específica de 4,18 kg/m² e distância máxima entre apoios de 1,5m, considerando uma sobrecarga de 100 kg/m². Verificando as informações anteriores, foi possível determinar o espaçamento das terças no projeto, que são os elementos longitudinais da cobertura que irão

auxiliar na sustentação das telhas. Levando em conta o comprimento do arco encontrado no item 3.1.2, de 24,70m, o espaçamento adotado foi de 1,25m ao longo de toda sua extensão.

3.1.5 Definição das ligações

Para realizar as ligações entre as terças e os arcos em MLC serão utilizadas as sapatas metálicas com asas externas do tipo BSA Lisa, fabricadas pela Rothoblaas® (Figura 11).

Figura 11 – Representação da sapata tipo BSA Lisa.



Fonte: Catálogo BSA Rothoblaas®.

Como será esclarecido nos itens a seguir, cada arco é composto por dois semiarcos. Nas ligações entre os semiarcos e os pilares e entre os dois semiarcos foram adotadas chapas metálicas internas parafusadas. A ABNT NBR 7190:1997 especifica o valor mínimo de 6mm para a espessura das chapas e 10mm para o diâmetro dos parafusos, que também devem ter resistência característica mínima de 240 MPa. No projeto, optou-se por utilizar chapas metálicas em aço ASTM A36, com 6mm de espessura, e parafusos do tipo ASTM A325 com diâmetro de 5/8" (aproximadamente 16 mm).

Devido às maiores cargas atuantes, para as ligações nas bases dos pilares a espessura das chapas verticais adotada foi de 10mm. Os diâmetros dos parafusos e dos chumbadores, assim como a espessura das chapas de base, foram dimensionados posteriormente. Definiu-se o aço ASTM A36 tanto para as chapas vertical e de base, quanto para os chumbadores. O aço ASTM A325 foi mantido para os parafusos conectados nas chapas verticais.

As propriedades de resistência respectivas a cada material foram obtidas na NBR 8800:2008 e estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades de resistência das chapas e parafusos.

Material	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Espessura e diâmetro limites (mm)
ASTM A36	250	400 a 550	$t \leq 200$
ASTM A325	635	825	$16 \leq d_b \leq 24$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800:2008.

Onde:

- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- f_u é a resistência à ruptura do aço.

Para o concreto na base dos pilares, optou-se por considerar a classe C20, com resistência característica à compressão de 20MPa, por se tratar de um material amplamente utilizado em construções na região.

3.2 Ações consideradas

Na elaboração de um projeto estrutural, deve-se conhecer a magnitude e o sentido das solicitações atuantes nos elementos estruturais. Sendo assim, são consideradas as ações permanentes e variáveis, de acordo com valores e procedimentos normativos preestabelecidos pela ABNT.

3.2.1 Ações permanentes

Para a determinação das ações permanentes na estrutura foi consultada a NBR 6120:1980 (em revisão). De acordo com a norma, cargas permanentes são geradas pelo peso próprio da estrutura, além do peso de todos os elementos de construção e instalações fixas.

As ações consideradas no projeto estão listadas a seguir:

- Peso próprio da estrutura, calculado pelo *Software* estrutural utilizado, de acordo com a especificação dos materiais do projeto e de suas respectivas seções e dimensões;

- Peso do material de cobertura, que no projeto foi a telha ondulada AM TO17 da ArcelorMittal, com 0,43mm de espessura. A carga considerada foi de 0,042 kN/m²;
- Peso das instalações de iluminação que estarão fixadas na estrutura de cobertura. O peso adotado foi de 0,05 kN/m², como considerado por Silva et al. (2019).

3.2.2 Ações variáveis

De acordo com a NBR 7190:1997, as ações variáveis são cargas verticais atribuídas ao uso normal da edificação e seus eventuais efeitos, além da ação do vento na estrutura.

Para considerar a ação das cargas superficiais (kN/m²) nos elementos de MLC, as mesmas são multiplicadas pelo espaçamento entre as terças, transformando-se em cargas lineares (kN/m).

São consideradas como sobrecarga as cargas que excedem o peso habitual da estrutura. Como preconizado na NBR 6120:1980, os elementos isolados de cobertura, como as terças, devem ser dimensionados para receber uma carga de 0,25 kN/m², além das cargas permanentes, em sua posição mais desfavorável. Foi considerado também um carregamento de 1,00 kN/m² na cobertura, para a manutenção ou inspeção da estrutura.

Para a verificação da força gerada pelo vento na cobertura, foi realizada a metodologia de cálculo de acordo com a NBR 6123:1988, consultando os coeficientes aerodinâmicos para coberturas curvas, mais especificamente para abóbodas cilíndricas. Todo o procedimento de cálculo encontra-se no Apêndice B deste trabalho.

3.3 Projeto arquitetônico

O projeto arquitetônico é essencial para a concepção de um projeto de engenharia. A partir das representações gráficas e escritas, foi possível compreender e executar toda a proposta relacionada a este trabalho.

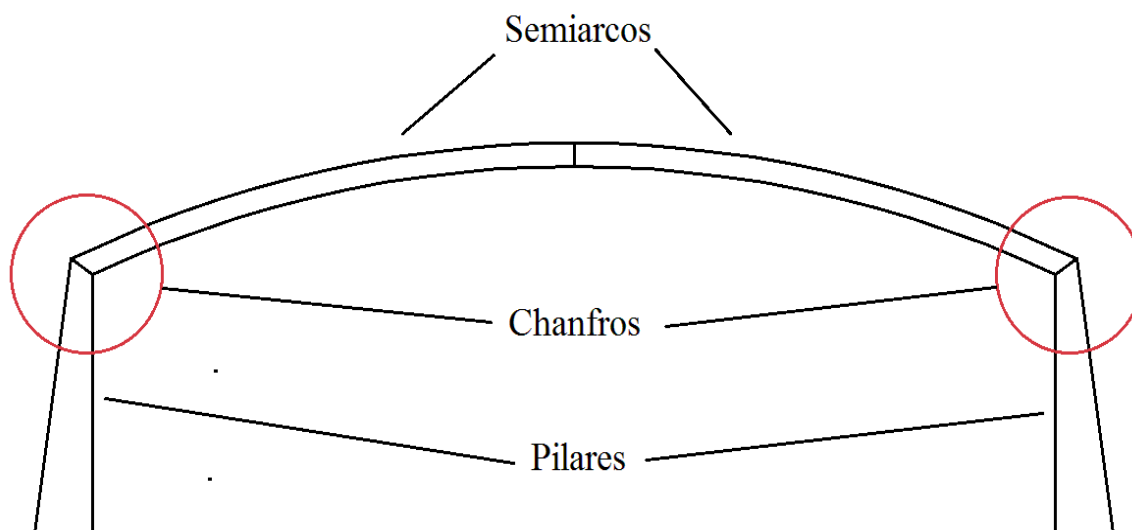
Após a verificação dos parâmetros geométricos dos arcos da estrutura de cobertura (item 3.1.2) foram estudadas as dimensões reais das peças de MLC. A fim de padronizar o projeto estrutural e torná-lo realizável, todas as peças foram projetadas considerando lâminas de 30mm de espessura.

Sabendo que a dificuldade de execução de um projeto pode torná-lo inviável conforme as dimensões dos elementos estruturais, optou-se por dividir os arcos em duas peças com seção transversal de 60x20 cm, favorecendo o transporte e o processo de montagem da estrutura. Cabe destacar que o comportamento estrutural dos arcos também foi um dos fatores pelos quais considerou-se a divisão (considerações disponíveis no Apêndice C).

Visando contribuir na estética da cobertura e demonstrar a versatilidade da Madeira Laminada Colada, foram idealizados pilares de seção transversal variável, com seção de 120x20 cm na sua base e 60x20 cm na parte superior, onde haverá a ligação com os arcos. Além da compatibilidade de seções transversais, os encontros entre os arcos e os pilares se darão por meio de um chanfro, de modo a auxiliar no dimensionamento e na execução das ligações. Com relação às terças, a seção inicial considerada foi de 15x8 cm.

Para a elaboração dos cortes, da planta baixa e dos demais desenhos da estrutura foi utilizado o *software* AutoCad®. A geometria dos arcos, bem como o detalhe dos chanfros, pode ser observada na Figura 12, e os detalhamentos de cada elemento estrutural de acordo com suas dimensões finais encontram-se no Apêndice E deste trabalho.

Figura 12 – Geometria do arco e detalhe dos chanfros.



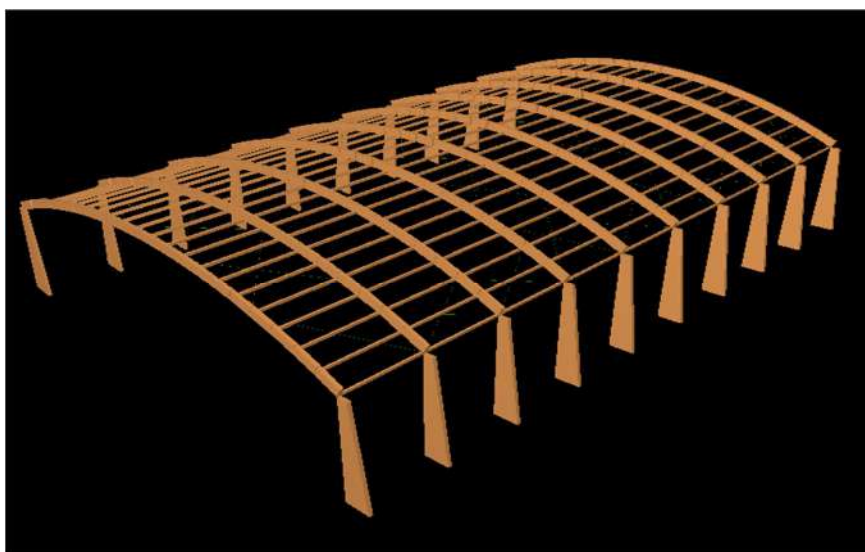
Fonte: Autor (2019).

3.4 Análise estrutural

A análise estrutural da cobertura foi realizada com o auxílio do *software* para desenho Autocad® e do *software* estrutural Cype3D®. Inicialmente, utilizou-se o Autocad® para desenhar os elementos dos arcos de acordo com os parâmetros geométricos obtidos. Foram também posicionadas as terças com seus espaçamentos preestabelecidos.

Em seguida, a configuração dos arcos foi exportada para o Cype3D®, onde foram feitas as verificações correspondentes aos elementos de MLC, preconizadas pela NBR 7190:1997. No *software* estrutural, como não é possível dimensionar elementos curvos, realizou-se uma discretização dos arcos em 20 seguimentos de retas, a fim de se obter uma análise satisfatória para a estrutura projetada. Com os arcos devidamente posicionados, foram introduzidos os pilares e as terças de acordo com as dimensões e espaçamentos predeterminados no projeto arquitetônico (Figura 19).

Figura 13 – Desenho da estrutura em 3D no Cype3D®.



Fonte: Autor (2019).

Para a completa análise dos elementos de Madeira Laminada Colada, as características do material utilizado e as ações na estrutura foram devidamente especificadas no *software*, tais como:

- Categoria de uso da estrutura;
- Tipo de madeira e tecnologia aplicada;
- Classe de resistência da madeira;
- Classe de umidade da madeira;

- Dimensões e disposições dos elementos estruturais;
- Vinculações externas e internas da estrutura;
- Ações permanentes (Somatório de todas as ações consideradas);
- Ações do vento (Consideração do cálculo mais desfavorável);
- Ações variáveis;
- Flecha limite;
- Parâmetros de flambagem das barras.

A partir do desenho da estrutura e das informações inseridas, o software realiza uma série de verificações para cada uma das seções estruturais. As verificações, bem como as considerações do autor para a realização da análise estrutural, estão apresentadas no Apêndice C deste trabalho.

3.5 Dimensionamento das ligações

O dimensionamento de ligações metálicas em peças de madeira envolve verificações quanto à resistência ao embutimento da madeira, e quanto às resistências atribuídas aos elementos metálicos (chapas, parafusos e chumbadores).

Para esta etapa, foram consultadas a NBR 7190:1997 e a NBR 8800:2008, além dos procedimentos utilizados por Bellei et al. (2008), levando-se em consideração a ANSI AISC:2016. Todas as verificações e considerações estão apresentadas e discutidas no Apêndice D deste trabalho. O resultado do dimensionamento e o detalhamento das peças metálicas estão disponíveis no Apêndice F.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para a modelagem arquitetônica, assim como o dimensionamento das peças de MLC e das ligações metálicas. É importante destacar que o Cype3D® não dimensiona as ligações entre os elementos de madeira, sendo assim, para o dimensionamento dos parafusos, chapas e chumbadores foi necessário avaliar as solicitações fornecidas pelo *software* em cada ligação, levando em conta todas as combinações realizadas.

4.1 Modelagem arquitetônica

A modelagem 3D foi realizada com auxílio dos *softwares* Revit® e Lumion®. Objetivando a melhor visualização e interpretação do projeto, foi recriado o espaço onde situa-se a “Quadra do Brejão”, considerando alguns elementos do seu entorno como a vegetação, a quadra de esportes secundária, o relevo e a fachada dos alojamentos estudantis. Nas figuras a seguir (Figura 14 – 19) é possível verificar o resultado das renderizações.

Figura 14 – Modelagem 3D: vista geral da cobertura e seu entorno.



Fonte: Autor (2019).

Figura 15 – Modelagem 3D: vista interna da cobertura.



Fonte: Autor (2019).

Figura 16 – Modelagem 3D: vista interna da cobertura.



Fonte: Autor (2019).

Figura 17 – Modelagem 3D: vista lateral a partir da quadra secundária.



Fonte: Autor (2019).

Figura 18 – Modelagem 3D: vista lateral a partir da rua.



Fonte: Autor (2019).

Figura 19 – Modelagem 3D: vista geral da cobertura e seu entorno.

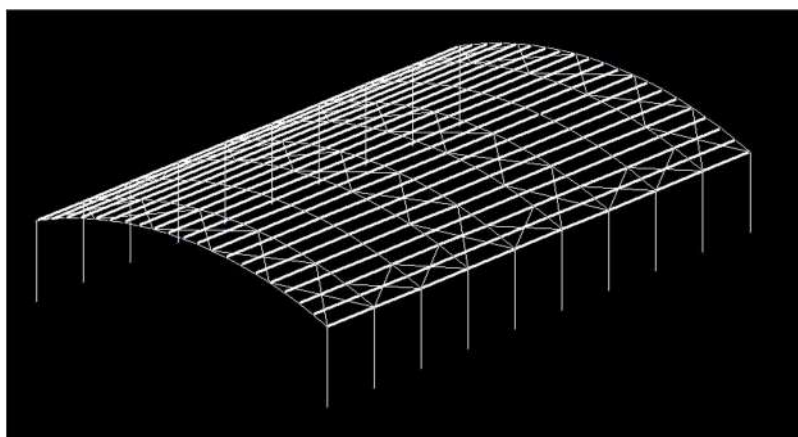


Fonte: Autor (2019).

4.1 Verificação dos elementos de MLC

Após a inserção de todas as informações e a configuração de toda a estrutura no Cype3D®, como observado na Figura 20, o *software* informa sobre a verificação realizada em cada elemento estrutural, juntamente com a porcentagem de aprovação da resistência do material e da sua flecha.

Figura 20 – Montagem da estrutura no Cype3D®



Fonte: Autor (2019)

A montagem inicial da estrutura em MLC foi feita a partir das considerações apresentadas no projeto arquitetônico (item 3.2). O resultado apresentado pelo *software* mostrou a aprovação da resistência de todos os arcos, com baixo aproveitamento do material, e a não aprovação da maioria dos pilares na estrutura. As terças localizadas na parte superior e nas extremidades da cobertura também tiveram seus valores de resistência extrapolados.

Como correção, optou-se por aumentar a seção transversal das terças e diminuir a seção dos arcos, aproveitando mais a capacidade resistente dos elementos de MLC. Com relação aos pilares, foi necessário aumentar as seções transversais na base, e foi possível, todavia, diminuir as seções no topo, de forma a compatibilizar a ligação dos elementos com os arcos.

Sendo assim, após uma série de tentativas e alterações nas peças estruturais, foi considerado o resultado que melhor atendeu às exigências arquitetônicas e à viabilidade econômica do projeto.

Na Tabela 6, estão apresentados os valores iniciais e finais das seções de cada elemento estrutural, assim como suas respectivas porcentagens de aproveitamento, realizadas pelo Cype3D®. Deve-se destacar que a escolha das novas seções também obedeceu ao critério inicial de espessura das lâminas de madeira (30mm).

Tabela 6 – Alteração das seções transversais e aproveitamento dos elementos de MLC

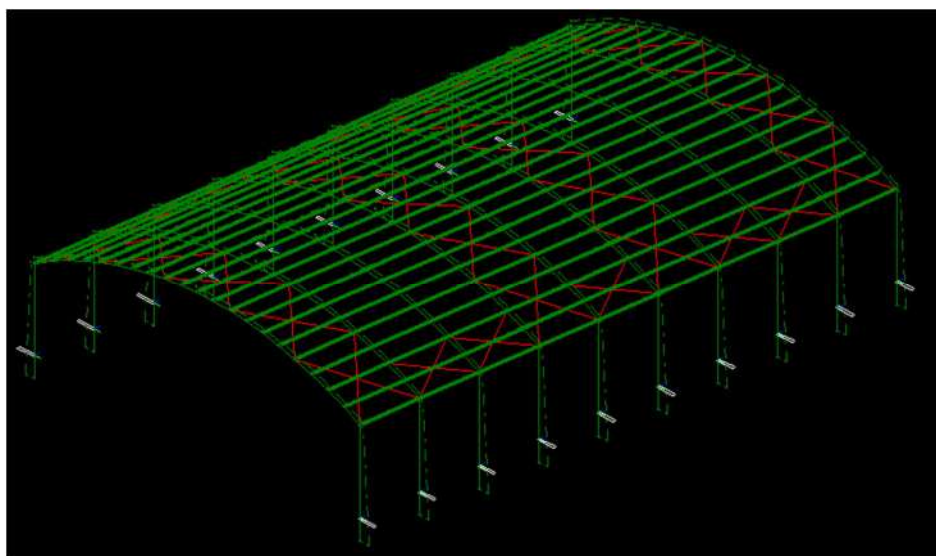
Elemento estrutural	Seção inicial (cm)	Seção adotada (cm)	Aproveitamento de resistência	Aproveitamento de flecha
Pilares	120/60x20	144/54x20	92,00%	15,40%
Arcos	60x20	54x20	15,83%	1,04%
Terças	15x8	18x10	84,67%	56,10%

Fonte: Autor, 2019.

Mesmo com a diminuição da seção transversal dos arcos, observa-se que o aproveitamento das suas peças permaneceu consideravelmente inferior ao aproveitamento dos elementos dos pilares e das terças. Para atender aos aspectos construtivos e arquitetônicos, foi necessário manter a seção dos arcos equivalentes às seções dos pilares, entretanto, ainda que possa ser uma escolha antieconômica, a situação elucida a boa capacidade de resistência da Madeira Laminada Colada. O completo detalhamento das peças em MLC está disponível no Apêndice E deste trabalho.

A Figura 21 mostra o resultado final da análise no *software* estrutural. A cor verde dos elementos significa que os mesmos atenderam às verificações realizadas para a resistência e para a flecha limite. Nota-se que os tirantes apresentam a coloração vermelha, pois o *software* considera seus índices de esbeltez excedidos. Neste caso, contudo, os elementos atirantados atuam sob tração nas estruturas de contraventamento, não trabalhando sob compressão conforme avaliação feita pelo *software*.

Figura 21 – Resultado da análise estrutural no Cype3D®.



Fonte: Autor (2019).

4.2 Verificação das ligações

Para o dimensionamento das terças foi consultada a Tabela C1 do Anexo C, retirada do catálogo da Rothoblaas®. A partir da tabela é possível definir as dimensões da peça e o número de fixações necessárias para a colocação do material, em função da verificação do esforço cortante atuante na ligação (Figura C1 do Anexo C). Levando-se em conta a máxima solicitação de esforço cortante (F_v) encontrada, de 2,82 kN, a sapata de ligação escolhida foi a sapata BSA com 40mm de base (B) e 110mm de altura (H), com conectores de 5mm e 11mm de diâmetro.

Com relação às conexões entre os elementos principais da estrutura, foi inicialmente estudado o encontro entre os semiarcos a partir dos valores de resistência da madeira, considerando apenas o embutimento paralelo às fibras. Para as ligações entre os semiarcos e os pilares foram comparadas as resistências ao embutimento paralelo ($f_{c0,d}$), normal ($f_{c90,d}$) e na

direção do esforço ($f_{ca,d}$). Após a análise das solicitações, verificou-se que para os esforços de compressão, as peças de MLC ofereceram grande capacidade resistente (Tabela 7).

Tabela 7 – Resistência dos elementos de MLC aos esforços de compressão.

Ligação	Compressão			
	na madeira (MPa)	$f_{c0,d}$ (MPa)	$f_{ca,d}$ (MPa)	$f_{c90,d}$ (MPa)
Semiarcos	0,44	12,86	-----	-----
Pilares e semiarcos	1,12	12,86	5,40	4,89

Fonte: Autor(2019)

Para o dimensionamento das ligações foram retirados do *software* os máximos valores de tração nas regiões limitantes entre os semiarcos e os pilares. Sendo assim, considerou-se o valor mais desfavorável para $R_{vd,1}$, e, com isso, foram obtidos os números de parafusos necessários para cada ligação (Tabela 8).

Tabela 8 - Definição do número de parafusos nas ligações entre pilares e semiarcos.

Ligação	Esforço de tração		
	nas chapas (kN)	$R_{vd,1 min}$ (kN)	Nº de parafusos
Semiarcos	93,01	11,04	9
Pilares e semiarcos	38,53	6,26	7

Fonte: Autor (2019).

Visando padronizar a disposição dos parafusos, optou-se por adotar 10 unidades nas ligações entre os semiarcos e 8 nas ligações entre os semiarcos e os pilares. Dessa forma, foram preestabelecidos os espaçamentos e realizadas as demais verificações nos parafusos e nas chapas de ligação, como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Verificações de resistência das ligações superiores.

Ligação	Pressão de contato (kN)	Resistencia à tração nas chapas (kN)	Colapso por rasgamento (kN)
Semiarcos	273,07	409,09	553,48
Pilares e semiarcos	273,07	409,09	486,81

Fonte: Autor (2019).

Para as ligações parafusadas nas bases dos pilares, foram considerados 8 parafusos nas chapas verticais e 4 chumbadores nas chapas de base. O diâmetro calculado foi de 1 ¾” (aproximadamente 44,45mm) para os parafusos e 1” (aproximadamente 24,5mm) para os chumbadores. A espessura obtida para as chapas de base foi de 38mm.

Na Tabela 10 são apresentadas as solicitações e verificações realizadas para as chapas verticais. Os detalhamentos de todas as ligações parafusadas encontram-se no Apêndice F deste trabalho.

Tabela 10 – Solicitações e verificações nas ligações de base.

Solicitações principais		Verificações de resistência		
Momento fletor atuante (kNm)	Tração nas chapas (kN)	Pressão de Contato (kN)	Tração nas chapas (kN)	Colapso por rasgamento (kN)
505,06	79,17	2.190,24	909,09	1.726,63

Fonte: Autor (2019)

Cabe ressaltar que, para o dimensionamento das ligações, é indicado um estudo específico, considerando a possibilidade de rigidez parcial nas ligações rotuladas e desconsiderando o engastamento perfeito na base dos pilares, a partir da caracterização do comportamento das ligações pelo diagrama Momento x Rotação relativa. A análise aprofundada permite evitar efeitos locais e imperfeições que podem gerar um comportamento global não-linear da estrutura (RIBEIRO, 1998).

Sendo assim, para o total dimensionamento dos elementos metálicos, sugere-se a utilização de *softwares* estruturais mais completos, além de ensaios em laboratório, visando a devida caracterização da rigidez nas ligações.

4.3 Análise de custos do Projeto

Além da análise estrutural dos elementos de MLC, o Cype3D® oferece a possibilidade de elaborar um relatório quantificando os materiais necessários para o projeto (Tabela 11). A partir dos dados fornecidos pelo *software*, realizou-se uma pesquisa de custos relacionados à madeira, considerando duas grandes empresas do cenário nacional de Madeira Laminada Colada.

É importante destacar que para o peso dos elementos metálicos foi considerado o valor de 3% sobre o peso dos elementos de madeira, como estimado na NBR 7190:1997.

Na análise não foram considerados o custo dos elementos metálicos, bem como os custos e os pesos dos aparelhos de iluminação e das telhas.

Tabela 11 – Quantitativo de MLC elaborado pelo Cype3D®.

Material		Perfil (mm)	Volume (m³)	Peso (kg)
Tipo	Classificação			
Madeira Laminada Colada	Dicotiledônea C30	540x200 (Arcos)	28,42	18.474,94
		14400/540x200 (Pilares)	24,82	16.133,16
		180x100 (Terças)	14,97	9.729,72
		Ligações metálicas	-----	1.330,14
		Total	68,21	45.667,98

Fonte: Autor (2019).

A primeira empresa contatada ofereceu um valor variável de R\$ 7000,00 a R\$ 7500,00 pelo metro cúbico de MLC, conforme a complexidade de fabricação das peças. No entanto, a companhia informou que não costuma oferecer as peças separadamente, visto que apenas o material não garante a segurança e a qualidade de execução da estrutura. Com relação ao projeto completo, incluindo o material e sua montagem, o valor oferecido pode variar de R\$ 600,00 a R\$ 800,00 por metro quadrado, de acordo com sua dificuldade de elaboração.

A segunda empresa ofereceu um valor médio de R\$ 550,00/m². O valor também varia conforme as dificuldades impostas, sendo necessária uma avaliação mais rigorosa do projeto.

Deste modo, como apresentado na Tabela 12, foi realizado um orçamento do projeto da estrutura e dos elementos de MLC, levando também em consideração o valor médio de R\$ 635,00/m² obtido por Silva et al. (2019).

Tabela 12 – Orçamento do projeto.

Custo por m² de projeto		Área total da cobertura (m²)	Custo total
Empresa 1	R\$ 700,00	1.190,78	R\$ 833.546,00
Empresa 2	R\$ 550,00		R\$ 654.929,00
Silva et al. (2019)	R\$ 635,00		R\$ 756.145,00
Custo médio do m³ de MLC		Volume de MLC (m³)	Custo total das peças de MLC
Empresa 1	R\$ 7.250,00	68,21	R\$ 494.523,00

Fonte: Autor (2019).

Tendo em vista os dados apresentados, observa-se que o custo de uma obra em MLC pode variar significativamente, de acordo com a empresa e a complexidade de execução ou elaboração do projeto.

5 CONCLUSÃO

Esta obra trata de uma proposta ousada e inovadora para o *campus* da UFLA e toda a região de Lavras-MG. Conforme evidenciado ao longo do trabalho, uma estrutura em Madeira Laminada Colada apresenta vantagens com relação à rapidez de execução, à versatilidade do material e à sustentabilidade nos processos construtivos.

A partir da ideia inicial da cobertura em MLC, foi possível elaborar toda a proposta arquitetônica e, posteriormente, a modelagem tridimensional da estrutura. A utilização de *softwares* arquitetônicos específicos permitiu criar um modelo claro e esteticamente realista do projeto, de modo a facilitar a sua assimilação e realização.

Na análise estrutural, foram verificadas as solicitações nos elementos da cobertura, e demonstrou-se que as estruturas em arco de MLC se destacam como uma boa alternativa para

vencer grandes vãos, levando em consideração a capacidade resistente do material e sua trabalhabilidade.

Para o dimensionamento dos elementos de ligação, apesar da realização dos procedimentos e considerações de acordo com as normas vigentes, constatou-se a necessidade de uma avaliação mais rigorosa das ligações e suas respectivas rigidezes, a fim de evitar possíveis imperfeições estruturais posteriores.

Deste modo, conclui-se neste trabalho que a implementação de uma cobertura em MLC para a “Quadra do Brejão”, apesar do custo e das poucas considerações normativas específicas para o projeto, poderia auxiliar na exposição de uma eficiente tecnologia construtiva para a região, além de colaborar para uma melhor utilização do espaço público, atendendo aos estudantes e à toda a comunidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para possíveis trabalhos futuros, indica-se:

- A realização de uma nova análise da mesma estrutura a partir de novo projeto arquitetônico, com fechamentos laterais da cobertura/edificação, ou mesmo considerando beirais largos, para proteção da estrutura de MLC contra umidade e incidência de raios ultravioleta.
- O dimensionamento da estrutura de fundação da cobertura, considerando as solicitações apresentadas pelo *software* estrutural.
- A avaliação de uma nova concepção estrutural para a cobertura, com base de pilares rotuladas e ligações entre semiarcos e pilares engastadas.
- A avaliação computacional do comportamento dos elementos de ligação dimensionados neste trabalho, de modo a verificar a possibilidade de execução do projeto.

REFERÊNCIAS

AISC (2016). **Standard Specification for Structural Steel Buildings**. *American Institute of Steel Construction*, New York, USA.

ABCCMM. **Arquitetura monumentos do Parque**. 2018. Disponível em:
<<http://www.abccmm.org.br/leitura?id=9440>> Acesso em: 02 de agosto de 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

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

_____. NBR 7190: **Projeto de estruturas de madeira**. Revisão da norma, Rio de Janeiro, 2011.

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

_____. NBR 8681: **Ações e segurança nas estruturas: procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

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

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 128 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de múltiplos andares de aço**. 2ª edição. Editora Pini, São Paulo, 2008.

BESSA, V.M.T. **Contribuição da metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios e escritórios.** 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BRAGA, I. C. S. **Instabilidade dinâmica de arcos tri-articulados.** 115 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

BUCHANAN, A. H.; HONEY, B. G. **Energy and carbon dioxide implications of building construction.** 13 f. *Energy and Building*, University of Canterbury, New Zeland, v. 20, n. 3, p. 205-217, 1993.

CALIL, C. N. **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo.** 118 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL, C. N. **A madeira laminada colada.** *Revista da Madeira*, edição nº124. São Paulo, 2010. Disponível em:

<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1473&subject=MLC&title=A%20madeira%20laminada%20colada> Acesso em: 08 de setembro de 2019.

CALIL JR, C.; DIAS, A. A. **Utilização de madeira em construções rurais.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v. 1, p. 71-77, 1997.

CABRAL, A.E.B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 280 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CARPINTERIA. **Shopping Iguatemi Fortaleza.** 2018. Disponível em:

<<https://carpinteria.com.br/project/shopping-iguatemi-fortaleza/>> Acesso em: 02 de agosto de 2019.

CARVALHO, P. A. R. de. **Avaliação técnica e econômica de estruturas de cobertura de grande vão em madeira lamelada colada**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP. Porto, Portugal. 2008.

CBFS – CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE FUTEBOL DE SALÃO - FUTSAL. **Quadra de jogo**. Disponível em: <<http://www.cbfs.com.br/2015/futsal/quadra/index.html>> Acesso em: 06 de setembro de 2019.

DCOM UFLA. **Ufla é azul: 2ª universidade do mundo com o certificado blue university em reconhecimento pela gestão das águas**. *Arquivo de notícias anteriores à jan/2018*. 2016. Disponível em: <<http://www.ufla.br/dcom/2016/05/16/ufla-e-azul-2a-universidade-do-mundo-com-o-certificado-blue-university-em-reconhecimento-pela-gestao-das-aguas/>> Acesso em: 01 de agosto de 2019.

GRANATO, A. F. **Aspectos tecnológicos da fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 71 f. Trabalho de conclusão de curso (TCC) - Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, 2011.

GUSTAVSSON, L.; PINGOUD, K.; SATHRE, R. **Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete- and wood-framed buildings**. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 11, p. 667–691, 2006.

IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Ibá 2017**. Brasília, 2017.

ITA CONSTRUTORA LTDA. **Centro de eventos Iporanga**. 2011. Disponível em: <<http://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/centro-de-eventos-iporanga/>> Acesso em: 02 de agosto de 2019.

KARPINSKI L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. *Edipucrs*, Porto Alegre, 163 p., 2009.

LEITE, T. M. **Análise da viabilidade técnica e econômica da produção de janelas de madeira de eucalipto em uma marcenaria coletiva autogestionária para projetos de habitação social rural.** Dissertação (Mestrado) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2009.

LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M.; VALLE, I. M. R. do. **O uso da madeira laminada colada no brasil: panorama e desafios.** 12 f. *II Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera.* Universidad Nacional del Noroeste de La Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires, 2017.

LOBO, F. H. R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do paraná curitiba.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** 325 f. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOODY, R. C.; HERNANDEZ, R.; LIU, J. Y. **Glued structural members.** *Wood Handbook – Wood as an engineering material.* Madison: Forest Products Laboratory. Gen. Tech. Rep. FPLGTR- 113, c. 11, 24 p. 1999.

NUNES, G. G. **Dimensionamento de uma cobertura de Madeira Laminada Colada.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

DHAPEKAR, N. K.; MISHRA, S. P. **Effective utilization of construction and demolished waste concret-review.** *Research Journal of Engeneering Sciences*, v. 6, p. 52-55, 2017.

OLIVEIRA, M. E. D. et al. **Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE.** *Revista Engenharia Sanitária*, Rio de Janeiro, v.16, n.13, p. 219-224, 2011.

PAO, HT.; TSAI, CM. **Modeling and forecasting the co2 emissions, energy consumption, and economic growth in brazil.** 9 f. *Energy*, Department of Management Science, National Chiao Tung University, Taiwan, v. 36, p. 2450-2458, 2011.

RIBEIRO, L.F.R. **Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-coluna com chapa de topo: Análise teórico-experimental.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Boletim de recursos florestais.** SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais (1), Brasília, 2016.

SILVA, A. R. D. da. **Sistema Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas Metálicas.** Tese (Doutorado) – Escola de Minas de Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SILVA, D. D.; COSTA, M. A.; SALGADO, S. S. **Análise comparativa entre estruturas de madeira e aço para um salão de festas.** 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Lavras, 2019.

TAM, V. W. Y.; TAM C. M. **A review on the viable technology for construction waste recycling.** *Resource, Conservation and Recycling*, n. 47, p. 209-221, 2006.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia Rubra*).** 118 f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2009.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada.** 78 f. Dissertação (Mestrado) -Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ANEXO A – Tabelas e figuras da NBR 6123:1988

Figura A1 – Mapa das isopleias

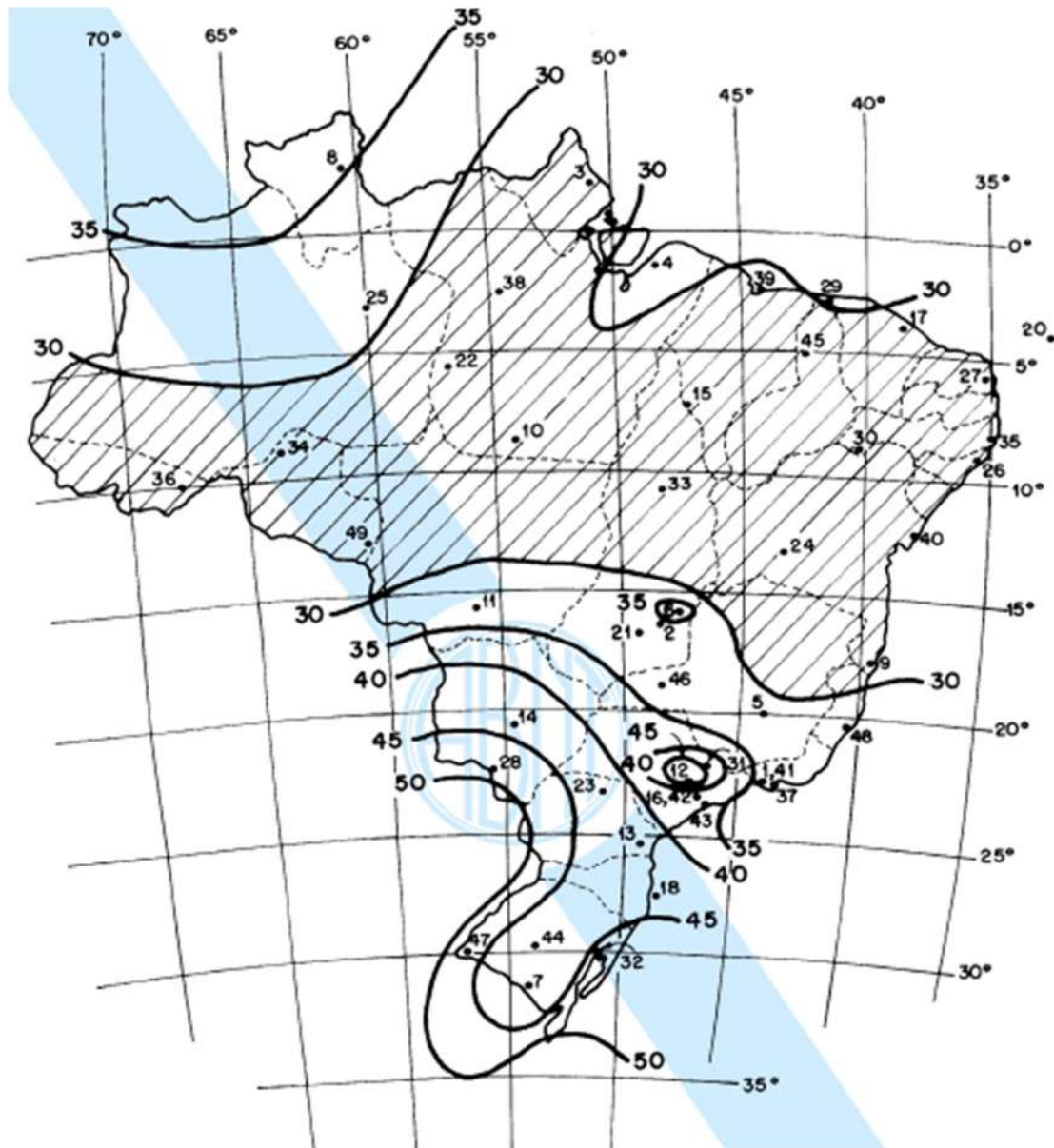
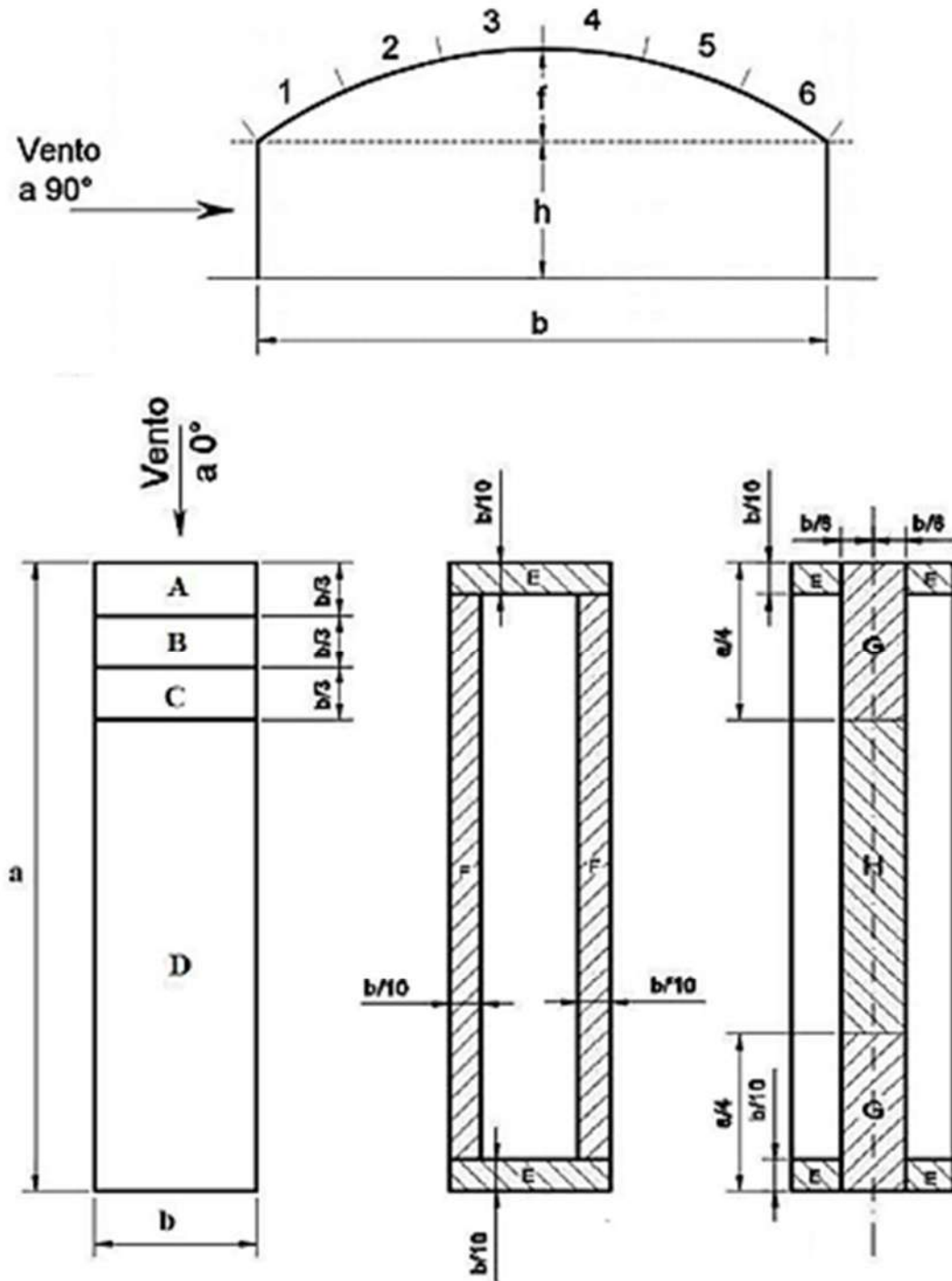


Figura A2 – Faixa de pressão para abóbodas cilíndricas de seção circular



Fonte: SILVA et al. (2019) adaptado de ABNT NBR 6123:1988

Tabela A1 – Fator S2.

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Tabela A2 – Fator S3.

Grupo	Descrição	S ₃
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Tabela A3 – Coeficiente de pressão externa para vento soprando paralelamente à geratriz da cobertura (0°).

Série	a/b	f/b	h/b ^(A)	c _{pe} para parte			
				A	B	C	D
S1	4	1/5	1/4	-0,8	-0,4	-0,3	-0,2
			1/2	-0,8	-0,6	-0,3	-0,2
		1/10	1/4	-0,8	-0,4	-0,3	-0,2
			1/2	-0,9	-0,6	-0,3	-0,2
S2	-5	-1/3	-1/9	-0,8	-0,4	-0,2	-0,2

Tabela A4 – Coeficiente de pressão externa para vento soprando perpendicularmente à geratriz da cobertura (90°).

Série	a/b	f/b	h/b*	c _{pe} para a parte					
				1	2	3	4	5	6
S1	4	1/5	1/4	-0,3	-0,7	-0,8	-0,6	-0,4	-0,4
			1/2	-0,9	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,5
		1/10	1/4	-1,0	-0,6	-0,6	-0,6	-0,4	-0,3
			1/2	-1,0	-0,8	-0,7	-0,7	-0,5	-0,4
S2	-5	-1/3	-1/9	+0,4	-0,6	-1,2	-0,9	-0,7	-0,7

Tabela A5 – Coeficiente de pressão externa para vento oblíquo.

Série	a/b	f/b	h/b ^(A)	c _{pe} para a faixa			
				E	F	G	H
S1	4	1/5	1/4	-1,6	--	--	--
			1/2	-2,4	-1,2	--	--
		1/10	1/4	-1,4	-1,4	--	--
			1/2	-1,6	-1,8	--	--
S2	-5	-1/3	-1/9	-1,5	--	-1,8	-1,5

ANEXO B – Tabelas e figuras da NBR 7190:1997

Tabela B1 – Valores de $K_{mod,1}$.

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	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

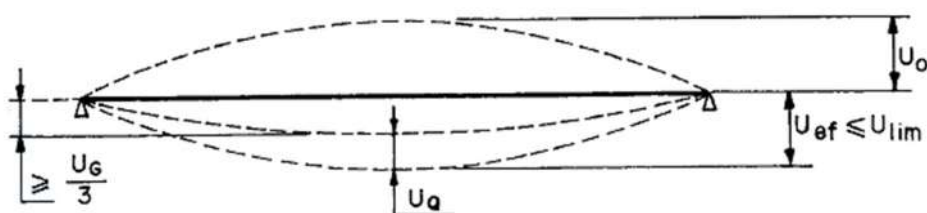
Tabela B2 – Valores de $K_{mod,2}$.

Classes de umidade	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

Tabela B3 – Valores de α_e .

Diâmetro do pino cm	$\leq 0,62$	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2
Coefficiente α_e	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33
Diâmetro do pino cm	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	$\geq 7,5$
Coefficiente α_e	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1,0

Figura B1 – Verificação das deformações limites.



ANEXO C – Informações sobre os elementos das ligações

Tabela C1 – Valores estáticos para utilização da sapata tipo BSA.

BSAS - LISA			PREGAGEM PARCIAL				PREGAGEM TOTAL				VALORES ADMISSÍVEIS
			NÚMERO FIXAÇÕES		VALORES CARACTERÍSTICOS		NÚMERO FIXAÇÕES		VALORES CARACTERÍSTICOS		
B [mm]	H [mm]	pregos LBA d x L [mm]	$n_H^{(2)}$ [pça]	$n_J^{(3)}$ [pça]	$R_{Vyk} \downarrow$ [kN]	$R_{LATk} \leftarrow$ [kN]	$n_H^{(2)}$ [pça]	$n_J^{(3)}$ [pça]	$R_{Vyk} \downarrow$ [kN]	$R_{LATk} \leftarrow$ [kN]	$V_{adm} \downarrow$ [kg]
40	110	Ø4 x 40	8	4	8,7	1,9	-	-	-	-	-
46	117	Ø4 x 40	8	4	9,0	2,1	-	-	-	-	-
46	137	Ø4 x 40	10	6	11,8	2,4	-	-	-	-	-
46	207	Ø4 x 40	14	8	16,9	2,9	-	-	-	-	-
50	70	Ø4 x 40	4	2	3,6	1,3	-	-	-	-	-
51	105	Ø4 x 40	8	4	8,1	2,3	-	-	-	-	-
51	135	Ø4 x 40	10	6	11,5	2,6	-	-	-	-	-
60	100	Ø4 x 40	8	4	7,6	2,6	14	8	13,0	4,9	571
63	158	Ø4 x 40	12	6	15,0	3,6	22	12	26,3	6,7	857
64	68	Ø4 x 40	4	2	3,4	1,5	8	4	5,6	2,9	286
64	98	Ø4 x 40	8	4	7,4	2,7	14	8	12,6	5,1	571
64	128	Ø4 x 40	10	6	10,9	3,6	18	10	19,2	5,9	714

Fonte: Catálogo BSA Rothoblaas®.

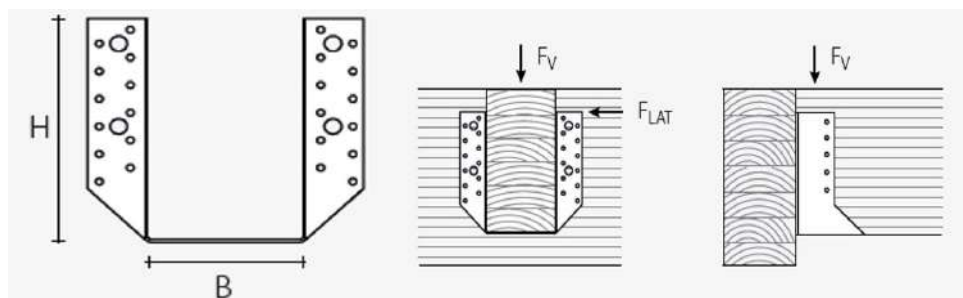
Tabela C2 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências.

Combinações	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

Figura C1 – Geometria e esforços atuantes na ligação com a sapata tipo BSA



Fonte: Catálogo BSA Rothoblaas

APÊNDICE A – Exemplos de projetos em MLC no Brasil

Centro de eventos Iporanga

Localizado no Guarujá-SP, o centro de eventos Iporanga é um espaço de convivência e festividades de um condomínio residencial (Figuras 22 e 23). O pavilhão de 800 m², projetado pelo escritório Mauro Munhoz Arquitetura e executado em 2011 pela ITA Construtora, se confunde em meio a natureza que o envolve, apresentando leveza e beleza arquitetônica.

Figura 22 - Centro de eventos Iporanga



Fonte: Ita Construtora Ltda.

Figura 23 - Centro de eventos Iporanga



Fonte: Ita Construtora Ltda.

Parque de Exposições Agropecuárias Granja do Torto

O design inovador remete às gaivotas e se destaca pelas curvas e detalhes, como pode ser visto na Figura 24. A estrutura, toda em Madeira Laminada Colada, leva beleza e modernidade aos participantes dos eventos, além de abrigá-los confortavelmente (ABCCMM, 2018).

Figura 24 - Parque de Exposições Granja do Torto



Fonte: ABCCMM

As grandes peças em MLC, com dimensões de até 26 metros de comprimento, foram fabricadas pela Esmera Estruturas em Madeira, e levadas de Porto Alegre-RS a Brasília-DF, onde se situa o parque de exposições. O pavilhão possui um vão livre de 48 metros, e balanços externos de 12 metros cada (Figura 25).

Figura 25 - Parque de Exposições Granja do Torto



Fonte: ABCCMM

Shopping Iguatemi Fortaleza

Considerada como o maior exemplo de aplicação de MLC no país, a premiada estrutura de cobertura da praça de alimentação do Shopping Iguatemi, em Fortaleza-CE, abrange uma área de 4800 m² e possui 1,2 mil m³ de peças em Madeira Laminada Colada de *Abeto Spruce*, pré-fabricadas e transportadas pela empresa Moretti Interholz desde Gênova, na Itália (Figura 26). O projeto foi concebido pelo escritório americano *LaGuarda.Low Architects*, e a execução realizada pelo escritório brasileiro Carpinteria Estruturas de Madeira Ltda.

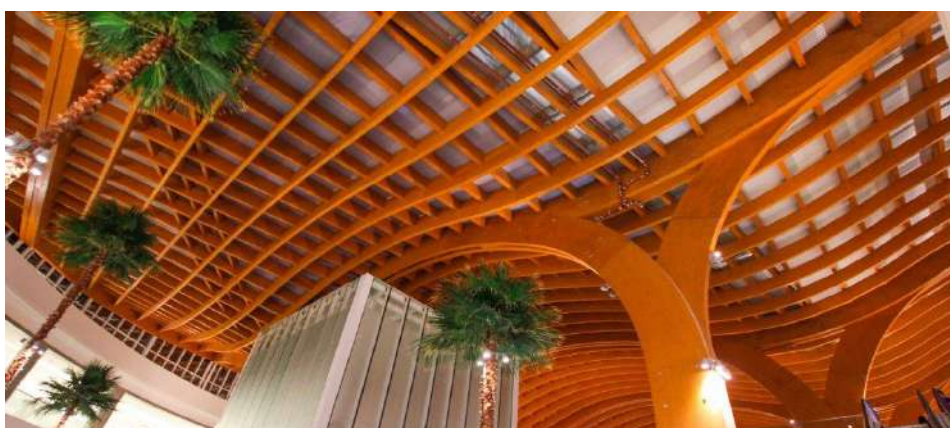
Figura 26 - Cobertura do Shopping Iguatemi Fortaleza



Fonte: Carpinteria Estruturas de Madeira Ltda.

A estrutura possui peças de até 20 metros de comprimento e um vão livre de 48 metros. Em alguns pontos, apresenta curvas voltadas para duas direções opostas, formando arcos de sustentação e passagem, e conferindo um efeito de fluidez ao seu topo (Figura 27).

Figura 27 - Cobertura do Shopping Iguatemi Fortaleza



Fonte: Carpinteria Estruturas de Madeira Ltda

APÊNDICE B – Ações do vento na estrutura: procedimento

Inicialmente, foi obtida a velocidade característica do vento (V_k), por meio da expressão a seguir:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (4)$$

Onde:

- V_0 é a velocidade básica do vento, obtida pela análise do mapa de isopletas, disponível na Figura A1 do anexo A. No caso da região de Lavras-MG, considera-se o valor de 35m/s;
- S_1 é o fator topográfico, que leva em conta as variações do terreno e do relevo. Por se tratar de um terreno plano, foi atribuído o valor de 1;
- S_2 é a rugosidade do terreno, que considera também as dimensões da edificação e a variação da velocidade do vento. Foi considerada a categoria III, relacionada a terrenos planos e com obstáculos médios, e classe B, atribuída a edifícios nos quais a maior dimensão esteja entre 20 e 50 m. Sendo assim, de acordo com a Tabela A1, disponível no anexo A, o valor de S_2 é de 0,92;
- S_3 é o fator estatístico, que leva em consideração o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Como se trata de um local com alta taxa de ocupação, foi atribuído o valor de 1 para S_3 , obedecendo a tabela A2 disponível no anexo A.

O valor de V_k encontrado foi de 32,20 m/s. Com isso, através da expressão 5, foi possível determinar a pressão dinâmica do vento (q), que resultou em 635,58 N/m², ou 0,64 KN/m².

$$q = 0,613 * V_k^2 \quad (5)$$

Para dar sequência aos cálculos, foram considerados os valores de -0,3 e 0 para o coeficiente de pressão interna (C_{pi}), levando em conta que a estrutura de cobertura possui as 4 faces permeáveis. Após as verificações, utilizou-se no projeto o valor que contribuiu de maneira mais desfavorável para a pressão do vento.

Com relação ao coeficiente de pressão externa, foram adotadas as tabelas referentes aos ventos a 0°, 90° e oblíquo, disponíveis no Anexo A. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 13 e 14, e as faixas de pressão onde o vento atua na estrutura são representadas na Figura A2, também disponível no Anexo A.

Tabela 13 – Dimensões da estrutura de cobertura (m).

Total	f	a	b	h	f/b	h/b
24 x 44	2,77	44	24	6	0,12	0,25

Fonte: Autor (2019).

Tabela 14 – Coeficientes de pressão externa.

Vento a 0°				Vento a 90°						Vento oblíquo	
A	B	C	D	1	2	3	4	5	6	E	F
-0,8	-0,4	-0,3	-0,2	-1,0	-0,6	-0,6	-0,6	-0,4	-0,3	-1,4	-1,4

Fonte: Autor (2019).

A partir da expressão 6, foram obtidos os resultados para as pressões dinâmicas efetivas do vento (Tabela 15).

$$\Delta P = (C_{pe} - C_{pi}) * q \quad (6)$$

Tabela 15 – Pressões dinâmicas efetivas do vento (KN/m²)

C_{pi}	Vento a 0°				Vento a 90°						Vento oblíquo	
	A	B	C	D	1	2	3	4	5	6	E	F
0,0	-0,509	-0,254	-0,191	-0,127	-0,636	-0,382	-0,382	-0,382	-0,254	-0,191	-0,890	-0,890
-0,3	-0,318	-0,064	0,000	0,064	-0,445	-0,191	-0,191	-0,191	-0,064	0,000	-0,700	-0,700

Fonte: Autor, 2019.

Como indicado na NBR 6123:1988, os valores positivos para a pressão efetiva indicam o sentido de uma sobrepessão externa, e os valores negativos indicam o sentido de uma sucção externa na estrutura.

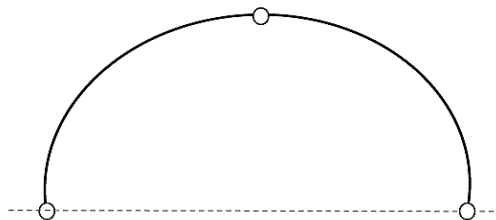
APÊNDICE C – Análise estrutural: verificações do *software* Cype3D®

Arcos Tri-articulados

Os arcos são geralmente empregados com o objetivo de vencer grandes vãos e, por este motivo, são amplamente encontrados em construções com distintas finalidades sob a ótica estrutural, como pontes, galpões e ginásios esportivos. Devido aos seus parâmetros geométricos, os elementos estruturais arqueados também estão relacionados com a arquitetura e os aspectos estéticos de uma edificação (BRAGA, 2017).

Os arcos tri-articulados são elementos isostáticos que possuem apoios fixos e descontinuidade interna do tipo rótula (Figura 28). Por ser determinada estaticamente, esse tipo de configuração estrutural torna-se eficiente com relação à mudanças de temperatura, recalques de apoio e erros de fabricação, não havendo portanto a evolução das tensões internas na estrutura. Outra vantagem dos arcos tri-articulados é a sua facilidade de execução.

Figura 28 – Esquema de um arco tri-articulado.



Fonte: Adaptado de BRAGA (2017)

Neste projeto, a estrutura em arco foi considerada tri-articulada, sendo duas articulações nos encontros entre os arcos e os pilares, além de uma articulação nos centros dos vãos, onde haverá o encontro entre as duas seções de semiarcos.

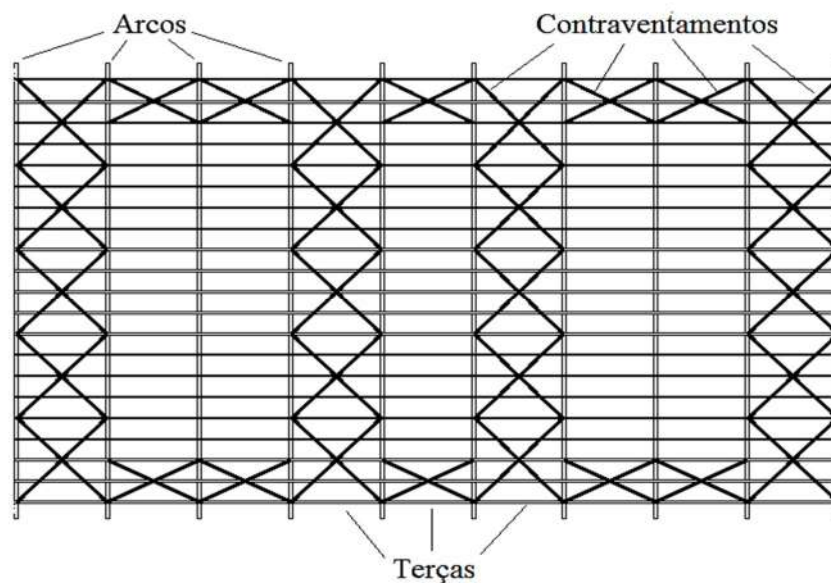
Contraventamento

Como preconizado na NBR 7190:1997, elementos estruturais dispostos com sua maior rigidez em panos paralelos entre si devem ter seus deslocamentos transversais controlados e sua estabilidade global assegurada por outros componentes estruturais, dispostos com sua maior rigidez em planos ortogonais aos primeiros.

Para estruturas de cobertura, a norma brasileira permite, na falta de uma análise estrutural rigorosa, dispor a estrutura de contraventamento como treliças verticais, posicionadas perpendicularmente aos elementos do sistema principal, nas extremidades e nas regiões intermediárias da edificação, com espaçamentos não superiores a 20m.

Neste projeto optou-se pelo contraventamento em dois vãos intermediários, além dos vãos horizontais e verticais nas extremidades (Figura 29). O material escolhido foi a barra redonda de aço ASTM A36, com 10 mm de diâmetro.

Figura 29 – Disposição do contraventamento na estrutura.



Fonte: Autor (2019).

Estados Limites

Os estados limites são caracterizados por Estados Limites Últimos (ELU) ou Estados Limites de Serviço (ELS) e definem a inadequação de uma estrutura com relação a sua utilização, levando em conta aspectos como segurança, estética, funcionalidade ou desempenho.

Os Estados Limites Últimos estão atribuídos ao estado no qual a estrutura já não pode ser utilizada, por questões de perda de equilíbrio, ruptura, deformação plástica em excesso, ou demais instabilidades estruturais (NUNES, 2015). Para a verificação do ELU, tem-se as Combinações Últimas Normais, apresentadas na expressão 7:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} * F_{Gi,k} + \gamma_Q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} * F_{Qj,k} \right] \quad (7)$$

Onde:

- $F_{gi,k}$ é o valor característico para as ações permanentes;
- $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável principal;
- $\Psi_{0j} * F_{Qj,k}$ é o valor minorado para cada combinação das ações variáveis;
- γ_{Gi} e γ_Q é o coeficientes de ponderação.

A NBR 7190:1997 estabelece também as Combinações Últimas Especiais e Excepcionais, para casos de carregamentos originados pelo método construtivo e carregamentos de duração muito curta, respectivamente.

Os Estados Limites de Serviço, por sua vez, são relacionados ao conforto, à durabilidade, e aos aspectos estéticos da estrutura. De um modo geral, são critérios que consideram a boa utilização da edificação. Para sua verificação, existem quatro tipos de combinações: de longa duração (expressão 8), de média duração (expressão 9), de curta duração (expressão 10), e de duração instantânea (expressão 11).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} * F_{Qj,k} \quad (8)$$

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 * F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} * F_{Qj,k} \quad (9)$$

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} * F_{Qj,k} \quad (10)$$

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q,especial} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} * F_{Qj,k} \quad (11)$$

As Tabelas referentes aos coeficientes de ponderação e aos fatores de combinação podem ser consultadas no Capítulo 5 da NBR 7190:1997. De acordo com o item 9.2.1 da mesma norma, a flecha efetiva (U_{ef}), determinada pela soma das parcelas devidas à carga permanente (U_G) e à carga acidental (U_Q), não pode superar 1/200 dos vãos, nem 1/100 do comprimento dos balanços correspondentes (Figura B1, do Anexo B).

Esbeltez

A esbeltez está relacionada com a estabilidade do elemento estrutural. As peças submetidas à compressão devem ser dimensionadas admitindo-se excentricidades acidentais, e, no caso das peças esbeltas, também devem ser considerados os efeitos de fluência na madeira (ABNT NBR 7190:1997).

A verificação da esbeltez (λ) é dada pela expressão 12, sendo as peças caracterizadas em: peças curtas ($\lambda \leq 40$), medianamente esbeltas ($40 < \lambda \leq 80$) e esbeltas ($80 < \lambda \leq 140$).

$$\lambda = \frac{L_0}{i_{min.}} \quad (12)$$

Em que:

- L_0 é um comprimento teórico de referência;
- $i_{min.}$ é o raio de giração mínimo de sua seção transversal.

Valores de cálculo

Para a realização da análise estrutural, deve-se obter inicialmente a resistência de cálculo (R_d) oferecida pelos componentes da estrutura, utilizando as expressões a seguir:

$$K_{mod,3} = 1 - 2000 * \left(\frac{t}{r}\right)^2 \quad (13)$$

$$K_{mod} = K_{mod,1} * K_{mod,2} * K_{mod,3} \quad (14)$$

$$R_d = K_{mod} * \frac{R_k}{\gamma_w} \quad (15)$$

Onde:

- K_{mod} é o coeficiente de modificação;
- $K_{mod,1}$ é um coeficiente parcial de modificação, que leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado. É obtido pela Tabela B1, do Anexo B.
- $K_{mod,2}$ é um coeficiente parcial de modificação, que leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado. É obtido pela Tabela B2, do Anexo B;
- $K_{mod,3}$ é coeficiente parcial de modificação, que leva em conta a categoria da madeira. A expressão 3.12 é utilizada especificamente para elementos curvos em MLC, onde r é o menor raio de curvatura e t a espessura das lâminas;
- R_k é a resistência característica do material, valor pré-determinado.
- γ_w é um fator de ponderação para Estados Limites Últimos, que minora as propriedades da madeira de acordo com os diferentes esforços atuantes. O valor do coeficiente é de 1,4 para compressão paralela às fibras e 1,8 para tração e cisalhamento paralelos às fibras.

Resistência à tração

A verificação da resistência à tração é feita na direção axial das peças, ou seja, na direção paralela às fibras da madeira. O valor da resistência à tração paralela (f_{t0}), é obtido relacionando-o ao valor da resistência à compressão paralela (f_{c0}), apresentado na Tabela 2.

$$f_{t0} = \frac{f_{c0}}{0,77} \quad (16)$$

Sendo assim, com as seguintes expressões é possível determinar o esforço solicitante e verificar a segurança da peça, respectivamente:

$$\sigma_{td} = \frac{f_{t\alpha,d}}{A_{\text{útil}}} \quad (17)$$

$$f_{t\alpha,d} \geq \sigma_d \quad (18)$$

Em que:

- $A_{\acute{u}til}$ é a área de seção transversal da peça, descontando eventuais imperfeições na mesma;
- α é o ângulo de inclinação das fibras, podendo ser considerado 0 para $\alpha \leq 6^\circ$.

Resistencia à compressão

A resistência à compressão é analisada nas direções paralela e normal às fibras, sendo representadas por f_{co} e f_{c90} , respectivamente. f_{c90} é obtida através da relação a seguir:

$$f_{c90} = 0,25 * f_{co} \quad (19)$$

Com isso, é encontrado o valor da tensão solicitante de compressão por meio da expressão 20, e posteriormente verificada a segurança da peça.

$$\sigma_{cd} = \frac{f_{c\alpha,d}}{A_{\acute{u}til}} \quad (20)$$

$$f_{c\alpha,d} \geq \sigma_{cd} \quad (21)$$

Flexão simples reta

De acordo com a NBR 7190:1997, para peças fletidas, deve-se considerar o menor valor entre a distância entre os eixos dos apoios ou o vão livre acrescido da altura da seção transversal da peça no meio do vão. A verificação da segurança é dada pelas seguintes expressões:

$$\sigma_{c1,d} \leq f_{cd} \quad (22)$$

$$\sigma_{c2,d} \leq f_{td} \quad (23)$$

Onde:

- $\sigma_{c1,d}$ é a tensão atuante de cálculo na borda mais comprimida da seção transversal;
- $\sigma_{c2,d}$ é a tensão atuante de cálculo na borda mais tracionada da seção transversal.

Flexotração

A condição de segurança para as barras submetidas à flexotração é determinada pela mais rigorosa das duas expressões a seguintes expressões:

$$\frac{\sigma_{Nt,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{t0,d}} + k_M * \frac{\sigma_{My,d}}{f_{t0,d}} \leq 1 \quad (24)$$

$$\frac{\sigma_{Nt,d}}{f_{t0,d}} + k_M * \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{t0,d}} \leq 1 \quad (25)$$

Em que:

- $\sigma_{Nt,d}$ é o valor de cálculo da parcela de tensão normal atuante em função da força normal de tração;
- $\sigma_{Mx,d}$ e $\sigma_{My,d}$ são as tensões máximas devidas à componentes de flexão atuantes segundo as direções principais x e y, respectivamente;
- k_M é um coeficiente de correção, que para seções retangulares é atribuído o valor de 0,5.

Flexocompressão

Além da verificação da estabilidade de peças comprimidas, é realizada também a avaliação das seções transversais submetidas à flexocompressão. A condição de segurança relativa à resistência das seções é expressa pela mais rigorosa das duas relações abaixo:

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M * \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (27)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + k_M * \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (27)$$

Cisalhamento longitudinal em vigas

Para vigas com seções transversais retangulares, a máxima tensão de cisalhamento (τ_d) atuando no ponto mais solicitado da peça é obtida pela seguinte expressão:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \left(\frac{V_d}{b * h} \right) \quad (28)$$

Em que:

- V_d é a força cortante de cálculo;
- b é a largura da seção transversal;
- h é a altura da seção transversal.

O critério de segurança para o cisalhamento longitudinal é dado pelas relações abaixo, sendo a expressão 30 utilizada para as dicotiledôneas.

$$\tau_{T,d} \leq f_{v0,d} \quad (29)$$

$$f_{v0,d} = 0,1 * f_{c0,d} \quad (30)$$

APÊNDICE D – Dimensionamento das ligações: procedimento

De acordo com a NBR 7190:1997, as ligações são consideradas deformáveis (flexíveis) desde que o diâmetro de pré-furação (d_0) seja maior do que o diâmetro do parafuso acrescido de 0,5mm. Além disso, as ligações devem ter 2 ou 3 parafusos, sendo inadmissível o uso de apenas 1 parafuso. A norma brasileira ainda indica que as ligações deformáveis podem ser empregadas somente em estruturas isostáticas, no entanto, devem ser dimensionadas como ligações rígidas, desde que sejam respeitados os valores limites de pré-furação.

Desta forma, mesmo sabendo que as ligações entre os elementos de MLC foram consideradas flexíveis (item 3.3.1), adotou-se no projeto o número mínimo de 4 parafusos por ligação, respeitando as condições preconizadas pelas NBR 7190:1997 e NBR 8800:2008.

Resistência ao embutimento da madeira

A resistência de embutimento da madeira é determinada por meio de ensaios padronizados da NBR 7190:1997. Na falta de dados experimentais, a resistência é dada pela seguintes expressões:

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (31)$$

$$f_{e90,d} = 0,25 * f_{c0,d} * \alpha_e \quad (32)$$

Onde:

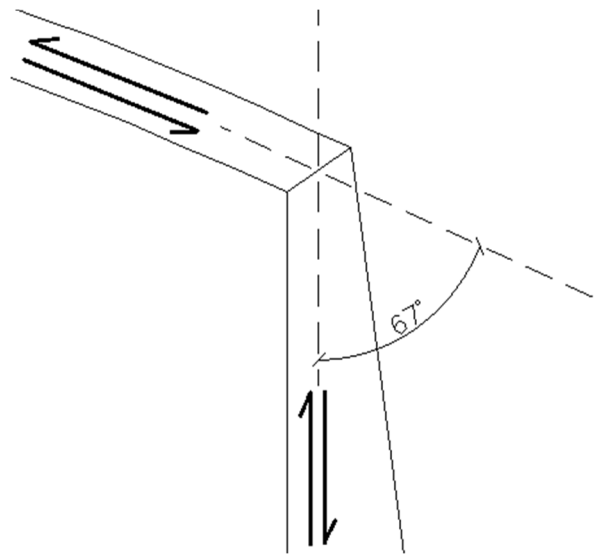
- $f_{e0,d}$ é a resistência ao embutimento paralelo às fibras;
- $f_{e90,d}$ é a resistência ao embutimento perpendicular às fibras;
- α_e é um coeficiente relacionado com o diâmetro do pino. Seu valor para um diâmetro de 16mm é de 1,52, como observado na tabela B3 do Anexo B.

A resistência ao embutimento em uma direção qualquer ($f_{e\alpha,d}$), inclinada de um ângulo α em relação às fibras, é obtida pela Equação de Hankinson, mostrada a seguir:

$$f_{e\alpha,d} = \frac{f_{e0,d} * f_{e90,d}}{f_{e0,d} * \text{sen}^2\alpha + f_{e90,d} * \text{cos}^2\alpha} \quad (33)$$

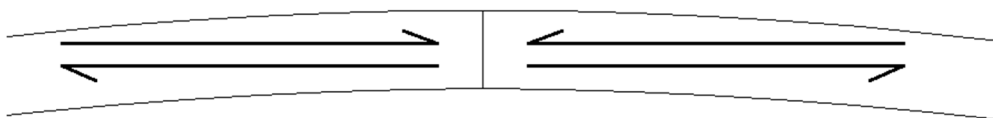
Neste projeto foi considerado um ângulo α de 67° para o cálculo de $f_{e\alpha,d}$ entre os pilares e os semiarcos (Figura 30) e para a completa análise estrutural também foram verificadas as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular. Nas ligações entre os semiarcos, foi considerada somente a resistência ao embutimento paralelo às fibras (Figura 31).

Figura 30 – Ângulo de inclinação da carga aplicada nos pilares.



Fonte: Autor (2019).

Figura 31 – Direção das cargas aplicadas na ligação entre os semiarcos.



Fonte: Autor (2019).

Resistência ao escoamento dos parafusos

As ligações com pinos metálicos podem ser parafusadas ou pregadas. Neste trabalho, a resistência total foi calculada considerando a soma das resistências correspondentes às diferentes seções de corte dos parafusos adotados. A resistência ao escoamento de cálculo do pino metálico é encontrada pela expressão a seguir:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{a1}} \quad (34)$$

Em que:

- f_{yd} é a resistência característica do escoamento do aço do pino;
- γ_{a1} é um coeficiente de ponderação para estados limites últimos de escoamento. É atribuído o valor de 1,1, como verificado na Tabela C2 do Anexo C.

Nas ligações parafusadas, deve-se considerar a probabilidade de embutimento da madeira ou de flexão no pino. Conforme a NBR 7190:1997, a ocorrência de uma das duas situações é verificada pela relação entre os parâmetros beta e beta-limite.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (35)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 * \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (36)$$

Em que:

- d é o diâmetro do pino;
- t é a espessura convencional da madeira.

No caso de embutimento da madeira ($\beta < \beta_{lim}$), o valor de cálculo da resistência de um pino é dado pela expressão a seguir:

$$R_{vd,1} = 0,40 * \frac{t^2}{\beta} * f_{ed} \quad (37)$$

Caso ocorra a flexão no pino metálico ($\beta > \beta_{lim}$), o valor de cálculo é obtido pela expressão abaixo:

$$R_{vd,1} = 0,625 * \frac{d^2}{\beta_{lim}} * f_{yd} \quad (38)$$

Para calcular o número de parafusos necessários em cada ligação, efetua-se uma razão entre os maiores esforços normais e cisalhantes na estrutura e a resistência atribuída à 1 parafuso. As análises posteriores foram realizadas a fim de validar o número de conectores calculado e garantir a segurança da estrutura.

Resistência à tração dos parafusos

De acordo com a NBR 8800:2008 a força de tração resistente de cálculo de um parafuso é dada por:

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{be} * f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (39)$$

Em que:

- f_{ub} é a resistência à ruptura do material do parafuso;
- A_{be} é a área efetiva, considerada igual a $0,75A_b$, sendo A_b a área bruta da seção do parafuso.
- γ_{a2} é o coeficiente para estados limites últimos, relacionado à ruptura do material. Para as combinações normais utiliza-se o valor de 1,35, como verificado na tabela 2 do Anexo C..

Resistência ao cisalhamento dos parafusos

Para os parafusos onde a força cisalhante passa pela rosca, a força de cisalhamento resistente de cálculo é dada por:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 * A_b * f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (40)$$

Pressão de contato em furos

Como apresentado na NBR 8800:2008, a força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo, já considerando o rasgamento entre dois furos consecutivos ou entre um furo extremo e a borda é calculada conforme a relação abaixo:

$$F_{v,Rd} = \frac{1,2 * l_f * t * f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 * d_b * t * f_u}{\gamma_{a2}} \quad (41)$$

Sendo:

- l_f é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre;
- d_b é o diâmetro do parafuso;
- t é a espessura da parte ligada, que neste projeto é a espessura das chapas metálicas (6mm);
- f_u é a resistência à ruptura do aço da parede do furo.

Resistência à tração das chapas de ligação

Para a resistência de cálculo à tração das chapas de ligação é considerado o menor valor entre a resistência aos estados limites últimos de escoamento (expressão 43) e ruptura (expressão 44).

$$F_{Rd} = \frac{f_y * A_g}{\gamma_{a1}} \quad (42)$$

$$F_{Rd} = \frac{f_u * A_g}{\gamma_{a2}} \quad (43)$$

Resistência ao colapso por rasgamento nas chapas de ligação

Como preconizado na NBR 8800:2008, no estado limite de colapso por rasgamento a força resistente é determinada pela soma das forças resistentes de cisalhamento de uma ou mais linhas de falha e à tração em um segmento perpendicular. A força resistente de colapso por rasgamento é dada pela seguinte expressão:

$$F_{r,Rd} = \frac{(0,60 * f_u * A_{nv} + C_{ts} * f_u * A_{nt})}{\gamma_{a2}} \leq \frac{(0,60 * f_y * A_{gv} + C_{ts} * f_u * A_{nt})}{\gamma_{a2}} \quad (44)$$

Sendo:

- A_{gv} a área bruta sujeita ao cisalhamento;
- A_{nv} é a área líquida sujeita ao cisalhamento;
- A_{nt} é a área líquida sujeita à tração;
- C_{ts} um coeficiente que tem o valor de 1,0 quando a tensão na área líquida é uniforme.

Espaçamentos mínimos e máximos

De acordo com a NBR 8800:2008, o espaçamento mínimo entre os furos é de $2,7 d_b$, sendo preferencialmente $3d_b$. O espaçamento máximo entre os parafusos deve ser o menor valor entre 300mm e 24 vezes a espessura da chapa. O espaçamento entre os furos e a borda da chapa, por sua vez, não deve ser inferior a 22mm.

Para a placa de base, a distância entre o centro dos furos e as bordas da placa de base e entre os centros dos furos e a face das chapas de ligação do pilar deve ser de, no mínimo, $2d_{ca}$. Entre o centro de dois furos, a distância mínima deve ser de $4d_{ca}$.

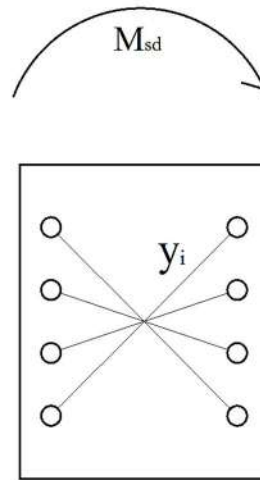
Considerações para o dimensionamento das ligações de base

Para resistir aos esforços na base dos pilares e conferir rigidez à ligação, foi desenvolvido um conector composto por uma chapa vertical parafusada (50x40cm) e uma placa de base (154x30cm).

As ligações entre as chapas de base e os blocos de concreto foram dimensionadas como bases engastadas de acordo com o método das Tensões Admissíveis apresentado por Bellei et al. (2008), conforme a ANSI AISC:2016. Sendo assim, foram levados em conta os esforços horizontais e verticais, assim como o momento fletor atuante.

No dimensionamento das chapas verticais foi considerado o momento atuante em cada parafuso, considerando como braço de alavanca a distância do centro geométrico da disposição dos furos (y_i) (Figura 32). Deste modo, o momento solicitante (M_{sd}) foi igualado ao somatório dos produtos entre a resistência ao cisalhamento dos parafusos (V_{Rd}) e a distância y_i atribuída, resultando em uma relação em função do diâmetro dos parafusos (expressão 46).

Figura 32 – Momento fletor atuante na chapa vertical.



Fonte: Autor (2019).

$$\sum_{i=1}^n V_{Rd,i} * y_i = M_{Sd} \quad (45)$$

Esforço de compressão no bloco de fundação

Devido à combinação entre o esforço normal, o esforço cortante e o momento fletor, a chapa de base dos pilares sofrerá um esforço de compressão excêntrica, que exerce uma pressão irregular na superfície do bloco de fundação. Uma parcela da chapa comprime a superfície de fundação, enquanto outra parcela tende a se desprender da mesma, fenômeno que é impedido pelos chumbadores de ancoragem.

O esforço solicitante máximo de compressão é calculado pela expressão abaixo:

$$F_{c,máx} = \left(\frac{N}{B * L} \right) + \left(\frac{6 * M}{B * L^2} \right) \leq 0,35 * f_{ck} \quad (46)$$

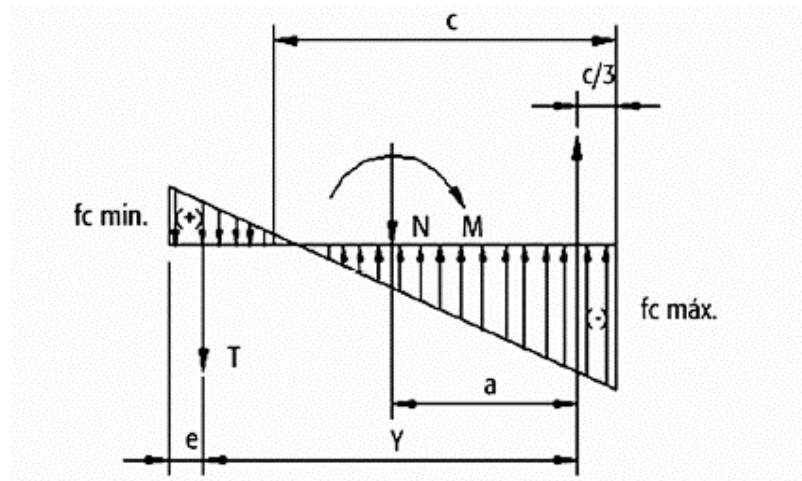
Em que:

- B e L são o comprimento e a largura da chapa de base, respectivamente;
- N é a força normal solicitante;
- M é o momento fletor solicitante.
- f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão.

Dimensionamento da chapa de base e dos chumbadores

Os máximos esforços nas bases foram obtidos por meio de relações entre triângulos, que descrevem a intensidade e a parcela de aplicação das solicitações de tração e compressão, ao longo de toda a largura das chapas. Na Figura 33 é possível observar os parâmetros e , y , a e C , que estão relacionados com a distância do chumbador à borda da chapa, a distância entre chumbadores, a distância entre a aplicação da força axial e o chumbador e a parcela da chapa submetida aos esforços de compressão, respectivamente.

Figura 33 – Esforços solicitantes na placa de base.

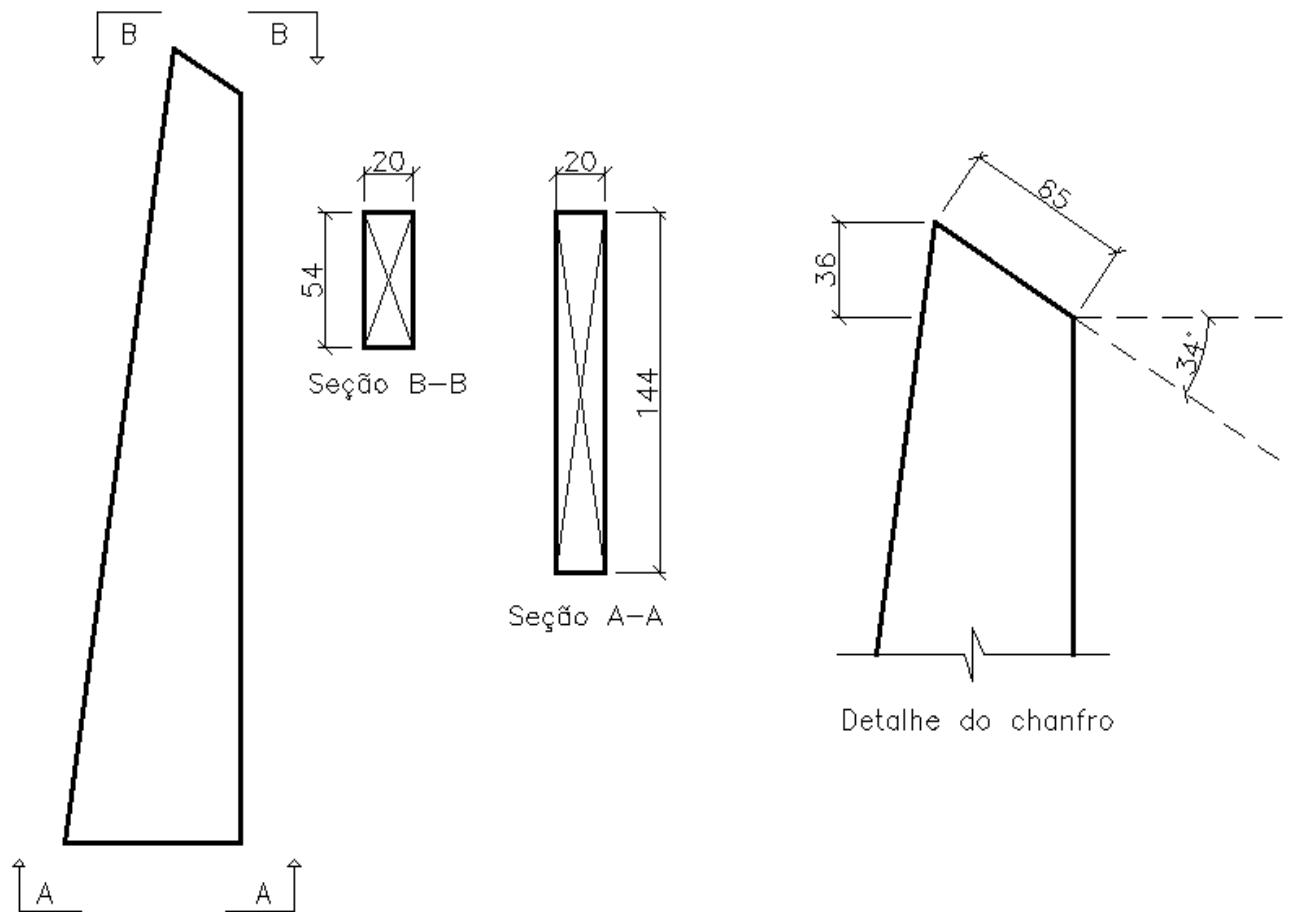


Fonte: BELLEI et al. (2008).

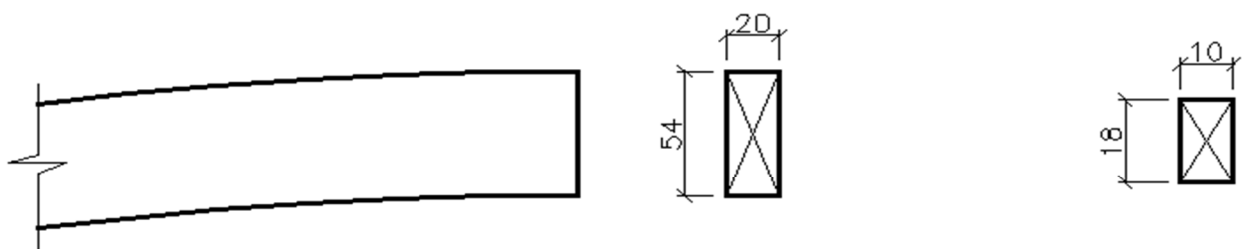
Após encontradas as solicitações, é possível determinar a espessura mínima das chapas de base e o diâmetro mínimo dos chumbadores. A ligação entre as chapas e o pilar de MLC foi calculada da mesma maneira que as demais ligações parafusadas, com a diferença que, neste caso, considerou-se o momento fletor solicitante nos pilares.

APÊNDICE E – Detalhamento das peças estruturais de MLC

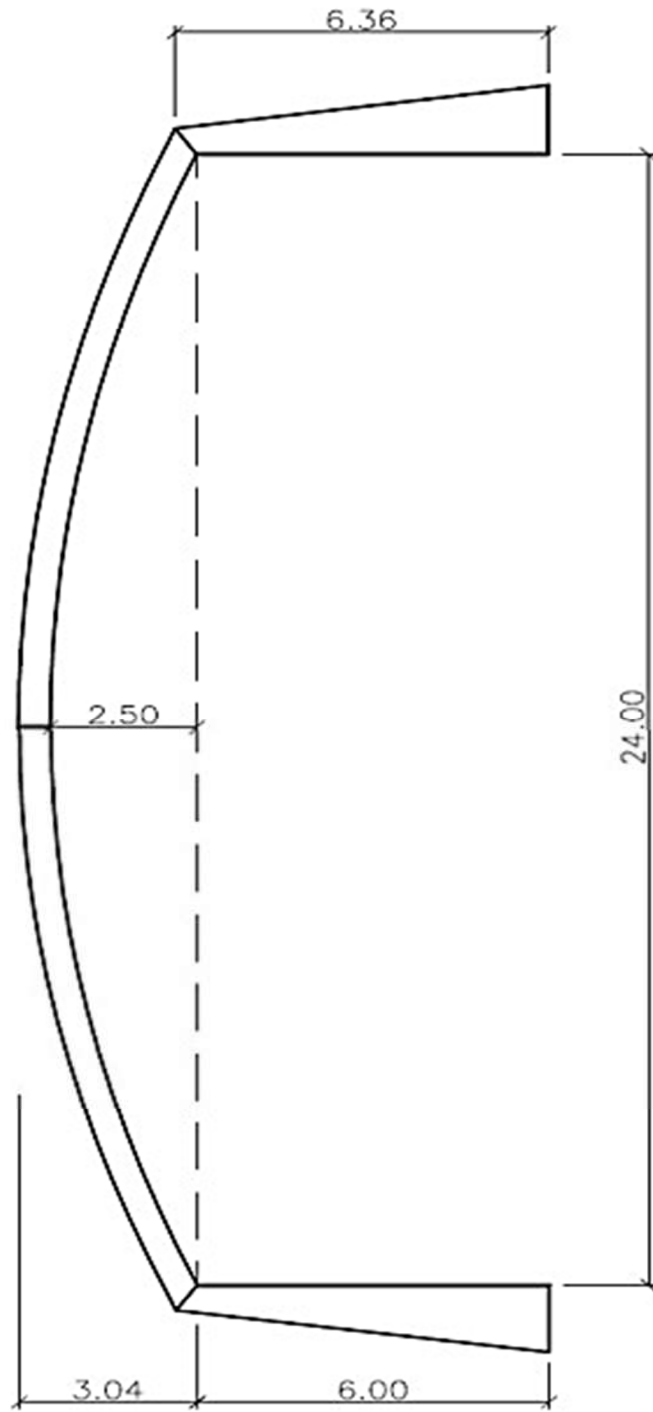
Pilares de seção transversal variável (cm)

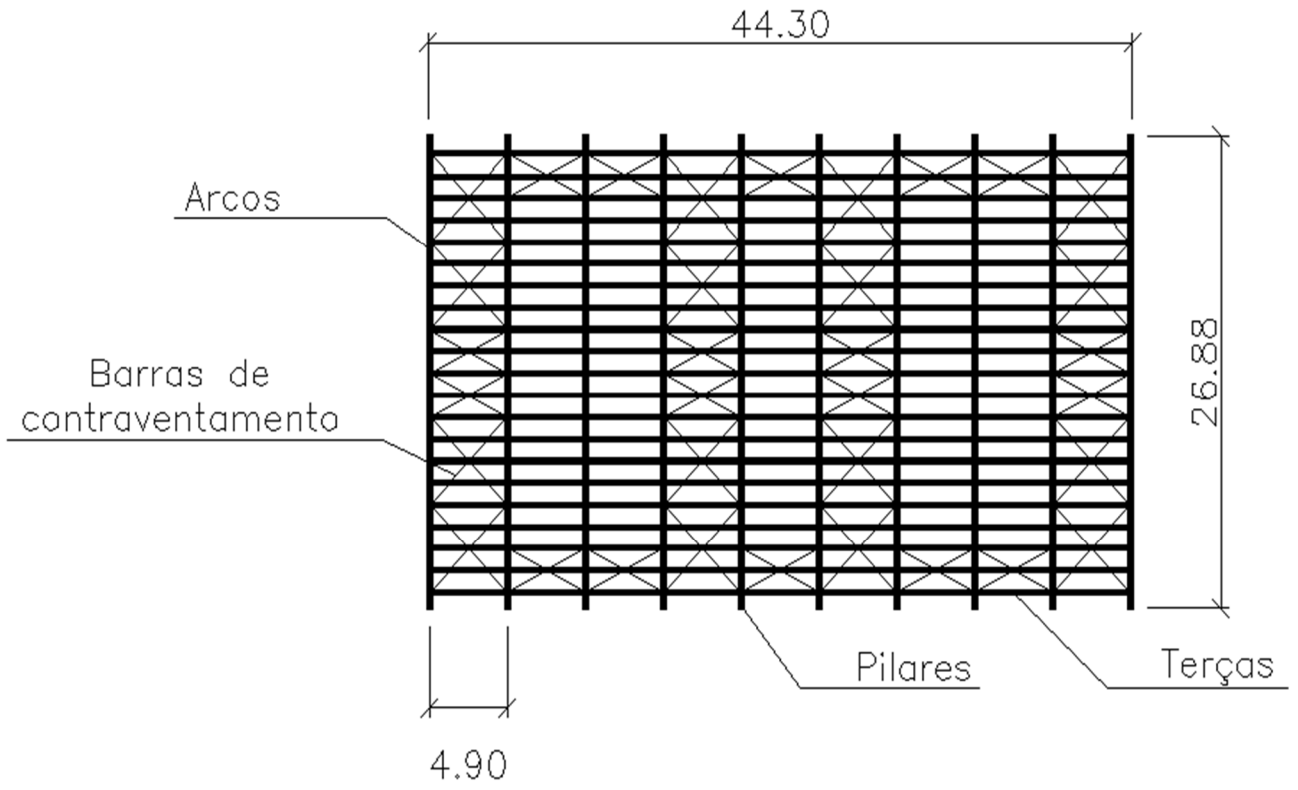


Terças e vigas arqueadas (cm)



Pórtico de MLC (m)

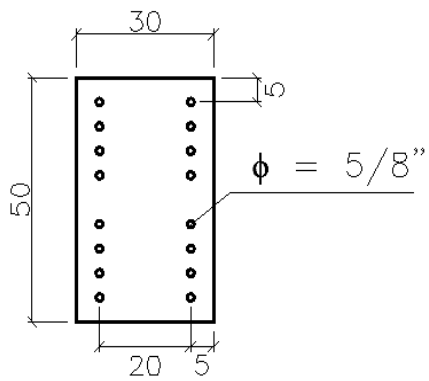


Planta da cobertura (m)

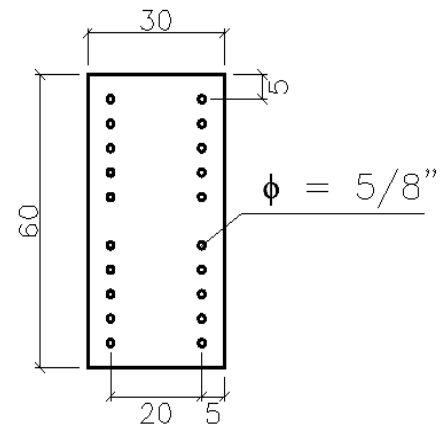
APÊNDICE F – Detalhamento das ligações

Detalhamento das ligações superiores (cm)

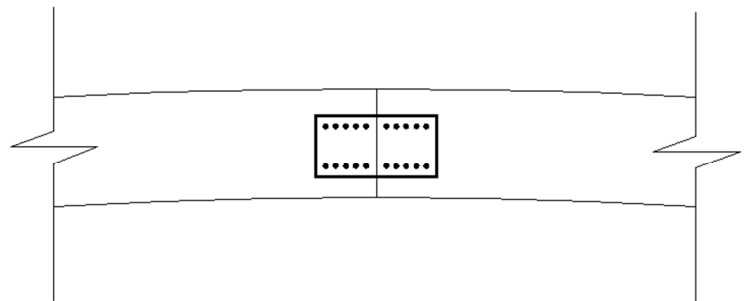
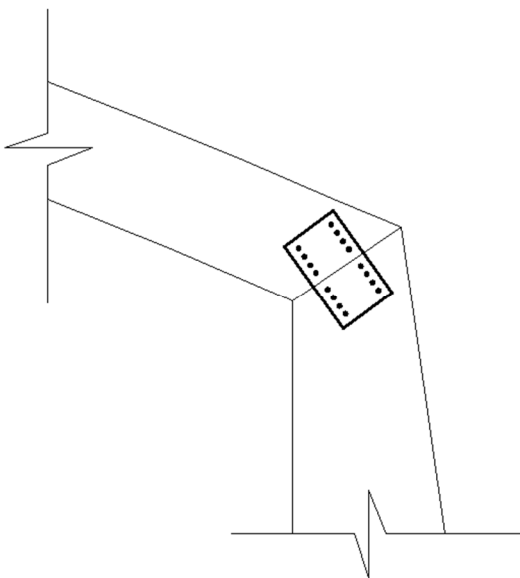
CHAPAS ENTRE OS SEMIARCOS E PILARES



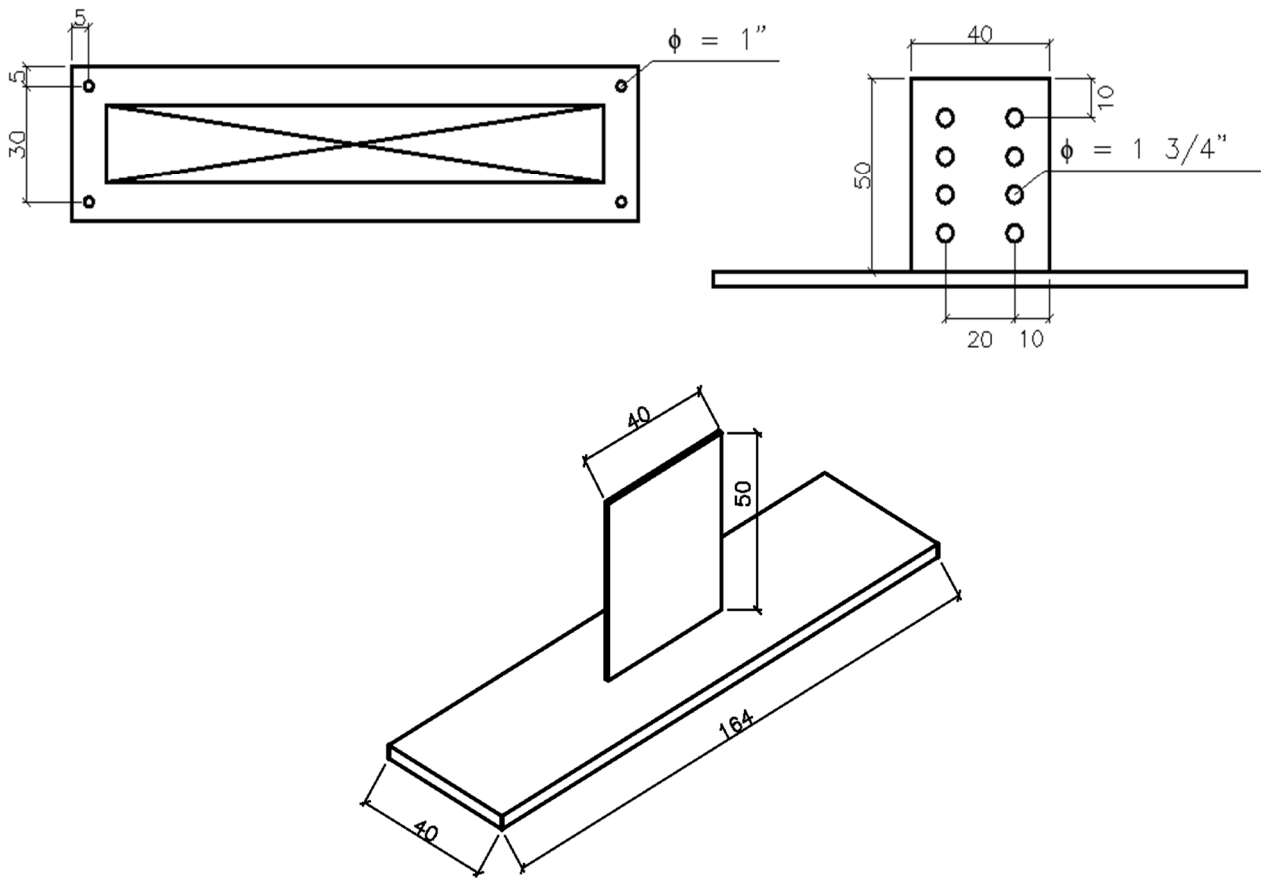
CHAPAS ENTRE OS SEMIARCOS



Posição das ligações superiores



Detalhamento do conector de base (cm)



Dimensões e localização do conector de base (cm)

