

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS GERAIS
Programa de Pesquisa, Produção e Divulgação Científica

BREENDHOWM WALLCKER OLIVEIRA DE ASSIS
BRUNO OLIVEIRA SOARES
DIEGO HENRIQUE OLIVEIRA MACHADO

ESTRUTURAS ESPACIAIS: Vantagens de Desvantagem das
Estruturas Espaciais

BELO HORIZONTE - MG
JUNHO / 2021

BREENDHOWM WALLCKER OLIVEIRA DE ASSIS
BRUNO OLIVEIRA SOARES
DIEGO HENRIQUE OLIVEIRA MACHADO

ESTRUTURAS ESPACIAIS: Vantagens de Desvantagem das
Estruturas Espaciais

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia de Minas Gerais (FEAMIG), como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientador de conteúdo: Prof. Ms. Diego de Jesus Queiroz Rosa

Orientador (a) de metodologia: Prof. Ms. Raquel Ferreira de Souza

BELO HORIZONTE - MG

JUNHO / 2021

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS GERAIS

Instituto Educacional “Cândida de Souza”

Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ESTRUTURAS ESPACIAIS: Vantagens de Desvantagem das Estruturas Espaciais**, de autoria dos alunos Breendhowm Wallcker Oliveira de Assis, Bruno Oliveira Soares e Diego Henrique Oliveira Machado, aprovados pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Diego de Jesus Queiroz Rosa
Orientador

Prof. Dr. ou Ms. #Nome Completo do Membro da Banca#
Membro da Banca

Prof. Dr. ou Ms. #Nome Completo do Membro da Banca#
Membro da Banca

Belo Horizonte-MG, 12 de junho de 2021.

Rua Gastão Bráulio dos Santos, 837 – Nova Gameleira – Belo Horizonte/ MG (31) 3372-3703

www.feamig.br / e-mail: feamig@feamig.br

CARTA DE ACEITE

Certificamos para os devidos fins que o artigo ***ESTRUTURAS ESPACIAIS: VANTAGENS E DESVANTAGENS*** foi aceito para publicação no **4º CADERNO DE COMUNICAÇÕES UNIVERSITÁRIAS** do Simpósio de Engenharia, Arquitetura e Gestão – SEAG, promovido pelo Centro de Extensão da FEAMIG, nos dias 14, 15 e 16/05/2021 – **ISSN 2675-1879**.

Belo Horizonte, 09 de junho de 2021.

Professora Raquel Ferreira de Souza
Coordenadora do CENEX e do PPDC da FEAMIG
E-mail: raquel.ferreira@feamig.br

AGRADECIMENTOS

A Deus que permitiu que tudo isso acontecesse nos dando saúde e força para superar as dificuldades.

A faculdade FEAMIG, seu corpo docente, direção e administração que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

Ao professor Ms. Diego de Jesus Queiroz Rosa, pela orientação, apoio e confiança na elaboração deste trabalho.

À nossa família e amigos que fizeram parte da nossa formação nos dando apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal um estudo sobre as estruturas espaciais abordando aspectos importantes como a abordagem histórica, noções de projetos, tipos e relação dos elementos, vantagens e desvantagens das estruturas espaciais, materiais empregados, as principais estruturas utilizadas e relação de características de cada uma. Este trabalho adota como metodologia de pesquisa a revisão bibliográfica, reunindo os principais conceitos e conhecimentos abordados nas literaturas que servem como fundamento para o tema desta pesquisa, a fim de trazer informações relevantes para os setores econômico, social, acadêmico e ambiental, bem como uma melhor compreensão do assunto. A pesquisa apresenta os resultados de expor os materiais utilizados nas estruturas espaciais, as vantagens e desvantagens do seu uso e apresentação dos principais sistemas utilizados.

Palavras-chave: Estruturas Espaciais. Estruturas Tridimensionais. Sistemas estruturais.

ABSTRACT

The main objective of this study is to study spatial structures addressing important aspects such as the historical approach, project definitions, types and relationship of elements, advantages and disadvantages of spatial structures, materials employed, the main structures used and the relationship of characteristics of each one. This work adopts as research methodology the bibliographic review, bringing together the main concepts and knowledge addressed in the literatures that serve as a basis for the theme of this research, in order to bring relevant information to the economic, social, academic and environmental sectors, as well as a better understanding of the subject. The research presents the results of exposing the materials used in spatial structures, the advantages and disadvantages of their use and presentation of the main systems used.

Keywords: Spatial Structures. Three-dimensional structures. Structural systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura espacial reticulada de Alexander Graham Bell	19
Figura 2: Treliça tridimensional com carrinho de avanço	20
Figura 3: Sistema alemão MERO.....	21
Figura 4: Sistemas de nós mais conhecidos	23
Figura 5: Ponte de Apollodorus sobre o Danúbio.....	24
Figura 6: Tipos de treliças usadas em coberturas (coluna da esquerda) e pontes ou passagens superiores (coluna da direita).....	25
Figura 7: Ponte treliçada com elementos de barra.....	27
Figura 8: T(a) Cantoneiras; (b) Perfis “I” soldados e laminados (c) perfis com seção transversal tubular circular e retangular.	28
Figura 9: Detalhe do Nó de Aço - Expominas - Belo Horizonte - MG.....	29
Figura 10: Planta e elevação do centro esportivo na Espanha	30
Figura 11: Fotos do Centro Esportivo da Espanha.....	31
Figura 12: Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado	33
Figura 13: Vistas do arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal	34
Figura 14: Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado diagonal.....	35
Figura 15: Tipos de apoios mais empregados em estruturas espaciais planas - Apoios: (a) no banzo inferior, (b) no banzo superior, (c) tipo “pé-de-galinha” e (d) tipo “engaste”	36
Figura 16: Fotos das Etapas do Método “lift-slab” - Expominas - BH - MG.....	37
Figura 17: Telhas Metálicas – Perfis Ondulados e Trapezoidais.....	38
Figura 18: Treliça espacial em perfis de alumínio	48
Figura 19: Treliça espacial em perfis de aço.....	48
Figura 20: Cúpula do Skydome J. Lawrence Walkup, Arizona.....	49
Figura 21: Sistema Mero	54
Figura 22: Sistema Space Deck.....	54
Figura 23: Sistema Triodetic.....	55
Figura 24: Sistema Unistrut.....	56

LISTA DE QUADRO

Quadro 1: Vantagens da estrutura espacial	51
Quadro 2: Desvantagens da estrutura espacial	52
Quadro 3: Resumo das principais características dos diferentes sistemas espaciais	57
Quadro 4: Características Construtivas e Domínio de Utilização dos Diferentes Sistemas Espaciais	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASCE: Sociedade Americana de Engenheiros Civis

FEAMIG: Faculdade de Engenharia de Minas Gerais

TCC: Trabalho de Conclusão de Curso

T&D: Treinamento e Desenvolvimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Contexto do Problema.....	12
1.2 Problema de Pesquisa	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 Justificativa.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Noções de Projeto Estrutural.....	15
2.2 Estrutura Espacial Reticulada	17
2.2.1 Histórico das Estruturas Espaciais	18
2.2.2 Tipos de Estruturas Espaciais	20
2.3 Estruturas Espaciais.....	21
2.3.1 Abordagem Histórica	24
2.3.2 Barras.....	26
2.3.3 Ligações.....	28
2.3.4 Arranjos Geométricos	32
2.3.5 Tipos de Apoio	35
2.3.6 Princípios de Montagem	36
2.3.7 Elementos de vedação	38
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	40
3.1 Pesquisa quanto aos fins	40
3.2 Tipo de pesquisa quanto aos meios.....	41
3.3 Organização em estudo	43
3.4 Universo e amostra	43
3.5 Formas de coleta e análise dos dados.....	44
3.6 Limitações da pesquisa	45
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
4.1 Materiais Utilizados nas Estruturas Espaciais	47
4.2 Vantagens de Desvantagens do Uso de Estruturas Espaciais.....	50
4.3 Principais Sistemas de Estruturas Espaciais.....	53

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

Em função do crescimento acelerado da população, surge algumas necessidades como a de se ter estruturas que possam acomodar grande quantidade de pessoas ou de proteger elementos de maior porte fazendo com que acontecesse a evolução das tecnologias construtivas com o passar dos anos.

Com a popularização do uso do aço e do ferro como materiais construtivos durante a Revolução Industrial, foi que começou a tornar-se possível a elaboração de estruturas mais extensas e que fossem eficientes a ponto de atender as necessidades das edificações que precisassem atingir grandes vãos livres.

A construção de edificações que requerem grandes vãos livres com menores quantidades de pilares internos possíveis, tem crescido de forma significativa. As estruturas metálicas e a regulamentação dos materiais empregados são importantes para a execução dessas estruturas de grande porte. Ademais, reduz expressivamente o tempo de execução e o custo global da obra.

As treliças metálicas têm grande aplicação na engenharia estrutural e vêm como progresso tecnológico de benfeitorias em estruturas com cobertura de grandes vãos abertos, corrigindo assim problemas de espaços, de manejo de grandes estruturas, peças ou grandes objetos dentro de fábricas, galpões dentre outras estruturas.

Hoje em dia, os sistemas em treliças espaciais de dimensões e complexidade cada vez maiores são usados numa grande variedade de realizações práticas na engenharia e possuem vantagens em relação a outros sistemas como baixo peso, grande rigidez, entre outros fatores. Entretanto, ainda existe uma grande dificuldade de utilização do sistema de ligação entre barras.

Contudo, a pesquisa pretende apresentar as estruturas treliçadas espaciais bem como as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Seguindo essa linha almeja-se demonstrar a grande importância das treliças nas estruturas através de análises, estudos, cálculos e viabilidade do seu uso.

1.1 Contexto do Problema

Com o avanço da tecnologia, a implantação de estruturas metálicas espaciais também vem avançando em todo o mundo. O fator mais importante do desenvolvimento dessas estruturas são as diversas pesquisas que abordam os variados aspectos do seu comportamento e projeto.

As estruturas são caracterizadas por se tratarem das partes mais resistentes de uma edificação, dado que são elas que recebem e transmitem os esforços, tornando-se fundamentais para a manutenção da segurança e da solidez da construção.

O aumento da utilização de estruturas metálicas na construção civil pode se dizer que vem da sua facilidade de adaptação ao projeto, sequência industrial de fabricação e rápida montagem. Considera-se também a viabilidade econômica da matéria-prima, com alternativa de reutilização.

As treliças espaciais são um dos principais tipos de estruturas da engenharia, sendo uma solução estrutural simples, prática e econômica. Sua implantação tem como grande vantagem conseguir vencer grandes vãos, podendo suportar altas cargas.

Pretende-se com esta pesquisa ressaltar os principais benefícios da implantação de estruturas em treliças espaciais, suas vantagens e desvantagens visto que o avanço da mesma vem com o intuito de aprimorar e suprir a necessidade de qualquer projeto.

1.2 Problema de Pesquisa

Qual a viabilidade da implantação de estruturas de treliças espaciais em coberturas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar as principais vantagens e desvantagens na implantação de estruturas espaciais.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar os materiais utilizados nas estruturas espaciais;
- b) Apresentar as vantagens e desvantagens do uso de estruturas espaciais;
- c) Demonstrar os principais sistemas de estruturas espaciais.

1.4 Justificativa

É de extrema importância, principalmente na engenharia, se trabalhar com planejamento e precisão, uma vez que, através da tecnologia pode-se buscar otimização de tempo, recursos, custos e ainda sim ser capaz de obter melhores resultados.

Apresentar o conceito, os tipos, os benefícios e a aplicabilidade de estruturas em treliças espaciais é de grande relevância, visto que, existe pouco material disponível sobre o assunto e por se tratar de uma solução estrutural simples, prática e econômica se projetada e executada da maneira correta.

Para a engenharia civil, as treliças se destacam por serem de fácil e rápido manuseio, já estarem prontas e com alta resistência, trazendo durabilidade e confiabilidade do

produto e com valores mais baixos. Além de proporcionar pouco reparo e manutenção, se instalada de forma correta.

Os benefícios de se executar coberturas com estruturas de treliças não é apenas ao fornecedor, mas também contribui para uma sociedade mais sustentável, dado que além do material ser reutilizável, proporciona diminuição de material que pode significar uma redução na extração de matéria-prima do meio-ambiente e menos resíduos.

Para os profissionais da construção civil é um desafio buscar e demonstrar a importância de cada tecnologia, ter comprometimento com as questões ambientais e atender as necessidades dos empreendimentos. A treliça pode satisfazer a essas necessidades com suas particularidades.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Noções de Projeto Estrutural

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 8800 (2008, p. 10) a definição de projeto é “o conjunto de especificações, cálculos estruturais, desenhos de projeto, de fabricação e de montagem dos elementos de aço e desenhos de fôrmas e armação referentes às partes de concreto”.

Para Queiroz (1988, p. 13), “A melhor solução de projeto para uma estrutura é aquela que, dentre diversas opções que preenchem os requisitos técnicos e estéticos, apresenta o menor custo”.

Em um projeto estrutural precisa ser desenvolvido em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT relativos ao tema. Na análise estrutural considera-se a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a estrutura, levando-se em conta os possíveis estados limites últimos e de serviço (GUESSI, 2010).

Segundo Pfeil e Pfeil (2009) garantir a segurança estrutural evitando-se o colapso da estrutura e garantir um bom desempenho da estrutura evitando-se a ocorrência de grandes deslocamentos, vibrações, danos locais são os principais objetivos de um projeto estrutural.

Na preparação de um projeto estrutural é requerido do profissional visão espacial, criatividade, capacidade de produzir um projeto seguro, econômico e exequível. As etapas seguintes à elaboração do projeto estrutural são de caráter essencialmente matemático, sendo feitas atualmente com muita eficiência por programas computacionais comerciais (MELO, 2013).

Para um projeto estrutural com bom desempenho, Queiroz (1988, p. 13) explica que “ ele deve garantir, dentro do objetivo para o qual foi criada, uma utilização econômica e que não traga qualquer prejuízo ao bem estar de pessoas, ao funcionamento de equipamentos e à integridade dos materiais a ela ligados, durante sua vida útil”.

Devido à complexidade das construções, uma estrutura requer a utilização de diferentes tipos de elementos estruturais, adequadamente combinados para a formação do conjunto. O ponto de partida do projeto estrutural consiste na elaboração do arranjo das peças, que é a definição da geometria, do posicionamento e da interligação dos diversos elementos estruturais. Os elementos que compõem uma estrutura devem ter geometria de acordo com o projeto arquitetônico e com a função estrutural, que é definida pelos esforços solicitantes (ENGEL, 2001).

Alguns princípios gerais que norteiam o projeto estrutural, que são referências para a metodologia de projetos de acordo com Nóbrega (2017) são:

- i. A edificação compõe-se de partes resistentes e não resistentes. Ao conjunto das partes resistentes dá-se o nome de estrutura.
- ii. A estrutura garante a segurança contra os estados limites. Estes podem ser: estado limite de ruína (ruptura do concreto, deformação plástica excessiva do aço ou instabilidade global da estrutura) ou estado limite de utilização (fissuração, deformação ou vibração excessivas).
- iii. É imprescindível o conhecimento do comportamento das peças estruturais para que seja feita o projeto estrutural;
- iv. A cada tipo de peça estrutural correspondem métodos de cálculo, métodos construtivos, implicações econômicas, funcionais e estéticas que devem ser levadas em consideração. (NÓBREGA 2017, p. 8)

Ainda de acordo com Nóbrega (2017) estabelecer um arranjo estrutural adequado consiste em obedecer simultaneamente, sempre que possível, aos aspectos de segurança, economia (custo e durabilidade) e os definidos pelo projeto arquitetônico (estética e funcionalidade).

Apesar de não ter uma definição específica na literatura e nas normas relacionado as etapas de um projeto estrutural, para Pfeil e Pfeil (2009) um projeto estrutural é dividido em 3 fases:

- a) Anteprojeto ou projeto básico, quando são definidos o sistema estrutural, os materiais a serem utilizados, o sistema construtivo.
- b) Dimensionamento ou cálculo estrutural, fase na qual são definidas as dimensões dos elementos da estrutura e suas ligações de maneira a garantir a segurança e o bom desempenho da estrutura.
- c) Detalhamento, quando são elaborados os desenhos executivos da estrutura contendo as especificações de todos os seus componentes. (PFEIL E PFEIL, 2009, p. 34)

É de responsabilidade do projetista estrutural conhecer todas as instalações e utilidades a serem implantadas na edificação, que sejam condicionantes na escolha e dimensionamento do esquema, entender a flexibilidade de utilização desejada no projeto arquitetônico, para que eventuais modificações de distribuição interna não venham a ser impossibilitadas por questões estruturais, conhecer as possibilidades futuras de ampliação de área e alteração de utilização da edificação e conhecer o prazo fixado para a execução da obra (GUESSI, 2010).

2.2 Estrutura Espacial Reticulada

A estrutura espacial reticulada é um agrupamento de barras interconectadas em determinados números de pontos, onde costuma-se esperar um modelo discreto dispor uma simulação melhor do comportamento real do que um modelo contínuo. No entanto, o método discreto pode apresentar dois pontos, imperfeições geométricas e eficiência dos nós, de indefinição e que é uma avaliação difícil nos modelos discretos: (SOUZA; MALITE, 2005).

As estruturas espaciais reticuladas, também são conhecidas por treliças espaciais ou simplesmente por estruturas espaciais, são muito usadas em coberturas, principalmente em edificações que exigem grandes áreas livres, como galpões, ginásios, edifícios industriais, entre outros (SOUZA, 2002).

De acordo com Krause (2009), existem alguns benefícios na escolha do uso de estruturas espaciais reticuladas se comparados às estruturas planas convencionais, e são elas:

- Grande rigidez, sendo possível a realização de obras de grandes vãos;
- Facilidade de fixação de instalações, devido à grande quantidade de nós nos quais podem ser fixados suportes;
- Liberdade arquitetônica na locação de apoios;
- Beleza arquitetônica, permitindo explorar as mais diversas formas;
- Possibilidade de ampliação, e fácil montagem e desmontagem para estruturas não permanentes;
- Menor peso e menor custo para grandes vãos. (KRAUSE, 2009, p. 30)

Os requisitos básicos para o início da determinação das características geométricas da estrutura vêm da arquitetura. De acordo com a necessidade de vãos livres e balanços, monta-se a disposição dos apoios através da análise das ações, as limitações de deslocamentos máximos, as condições e tecnologias de fabricação, montagem e içamento. Outros aspectos específicos podem ser definidos, como as dimensões e orientações dos módulos, quantidades de camadas e altura (SOUZA; MALITE, 2005).

Segundo Souza (2002) essas estruturas são montadas, na maioria das vezes, por perfis de seção transversal tubular, que não precisa verificar flambagem. As barras são conectadas por mecanismos chamados de nós, que vão desde os mais simples até os mais complexos e muitas vezes estas conexões podem apresentar problemas de instabilidade. Vários estudos então sendo feitos para avaliar o desempenho local e global da estrutura para os tipos de sistemas de conexão.

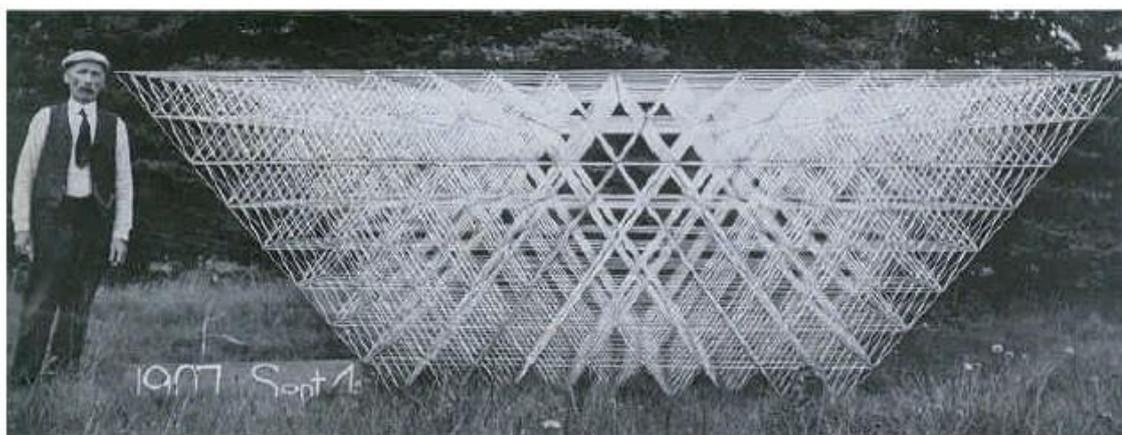
2.2.1 Histórico das Estruturas Espaciais

O termo “estrutura espacial” é utilizado para denominar um sistema estrutural em que não há subsistemas de planos definidos. A expressão estrutura espacial é aplicada para diversas funções, onde envolve as estruturas reticuladas que são compostas por elementos de barra, estruturas contínuas, formada por placas, membranas ou cascas,

e estruturas mistas, elaborada pela associação de elementos discretos e contínuos (MAKOWSKI, 1987).

Segundo Du Chateau (1984) os principais tipos de estruturas espaciais reticuladas são as treliças espaciais planas, os arcos treliçados espaciais e as cúpulas treliçadas espaciais. Estas estruturas surgiram por volta do século XVIII, porém, em 1907, Alexander Graham Bell desenvolveu um reticulado espacial constituído de barras de igual comprimento, conectadas por nós simples, idênticos para toda a estrutura conforme Figura 1.

Figura 1: Estrutura espacial reticulada de Alexander Graham Bell.



Fonte: DU CHATEAU (1984).

Alexander Graham Bell foi o primeiro engenheiro a mostrar como este sistema é simples e fácil de montar, resultando uma estrutura leve e com grande resistência e chamou a atenção para a economia que poderia advir da industrialização e pré-fabricação deste sistema (MAKOWSKI, 1981).

Ainda conforme Makowski (1981) no início dos anos 1930, a TOMOE Corporation, no Japão, desenvolveu o sistema “treliça diamante” devido à demanda crescente por estruturas de cobertura para hangares que abrigassem as aeronaves que começavam a surgir. Um pequeno triângulo foi adotado como unidade básica. A combinação desses triângulos, gerava uma estrutura “rígida” e de elevada capacidade de carga que lembrava a forma de um diamante.

Depois de algumas décadas desde a primeira estrutura espacial construída por Alexander Graham Bell, tem-se observado um crescente interesse por esta forma de construção, com aplicação em grandes coberturas de estádios, espaços públicos, hangares, coberturas de piscinas, ginásios de esportes, e muitas outras construções; entretanto, no geral, a existência das treliças espaciais no mercado de estruturas de grandes coberturas não vem sendo significativamente expressiva, e o número de suas aplicações é relativamente pequeno e não reflete seus importantes méritos construtivos (EL-SHEIKH; EL-BAKRY, 1996).

De acordo com Souza (2002) no ano de 1966, em Londres, ocorreu a primeira conferência a respeito de estruturas espaciais, estabelecendo o início da integração e dedicação das pesquisas sobre este tema. No ano seguinte foi criado pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE) um comitê específico para o estudo destas estruturas no Estados Unidos.

2.2.2 Tipos de Estruturas Espaciais

De acordo com Silva (1999) as estruturas espaciais são:

Aquelas compostas de malhas planas ou curvas, tridimensionais, interligadas por elementos estruturais chamados barras ou membros, conectados entre si por intermédio de peças ou dispositivos especiais, chamados juntas ou nós. Geralmente, são formadas por duas malhas, uma inferior, chamada também banzo inferior, outra superior, denominada banzo superior, malhas estas que geralmente são interligadas em suas juntas por diagonais, que formam assim um conjunto de tetraedros ou pirâmides, regulares ou não, resultando o que é chamado de malha espacial (SILVA, 1999, p. 01).

A expressão estrutura espacial se aplica a uma ampla categoria no setor das construções. De acordo com Makowski (1987), um dos maiores teóricos de estruturas espaciais, essas estruturas são classificadas em três tipos: estruturas em malhas (treliça espacial), estruturas suspensas de toda natureza (coberturas sobre cabos) e estruturas em membranas metálicas.

Segundo Porto (2016) as estruturas em malhas (treliça espacial) são constituídas por uma série de barras unidas entre si por nós. As malhas podem ser o produto de muitos corpos geométricos ou da repetição de um entre eles (cúpulas em malhas, abóbadas de berço em malhas, grelhas de duas camadas);

As estruturas suspensas de toda natureza, consideradas as coberturas sobre cabos, são definidas pelo sistema de cabos que mantém a cobertura, com ou sem bordas de apoio. Nas estruturas que são suspensas, a distribuição das solicitações internas é caracterizada pela eliminação da flexão, a construção sobre cabos trabalhando unicamente à tração (MAKOWSKI, 1987).

Já as estruturas em membranas metálicas de acordo com Porto (2016), são as quais os elementos de cobertura participam na resistência dos esforços solicitantes como, por exemplo, as construções em membranas e as construções plissadas.

Por causa do seu comportamento tridimensional, as estruturas espaciais têm como principal vantagem uma boa redistribuição de esforços, ou seja, quando a estrutura é solicitada por uma carga concentrada ou móvel, existe uma veloz dispersão por todos os elementos próximos do seu ponto de ação, reduzindo os esforços no elemento diretamente carregado. Esta característica também pode reduzir o custo das estruturas de suporte, pois como a carga é distribuída por vários elementos, os apoios estruturais serão sujeitos a esforços menores (MARTINS, 2012).

2.3 Estruturas Espaciais

A definição de treliça, segundo Gomes (2016) é um sistema articulado plano rígido de barras rígidas ligadas entre si por extremidades rotuladas, formando um sistema estável, sendo o carregamento realizado por nós. Na forma como as barras estão colocadas na treliça forma um sistema eficiente para suportar as cargas, ou seja, uma treliça pode suportar cargas pesadas relativas ao seu próprio peso. A maioria das estruturas reais apresenta várias treliças unidas entre si, formando uma estrutura espacial como representado na Figura 2. Cada treliça é projetada para suportar as

cargas que atuam no seu plano, podendo assim serem tratadas como estruturas bidimensionais, ou seja, os eixos das barras estão contidos num mesmo plano.

Figura 2: Treliça tridimensional com carrinho de avanço.

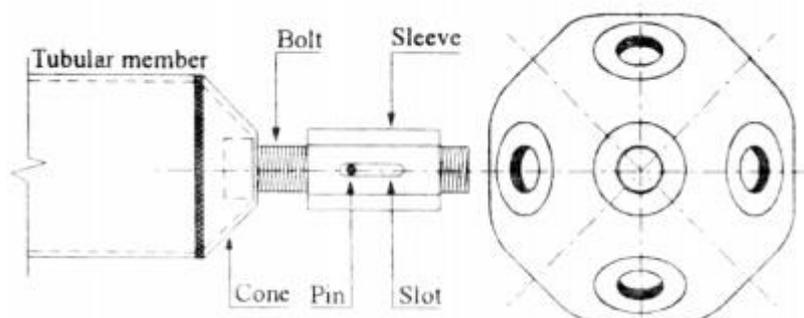


Fonte: GOMES (2016).

De acordo com Garcia (2018) a treliça espacial é um tipo de estrutura reticulada espacialmente, pois possui barras em três dimensões para lhe dar o intertravamento necessário da estrutura para sua estabilidade. As treliças espaciais são formadas por duas ou mais malhas planas, em geral, paralelas, que são conectadas através de diagonais verticais ou inclinadas. Assim como nas treliças planas, as barras são dimensionadas somente para trabalhar a esforços axiais de tração ou compressão e também, considera-se que não existe momento entre as barras e os nós da estrutura (SOUZA; GONÇALVES, 2006).

Nos últimos anos, dezenas de sistemas de treliças espaciais surgiram e muitas não tiveram grande sucesso comercial, principalmente pela complexidade dos seus sistemas de conexão. Dos sistemas em uso hoje em dia pode-se destacar o sistema alemão MERO, representado na Figura 3, que depois de muitos anos de desenvolvimento teve sua aplicação difundida em 1957 no “*International Building Exhibition*” em Berlim (CODD *et al*, 1984).

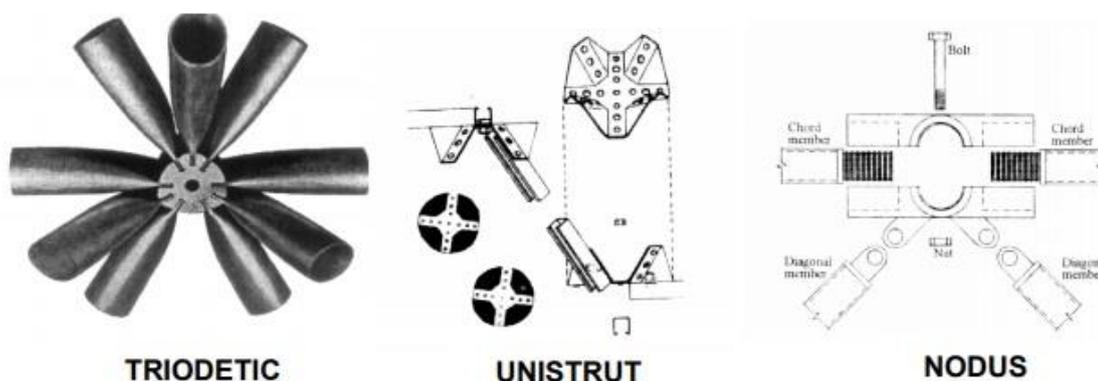
Figura 3: Sistema alemão MERO



Fonte: MAIOLA; MALITE (2002).

Ainda de acordo com Codd *et al*, (1984), nos anos 1950 os sistemas de maior destaque foram os TRIODETIC e UNISTRUT e dos mais recentes, o sistema em destaque o sistema britânico NODUS, ambos representados na Figura 4.

Figura 4: Sistemas de nós mais conhecidos.



Fonte: MAIOLA; MALITE (2002).

Quanto a aceitação destas estruturas pode-se dizer que, antes do dos computadores se tornarem comuns, havia uma resistência, de certo modo justificada por parte dos engenheiros, em relação ao uso das treliças espaciais, pois a análise destas estruturas era muito trabalhosa, devido a sua grande hiperestaticidade, necessitando recorrer a modelos aproximados e, em geral não muito adequados. Hoje em dia esta análise é facilitada pelos inúmeros programas computacionais de análises estruturais disponíveis (MAIOLA, 1999).

2.3.1 Abordagem Histórica

As treliças surgiram como um sistema estrutural mais econômico se comparado com vigas, sendo um dos principais tipos de estruturas de engenharia. Estes sistemas estruturais foram utilizados durante séculos para vencer grandes vãos. O engenheiro romano Apollodorus construiu sobre o Rio Danúbio por volta de 105 d.C, uma ponte de treliça de múltiplos vãos onde cada vão de ponte tomou forma similar à arqueada como apresentado na Figura 5 (SCHMIDT; BORESI, 2003).

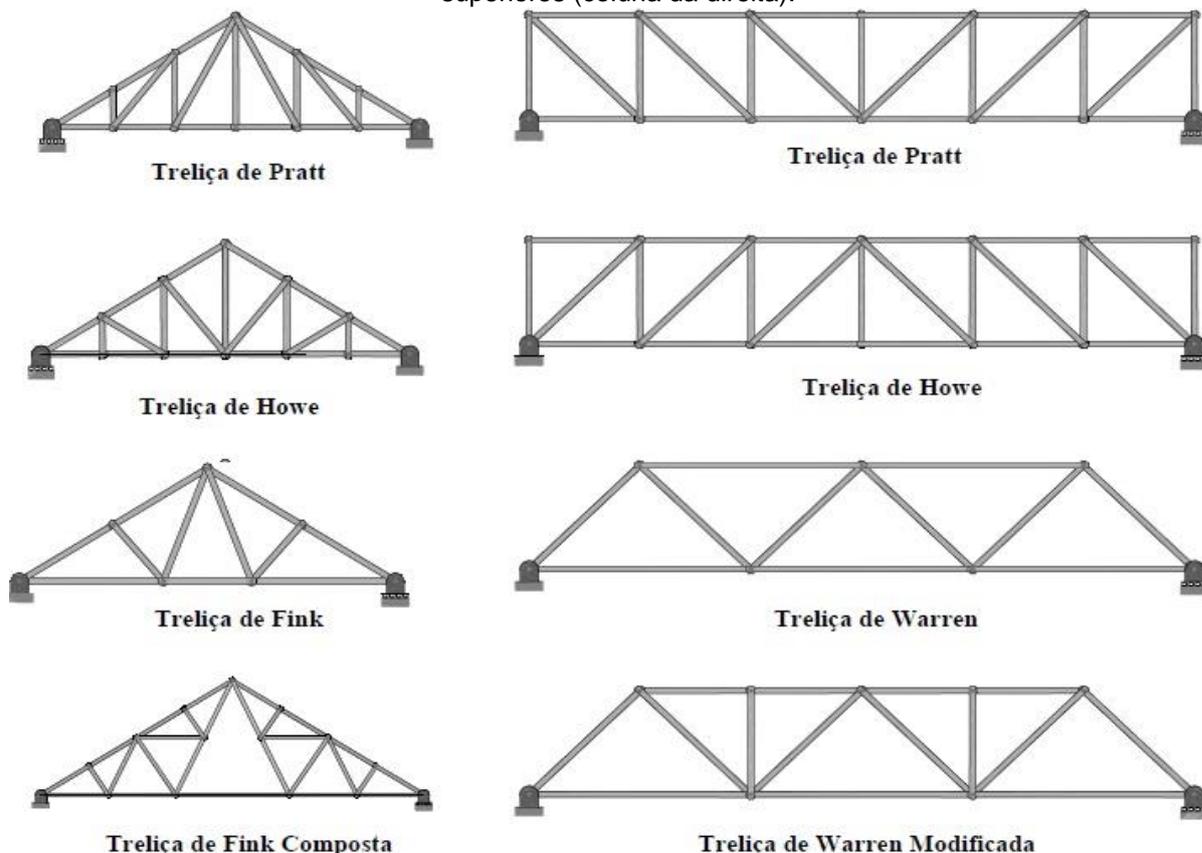
Figura 5: Ponte de Apollodorus sobre o Danúbio.



Fonte: SCHMIDT; BORESI, (2003).

Desde a Revolução Industrial (século XIX) algumas das configurações clássicas de estruturas treliçadas que foram utilizadas conforme apresentada na Figura 6. No período de desenvolvimento das treliças, estas distinguiam-se pelas suas configurações, pelos materiais, pela capacidade de resistirem a elevados esforços e ainda por apresentarem grandes vãos. Até hoje, as treliças são chamadas pelos nomes de quem as aperfeiçoou (GOMES, 2016).

Figura 6: Tipos de treliças usadas em coberturas (coluna da esquerda) e pontes ou passagens superiores (coluna da direita).



Fonte: GOMES (2016).

Segundo Pfeil e Pfeil (2009) a treliça Howe é semelhante a treliça Pratt, todavia, as diagonais, ao invés de confluírem para o banzo inferior, confluem para o banzo superior, de maneira que acabam sofrendo esforços de compressão, enquanto os montantes recebem esforços de tração. Este modelo de estrutura, no qual as barras comprimidas são de menor dimensão, é uma solução mais econômica.

A treliça Warren possivelmente é a mais comum quando se necessita de uma estrutura contínua e simples. São usadas para vencer vãos entre 50 e 100 metros. Também pode utilizar em projetos de pontes com pequenos vãos, uma vez que não é necessário usar elementos verticais para amarrar a estrutura. O que não acontece em pontes com grandes vãos, pois estes elementos verticais são necessários para dar maior resistência. A treliça Fink, é uma estrutura cujas as diagonais são tracionadas, sendo os montantes comprimidos, características semelhantes às da viga Pratt (GOMES, 2016).

De acordo com Gomes (2016) até à Revolução Industrial não houve grandes avanços neste tipo de estruturas, mas durante a revolução industrial, devido à falta de disponibilidade de ferro na Europa e à expansão das ferrovias, os engenheiros foram pressionados a desenvolver treliças mais racionais para a construção de pontes de grandes vãos, mas com um baixo peso próprio. Depois de anos, o aço começou a substituir o ferro fundido e o ferro laminado, principalmente devido à sua maior resistência e ductilidade.

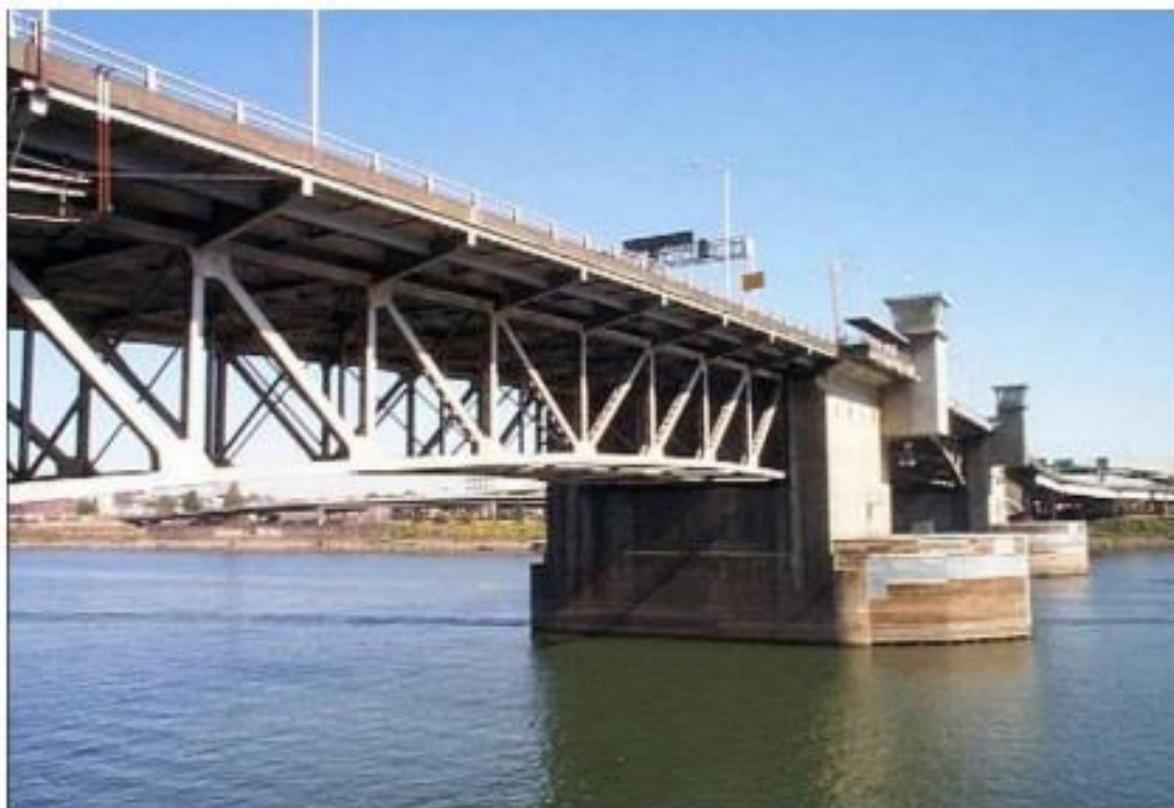
Somente após a criação dos computadores eletrônicos é que aconteceu uma grande revolução no crescimento das estruturas espaciais. Com o surgimento dos novos programas computacionais foi capaz de buscar construções geométricas com bom desempenho estrutural e que atendam aos interesses arquitetônicos (MAKOWSKI 1993).

De acordo com Maiola (1999) a utilização das treliças espaciais está em constante crescimento, por motivo de, principalmente, a sua intrínseca leveza e aparência agradável. Relacionado a este crescimento, alguns problemas estruturais referentes a este sistema vêm ocorrendo, tendo-se observado casos de colapso parcial ou até mesmo total destas estruturas, criando assim um grande risco à sociedade. Por esse motivo, realizar estudos, elaboração de projeto adequado com emprego de matérias resistentes minimiza esses riscos.

2.3.2 Barras

Uma estrutura de treliça, constitui-se em um conjunto de elementos regularmente chamados de barras. Esses elementos de barra são caracterizados por uma seção transversal de dimensões pequenas quando comparadas com seu comprimento, e apresentam resistência à torção, dobragem e cisalhamento desprezíveis (FERNANDES *et al.*, 2015). A Figura 7 ilustra uma ponte treliçada com elementos de barras.

Figura 7: Ponte treliçada com elementos de barra.

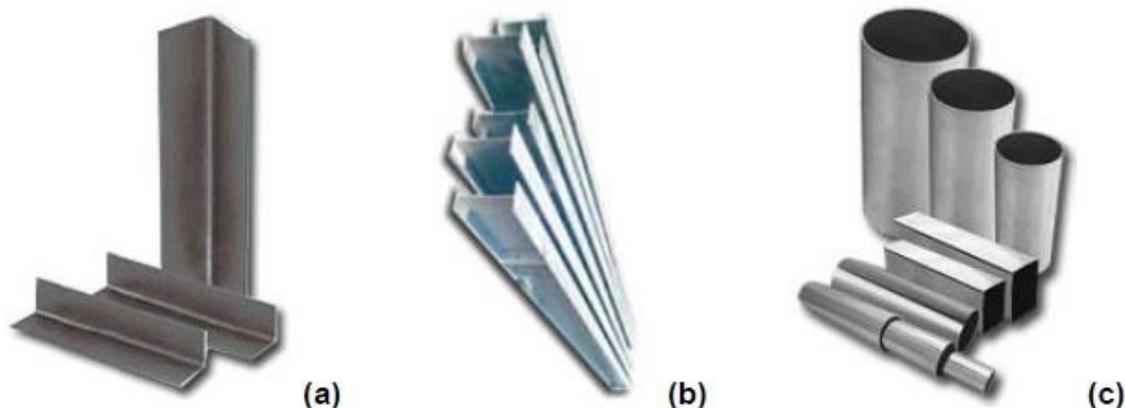


Fonte: FERNANDES *et al.* (2015).

Pfeil e Pfeil (2009, p. 231) apontam que “As barras de treliças são, em geral, constituídas por perfis laminados únicos ou agrupados, e também por perfis de chapa dobrada.”, comentando ainda que “As treliças mais leves são formadas por cantoneiras ou perfis, ligados por solda ou parafuso.”.

Quanto as barras, existem vários tipos de perfis, como perfis de seção transversal tubular, “I” soldados e laminados, cantoneiras, entre outros como apresentado na Figura 8. A seleção do perfil está relacionada aos níveis de solicitação da barra, ao sistema de conexão dos nós, à idealização arquitetônica, a designo da estrutura ou a alguma função que o perfil poderá exercer (MARTINI, 2016).

Figura 8: (a) Cantoneiras; (b) Perfis “I” soldados e laminados (c) perfis com seção transversal tubular circular e retangular.



Fonte: <http://www.acocil.com.br>

Agrupando cantoneiras ou perfis laminados aos pares, é capaz de gerar barras de maneira a conseguir treliças médias, à medida que as barras de maior capacidade tornam-se viáveis a partir da união de quatro perfis. Em construções de grande porte, como as pontes, as treliças pesadas são normalmente constituídas por perfis I soldados ou perfis fechados (PFEIL; PFEIL, 2009).

Conforme Sampaio e Gonçalves (2007) para que os modelos numéricos de treliças espaciais com nós de extremidades estampadas possam mostrar um comportamento próximo do real, a variação de inércia nas barras deve ser levantada cuidadosamente. Para todas as tipologias de nó, o comprimento inicial da barra deve ser modelado com elementos de casca e o trecho restante, assim como as barras de treliça ideal, com elemento de barra.

2.3.3 Ligações

Para a escolha do tipo de ligação a ser utilizado em estruturas espaciais é necessário avaliar os dos seguintes fatores: forma da estrutura, disposição dos elementos e tipos de seção transversal. Normalmente os esforços solicitantes em treliças espaciais são determinados considerando nós rotulados. Detalhes de ligação que garantam esse

comportamento são muito difíceis e, portanto, a rigidez da ligação influencia sensivelmente o comportamento da estrutura (SOUZA, 2003).

Segundo Martini (2016) os nós são um dos fatores de maior importância na resistência, no comportamento e no valor final de uma estrutura. A escolha do sistema a ser utilizado está relacionada ao perfil, à quantidade e à arranjo das barras, a demais, o nó deve demonstrar, as hipóteses de cálculo adotadas. A maioria dos sistemas são de ligações parafusadas devido ao alto custos de soldagem, além ser ter execução difícil que pode comprometer a eficiência dos nós Os tipos de ligações utilizadas às estruturas espaciais são: nó típico, nó de aço, nó com chapas de ponteira, ligação Cuenca, ligação Mero e ligações combinadas.

Em nós típicos e em nós de aço as barras apresentam variação de seção devido ao processo de estampagem ou amassamento das extremidades conforme ilustrado na Figura 9. A geometria da região amassada varia a depender do tipo de ferramenta utilizada e das dimensões do tubo, o que dificulta a determinação das propriedades geométricas destas seções (SAMPAIO; GONÇALVES, 2007).

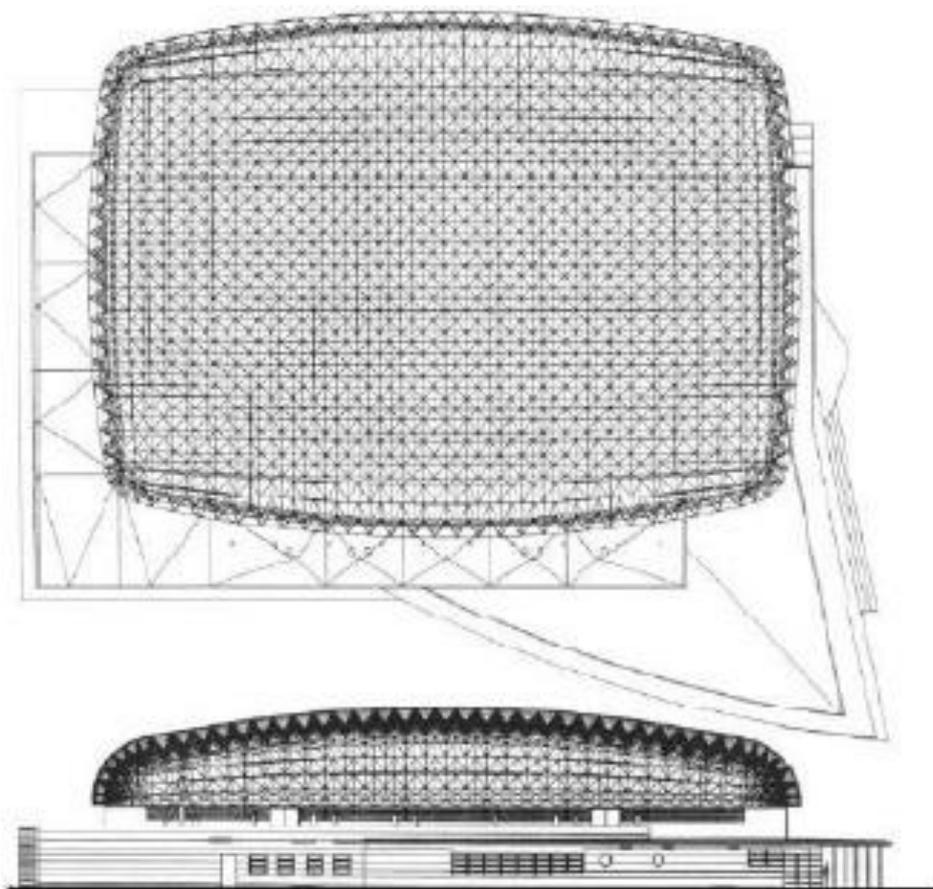
Figura 9: Detalhe do Nó de Aço - Expominas - Belo Horizonte - MG



Fonte: <http://www.techneaco.com.br/>

O nó de Cuenca, segundo Freitas (2008) é um sistema de ligação foi desenvolvido e utilizado por Cuenca (2002), em uma obra na Espanha do ginásio de esportes onde a cobertura do ginásio era composta por uma estrutura treliçada tridimensional geodésia com 2.800m² de área. Na planta é possível observar a elevação na Figura 10.

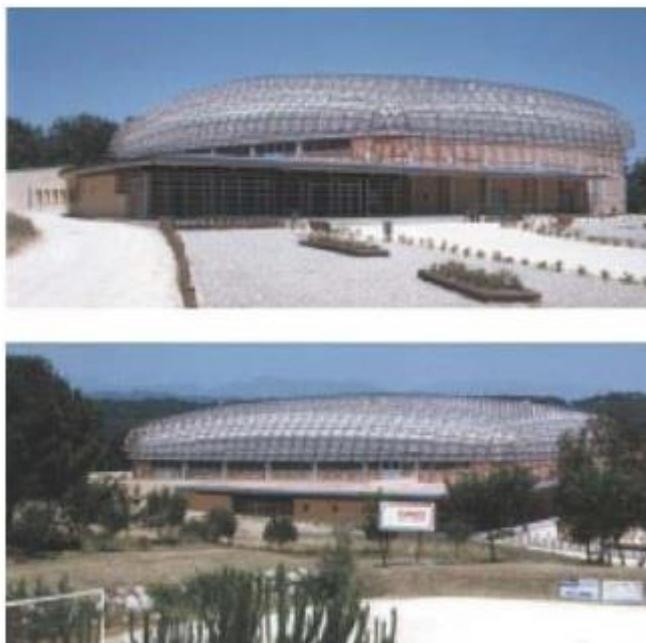
Figura 10: Planta e elevação do centro esportivo na Espanha



Fonte: FREITAS (2008)

Cuenca, arquiteto responsável pelo projeto, salienta as vantagens construtivas e econômicas. No entanto, não há referência sobre o comportamento estrutural da ligação e da estrutura como um todo. O afastamento entre os banzos e diagonais, obtidos pela utilização de uma arruela, seria para reduzir a excentricidade na ligação. Entretanto, além da excentricidade, existe o fato da baixa rigidez da ligação e a redução na capacidade das barras devido à estampagem de extremidade (SOUZA, 2003). A Figura 11 são fotos do centro esportivo projetado por Cuenca.

Figura 11: Fotos do Centro Esportivo da Espanha



Fonte: FREITAS (2008)

O sistema mais conhecido e mais usado no mundo que é sistema de ligação Mero, que compreende em barras de seção transversal tubular de aço com parafusos nas extremidades que são conectados a nós esféricos. Nos sistemas de ligações combinada nada mais é que a na união de mais de um sistema. A apuração pelo tipo, normalmente, está relacionada as medidas de diâmetro e/ou à espessura do tubo a ser utilizado (MARTINI, 2016).

Segundo Aprile e benedetti (1998) para se avaliar a eficiência de um sistema de ligação em sistemas de treliças espaciais é necessário considerar alguns aspectos como: a capacidade resistente do sistema, a minimização dos materiais empregados, a tecnologia de manufatura adotada, o nível de pré-fabricação do sistema e a facilidade de transporte e montagem.

Esses sistemas de ligação podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro é aquele em que os aspectos apresentados acima são avaliados e caracterizados experimentalmente, tendo sua eficiência estrutural comprovada que são geralmente sistemas de ligação patenteados e o segundo grupo engloba detalhes de ligações, geralmente empíricos, projetados na base da intuição e experiência, sem quaisquer

estudos que confirmem seu comportamento, ou baseado em hipóteses simplistas (SOUZA, 2003).

As ligações das barras às chapas são feitas, geralmente, por meio de parafusos ou soldas. A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 64) afirma que “Grupos de parafusos ou soldas, situados nas extremidades de qualquer barra axialmente solicitada, devem ter seus centros geométricos sobre o eixo que passa pelo centro geométrico da seção da barra, a não ser que seja levado em conta o efeito de excentricidade.”.

No entanto, segundo Pfeil e Pfeil (2009) quando as barras em são do tipo cantoneira não é possível fazer uma ligação concêntrica, pois não há espaço para a instalação do parafuso na linha do centro de gravidade do perfil. Quando isso acontece, a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 64) aponta que “Nos casos de cantoneiras simples ou duplas e barras semelhantes solicitadas axialmente, não é exigido que o centro geométrico de grupos de parafusos ou soldas de filete fique sobre o eixo baricêntrico da barra, nas suas extremidades, para os casos de barras não sujeitas à fadiga.”.

2.3.4 Arranjos Geométricos

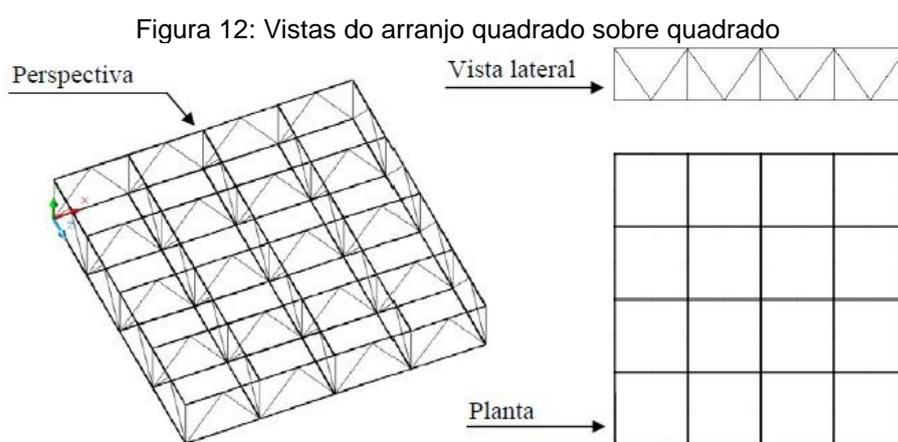
As estruturas treliçadas tridimensionais são caracterizadas por possuírem elementos de barras entre dois nós descritos em coordenadas tridimensionais. Estas estruturas podem ser classificadas quanto à sua geometria, considerando o arranjo dos elementos em planta ou em elevação (FREITAS, 2008).

Conforme Souza (2002) as formas geométricas ótimas geralmente possuem tensões distribuídas uniformemente. Algumas condições importantes na escolha do arranjo geométrico são a quantidade e a posição dos apoios, o layout em planta da edificação, o custo dos nós e as técnicas de montagem e içamento a serem utilizadas.

Segundo Agerskov (1986), na escolha do arranjo geométrico ótimo não se deve relacionar apenas às soluções de mínimo peso, mas também deve analisar outros fatores, como número de barras. Para diminuir o consumo de material, reduzir o número de nós e por consequência também reduzir o custo da montagem, a densidade das barras na estrutura deve ser baixa, sendo elas tracionadas longas e comprimidas curtas.

Encontram-se vários arranjos geométricos, mas os tipos mais usados são os tetraédricos, os cúbicos e os octaédricos, por se mostrarem melhor acomodação às treliças espaciais planas. Tenta-se aprimorar a distribuição das barras, com intuito de melhorar a resistência da treliça. Alguns dos arranjos geométricos mais utilizados em obras com mais pesquisas e experimentos realizados são: arranjo quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo, arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal com defasagem de meio módulo e arranjo quadrado sobre quadrado diagonal (SOUZA, 2002).

O arranjo quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo, representado na Figura 12, é sem dúvida o tipo de disposição de barras mais utilizado e mais estudado, tem como unidade básica um tetraedro de forma piramidal que se repete ao longo de toda estrutura (SOUZA, 2002).

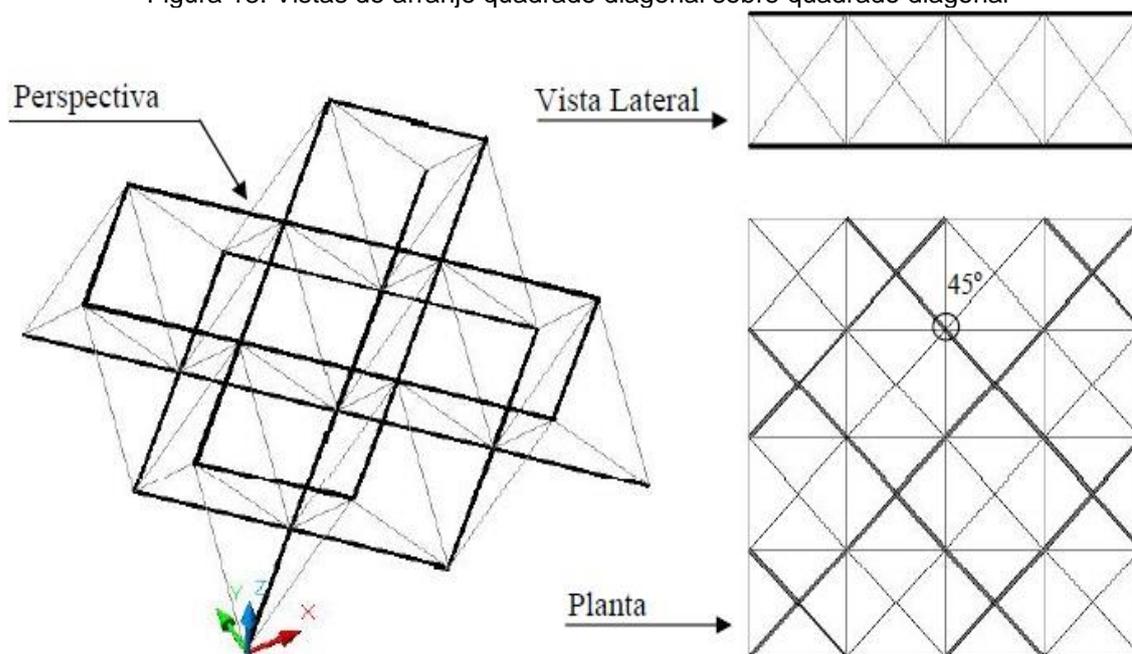


Fonte: FREITAS (2008)

O arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal com defasagem de meio módulo, representando na Figura 13, é uma variação do arranjo anterior, com inclinação dos banzos de 45° . Segundo Shutun (1999), este tipo de disposição de

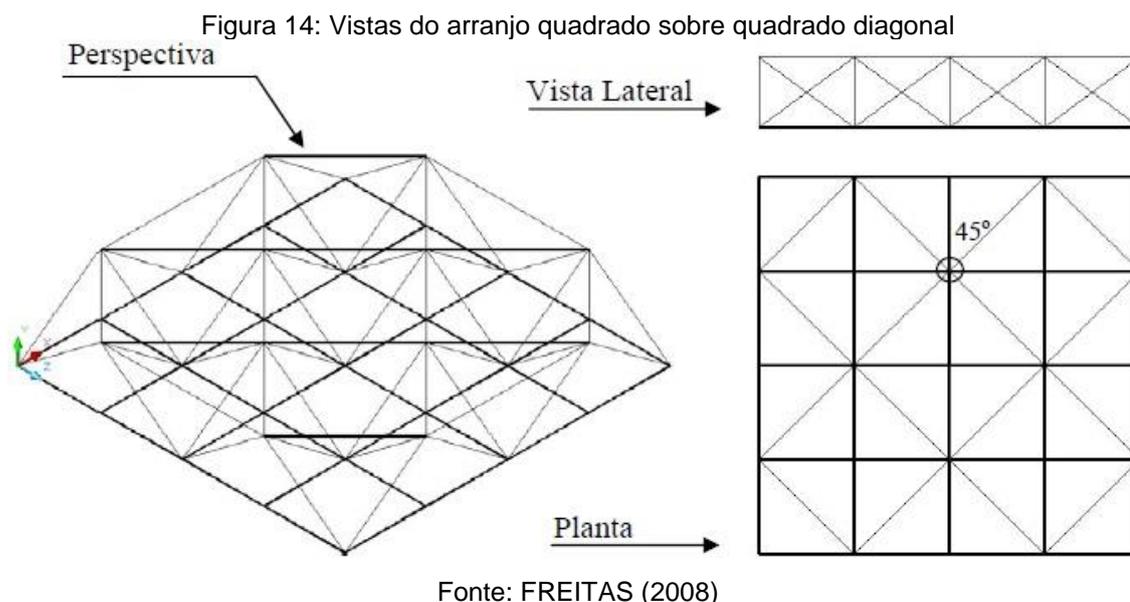
barras apresenta uma melhor distribuição de esforços, diminuindo as deformações e os esforços internos. Uma das desvantagens deste sistema é que o banzo superior em diagonal dificulta o detalhamento de fabricação, e aumenta a dimensão dos elementos da estrutura secundária.

Figura 13: Vistas do arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal



Fonte: FREITAS (2008)

O arranjo quadrado sobre quadrado diagonal, representado na Figura 14, corresponde a uma combinação dos dois tipos anteriores, que tem sido muito utilizada em outros países. Neste arranjo geométrico, as barras do banzo inferior em diagonal apresentam a mesma dimensão da diagonal do quadrado do banzo superior. Este sistema é interessante para situações de sobrecarga elevada, pois o banzo inferior tracionado apresenta dimensões maiores que o banzo superior comprimido, seguindo a recomendação de alguns autores (SOUZA, 2002).



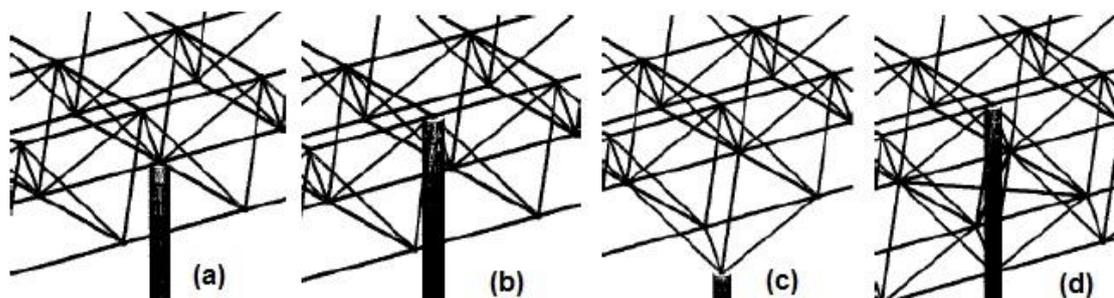
Segundo Lan e Qian (1986), os principais fatores que influenciam no peso e no custo de uma treliça espacial são as dimensões do módulo e a altura da estrutura. Utilizando estes dois fatores como variáveis principais para otimização, eles analisaram diversas treliças com vãos variando de 24 m a 72 m, apoiadas em todo perímetro, e desenvolveram formulações para dimensões do módulo e altura da estrutura em função do vão.

2.3.5 Tipos de Apoio

A quantidade e a disposição dos apoios exercem muita influência no comportamento das treliças espaciais, pois definem os vãos livres e balanços. As restrições impostas, quanto às translações e às rotações, nos pontos de apoio também influenciam no comportamento. Normalmente, os apoios apresentam restrições às translações verticais e horizontais e as restrições podem ser totais ou parciais, que neste caso são substituídas por coeficientes de mola que representam as rigidezes dos pontos de apoio (SOUZA, 2002).

O tipo de apoio, bem como a quantidade e localização dos mesmos são fatores importantes para o sucesso de um projeto de treliça espacial. Existem diversas formas, as mais utilizadas atualmente estão representadas na Figura 15.

Figura 15: Tipos de apoios mais empregados em estruturas espaciais planas - Apoios: (a) no banzo inferior, (b) no banzo superior, (c) tipo “pé-de-galinha” e (d) tipo “engaste”.



Fonte: SOUZA; MALITE (2005).

A definição e as características de cada um dos apoios citados como os mais utilizados atualmente de acordo com Martini (2016) são:

- a) Apoios no banzo inferior: tomam os apoios mais simples; evitam interferências; são mais utilizados;
- b) Apoios no banzo superior: são menos utilizados por haver possibilidade de interferência nas entre as diagonais da treliça e a seção do pilar; são aplicados geralmente quando a locação do pilar coincide com a modulação do banzo superior;
- c) Apoios de tipo “pé de galinha”: ponto de apoio está abaixo do nível do banzo inferior sendo esta ligação feita por meio de diagonais auxiliares; geralmente ocorre em três casos: projeto arquitetônico; diminuição do vão livre entre apoios; falta de coincidência da modulação do banzo inferior com o apoio.
- d) Apoio do tipo “engaste”: as barras se apoiam em mais de um nível do pilar; ocorre com menos frequência por apresentar interferência entre as barras e o pilar; utilizados em treliças com mais de uma camada. (MARTINI, 2016, p. 28)

Segundo Souza (2003) geralmente os apoios são distribuídos no perímetro da estrutura ou somente nos vértices permitindo grandes áreas sem interferência de pilares. A localização dos apoios define a relação de aspecto da estrutura, ou seja, a relação comprimento/largura, que tem grande influência na distribuição de esforços

2.3.6 Princípios de Montagem

De acordo com Magalhães e Malite (1998) existem basicamente três técnicas de montagem para as treliças espaciais. São elas: a montagem por elemento ou

montagem “*in loco*”, a montagem método “*lift-slab*” e a combinação dos métodos anteriores ou mista.

O método de montagem mais simples e que exige menor número de equipamento é a montagem por elementos ou “*in loco*”. Nesta técnica, a estrutura é montada elemento por elemento já em seu local definitivo. Desta forma, pode se montar grandes estruturas dispondo de equipamentos simples como cordas, polias e andaimes para apoio temporário. No entanto, para grandes estruturas, com alturas elevadas, esse método de montagem pode apresentar baixa produtividade, exigindo grande quantidade de elementos de escoramento e, conseqüentemente, aumentando os custos (SOUZA, 2003).

A montagem “*lift-slab*”, representado na Figura 16, é o método indicado para obras que apresentam grandes superfícies concretadas que possibilitam primeiramente montar os elementos da malha no chão e em seguida, com ajuda de máquinas de levantamento, erguê-los até sua posição definitiva (MARTINI, 2016)

Figura 16: Fotos das Etapas do Método “*lift-slab*” - Expominas - Belo Horizonte - MG



Fonte: <http://www.techneaco.com.br>

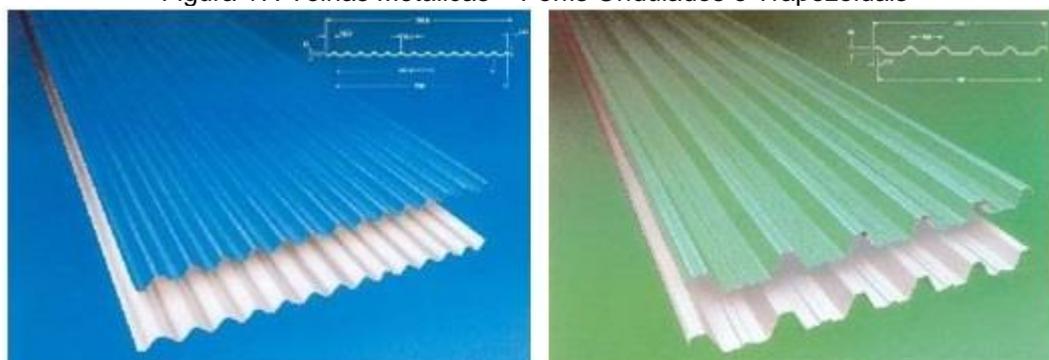
A técnica de combinação dos métodos ou mista é uma combinação dos dois primeiros métodos. Partes da estrutura são montadas sobre o chão e depois, com o auxílio de equipamentos de içamento, elas são unidas ao resto da estrutura (MAGALHAES; MALITE, 1998).

De acordo com Souza (2003) cada técnica de montagem apresenta maior vantagem sobre as outras para determinadas condições. Sem dúvida, a que permite a maior redução no tempo de montagem é a “*lift-slab*”. No entanto, não devem existir obstáculos sobre a superfície na qual a estrutura é montada. Assim, se se deseja utilizar essa técnica em edificações que possuam paredes, estas só poderão ser erguidas após a montagem da cobertura.

2.3.7 Elementos de vedação

Os elementos de vedação, tais como as telhas de cobertura e fechamento, são os responsáveis pelo fechamento externo da treliça espacial. As telhas metálicas, apresentadas na Figura 17, são fabricadas tanto em aço como em alumínio, e apresentam perfis ondulados, com altura de 17mm, ou trapezoidais, com altura variando de 25 a 100mm (SOUZA, 2002).

Figura 17: Telhas Metálicas – Perfis Ondulados e Trapezoidais



Fonte: SOUZA (2002)

A fixação das telhas pode ser rígida, por meio de parafusos e ganchos, ou móvel, por meio de suportes que permitem a movimentação das telhas no seu plano. A fixação por parafusos fornece um certo grau de contraventamento à mesa superior das terças de cobertura, porém apresenta o problema da perfuração das telhas, que compromete a estanqueidade da cobertura. A fixação por suportes móveis, típica dos sistemas de “telhas zipadas”, minora os efeitos de contração e dilatação térmica que as telhas

apresentam, e melhora a estanqueidade da cobertura, pois não são necessárias perfurações nas telhas (SOUZA; MALITE, 2005).

Segundo Martini (2016) algumas estruturas não apresentam estrutura secundária, pois os elementos de vedação são fixados diretamente sobre a estrutura principal (ver figura a seguir). Isso acarreta um descarregamento não só nos nós da treliça, ou seja, mas também ao longo das barras, resultando na redução da resistência das mesmas, pois elas estarão submetidas a esforços normais e de flexão.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

De forma bem simples, pesquisar significa procurar respostas para questões propostas. Demo (1996, p. 34) considera a pesquisa como atividade rotineira, considerando-a uma atitude, um “questionamento sistemático crítico e criativo, mais a intervenção competente na realidade, ou o diálogo crítico permanente com a realidade em sentido teórico e prático”.

Através de uma abordagem mais filosófica, a pesquisa pode ser definida segundo Minayo (1993) como:

Atividade básica das ciências na sua indagação e descoberta da realidade. É uma atitude e uma prática teórica de constante busca que define um processo intrinsecamente inacabado e permanente. É uma atividade de aproximação sucessiva da realidade que nunca se esgota, fazendo uma combinação particular entre teoria e dados (MINAYO, 1993, p.23).

De acordo com Yin (2005), a pesquisa tem um caráter pragmático, é um processo formal e sistemático de desdobramento do método científico, sendo o objetivo fundamental da pesquisa, descobrir respostas para problemas através de inclusão de metodologias científicas.

3.1 Pesquisa quanto aos fins

De acordo com Gil (2008) cada pesquisa social, naturalmente, tem um objetivo específico e com isso é possível agrupar várias pesquisas em certo número de grupos maiores. Ainda segundo o Gil (2008, p.27-28), ele distingue três níveis de pesquisa quanto aos fins, que podem ser:

- **Pesquisa Exploratória:** Esta pesquisa tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas tem como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é,

portanto, bastante flexível de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado;

- **Pesquisa Descritiva:** As pesquisas descritivas tem como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis. São inúmeros os estudos que podem ser classificados sob esse título e uma de suas características mais significativas está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados tais, como o questionário e a observação sistemática;
- **Pesquisa Explicativa:** Essa pesquisa tem como preocupação central identificar os fatores que determinam o que contribuem para ocorrência dos fenômenos. Esse é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explicar razão, o porquê das coisas. Por isso mesmo, é o tipo mais complexo e delicado, já que o risco de cometer erros aumenta consideravelmente.

Diante disso, a pesquisa desse estudo é classificada como exploratória visto que o trabalho aborda as vantagens e desvantagens da utilização de estrutura espacial. Além disso, provê informações desde a sua abordagem histórica até os princípios de montagem da estrutura.

3.2 Tipo de pesquisa quanto aos meios

Com objetivo de organizar as informações com o intuito de responder o problema, a pesquisa quanto aos meios busca apresentar os dados necessários ao desenvolvimento da pesquisa, de acordo com o método selecionado, juntamente com o referencial teórico. Segundo Moresi (2003, p.9-11), as técnicas mais usuais podem ser definidas como:

- **Estudo de Campo:** É o circunscrito a uma ou poucas unidades, entendidas essas como uma pessoa, uma família, um produto, uma empresa, um órgão

público, uma comunidade ou mesmo um país. Tem caráter de profundidade e detalhamento. Pode ou não ser realizado no campo;

- **Pesquisa de Laboratório:** É experiência realizada em local circunscrito, já que no campo seria praticamente impossível realizá-la. Simulações em computador situam-se nesta classificação;
- **Pesquisa Documental:** É a realizada em documentos conservados no interior de órgãos públicos e privados de qualquer natureza, ou com pessoas: registros, anais, regulamentos, circulares, ofícios, memorandos, balancetes, comunicações informais, filmes, microfilmes, fotografias, vídeo-tape, informações em disquete, diários, cartas pessoais a outros;
- **Pesquisa Bibliográfica:** É o estudo sistematizado desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, jornais, redes eletrônicas, isto é, material acessível ao público em geral. Fornece instrumental analítico para qualquer outro tipo de pesquisa, mas também pode esgotar-se em si mesma. O material publicado pode ser fonte primária ou secundária;
- **Pesquisa Experimental:** É investigação empírica na qual o pesquisador manipula e controla variáveis independentes e observa as variações que tal manipulação e controle produzem em variáveis dependentes. Variável é um valor que pode ser dado por quantidade, qualidade, característica, magnitude, variando em cada caso individual;
- **Pesquisa-ação:** É um tipo particular de pesquisa participante que supõe intervenção participativa na realidade social;
- **Pesquisa Estudo de Caso:** É o circunscrito a uma ou poucas unidades, entendidas essas como uma pessoa, uma família, um produto, uma empresa, um órgão público, uma comunidade ou mesmo um país. Tem caráter de profundidade e detalhamento.

Quanto aos meios, este estudo pode ser classificado como uma pesquisa bibliográfica pois é um estudo desenvolvido a partir da análise de materiais já publicados irá buscar em materiais já publicados informações sobre as estruturas espaciais existente a fim de reunir informações que possam embasar nas vantagens de desvantagens de sua implantação.

3.3 Organização em estudo

Para atingir os objetivos específicos deste estudo, foi necessário buscar empresas que prestam serviços de projeto e execução de treliças espaciais que pudessem e aceitassem ajudar com o trabalho. Desta maneira, a empresa LR Engenharia e Empreendimentos Imobiliários Ltda. aceitou contribuir e indicou uma obra que pudesse ser acompanhada.

A LR Engenharia e Empreendimentos Imobiliários Ltda é uma empresa do segmento de construção civil, que iniciou suas atividades em Minas Gerais e que vem se expandindo para vários estados brasileiros, voltada, principalmente, para os setores de logística, indústria e comércio.

O empreendimento a ser estudado é um supermercado em construção, localizado na Avenida Denise Cristina Rocha, 2900, Centro, Ribeirão das Neves, Minas Gerais, CEP:33900-702. Depois de estudos, foi definido a utilização de treliças para esta obra e será feita o acompanhamento e registro da construção.

3.4 Universo e amostra

De acordo com Gil (2008), normalmente as pesquisas englobam um grande universo de elementos que fica difícil considerá-los por completo. O universo ou população é um conjunto definido de elementos que possuem características definidas e a amostra

é um subconjunto nesse universo ou população, que se estabelecem ou se estimam as características desse universo ou população.

Neste trabalho o universo pesquisado são as estruturas espaciais com ênfase nas treliças espaciais com suas vantagens e desvantagens. Através de artigos, publicações e livros que abordam o tema foi possível apresentar a treliça espacial desde a sua abordagem histórica até e suas etapas construtivas.

Segundo Gil (2008), são utilizados diversos tipos de amostragem, que pode ser classificado em dois grandes grupos:

- **Amostragem Probabilística:** Este grupo é rigorosamente científico e se baseiam nas leis estatísticas;
- **Amostragem Não-Probabilística:** não apresentam fundamentação matemática ou estatística, dependendo unicamente de critérios do pesquisador. Claro que os procedimentos deste último tipo são muito mais críticos em relação à validade de seus resultados, todavia apresentam algumas vantagens, sobretudo no que se refere ao custo e ao tempo despendido.

As amostras estudadas através de leitura e compreensão do projeto e visitas ao canteiro de obra para verificação, entendimento e registro são baseadas em conceitos e fundamentos de modo a apresentar as vantagens e desvantagens desse método construtivo. Com isso, a amostra selecionada pode ser classificada como não probabilística, pois dependem unicamente dos parâmetros dos pesquisadores.

3.5 Formas de coleta e análise dos dados

Segundo Gil (2008) no desenvolvimento de pesquisa envolve planejamento, coleta de dados, análise e interpretação e redação do relatório sendo que cada uma etapa pode ser subdividida em outras mais específicas, podendo dar origem aos mais diversos arranjos.

De acordo com Lakatos e Marconi (1991, p. 165), “a fase de coleta dos dados, é tarefa cansativa e toma, quase sempre, mais tempo do que se espera, exigindo do pesquisador paciência, perseverança e esforço pessoal, além do cuidadoso registro dos dados e de um bom preparo anterior.”

A coleta de dados será realizada entre agosto/2020 a março/2021 através de pesquisa bibliográfica em que se utilizou da literatura disponível, tais como livros, artigos acadêmicos, revistas, teses e dissertações que abordam o tema.

Portanto, a coleta de dados ocorreu por meio de informações e pesquisas que tratam sobre o tema em estudo e as conclusões extraídas na pesquisa foram baseadas nos fatos e dados apresentados, atenciosamente examinados e organizados para melhor entendimento das soluções, vantagens e desvantagens da utilização de estruturas espaciais.

3.6 Limitações da pesquisa

Segundo Vergara (2007), todos os métodos de pesquisa têm possibilidades, porém também tem suas limitações. Sendo assim, limitação é tudo aquilo que dificulta ou impede a obtenção total e clara dos resultados.

A primeira limitação encontrada na pesquisa foi o isolamento social enfrentado pela população devido à pandemia causada pelo novo Covid-19 que ocorre desde fevereiro de 2020. Uma série de novos cuidados, impossibilitou encontros presenciais para discussão e análise de dados, visitas a campo para buscar obras em execução.

A segunda limitação está relacionada com a falta de estudos com o mesmo objetivo deste estudo para revisão de literatura e de comparação de resultados com outros estudos realizados. Dificuldade em encontrar livros, teses e artigos na internet já que devido a pandemia do Covid-19 locais como biblioteca eram locais de risco de aglomeração por isso ficou por muito tempo fechado.

A terceira limitação é que por se tratar de uma pesquisa exploratória, por tanto, depende da interpretação do pesquisador com base nas declarações obtidas. Com isso, as interpretações podem sofrer influência dos próprios pesquisadores.

Apesar das limitações, considera-se que estudo realizado apresenta utilidade e representatividade para contribuir com a sociedade que busca compreender melhor e/ou ampliar seus conhecimentos sobre as vantagens e desvantagens do uso de estruturas espacial.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e as discussões desta pesquisa, com o intuito de responder ao objetivo geral inicialmente proposto: Apresentar as vantagens e desvantagens do uso de estruturas espaciais.

Este trabalho foi dividido em três objetivos específicos que, juntos, possibilitam uma análise mais ampla do problema de pesquisa, a fim de chegar à solução do objetivo geral. Para atingir estes objetivos, foram feitas buscas e bibliografias variadas, em vista de apresentar as vantagens e desvantagens das estruturas espaciais, bem como os materiais utilizados e os principais sistemas utilizados atualmente.

4.1 Materiais Utilizados nas Estruturas Espaciais

São diversos os tipos de materiais que podem ser utilizados em treliças espaciais, sendo eles o aço, o alumínio, a madeira e o plástico reforçado. Entretanto, a maior aplicação comercial é realizada com materiais metálicos, mais especificadamente o alumínio e o aço.

De acordo com Souza (2002), o alumínio demonstra determinadas vantagens em relação ao aço, tais como necessidade de manutenção reduzida, pois o material não está sujeito a corrosão tendo maior resistência em ambientes agressivos, como as áreas litorâneas, e baixo peso próprio da estrutura facilita no içamento e na montagem. Porém, segundo Martini (2016), as estruturas em alumínio, apresentada na Figura 18, vem caindo consideravelmente nos últimos anos devido ao seu elevado custo. Além disso, o aço resiste mais ao fogo, escoando a 1.200°C, sendo quase o dobro da resistência do alumínio.

Figura 18: Treliça espacial em perfis de alumínio.



Fonte: <http://www.spcom.eng.br/materiais.htm>.

Devido às suas propriedades, aço é o material mais utilizado e como maior interesse de pesquisas na atualidade. De acordo com Souza (2003), o desenvolvimento de ligas de alta resistência à corrosão impulsionou o uso deste material.

Diversos tipos de perfis podem ser utilizados, dependendo do sistema escolhido e das características da obra, como, por exemplo, a estrutura apresentada na Figura 19.

Figura 19: Treliça espacial em perfis de aço.



Fonte: <http://www.spcom.eng.br/materiais.htm>.

Para obter uma estrutura rígida e pouco deformável, o autor Schimdt (2000) recomenda o uso de aços estruturais dúcteis para construção de estruturas espaciais. Para medida de ductilidade ele adota como parâmetro a razão entre a tensão última e a tensão de escoamento e desejável é que este parâmetro seja da ordem de 1,25 ou superior.

Diferente dos convencionais, outro tipo de material que pode ser usado para treliças espaciais é a madeira. De acordo com Martins (2012), o uso da madeira ainda se encontra em desenvolvimento, embora já existam algumas cúpulas construídas com este material. A principal dificuldade é a transferência de forças nas articulações que unem os diversos membros da estrutura, devido às elevadas forças axiais a que estes estão sujeitos. Por isso, geralmente aplicam-se articulações ou nós metálicos e cada membro individual possui encaixes metálicos nas suas extremidades, com o objetivo de transferir as forças ao longo de um maior comprimento do membro.

Um exemplo de uma estrutura espacial em madeira é a cobertura do Skydome J. Lawrence Walkup, localizado no campus da Universidade do Norte do Arizona como mostra a Figura 20. Esta edificação possui a terceira cúpula de madeira com maior vão livre do mundo, um diâmetro de 153 metros e uma altura de 43 metros medidos desde o nível do piso interior (MARTINS, 2012).

Figura 20: Cúpula do Skydome J. Lawrence Walkup, Arizona.



Fonte: BASTIAN, (2010).

Outro tipo de material que pode ser aplicado em estruturas espaciais que está em desenvolvimento é o plástico reforçado. De acordo com Martins (2012), devido ao

baixo módulo de elasticidade que possuem, os plásticos reforçados são normalmente aplicados como elemento constituinte de treliças espaciais com membranas tracionadas. Sua aplicação possui diversas contingências como, a deterioração devido à exposição solar, fluência devido à natureza viscoelástica dos polímeros e razoável dilatação térmica. Porém, uma vantagem é a criação de uma estrutura com peso reduzido.

No processo de escolha de qual material estrutural utilizar, é de extrema importância compreender as propriedades de cada um como a resistência à tração e/ou compressão e características de plasticidade e elasticidade para, assim definir o melhor material de acordo com a necessidade de cada empreendimento.

4.2 Vantagens de Desvantagens do Uso de Estruturas Espaciais

Cada vez mais, a utilização de estruturas espaciais está se destacando e vem expandindo no mundo todo. O principal motivo do desenvolvimento dessas estruturas se dá pelo aumento considerado de pesquisas, apresentando variados aspectos do seu comportamento e maneiras de aplicação em projetos.

Como toda e qualquer estrutura, cada uma tem suas particularidades bem como suas vantagens e desvantagens. As estruturas espaciais apresentam uma série de vantagens em relação a estruturas convencionais. De acordo com Silva (1999) a principal vantagem é no sistema de padronização que a estrutura proporciona, pois são peças pré-fabricadas, vem com todas as dimensões detalhadas em projeto, fazendo com que toda a estrutura apresente uma padronização.

Uma vantagem muito importante, principalmente nos tempos atuais onde buscamos mais sustentabilidade, a estrutura espacial é um método construtivo a seco, ou seja, utiliza uma menor quantidade de água, reduz a emissão de poluição, execução durará menos tempo, gerando economia de luz, água e resíduos no canteiro de obras. Se o material utilizado for o aço, é um material 100% reciclável.

De acordo com Makowski (1981), uma outra vantagem é o comportamento tridimensional que permite uma distribuição de esforços homogêneo entre as barras que constituem a estrutura, deixando as estruturas padronizadas e baixo peso próprio da estrutura.

No quadro 1 a seguir é possível verificar algumas outras vantagens da utilização de estruturas espaciais em relação as estruturas convencionais, separadas por suas diversas propriedades e características afim de demonstrar com clareza dos benefícios.

Quadro 1: Vantagens das estruturas espaciais.

Vantagens	
Propriedades	Características
Padronização	Peças pré-fabricadas, totalmente de acordo com as dimensões detalhadas em projeto.
Adaptação	Adaptação a diversos tipos de projetos.
Peso Próprio Reduzido	Devido às pequenas espessuras das barras.
Sustentabilidade	Método construtivo a seco, ou seja, utiliza uma menor quantidade de água, reduz a emissão de poluição, economia de luz, água e resíduos no canteiro de obras.
Versatilidade	Permite que vãos mais amplos sejam construídos, sem a interrupção de pilares ou vigas.
Rapidez	Peças pré-fabricadas, já com as especificações e dimensões necessárias, pronta para montagem.
Redundância e Rigidez	Possui grau elevado de hiperestaticidade, o que permite resistir a determinados danos que possam ocorrer num número limitado dos seus elementos sem que se observe o colapso global da estrutura.
Facilidade de Montagem	Por ser tratar de componentes com pequenas dimensões, já pré-fabricadas.
Possibilidade de Desmontagem	No caso de estruturas não permanentes.

Fonte: Adaptado de Avila (2020), Tonon; Fioriti (2012) e Makowski (1981)

Além disso, também é necessário analisar critérios negativos desses sistemas construtivos, como por exemplo, os custos mais elevados devido a necessidade de

mão de obra especializada, possível dificuldades com logística e aumento de custo. No quadro 2, verifica-se as desvantagens.

Quadro 2: Desvantagens das estruturas espaciais.

Desvantagens	
Propriedades	Características
Mão-de-obra	Exige mão de obra especializada evitar falhas e danos com o passar do tempo.
Custo	Devido a necessidade de mão de obra especializada, custos com transporte e dependendo do material o custo pode aumentar também.
Vulnerabilidade contra intempéries	Possibilidade do aço acabar sendo distorcido no caso de fenômenos da natureza
Corrosão do material	Caso não tenha revestimentos e tratamentos adequados, pode sofrer corrosão com o passar do tempo.
Maior controle de incêndio	No caso do aço é um material suscetível à propagação de chamas durante um incêndio.
Transporte	Pode gerar maior custo dependendo da logística

Fonte: Adaptado de Avila (2020) e Martins (2012)

Dessa forma, apesar de tantos argumentos favoráveis, entende-se que para o bom funcionamento das estruturas espaciais, é necessário tomar medidas e cuidados, tanto na qualidade do material a ser utilizado, quanto na mão de obra escolhida, analisar a viabilidade e custo benefício dos métodos existentes afins de evitar sérios problemas na estrutura.

4.3 Principais Sistemas de Estruturas Espaciais

Para um sistema estrutural espacial ter eficiência, depende do tipo de nó de ligação utilizado para unir as barras. Segundo Porto (2011), a estrutura deve apresentar uma resistência suficiente que permita a transmissão dos esforços, ser indeformável sob o esforço de cargas estáticas e dinâmicas e deve assegurar a simplicidade de fabricação, a facilidade e a rapidez de montagem.

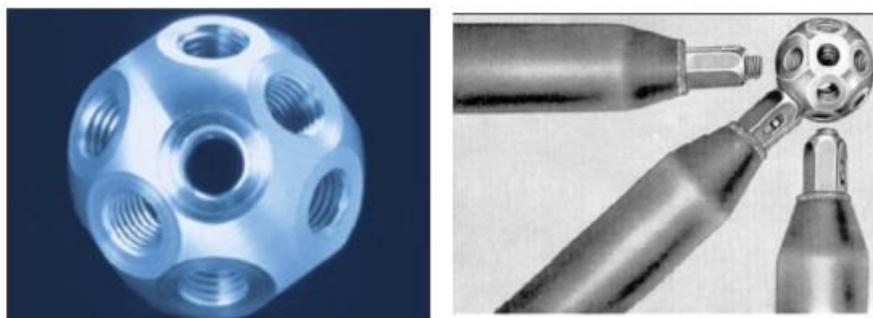
Deste modo, de acordo com Rosa (2001), pode-se dizer que o sucesso comercial de uma estrutura dependerá do seu grau de padronização e das vantagens que o sistema for capaz de oferecer quanto ao seu desempenho estrutural, conciliado a otimização do processo de montagem.

Vários tipos de nós foram apresentados, porém, muitos não manifestaram resultados satisfatórios aos problemas dos esforços solicitantes e outros eram muito complexos e inviáveis financeiramente. Conforme Porto (2016), os principais sistemas com boas características comerciais são: sistema Mero (1942), sistema Space Deck (1954), sistema Triodetic (1955) e o sistema Unistrut (1955).

O Sistema Mero foi desenvolvido na Alemanha em 1942, pelo Engenheiro Max Mengerlinghausen e uma equipe de colaboradores. É o primeiro sistema estrutural espacial com fabricação industrial, em série e até hoje é o mais conhecido e comercializado mundialmente (ROSA, 2001)

De acordo com Júnior (2008), o elemento fundamental do sistema está até hoje na sua forma original, sem alterações: constitui do nó em uma esfera em aço com 18 furos para serem aparafusados conforme Figura 21. É um sistema leve e quase todo pré-fabricado. Esta esfera, trespassada de furos rosqueado nas três direções do espaço pode receber o mesmo número de barras sem nenhuma excentricidade.

Figura 21: Sistema Mero.

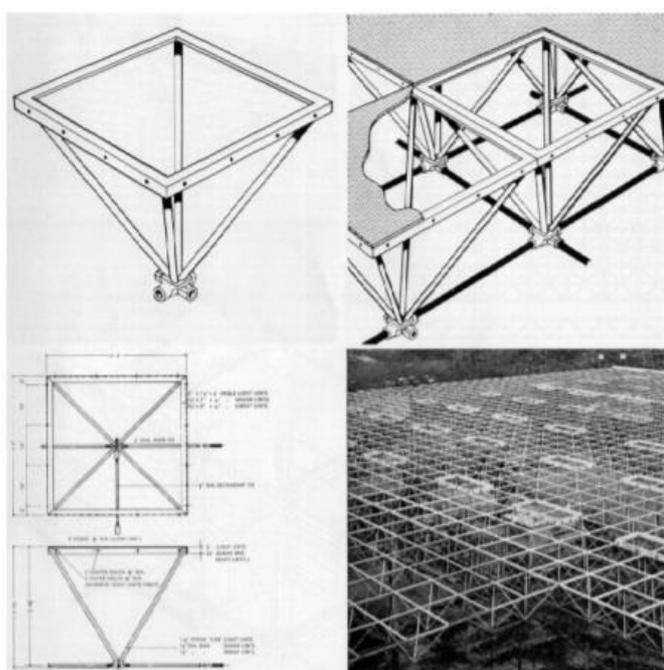


Fonte: JUNIOR (2008).

O Sistema Space Deck, foi desenvolvido na Inglaterra em 1954, consiste na repetição de módulos piramidais em aço, formando uma grelha autossustentável. Até então, já sofreu alguns aperfeiçoamentos, indicando vantagens como, grande solidez, leveza, adaptabilidade, facilidade de transporte, facilidade de armazenamento e rapidez de montagem. (PORTO, 2011)

Segundo Rosa (2001), os módulos tem formato semi-octaedros, um do lado do outro e com a base quadrada voltada para cima, conforme Figura 22. As diagonais em perfis ocos, soldadas aos vértices da base e a um vértice especial e fazer as ligações parafusadas.

Figura 22: Sistema Space Deck.



Fonte: JUNIOR, (2008).

O Sistema Triodetic, foi desenvolvido no Canadá em 1955, por Fentiman. De acordo com Rosa (2001) este sistema possui uma característica particular: não aplica parafusos ou solda para unir as barras de seção oca cilíndrica aos nós de ligação.

Segundo Junior (2008) este sistema utiliza como elemento de base um perfil oco circular, em alumínio, de dimensões variáveis, conforme Figura 23. São barras afuniladas na extremidade, seccionadas segundo um ângulo adequado e introduzidas por pressão nas fendas dentadas do nó. A ligação é feita por pressão, sem solda nem parafuso.

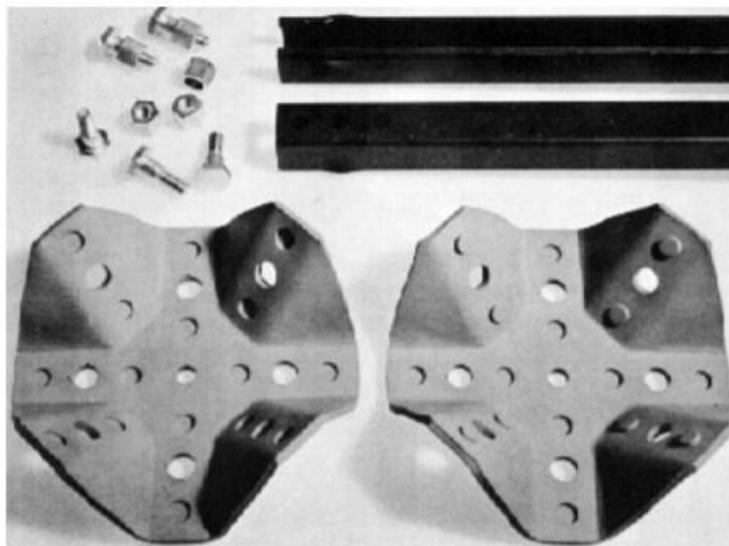
Figura 23: Sistema Triodetic.



Fonte: PORTO, (2011).

O Sistema Unistrut foi desenvolvido pelo americano F. Attwood por volta de 1955, a partir da ideia de que quanto maior for a padronização mais econômica será a estrutura, ele desenvolveu um sistema baseado em barras de mesmo comprimento e seção e um único tipo de nó, conforme Figura 24 (PORTO, 2011).

Figura 24: Sistema Unistrut.



Fonte: ROSA, (2001).

De acordo com Júnior (2008), o sistema consiste de placas prensadas de forma particular. As barras são todas de mesmo comprimento e seção, conectadas aos nós por um único parafuso em cada extremidade. Todos os elementos são fabricados com ajuda de gabaritos especiais.

Esses quatro sistemas apresentados são os principais métodos de estruturas espaciais no mercado atualmente. É importante ressaltar que cada uma tem suas propriedades e singularidades e é imprescindível que seja feito um estudo de viabilidade durante a elaboração do projeto para garantir a eficiência do sistema no empreendimento.

No Quadro 3, é possível observar um resumo dos sistemas apresentados, com seus respectivos países de origem, o ano do desenvolvimento e das primeiras aplicações de cada método, os materiais os quais podem ser utilizados em casa sistema e as características das ligações nos nós.

Quadro 3: Resumo das principais características dos diferentes sistemas espaciais

Nome do Sistema	País de Origem	Ano de Desenvolvimento e Primeiras Utilizações	Materiais que Podem Ser Utilizados	Características das ligações nos nós
Mero	Alemanha	1940-1950	Alumínio e Aço	As extremidades das barras em forma de cone ou de pirâmide truncada são ligadas ao nó (esfera) por um parafuso axial rosqueado.
Space Deck	Grã-Bretanha	1950-1960	Aço	Alinhamento de pirâmides soldadas, a ponta para baixo. Os quadrados da camada superior são unidos por parafusos, os cabos da camada inferior são ligados a ponta da pirâmide através de juntas macho-fêmea.
Triodetic	Canadá	1950-1960	Alumínio e Aço	As extremidades das barras, achatadas e dentadas, são introduzidas por pressão nas fendas correspondentes de um nó cilíndrico.
Unistrut	Estados Unidos	1950-1960	Aço	Dispositivo de ligação em tela dobrada, perfurada para o aparafusamento das barras.

Fonte: Adaptado de Rosa (2001)

Pode-se observar, analisando o Quadro 4, as características construtivas dos quatro principais sistemas espaciais em malhas já citados, de acordo com a constituição da estrutura, o domínio de utilização e a ligação das barras entre si e aos nós.

Quadro 4: Características Construtivas e Domínio de Utilização dos Diferentes Sistemas Espaciais

Características Construtivas e Domínio de Utilização dos Diferentes Sistemas					
Propriedades	Características	Mero	Space Deck	Triodetic	Unistrut
Constituição da Estrutura	Nós e barras separadas	x		x	x
	Elementos espaciais geralmente em forma de semi-octaedros. Barras separadas para ligar as pontas das pirâmides.		x		
Domínio de Utilização	Estruturas planas, grelhas	x	x	x	x
	Estruturas simples ou dupla curvatura	x		x	
	Estrutura temporária, por exemplo: andaimes	x			
Ligação das barras entre si e aos nós	Solda	x	x		
	Aparafusamento Axial	x	x		
	Encaixe das ranhuras			x	
	Aparafusamento com encaixe				x

Fonte: Adaptado de Rosa (2001)

Além desses mais usuais e patenteados, segundo Souza e Gonçalves (2007) existem ainda muitos outros sistemas de ligação, patenteados ou não, para estruturas espaciais, porém, a maioria deles é de uso restrito e regional sem grandes êxitos comerciais. A seleção de um determinado sistema precisa ser idealizada de forma extremamente cautelosa, garantindo a eficiência e segurança no empreendimento.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos dados levantados durante a pesquisa, pode-se concluir que os resultados obtidos foram satisfatórios para alcançar o objetivo geral proposto, apresentando as vantagens e desvantagens das estruturas espaciais, um sistema que vem sendo muito utilizado devido aos diversos benefícios que proporciona.

Na atualidade, o uso dessas estruturas espaciais está se consolidando e vem crescendo em todo o mundo. Um elemento importante no crescimento e desenvolvimento das estruturas espaciais foi o grande número de pesquisas, abordando diversos aspectos do seu comportamento e projeto.

Considerando os resultados encontrados neste estudo, percebe-se que as estruturas espaciais possuem diversos métodos conhecidos e usuais e muitos outros já descobertos, mas pouco usado devido algumas dificuldades. Além disso, é significativo frisar a importância de conhecer bem os sistemas, quais as suas características para saber escolher qual deles tem maior eficiência no empreendimento a ser executado.

A eficiência das estruturas espaciais é determinada pela correta escolha de alguns parâmetros e características que provém principalmente da sua geometria. Para se definir o sistema de ligação a ser utilizado, deve-se analisar os vãos, a magnitude dos carregamentos e esforços nas barras, facilidade de fabricação e montagem e, finalmente os custos envolvidos.

Existem oportunidades para o desenvolvimento de trabalhos futuros que podem ser sugeridos a partir deste estudo, tais como explorar outros sistemas com intuito de comparação e abrir mais o leque de opções levando em consideração outras características e materiais, apresentar soluções inovadoras para atender as diferentes necessidades de aplicação de maneira otimizada, segura, sustentável e de custo baixo.

REFERÊNCIAS

AGERSKOV, H. **Optimum geometry design of double-layer space structure.** Journal of Structural Engineering, v. 112, n.6, 1986.

APRILE, A.; BENEDETTI, A. **Sulla progettazione ottimale di strutture reticilari spaziali in alluminio.** Costruzione Metalliche, n.1: Milão, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2008.

AVILA, M. A. **Tudo sobre Estruturas Metálicas – Vantagens e Desvantagens.** Revista Total Construção: São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://www.totalconstrucao.com.br/estruturas-metalicas/>>. Acesso em: 02 abr. 2021.

BASTIAN, N. **Deportes & Conciertos Universitarios.** Cityseeker: Arizona, 2010. Disponível em: < <https://cityseeker.com/es/flagstaff/321429-j-lawrence-walkup-skydome>>. Acesso em: 14 out. 2020

CODD, E.T.; ARCH, B.; FRAIA; AIDA. **Low technology space frames.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES, 3: Guildford, 1984, Elsevier Applied Science.

CUENCAS, L.S. **The stainless steel structures of a sport stadium in quart.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES: Londres, 2002.

DEMO, P. **Avaliação qualitativa.** Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1996.

DU CHATEAU, S. **Structures spatiales.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES: Guildford, 1984. Elsevier Applied Science.

EL-SHEIKH, A.I.; EL-BAKRY, H. **Experimental study of behavior of new space truss system.** Journal of the Structural Engineering, v.122, n. 8: Reston, 1996.

ENGEL, H. **Sistemas de Estruturas.** Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A., 2001.

FERNANDES, L. M.; SILVA, P. O.; DIACENCO, A. A. **Métodos dos Elementos Finitos Aplicado á Barras e Treliças.** Revista Científica FEPI: Belo Horizonte, 2015.

FREITAS, C. A. S. F. **Análise teórico-experimental da conexão estampada de treliça espacial de aço sob carregamentos estáticos e cíclico,** Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental: Brasília, 2008.

GARCIA, V. A. F. **Análise de Treliça Espacial Constituída de Material Hiperelástico.** Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás: Goiânia, 2018.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, M. I. S. **Estudo e Análise de Treliças**. Instituto Politécnico de Lisboa, Área Departamental de Engenharia Civil: Lisboa, 2016.

GUESSI, D. E. **Instruções normativas para elaboração de projetos estruturais em concreto armado estruturas metálicas ou estrutura em madeira**. IFSC: Blumenau, 2010.

JUNIOR, A. S. M. **Monta Desmonta Remonta, Significado dos Sistemas de Montagem**. USP: São Paulo, 2008.

KRAUSE, J. Q. **Desenvolvimento de Elementos Especiais de Bambu para Treliças Espaciais**. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio: Rio de Janeiro, 2009.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

LAN, T.T.; QIAN, R. **A study on the optimum design of space trusses – optimal geometrical configuration and selection of type**. In: IASS SYMPOSIUM ON SHELLS, MEMBRANES AND SPACE FRAMES, Osaka, 1986.

MAGALHAES, J. R. M.; MALITE, M. **Treliças metálicas espaciais: alguns aspectos relativos ao projeto e à construção**. Caderno de Engenharia de Estruturas da USP: São Carlos, 1998.

MAIOLA, C. H. **Análise teórica experimental de treliças metálicas espaciais constituídas por barras com extremidades estampadas**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: São Carlos, 1999

MAIOLA, C. H.; MALITE, M. **Análise teórica experimental de treliças metálicas espaciais constituídas por barras com extremidades estampadas**. Departamento de Engenharia de Estruturas da USP: São Carlos, 2002

MAKOWSKI, Z.S. **A worldwide review of space structures in sports buildings**. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPACE STRUCTURES FOR SPORTS BUILDINGS: Beijing, 1987. Elsevier Applied Publishers.

MAKOWSKI, Z. S. **Review of Development of Various Types of Double Grids**. In: Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids: London, 1981 Applied Science Publishers.

MAKOWSKI, Z.S. **Space structures - a review of the developments within the last decade**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES: Guildford, 1993.

MARTINI, R. J. **Estrutura de cobertura metálica em malha treliçada espacial**. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Estruturas: Belo Horizonte, 2016.

MARTINS, R. A. L. **Biomimética no projecto de estruturas espaciais**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Perfil Estruturas e Geotecnia: Lisboa, 2012.

MELO, P. R. **Pré-Dimensionamento de Estruturas de Madeira, de Aço e de Concreto para Auxílio a Concepção de Projetos Arquitetônicos**. FECIF: Uberlândia, 2013.

MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento**. São Paulo. Hucitec, 1993.

MORESI, Eduardo. **Metodologia da pesquisa**. Programa de pós-graduação stricto sensu em gestão do conhecimento e tecnologia da informação. UCB – Brasília, 2003.

NÓBREGA, P. G. B. **Estrutura 2 - O Projeto Estrutural**. USP: São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/362289806/ProfPetrus-Proj-Estrut>>. Acesso em: 03 out. 2020.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático segundo a NBR 8800:2008**. LTC: Rio de Janeiro, 2009.

PORTO, C. E. **Tipologias Arquitetônicas de Estruturas Espaciais em Brasília**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UnB: Brasília, 2016.

PORTO, C. E. **Estruturas Espaciais**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UnB: Brasília, 2011. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/mackenzista2/estruturas-espaciais>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

QUEIROZ, G. **Elementos das estruturas de aço**. 2. ed. Imprensa Universitária: Belo Horizonte, 1988.

ROSA, Y. R. S. **Comportamento de Estruturas Espaciais Metálicas com Nós de Ligação do Tipo Ponta Amassada**. Departamento de Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2001.

SAMPAIO, T. S.; GONÇALVES, R. M. **Análise numérica, via MEF, de ligações em treliças metálicas espaciais**. Cadernos de Engenharia de Estruturas: São Carlos. 2007.

SCHMIDT, L.C. **Some design aspects peculiar to space trusses**. International Journal of Space Structures, v.15, 2000.

SCHMIDT, R. J.; BORESI, A. P. **Estática**. Cengage Learning: Boston, 2003.

SHUTUN, L. **Design and construction of 306m span hangar roof at Capital Airport**. International Journal of Space Structures, v.14, n.3, 1999.

SILVA, K.C. **Análise Teórico-Experimental de Barras Comprimidas em Estruturas Metálicas Espaciais** Dissertação de Mestrado - UFOP: Ouro Preto, 1999.

SOUZA, A. N. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: São Carlos, 2002.

SOUZA, A.S.C; GONÇALVES, R.M. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais**. Cadernos de engenharia de estruturas: São Carlos, 2006.

SOUZA, A. S. C. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais**. Tese de Doutorado apresentada a Escola de São Carlos – USP: São Carlos, 2003.

SOUZA, A. N.; MALITE, M. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas**. Cadernos de Engenharia de Estruturas Vol. 7: São Carlos, 2005.

TONON, B. F.; FIORITI, C. F. **Análise dos sistemas estruturais presentes no centro de convivência infantil da Unesp de Presidente Prudente**. Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão: Presidente Prudente, 2012

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 10ª ed. São Paulo: Atlas, 2007.

YIN, R. K. **Estudo de caso planejamento e método**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ESTRUTURAS ESPACIAIS: VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS ESTRUTURAS ESPACIAIS

Breendhowm Wallcker Oliveira de Assis¹

Bruno Oliveira Soares²

Diego Henrique Oliveira Machado³

Diego de Jesus Queiroz Rosa⁴

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal um estudo sobre as estruturas espaciais abordando aspectos importantes como a abordagem histórica, noções de projetos, tipos e relação dos elementos, vantagens e desvantagens das estruturas espaciais, materiais empregados, as principais estruturas utilizadas e relação de características de cada uma. Este trabalho adota como metodologia de pesquisa a revisão bibliográfica, reunindo os principais conceitos e conhecimentos abordados nas literaturas que servem como fundamento para o tema desta pesquisa, a fim de trazer informações relevantes para os setores econômico, social, acadêmico e ambiental, bem como uma melhor compreensão do assunto. A pesquisa apresenta os resultados de expor os materiais utilizados nas estruturas espaciais, as vantagens e desvantagens do seu uso e apresentação dos principais sistemas utilizados.

Palavras-chave: Estruturas Espaciais. Estruturas Tridimensionais. Sistemas estruturais.

Correspondência/Contato

Faculdade de Engenharia de Minas Gerais

FEAMIG

Rua Gastão Braulio dos Santos, 837

CEP 30510-120

Fone (31) 3372-3703

paramétrica@feamig.br

<http://www.feamig.br/revista>

Editores responsáveis

Wilson José Vieira da Costa

wilsoncosta@feamig.br

Raquel Ferreira de Souza

raquel.ferreira@feamig.br

1 Graduando em Engenharia Civil – FEAMIG.

2 Graduando em Engenharia Civil – FEAMIG.

3 Graduando em Engenharia Civil – FEAMIG.

4 Engenheiro Civil; Mestre em Processos Construtivos; Docente da FEMIG; Orientador

1 INTRODUÇÃO

Em função do crescimento acelerado da população, surge algumas necessidades como a de se ter estruturas que possam acomodar grande quantidade de pessoas ou de proteger elementos de maior porte fazendo com que acontecesse a evolução das tecnologias construtivas com o passar dos anos.

Com a popularização do uso do aço e do ferro como materiais construtivos durante a Revolução Industrial, foi que começou a tornar-se possível a elaboração de estruturas mais extensas e que fossem eficientes a ponto de atender as necessidades das edificações que precisassem atingir grandes vãos livres.

A construção de edificações que requerem grandes vãos livres com menores quantidades de pilares internos possíveis, tem crescido de forma significativa. As estruturas metálicas e a regulamentação dos materiais empregados são importantes para a execução dessas estruturas de grande porte. Ademais, reduz expressivamente o tempo de execução e o custo global da obra.

As treliças metálicas têm grande aplicação na engenharia estrutural e vêm como progresso tecnológico de benfeitorias em estruturas com cobertura de grandes vãos abertos, corrigindo assim problemas de espaços, de manejo de grandes estruturas, peças ou grandes objetos dentro de fábricas, galpões dentre outras estruturas.

Hoje em dia, os sistemas em treliças espaciais de dimensões e complexidade cada vez maiores são usados numa grande variedade de realizações práticas na engenharia e possuem vantagens em relação a outros sistemas como baixo peso, grande rigidez, entre outros fatores. Entretanto, ainda existe uma grande dificuldade de utilização do sistema de ligação entre barras.

Contudo, a pesquisa pretende apresentar as estruturas treliçadas espaciais bem como as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Seguindo essa linha almeja-se demonstrar a grande importância das treliças nas estruturas através de análises, estudos, cálculos e viabilidade do seu uso.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Histórico das Estruturas Espaciais

O termo “estrutura espacial” é utilizado para denominar um sistema estrutural em que não há subsistemas de planos definidos. A expressão estrutura espacial é aplicada para diversas funções, onde envolve as estruturas reticuladas que são compostas por elementos de barra, estruturas contínuas, formada por placas, membranas ou cascas, e estruturas mistas, elaborada pela associação de elementos discretos e contínuos (MAKOWSKI, 1987).

Segundo Du Chateau (1984) os principais tipos de estruturas espaciais reticuladas são as treliças espaciais planas, os arcos treliçados espaciais e as cúpulas treliçadas espaciais. Estas estruturas surgiram por volta do século XVIII, porém, em 1907, Alexander Graham Bell desenvolveu um reticulado espacial constituído de barras de igual comprimento, conectadas por nós simples, idênticos para toda a estrutura.

Alexander Graham Bell foi o primeiro engenheiro a mostrar como este sistema é simples e fácil de montar, resultando uma estrutura leve e com grande resistência e chamou a atenção para a economia que poderia advir da industrialização e pré-fabricação deste sistema (MAKOWSKI, 1981).

Depois de algumas décadas desde a primeira estrutura espacial construída por Alexander Graham Bell, tem-se observado um crescente interesse por esta forma de construção, com aplicação em grandes coberturas de estádios, espaços públicos, hangares, coberturas de piscinas, ginásios de esportes, e muitas outras construções; entretanto, no geral, a existência das treliças espaciais no mercado de estruturas de grandes coberturas não vem sendo significativamente expressiva, e o número de suas aplicações é relativamente pequeno e não reflete seus importantes méritos construtivos (EL-SHEIKH; EL-BAKRY, 1996).

2.2 Tipos de Estruturas Espaciais

A expressão estrutura espacial se aplica a uma ampla categoria no setor das construções. De acordo com Makowski (1987), um dos maiores teóricos de estruturas espaciais, essas estruturas são classificadas em três tipos: estruturas em malhas (treliça espacial), estruturas suspensas de toda natureza (coberturas sobre cabos) e estruturas em membranas metálicas.

De acordo com Silva (1999) as estruturas espaciais são:

Aquelas compostas de malhas planas ou curvas, tridimensionais, interligadas por elementos estruturais chamados barras ou membros, conectados entre si por intermédio de peças ou dispositivos especiais, chamados juntas ou nós. Geralmente, são formadas por duas malhas, uma inferior, chamada também banzo inferior, outra superior, denominada banzo superior, malhas estas que geralmente são interligadas em suas juntas por diagonais, que formam assim um conjunto de tetraedros ou pirâmides, regulares ou não, resultando o que é chamado de malha espacial (SILVA, 1999, p. 01).

Segundo Porto (2016) as estruturas em malhas (treliça espacial) são constituídas por uma série de barras unidas entre si por nós. As malhas podem ser o produto de muitos corpos geométricos ou da repetição de um entre eles (cúpulas em malhas, abóbadas de berço em malhas, grelhas de duas camadas);

As estruturas suspensas de toda natureza, consideradas as coberturas sobre cabos, são definidas pelo sistema de cabos que mantém a cobertura, com ou sem bordas de apoio. Nas estruturas que são suspensas, a distribuição das solicitações internas é caracterizada pela eliminação da flexão, a construção sobre cabos trabalhando unicamente à tração (MAKOWSKI, 1987).

Já as estruturas em membranas metálicas de acordo com Porto (2016), são as quais os elementos de cobertura participam na resistência dos esforços solicitantes como, por exemplo, as construções em membranas e as construções plissadas.

Por causa do seu comportamento tridimensional, as estruturas espaciais têm como principal vantagem uma boa redistribuição de esforços, ou seja, quando a estrutura é solicitada por uma carga concentrada ou móvel, existe uma veloz dispersão por todos os elementos próximos do seu ponto de ação, reduzindo os esforços no elemento diretamente carregado. Esta característica também pode reduzir o custo das estruturas de suporte, pois como a carga é distribuída por vários elementos, os apoios estruturais serão sujeitos a esforços menores (MARTINS, 2012).

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Materiais Utilizados nas Estruturas Espaciais

São diversos os tipos de materiais que podem ser utilizados em estruturas espaciais, sendo eles o aço, o alumínio, a madeira e o plástico reforçado. Entretanto, a maior aplicação comercial é realizada com materiais metálicos, mais especificadamente o alumínio e o aço.

De acordo com Souza (2002), o alumínio demonstra determinadas vantagens em relação ao aço, tais como necessidade de manutenção reduzida, pois o material

não está sujeito a corrosão tendo maior resistência em ambientes agressivos, como as áreas litorâneas, e baixo peso próprio da estrutura facilita no içamento e na montagem. Porém, segundo Martini (2016), as estruturas em alumínio, apresentada na Figura 1, vem caindo consideravelmente nos últimos anos devido ao seu elevado custo. Além disso, o aço resiste mais ao fogo, escoando a 1.200°C , sendo quase o dobro da resistência do alumínio.

Figura 1: Treliça espacial em perfis de alumínio.



Fonte: <http://www.spcom.eng.br/materiais.htm>.

Devido às suas propriedades, aço é o material mais utilizado e como maior interesse de pesquisas na atualidade. De acordo com Souza (2003), o desenvolvimento de ligas de alta resistência à corrosão impulsionou o uso deste material.

Diversos tipos de perfis podem ser utilizados, dependendo do sistema escolhido e das características da obra, como, por exemplo, a estrutura apresentada na Figura 2.

Figura 2: Treliça espacial em perfis de aço.



Fonte: <http://www.spcom.eng.br/materiais.htm>.

Para obter uma estrutura rígida e pouco deformável, o autor Schimdt (2000) recomenda o uso de aços estruturais dúcteis para construção de estruturas espaciais. Para medida de ductilidade ele adota como parâmetro a razão entre a tensão última e a

tensão de escoamento e desejável é que este parâmetro seja da ordem de 1,25 ou superior.

Diferente dos convencionais, outro tipo de material que pode ser usado para treliças espaciais é a madeira. De acordo com Martins (2012), o uso da madeira ainda se encontra em desenvolvimento, embora já existam algumas cúpulas construídas com este material. A principal dificuldade é a transferência de forças nas articulações que unem os diversos membros da estrutura, devido às elevadas forças axiais a que estes estão sujeitos. Por isso, geralmente aplicam-se articulações ou nós metálicos e cada membro individual possui encaixes metálicos nas suas extremidades, com o objetivo de transferir as forças ao longo de um maior comprimento do membro.

Um exemplo de uma estrutura espacial em madeira é a cobertura do Skydome J. Lawrence Walkup, localizado no campus da Universidade do Norte do Arizona como mostra a Figura 3. Esta edificação possui a terceira cúpula de madeira com maior vão livre do mundo, um diâmetro de 153 metros e uma altura de 43 metros medidos desde o nível do piso interior (MARTINS, 2012).

Figura 3: Cúpula do Skydome J. Lawrence Walkup, Arizona.



Fonte: Bastian, (2010).

Outro tipo de material que pode ser aplicado em estruturas espaciais que está em desenvolvimento é o plástico reforçado. De acordo com Martins (2012), devido ao baixo módulo de elasticidade que possuem, os plásticos reforçados são normalmente aplicados como elemento constituinte de treliças espaciais com membranas tracionadas. Sua aplicação possui diversas contingências como, a deterioração devido à exposição solar, fluência devido à natureza viscoelástica dos polímeros e razoável

dilatação térmica. Porém, uma vantagem é a criação de uma estrutura com peso reduzido.

No processo de escolha de qual material estrutural utilizar, é de extrema importância compreender as propriedades de cada um como a resistência à tração e/ou compressão e características de plasticidade e elasticidade para, assim definir o melhor material de acordo com a necessidade de cada empreendimento.

3.2 Vantagens de Desvantagens do Uso de Estruturas Espaciais

Cada vez mais, a utilização de estruturas espaciais está se destacando e vem expandindo no mundo todo. O principal motivo do desenvolvimento dessas estruturas se dá pelo aumento considerado de pesquisas, apresentando variados aspectos do seu comportamento e maneiras de aplicação em projetos.

Como toda e qualquer estrutura, cada uma tem suas particularidades bem como suas vantagens e desvantagens. As estruturas espaciais apresentam uma série de vantagens em relação a estruturas convencionais. De acordo com Silva (1999) a principal vantagem é no sistema de padronização que a estrutura proporciona, pois são peças pré-fabricadas, vem com todas as dimensões detalhadas em projeto, fazendo com que toda a estrutura apresente uma padronização.

Uma vantagem muito importante, principalmente nos tempos atuais onde buscamos mais sustentabilidade, a estrutura espacial é um método construtivo a seco, ou seja, utiliza uma menor quantidade de água, reduz a emissão de poluição, execução durará menos tempo, gerando economia de luz, água e resíduos no canteiro de obras. Se o material utilizado for o aço, é um material 100% reciclável.

De acordo com Makowski (1981), uma outra vantagem é o comportamento tridimensional que permite uma distribuição de esforços homogêneo entre as barras que constituem a estrutura, deixando as estruturas padronizadas e baixo peso próprio da estrutura.

No Quadro 1 a seguir é possível verificar algumas outras vantagens da utilização de estruturas espaciais em relação as estruturas convencionais, separadas por suas diversas propriedades e características afim de demonstrar com clareza dos benefícios.

Quadro 1: Vantagens das estruturas espaciais.

Vantagens	
Propriedades	Características
Padronização	Peças pré-fabricadas, totalmente de acordo com as dimensões detalhadas em projeto.
Adaptação	Adaptação a diversos tipos de projetos.
Peso Próprio Reduzido	Devido às pequenas espessuras das barras.
Sustentabilidade	Método construtivo a seco, ou seja, utiliza uma menor quantidade de água, reduz a emissão de poluição, economia de luz, água e resíduos no canteiro de obras.
Versatilidade	Permite que vãos mais amplos sejam construídos, sem a interrupção de pilares ou vigas.
Rapidez	Peças pré-fabricadas, já com as especificações e dimensões necessárias, pronta para montagem.
Redundância e Rigidez	Possui grau elevado de hiperestaticidade, o que permite resistir a determinados danos que possam ocorrer num número limitado dos seus elementos sem que se observe o colapso global da estrutura.
Facilidade de Montagem	Por ser tratar de componentes com pequenas dimensões, já pré-fabricadas.
Possibilidade de Desmontagem	No caso de estruturas não permanentes.

Fonte: Adaptado de Avila (2020), Tonon; Fioriti (2012) e Makowski (1981)

Além disso, também é necessário analisar critérios negativos desses sistemas construtivos, como por exemplo, os custos mais elevados devido a necessidade de mão de obra especializada, possível dificuldades com logística e aumento de custo. No Quadro 2, verifica-se as desvantagens.

Quadro 2: Desvantagens das estruturas espaciais.

Desvantagens	
Propriedades	Características
Mão-de-obra	Exige mão de obra especializada evitar falhas e danos com o passar do tempo.
Custo	Devido a necessidade de mão de obra especializada, custos com transporte e dependendo do material o custo pode aumentar também.
Vulnerabilidade contra intempéries	Possibilidade do aço acabar sendo distorcido no caso de fenômenos da natureza
Corrosão do material	Caso não tenha revestimentos e tratamentos adequados, pode sofrer corrosão com o passar do tempo.
Maior controle de incêndio	No caso do aço é um material suscetível à propagação de chamas durante um incêndio.
Transporte	Pode gerar maior custo dependendo da logística

Fonte: Adaptado de Avila (2020) e Martins (2012)

Dessa forma, apesar de tantos argumentos favoráveis, entende-se que para o bom funcionamento das estruturas espaciais, é necessário tomar medidas e cuidados, tanto na qualidade do material a ser utilizado, quanto na mão de obra escolhida, analisar a viabilidade e custo benefício dos métodos existentes afins de evitar sérios problemas na estrutura.

3.3 Principais Sistemas de Estruturas Espaciais

Para um sistema estrutural espacial ter eficiência, depende do tipo de nó de ligação utilizado para unir as barras. Segundo Porto (2011), a estrutura deve apresentar uma resistência suficiente que permita a transmissão dos esforços, ser indeformável sob o esforço de cargas estáticas e dinâmicas e deve assegurar a simplicidade de fabricação, a facilidade e a rapidez de montagem.

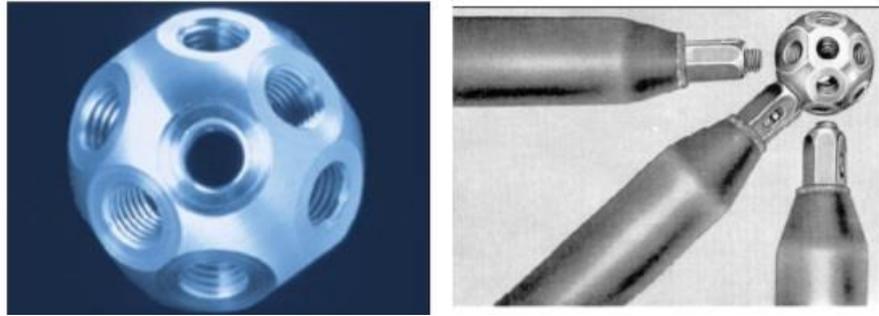
Deste modo, de acordo com Rosa (2001), pode-se dizer que o sucesso comercial de uma estrutura dependerá do seu grau de padronização e das vantagens que o sistema for capaz de oferecer quanto ao seu desempenho estrutural, conciliado a otimização do processo de montagem.

Vários tipos de nós foram apresentados, porém, muitos não manifestaram resultados satisfatórios aos problemas dos esforços solicitantes e outros eram muito complexos e inviáveis financeiramente. Conforme Porto (2016), os principais sistemas com boas características comerciais são: sistema Mero, sistema Space Deck, sistema Triodetic e o sistema Unistrut.

O Sistema Mero foi desenvolvido na Alemanha em 1942, pelo Engenheiro Max Mengerlinghausen e uma equipe de colaboradores. É o primeiro sistema estrutural espacial com fabricação industrial, em série e até hoje é o mais conhecido e comercializado mundialmente (ROSA, 2001)

De acordo com Júnior (2008), o elemento fundamental do sistema está até hoje na sua forma original, sem alterações: constitui do nó em uma esfera em aço com 18 furos para serem aparafusados conforme Figura 4. É um sistema leve e quase todo pré-fabricado. Esta esfera, trespassada de furos rosqueado nas três direções do espaço pode receber o mesmo número de barras sem nenhuma excentricidade.

Figura 4: Sistema Mero.

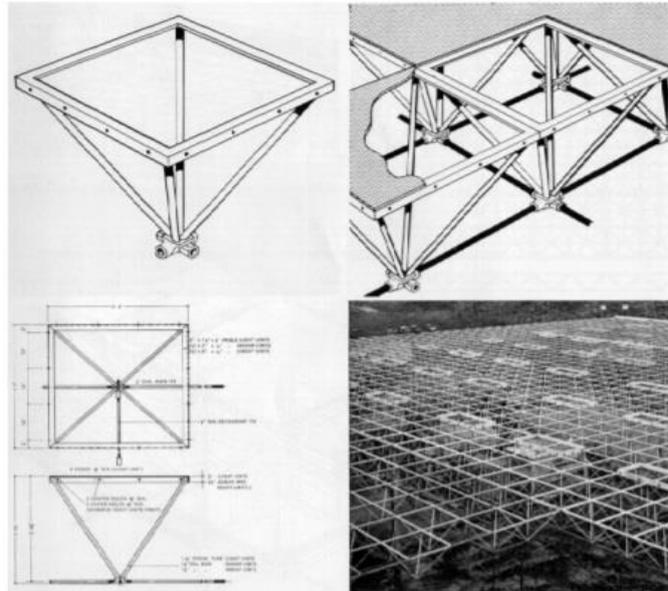


Fonte: Junior (2008).

O Sistema Space Deck, foi desenvolvido na Inglaterra em 1954, consiste na repetição de módulos piramidais em aço, formando uma grelha autossustentável. Até então, já sofreu alguns aperfeiçoamentos, indicando vantagens como, grande solidez, leveza, adaptabilidade, facilidade de transporte, facilidade de armazenamento e rapidez de montagem. (PORTO, 2011).

Segundo Rosa (2001) os módulos tem formato semi-octaedros, um do lado do outro e com a base quadrada voltada para cima, conforme Figura 5. As diagonais em perfis ocos, soldadas aos vértices da base e a um vértice especial e fazer as ligações parafusadas.

Figura 5: Sistema Space Deck.



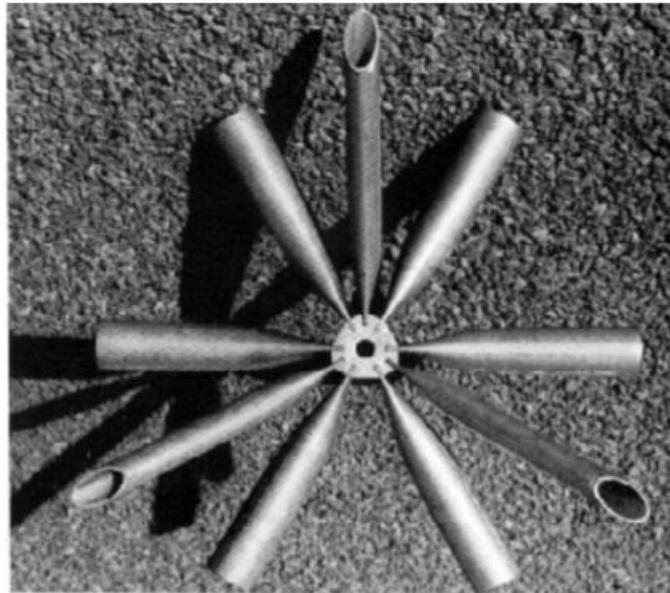
Fonte: Junior, (2008).

O Sistema Triodetic, foi desenvolvido no Canadá em 1955, por Fentiman. De acordo com Rosa (2001) este sistema possui uma característica particular: não aplica parafusos ou solda para unir as barras de seção oca cilíndrica aos nós de ligação.

Segundo Junior (2008) este sistema utiliza como elemento de base um perfil oco circular, em alumínio, de dimensões variáveis, conforme Figura 6. São barras

afuniladas na extremidade, seccionadas segundo um angulo adequado e introduzidas por pressão nas fendas dentadas do nó. A ligação é feita por pressão, sem solda nem parafuso.

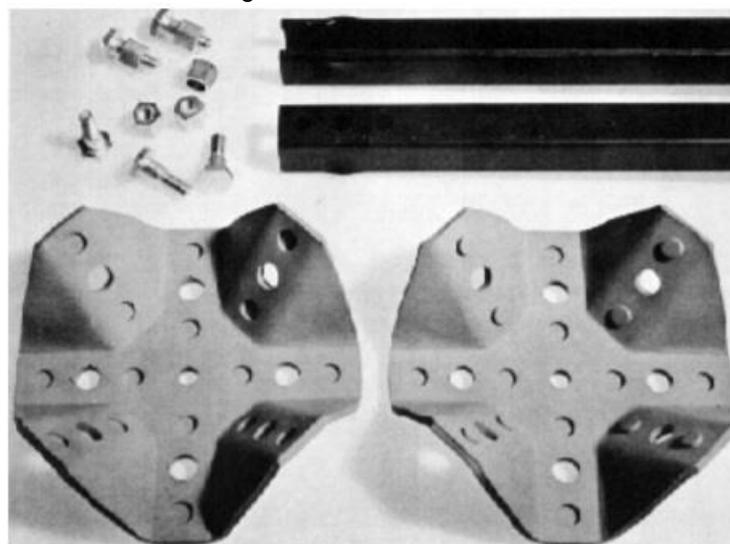
Figura 6: Sistema Triodetic.



Fonte: Porto, (2011).

O Sistema Unistrut foi desenvolvido pelo americano F. Attwood por volta de 1955, a partir da ideia de que quanto maior for a padronização mais econômica será a estrutura, ele desenvolveu um sistema baseado em barras de mesmo comprimento e seção e um único tipo de nó, conforme Figura 7 (PORTO, 2011).

Figura 7: Sistema Unistrut.



Fonte: Rosa, (2001).

De acordo com Júnior (2008), o sistema consiste de placas prensadas de forma particular. As barras são todas de mesmo comprimento e seção, conectadas

aos nós por um único parafuso em cada extremidade. Todos os elementos são fabricados com ajuda de gabaritos especiais.

Estes quatro sistemas apresentados são os principais métodos de estruturas espaciais no mercado atualmente. É importante ressaltar que cada uma tem suas propriedades e singularidades e é imprescindível que seja feito um estudo de viabilidade durante a elaboração do projeto para garantir a eficiência do sistema no empreendimento.

No Quadro 3, é possível observar um resumo dos sistemas apresentados, com seus respectivos países de origem, o ano do desenvolvimento e das primeiras aplicações de cada método, os materiais os quais podem ser utilizados em casa sistema e as características das ligações nos nós.

Quadro 3: Resumo das principais características dos diferentes sistemas espaciais

Nome do Sistema	País de Origem	Ano de Desenvolvimento e Primeiras Utilizações	Materiais que Podem Ser Utilizados	Características das ligações nos nós
Mero	Alemanha	1940-1950	Alumínio e Aço	As extremidades das barras em forma de cone ou de pirâmide truncada são ligadas ao nó (esfera) por um parafuso axial rosqueado.
Space Deck	Grã-Bretanha	1950-1960	Aço	Alinhamento de pirâmides soldadas, a ponta para baixo. Os quadrados da camada superior são unidos por parafusos, os cabos da camada inferior são ligados a ponta da pirâmide através de juntas macho-fêmea.
Triodetic	Canadá	1950-1960	Alumínio e Aço	As extremidades das barras, achatadas e dentadas, são introduzidas por pressão nas fendas correspondentes de um nó cilíndrico.
Unistrut	Estados Unidos	1950-1960	Aço	Dispositivo de ligação em tela dobrada, perfurada para o aparafusamento das barras.

Fonte: Adaptado de Rosa (2001)

Pode-se observar e analisar no Quadro 4, as características construtivas dos quatro principais sistemas espaciais em malhas já citados, de acordo com a constituição da estrutura, o domínio de utilização e a ligação das barras entre si e aos nós.

Quadro 4: Características Construtivas e Domínio de Utilização dos Diferentes Sistemas Espaciais

Características Construtivas e Domínio de Utilização dos Diferentes Sistemas					
Propriedades	Características	Mero	Space Deck	Triodetic	Unistrut
Constituição da Estrutura	Nós e barras separadas	x		x	x
	Elementos espaciais geralmente em forma de semi-octaedros. Barras separadas para ligar as pontas das pirâmides.		x		
Domínio de Utilização	Estruturas planas, grelhas	x	x	x	x
	Estruturas simples ou dupla curvatura	x		x	
	Estrutura temporária, por exemplo: andaimes	x			
Ligação das barras entre si e aos nós	Solda	x	x		
	Aparafusamento Axial	x	x		
	Encaixe das ranhuras			x	
	Aparafusamento com encaixe				x

Fonte: Adaptado de Rosa (2001)

Além desses mais usuais e patenteados, segundo Souza e Gonçalves (2007) existem ainda muitos outros sistemas de ligação, patenteados ou não, para estruturas espaciais, porém, a maioria deles é de uso restrito e regional sem grandes êxitos comerciais. A seleção de um determinado sistema precisa ser idealizada de forma extremamente cautelosa, garantindo a eficiência e segurança no empreendimento.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos dados levantados durante a pesquisa, pode-se concluir que os resultados obtidos foram satisfatórios para alcançar o objetivo geral proposto, apresentando as vantagens e desvantagens das estruturas espaciais, um sistema que vem sendo muito utilizado devido aos diversos benefícios que proporciona.

Na atualidade, o uso dessas estruturas espaciais está se consolidando e vem crescendo em todo o mundo. Um elemento importante no crescimento e desenvolvimento das estruturas espaciais foi o grande número de pesquisas, abordando diversos aspectos do seu comportamento e projeto.

Considerando os resultados encontrados neste estudo, percebe-se que as estruturas espaciais possuem diversos métodos conhecidos e usuais e muitos outros já descobertos, mas pouco usado devido algumas dificuldades. Além disso, é significativo frisar a importância de conhecer bem os sistemas, quais as suas características para saber escolher qual deles tem maior eficiência no empreendimento a ser executado.

A eficiência das estruturas espaciais é determinada pela correta escolha de alguns parâmetros e características que provém principalmente da sua geometria. Para se definir o sistema de ligação a ser utilizado, deve-se analisar os vãos, a magnitude dos carregamentos e esforços nas barras, facilidade de fabricação e montagem e, finalmente os custos envolvidos.

5 REFERÊNCIAS

AVILA, M. A. **Tudo sobre Estruturas Metálicas – Vantagens e Desvantagens**. Revista Total Construção: São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://www.totalconstrucao.com.br/estruturas-metalicas/>>. Acesso em: 02 abr. 2021.

BASTIAN, N. **Deportes & Concieros Universitarios**. Cityseeker: Arizona, 2010. Disponível em: < <https://cityseeker.com/es/flagstaff/321429-j-lawrence-walkup-skydome>>. Acesso em: 14 out. 2020

DU CHATEAU, S. **Structures spatiales**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES: Guildford, 1984. Elsevier Applied Science.

EL-SHEIKH, A.I.; EL-BAKRY, H. **Experimental study of behavior of new space truss system**. Journal of the Structural Engineering, v.122, n. 8: Reston, 1996.

JUNIOR, A. S. M. **Monta Desmonta Remonta, Significado dos Sistemas de Montagem**. USP: São Paulo, 2008.

MAKOWSKI, Z.S. **A worldwide review of space structures in sports buildings**. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPACE STRUCTURES FOR SPORTS BUILDINGS: Beijing, 1987. Elsevier Applied Publishers.

MAKOWSKI, Z. S. **Review of Development of Various Types of Double Grids**. In: Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids: London, 1981 Applied Science Publishers.

MARTINI, R. J. **Estrutura de cobertura metálica em malha treliçada espacial**. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Estruturas: Belo Horizonte, 2016.

MARTINS, R. A. L. **Biomimética no projecto de estruturas espaciais**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Perfil Estruturas e Geotecnia: Lisboa, 2012.

PORTO, C. E. **Tipologias Arquitetônicas de Estruturas Espaciais em Brasília.** Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UnB: Brasília, 2016.

PORTO, C. E. **Estruturas Espaciais.** Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UnB: Brasília, 2011. Disponível em: < <https://pt.slideshare.net/mackenzista2/estruturas-espaciais>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

ROSA, Y. R. S. **Comportamento de Estruturas Espaciais Metálicas com Nós de Ligação do Tipo Ponta Amassada.** Departamento de Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2001.

SILVA, K.C. **Análise Teórico-Experimental de Barras Comprimidas em Estruturas Metálicas Espaciais** Dissertação de Mestrado - UFOP: Ouro Preto, 1999.

SOUZA, A. N. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas.** Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: São Carlos, 2002.

SOUZA, A.S.C; GONÇALVES, R.M. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais.** Cadernos de engenharia de estruturas: São Carlos, 2006.

SOUZA, A. S. C. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais.** Tese de Doutorado apresentada a Escola de São Carlos – USP: São Carlos, 2003.

TONON, B. F.; FIORITI, C. F. **Análise dos sistemas estruturais presentes no centro de convivência infantil da Unesp de Presidente Prudente.** Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão: Presidente Prudente, 2012