

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GIOVANNI HENRIQUE SILVA DAS NEVES

**ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE MELHORIA DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DE UMA CESTA DE BASQUETE SEM ELEVAR SEU
CUSTO**

SÃO CARLOS
2024

GIOVANNI HENRIQUE SILVA DAS NEVES

**ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE MELHORIA DA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DE UMA CESTA DE BASQUETE SEM ELEVAR SEU
CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Mariano Eduardo Moreno

SÃO CARLOS
2024



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 37/2024/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

GIOVANNI HENRIQUE SILVA DAS NEVES

ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE MELHORIA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UMA CESTA DE BASQUETE SEM ELEVAR SEU CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 18 de setembro de 2024

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Mariano Eduardo Moreno
Membro da Banca 1	Alexandre Tácito Malavolta
Membro da Banca 2	João Gustavo Pereira da Silva



Documento assinado eletronicamente por **Mariano Eduardo Moreno, Docente**, em 18/09/2024, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Gustavo Pereira da Silva, Docente**, em 18/09/2024, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Tacito Malavolta, Docente**, em 18/09/2024, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1583401** e o código CRC **2FAC04D7**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.028238/2024-13

SEI nº 1583401

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Criado por 709935, versão 2 por 709935 em 16/09/2024 10:44:48.

À minha mãe, irmão e namorada, os três pilares que me mantiveram de pé nos tempos em que não pude fazê-lo sozinho.

Insanity is doing the same thing over and over again but expecting different results.

Albert Einstein.

RESUMO

O basquete vem se popularizando muito ao longo dos anos, e com isso pessoas de diversas classes sociais são introduzidas nesta atividade. No entanto, para a prática desse esporte faz-se necessária, além da bola, uma tabela e um aro, sendo que os modelos mais acessíveis destes produtos no mercado são muitas vezes frágeis e quebram facilmente ao longo do tempo. Para democratizar mais a prática desse esporte, o desenvolvimento de cestas acessíveis e de boa qualidade é de suma importância. Neste projeto, portanto, serão analisados os esforços solicitantes que ocorrem nos principais elementos de uma cesta de basquete devido ao constante impacto da bola com o aro. Desse modo, será estudada a viabilidade de substituição dos materiais que compõem o produto, da geometria das peças e/ou da maneira como o conjunto é montado, a fim de aumentar a resistência mecânica da cesta. A análise se realizará, a princípio, por meio do entendimento da dinâmica do arremesso da bola, para cálculo da força de impacto no aro. Posteriormente, o método dos elementos finitos será aplicado em um modelo mecânico da cesta, de modo a obter os esforços internos dos elementos devido ao choque. As simulações serão realizadas considerando os materiais e modelos de montagem mais comuns no mercado, e depois comparadas com construções alternativas. Decorrerá disso o desenvolvimento de uma análise crítica em cima das comparações, determinando, por fim, se existe alguma alternativa às cestas de basquete atuais que possua maior resistência mecânica sem deixar de ser acessível.

Palavras-chave: Resistência mecânica, Cesta, Aro, Basquete, Fadiga, Fratura, Elementos finitos, Redução de custos.

ABSTRACT

Basketball is becoming very popular in Brazil, which makes people from different social classes to start practising the sport. However, to play basketball, it is needed, despite the ball, a hoop to throw the ball in, and the problem is that the most financially accessible products are fragile and can break easily after some time of playing. In order to democratize the practice of basketball, the developing of good and cheap hoops is extremely important. Therefore, in this project, the loads and stresses caused on the main parts of the rim by the constant impacts of the ball will be analysed. Thus, it will be studied the viability of replacing materials from the hoop, changing its parts geometry or the way it is assembled in order to improve the mechanical strength of the hoop. The study will begin with the understanding of the basketball shooting dynamics, so it will be possible to calculate the force of the impact. Subsequently, the Finite Element Method will be applied in a model created for this process in order to obtain the mechanical stresses generated in the rim due to the shock. The simulations will be made considering the most common models and materials found on the market, which will then be compared with alternative assemblies. The results found in the simulation will enable a critical analysis of the comparisons, ultimately determining if there is an alternative solution for the assembly of the cheapest hoops that presents more durability while remaining accessible.

Keywords: Mechanical resistance, Hoop, Rim, Basketball, Fatigue, Fracture, Finite Element, Cost reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formato comum de uma cesta de basquete	12
Figura 2 – Forças em uma bola de basquete que está caindo e girando.	15
Figura 3 – Movimento oblíquo de uma partícula.	16
Figura 4 – As camadas que compõem uma bola de basquete comum.	17
Figura 5 – Bola de basquete oficial da NBA.	18
Figura 6 – Tensão (σ) x deformação (ϵ).	19
Figura 7 – Força e Tensão normal em uma barra.	20
Figura 8 – Força e Tensão de cisalhamento em um elemento.	21
Figura 9 – Tensão aplicada x número máximo de ciclos até a ruptura.	22
Figura 10 – Distribuição de tensões próximas a um concentrador de tensão.	23
Figura 11 – Análise via MEF da deformação de um aro de basquete após impacto da bola.	24
Figura 12 – Ponto de impacto da bola com o aro.	27
Figura 13 – Percurso da bola arremessada em direção à cesta.	28
Figura 14 – Tabela modelo do mercado.	31
Figura 15 – Vista de perfil da cesta.	32
Figura 16 – Vista lateral da cesta.	32
Figura 17 – Vista frontal da cesta	33
Figura 18 – Vista superior da cesta.	33
Figura 19 – Propriedades do aço estrutural.	34
Figura 20 – Definição do material da cesta na modelagem.	34
Figura 21 – Primeira tentativa de malha.	35
Figura 22 – Fixação do aro.	36
Figura 23 – Força aplicada no aro.	36
Figura 24 – Configuração da análise estática.	37
Figura 25 – Nivelado x Não nivelado.	37
Figura 26 – Diferença nodal.	38
Figura 27 – Vista de perfil da cesta (aro definido como viga).	39
Figura 28 – Segunda tentativa de malha.	39
Figura 29 – Nivelado x Não nivelado (2ª iteração).	40
Figura 30 – Diferença nodal (2ª iteração).	40
Figura 31 – Pontos com alta concentração de tensão.	41
Figura 32 – Nova condição de fixação da cesta (1).	41
Figura 33 – Nova condição de fixação da cesta (2).	42
Figura 34 – Pontos de solda criados.	42
Figura 35 – Nivelado x Não nivelado (3).	43

Figura 36 – Diferença nodal (3).	43
Figura 37 – Configuração da análise modal.	44
Figura 38 – Primeiro modo de vibração da cesta.	45
Figura 39 – Tabela de taxas de massa efetiva.	45
Figura 40 – Configuração da análise transiente modal.	46
Figura 41 – Tradução da força dinâmica de impacto da bola no aro.	46
Figura 42 – Estabilização do sistema (gráfico de deformação).	47
Figura 43 – Configuração da análise de fadiga.	48
Figura 44 – Vibração do aro após impacto da bola (transiente modal).	49
Figura 45 – Vibração do aro após impacto da bola (transiente completa).	50
Figura 46 – Tensão máxima equivalente: Modal x Completa.	50
Figura 47 – Tensão direta equivalente: Modal x Completa.	51
Figura 48 – Tensão alternada equivalente: Modal x Completa.	51
Figura 49 – Falha por máxima tensão equivalente: Modal x Completa.	52
Figura 50 – Falha por fadiga na teoria de Gerber: Modal x Completa.	52

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	11
1.2 Estrutura do Texto	12
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Física da Bola	14
2.1.1 Dinâmica	14
2.1.2 Força de Colisão	16
2.1.3 Material	17
2.2 Mecânica dos Sólidos para a Cesta de Basquete	18
2.2.1 Tensão nos elementos de uma estrutura	20
2.2.2 Fadiga - carregamentos repetidos	21
2.2.3 Concentradores de tensão e ponto crítico	22
2.3 Modelagem e Simulação com Métodos dos Elementos Finitos	23
3 – DESENVOLVIMENTO	26
3.1 Obtenção da Condições de Contorno	26
3.1.1 Força de impacto da bola no aro	26
3.1.2 Tabela de Basquete	31
3.2 Modelagem	33
3.2.1 Análise Estática e Refinamento de Malha	34
3.2.1.1 Primeira iteração	35
3.2.1.2 Segunda iteração	38
3.2.1.3 Terceira iteração	41
3.2.2 Análise Dinâmica	43
3.2.2.1 Modal e Transiente por Superposição Modal	43
3.2.2.2 Transiente Completa	46
4 – RESULTADOS	49
5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O esporte provê, em qualquer sociedade, inclusão social, entretenimento, benefícios à saúde e diversos outros desdobramentos positivos. Segundo Santos (1997, p.157),

A importância do esporte pode ser demonstrada de diversas formas, como, por exemplo, a preocupação dos governos em tornar o esporte obrigatório onde quer que a sua ação se faça sentir, principalmente no ensino, desde a primeira infância até os cursos universitários; [...] a acirrada disputa entre os países para sediar eventos esportivos de alcance internacional; e o esforço de muitos países em disseminar novas modalidades esportivas.

A realização de esportes desperta no indivíduo o senso de disciplina, trabalho coletivo e respeito às regras, contribuindo beneficentemente na formação do caráter. Portanto, faz-se de extrema importância democratizar o acesso à sua prática, seja por meio de iniciativas privadas ou governamentais, pois possibilita o enriquecimento de uma comunidade na esfera social e até econômica.

Evidenciada essa importância, é interessante analisar a situação do Brasil relativamente às possibilidades de se praticar um esporte popular. Depois do futebol, o basquete é um dos mais conhecidos e apreciados no país, mas sua prática exige a tabela. Este utensílio, no entanto, pode ter um custo elevado e, além disso, muitas vezes possui baixa resistência mecânica. Neste contexto, as quadras de basquete de domínio público podem frequentemente ser encontradas com suas tabelas quebradas, e o custo para se ter uma na própria casa é pouco acessível.

As principais características que as tabelas de basquete devem possuir para serem comercializáveis são: rigidez do sistema no contato da bola com o aro, resistência aos efeitos degradantes do ambiente externo, segurança para evitar acidentes e ter preço acessível (BURKHALTER, 2020). Nesse contexto, o desenvolvimento de um novo modelo construtivo para tabelas de basquete deve ser realizado centrando-se nas qualidades citadas, para que seja possível obter uma cesta de alto padrão que possa competir no mercado.

O presente projeto será realizado a partir de algumas simplificações, levando em conta os casos mais comuns e mais críticos de impacto no aro, e a partir disso estudados os efeitos relativos à fadiga no conjunto como um todo. De maneira geral, o sistema será composto por dois elementos principais, que serão a tabela e o aro, como pode ser observado na Figura 1.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o comportamento mecânico de uma cesta de basquete devido ao constante impacto da bola com o aro, gerando uma base comparativa entre os produtos mais comuns do mercado e alternativas mais inovadoras.

Figura 1 – Formato comum de uma cesta de basquete



Fonte: <https://www.walmart.com/ip/NBA-Official-54-In-Wall-Mounted-Basketball-Hoop-with-Polycarbonate-Backboard/483274161>. Acesso em: 18/04/2024.

Para que esse objetivo seja atingido os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Estudar a dinâmica do arremesso da bola para cálculo da força de impacto no aro;
- Determinar materiais e modelo construtivo que representem fielmente as cestas de basquete de menor preço mais comuns do mercado;
- Realizar uma análise com o método de elementos finitos no conjunto dos elementos que compõem a cesta, determinando seus esforços solicitantes;
- Comparar os resultados obtidos a partir da simulação com as cestas mais comuns e com as alternativas, inovando em material e modelo construtivo;
- Verificar se há uma alternativa às cestas mais acessíveis que são vendidas atualmente no mercado e que possibilite aumento da resistência mecânica destes produtos, sem elevação significativa do custo.

1.2 Estrutura do Texto

Esta monografia está organizada da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que define o comportamento dinâmico e cinemático da bola de basquete no arremesso, além dos esforços internos gerados no aro a partir do impacto entre a bola e o aro e conceitos da análise de elementos

finitos;

- O capítulo 3 descreve a o modelo proposto para esse trabalho e os métodos de simulação e otimização implementados;
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões relacionadas;
- O capítulo 5 contém as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para realizar a otimização da resistência à fadiga de uma cesta de basquete, é necessário compreender os conceitos de mecânica dos sólidos por trás da fratura de um objeto. Somado a isso, deve-se internalizar os fundamentos que compõem uma simulação utilizando o Método dos Elementos Finitos, levando em conta resistência dos materiais, pontos críticos do equipamento e as condições de contorno do evento. Desse modo, serão apresentados nesse capítulo os principais conceitos e considerações que foram utilizados no desenvolvimento do trabalho, incluindo conceitos de dinâmica, cinemática, simulação MEF e mecânica dos sólidos.

2.1 Física da Bola

Esta seção será dedicada ao estudo dos fundamentos físicos diretamente relacionados à bola de basquete. Para realizar uma simulação de elementos finitos que seja representativa para a situação estudada, faz-se necessário a utilização de dados de entrada bem estabelecidos, isto é, entender e calcular a maneira com que a bola bate no aro conforme os arremessos acontecem. Para tal, serão imprescindíveis os conceitos de dinâmica para cálculo da velocidade e angulação no momento do contato da bola com o aro da cesta. Além disso, conhecimentos de ciência dos materiais serão fundamentais para a simulação, visto que a bola é de borracha e seu interior é preenchido por ar a uma pressão que permite considerável deformação elástica no impacto, e isso deverá ser levado em consideração nas simulações.

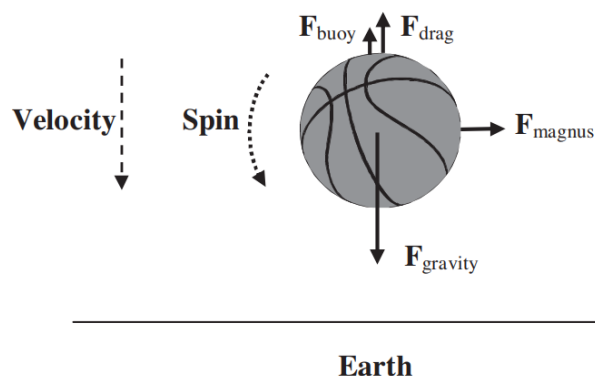
2.1.1 Dinâmica

Uma bola de basquete que é arremessada sofre, durante sua movimentação, efeito de 4 principais forças sobre ela: gravidade, empuxo, resistência do ar e efeito magnus (FONTANELLA, 2006). A Figura 2 representa a organização dessas forças, sendo a origem da seta o local onde as forças estão sendo aplicadas no objeto.

Avaliando estas diferentes forças, Fontanella (2006) deixa claro, por meio do comprimento das setas na Figura 2, que algumas exercem efeitos menos significativos que outras no percurso percorrido pela bola de basquete após o arremesso.

Para determinar a trajetória precisa no arremesso da bola, é importante levar em conta a ação de todas essas forças. Para o caso estudado no presente trabalho, entretanto, precisa-se de valores aproximados da velocidade de contato da bola com o aro, bem como do ângulo de contato. Neste contexto, o cálculo de trajetória considerando apenas a força da gravidade será suficientemente aproximado, logo será utilizada esta hipótese simplificadora.

Figura 2 – Forças em uma bola de basquete que está caindo e girando.



Fonte: Fontanella (2006)

Resnick (2012) explica que uma partícula que executa um movimento oblíquo após ser arremessada pode ser descrita separando-se a análise no eixo horizontal do eixo vertical. Ou seja, uma equação representa o deslocamento da bola no eixo x (horizontal), e a outra no eixo y (vertical). Estas são, respectivamente, as Equações 1 e 2 abaixo:

$$x = x_0 + (v_0 \cdot \cos \theta_0)t \quad (1)$$

$$y = y_0 + (v_0 \cdot \sin \theta_0)t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2)$$

Nas quais,

x : posição horizontal temporal da partícula;

x_0 : posição horizontal inicial da partícula;

v_0 : velocidade inicial da partícula;

θ_0 : ângulo de lançamento da partícula;

y : posição vertical temporal da partícula;

y_0 : posição vertical inicial da partícula;

t : tempo;

g : gravidade.

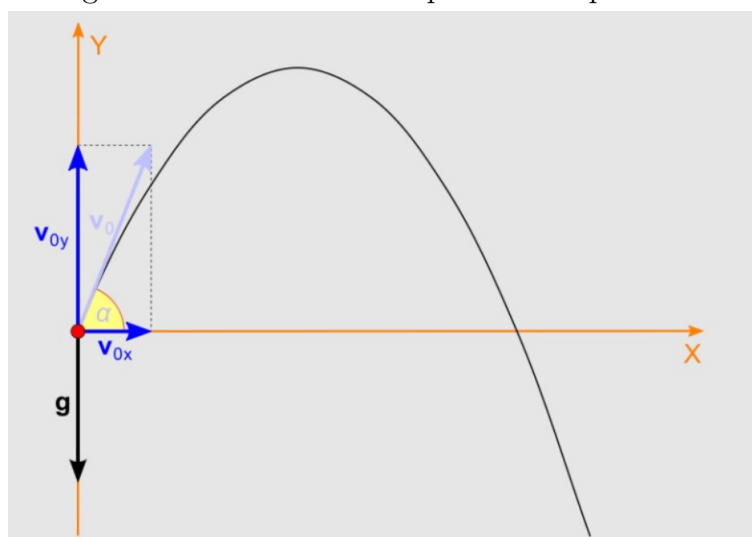
Além dos deslocamentos temporais da partícula, o autor provê equações para cálculo também da velocidade vertical no decorrer do tempo, como descrevem as Equações 3 e 4. A velocidade horizontal se mantém constante visto que não são consideradas forças agindo sobre a partícula nessa direção.

$$v_y = v_0 \cdot \sin \theta_0 - gt \quad (3)$$

$$v_y^2 = (v_0 \cdot \sin \theta_0)^2 - 2g(y - y_0) \quad (4)$$

O fenômeno descrito por Resnick (2012) pode ser melhor observado na Figura 3:

Figura 3 – Movimento oblíquo de uma partícula.



Fonte: <https://www.todoestudo.com.br/fisica/lancamento-obliquo>. Acesso em: 23/09/2024.

Por fim, é importante definir um ângulo θ_0 de lançamento para o estudo, e segundo análise feita pela Creighton University (2014), o ângulo de arremesso ideal para cestas de 3 pontos é de 45° . Os cálculos podem ser realizados utilizando-se um ângulo crítico de contato (90° , que geraria maior momento de flexão), no entanto esse ângulo nunca acontece em um jogo real. Portanto, os cálculos serão realizados com base no valor mais comum para o momento do arremesso, que é o ângulo ideal de arremesso de 45° .

2.1.2 Força de Colisão

Para determinar a força que o impacto da bola vai exercer no aro, é necessário a compreensão de mais alguns conceitos. Um deles é o **coeficiente de restituição**, que segundo Toledo (2007) é dado por $e = \frac{v_d}{v_a}$, no qual v_d é a velocidade com que a bola sai na direção contrário imediatamente depois do impacto e v_a a velocidade imediatamente antes do contato. É possível demonstrar ainda que o coeficiente de restituição, no caso de uma bola quicando no chão, pode ser dado por (CROSS, 1999):

$$e = \sqrt{\frac{h_d}{h_a}} \quad (5)$$

Com h_a sendo a altura em relação ao piso da qual a bola é solta, e h_d a altura atingida pela bola após rebater no chão.

Ademais, o **impulso** gerado em uma colisão é a variação da *quantidade de movimento* ($Q = mv$) em um intervalo de tempo (TOLEDO, 2007). Ou seja:

$$I = mv_2 - mv_1 \quad (6)$$

O autor ainda complementa que o impulso pode ser dado também pela média de força aplicada em um intervalo de tempo:

$$I = \frac{F}{\Delta t} \quad (7)$$

Por fim, Cross (1999) mostrou que é possível calcular o **tempo de contato** entre bola e objeto no momento do impacto:

$$t_c = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (8)$$

Sendo m a massa e k a constante de rigidez da bola.

2.1.3 Material

Ao longo da história desde o surgimento do esporte, a composição das bolas de basquete passou por diversas mudanças visto que o desenvolvimento de novas tecnologias possibilitava a criação de bolas mais eficazes e/ou mais acessíveis. Atualmente, grande parte delas é composta internamente por uma bexiga de borracha completamente envolta por fios de nylon ou poliéster. Este conjunto é, por fim, completamente encapado por uma camada de borracha, borracha sintética ou couro (MADEHOW, 2024). A Figura 4 ilustra esta composição:

Figura 4 – As camadas que compõem uma bola de basquete comum.



Fonte: Adaptado de: Austin (2024)

As bolas de basquete podem ser fabricadas com diferentes combinações das três camadas descritas acima, a depender da aplicação e do custo de produção. Aquelas encapadas em borracha sintética, por exemplo, costumam ter preço de venda mais acessível e maior resistência a intempéries, portanto costumam ser utilizadas em quadras que ficam em ambiente externo. Já a terceira camada em couro provê à bola melhor aderência no contato com a mão do jogador e uma boa flexibilidade no contato com o piso durante o jogo, no entanto, apresenta problemas quando em contato com água e tem um custo de

produção mais elevado. As bolas utilizadas no campeonato de basquete mais popular do mundo (Figura 5), a NBA, são encobertas por couro genuíno (WILSON, 2024).

Figura 5 – Bola de basquete oficial da NBA.



Fonte: Wilson (2024)

Para efeitos de simulação de fadiga, a utilização de um modelo de bola simplificado, composto apenas por uma esfera de borracha preenchida por ar, poderá produzir resultados suficientes ao estudo de melhoria da cesta. A pressão de ar ideal em bolas de basquete para um jogo comum é de 7.5 a 8.5 psi na categoria masculina e 6.5 a 8.5 psi para o gênero feminino (MYBASKETBALLACADEMY, 2023). Os cálculos do projeto serão realizados utilizando-se, portanto, uma pressão para o ar no interior da bola de 55 kPa (aproximadamente 8 psi).

2.2 Mecânica dos Sólidos para a Cesta de Basquete

Para desenvolver um método construtivo mais resistente para as cestas de basquete, é imperativo compreender os esforços internos de cada material e dos elementos de ligação que compõem o conjunto, esforços esses que são gerados a partir do impacto da bola. Para o presente estudo, será considerado como carregamento apenas o contato da bola com o aro, e não outras solicitações, como por exemplo o de uma pessoa pendurando-se na cesta. Portanto, os carregamentos individualmente possuirão magnitude baixa se comparado com a resistência mecânica da cesta de basquete, no entanto, os impactos serão numerosos, o que pode gerar falha por fadiga ao longo do tempo.

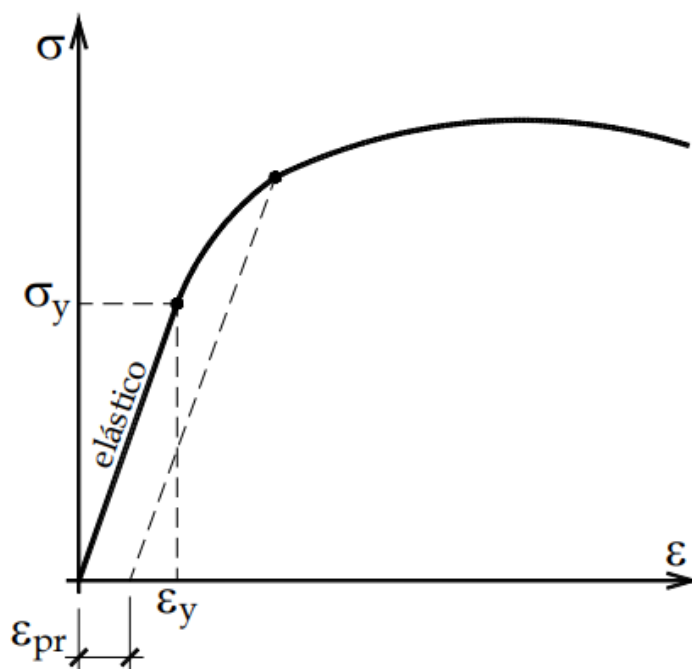
Se as deformações específicas em um corpo de prova pela aplicação de determinada força desaparecem quando a força é removida, dizemos que o material se comporta *elasticamente*. O maior valor de tensão para o qual o material se comporta elasticamente é chamado de limite elástico do material (BEER, 2011). Caso seja aplicada no corpo uma tensão maior que a tensão de escoamento, o material não retornará ao estado inicial após remoção da força executada e diz-se que a peça se deformou *plasticamente*. Existe uma relação de proporcionalidade entre tensão e deformação que define o comportamento elástico de muitos materiais - a Lei de Hooke - expressa por:

$$\sigma = E \epsilon \quad (9)$$

Na qual E é o módulo de elasticidade do material, que define sua rigidez.

A relação evidenciada pela Lei de Hooke pode ser visualizada graficamente na Figura 6.

Figura 6 – Tensão (σ) x deformação (ϵ).



Fonte: Coda (2017)

Sendo que a deformação ϵ é a variação de comprimento de um elemento dividido pelo seu comprimento inicial: $\frac{\Delta L}{L_0}$. Dessa maneira, a Figura 6 ilustra como as tensões geradas internamente em um corpo aumentam gradativamente (neste caso, em um material dúctil) conforme é aplicada uma deformação neste corpo.

É possível observar no gráfico que, ao início da deformação do material dúctil, a tensão interna gerada se eleva linearmente (momento em que a Lei de Hooke é aplicável). Isso acontece até que a tensão no corpo atinja o valor da **tensão de escoamento**, ponto em que o material passa a se deformar plasticamente quando mais deformação é aplicada, ou

seja, ocorrerá uma deformação residual que, mesmo após cessar a aplicação da deformação, continuará existindo no corpo. Já durante o primeiro momento, toda deformação é elástica, ou seja, o corpo retorna ao seu formato original após cessar aplicação da deformação forçada.

2.2.1 Tensão nos elementos de uma estrutura

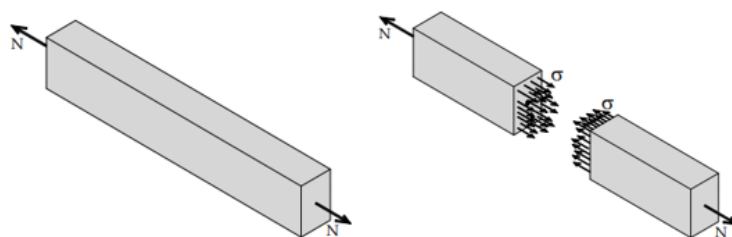
Foi visto que a tensão em muitos materiais possui uma relação de proporcionalidade para com a deformação que nela ocorre, conforme a Lei de Hooke (Equação 6). Os esforços internos em um elemento estrutural, no entanto, podem se apresentar de diversas maneiras, como por exemplo: tensão axial, tensão de cisalhamento. Além destas principais, a tensão de esmagamento é importante para o caso estudado, visto que a conexão entre aro e tabela é feita por parafusos/rebites que podem sofrer carregamentos tanto de cisalhamento como de esmagamento.

Se forças são aplicadas axialmente nas extremidades opostas de uma barra simples, uma *tensão normal* é distribuída ao longo de cada seção de área desta barra, como ilustrado pela Figura 7, e a tensão média é dada por:

$$\sigma_{med} = \frac{N}{A} \quad (10)$$

Sendo N a força aplicada em cada uma das extremidades e A é a área da seção da barra.

Figura 7 – Força e Tensão normal em uma barra.



Fonte: Coda (2017)

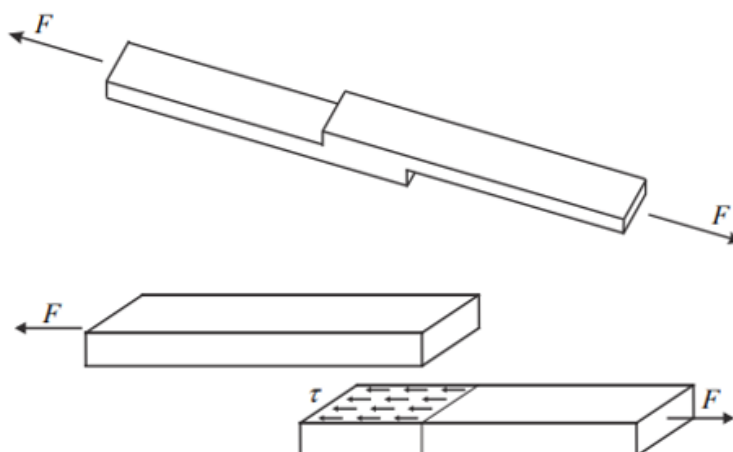
Por outro lado, as linhas das forças aplicadas na barra podem não estar sobrepostas uma na outra, o que gera uma *tensão de cisalhamento* neste elemento. A tensão média gerada na região onde ocorre o cisalhamento (um exemplo pode ser observado na Figura 8) é dada por:

$$\tau_{med} = \frac{F}{A} \quad (11)$$

Onde F a força aplicada em cada uma das extremidades.

No entanto, como evidenciado por Beer (2011), a tensão média pode nem mesmo ser aproximada à tensão real em um ponto específico do elemento que sofre a carga,

Figura 8 – Força e Tensão de cisalhamento em um elemento.



Fonte: Coda (2017)

dependendo do ponto de medição. Esta tensão específica varia muito principalmente em locais próximos ao ponto de aplicação da carga e em locais onde há concentradores de tensão. Estes fatores serão levados em consideração para o presente estudo.

2.2.2 Fadiga - carregamentos repetidos

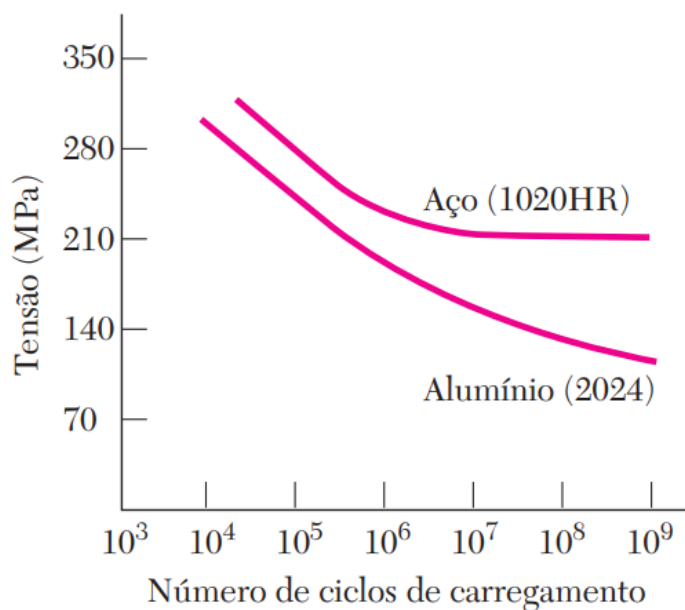
Se a tensão aplicada em um corpo de prova não excede o limite de escoamento do material, este sofrerá apenas deformação elástica e retornará ao seu formato inicial, bem como não romperá no ponto de ruptura do material. No entanto, Beer (2011) acrescenta que, caso a aplicação dessa tensão seja efetuada milhares ou milhões de vezes repetidamente, pode haver falha do corpo de prova a uma tensão muito menor que aquela do ponto de ruptura. Deste modo, o material se rompe ainda que muitas vezes não tenha nem mesmo se deformado plasticamente.

A Figura 9 demonstra que a uma alta tensão aplicada repetidas vezes a um corpo de prova, o material pode chegar à ruptura a um número muito menor de ciclos do que se a tensão aplicada fosse menor.

É ainda interessante observar, pelo mesmo gráfico $\sigma \times n$, que para materiais como o Aço (1020HR) existe um valor máximo de tensão σ para a qual, independente do número n de ciclos realizados, não ocorre ruptura no material. Restringir abaixo desse valor a magnitude das possíveis tensões aplicadas em uma peça é extremamente importante, quando possível de ser implementado, visto que proporciona uma vida útil muito duradoura à peça.

Conclui-se que, para a análise do presente estudo, o principal objetivo deverá ser maximizar o número de ciclos executáveis do conjunto da cesta de basquete sem que haja ruptura do ponto mais passível de falha do sistema.

Figura 9 – Tensão aplicada x número máximo de ciclos até a ruptura.



Fonte: Beer (2011)

2.2.3 Concentradores de tensão e ponto crítico

Em qualquer máquina, ferramenta ou conjunto, existem regiões onde a falha é mais provável que em outras, seja por sofrer um *carregamento mais agressivo* de tensões, por *realizar mais ciclos* ou por possuir maiores *concentradores de tensão*. Logo, é de suma importância identificar o ponto - ou pontos - críticos do sistema projetado/analísado para que o maior tempo e cuidado investido no dimensionamento do conjunto seja exatamente neles.

Primeiramente, de acordo com o *Princípio de Saint-Venant*, as tensões em pontos distantes do ponto de aplicação da carga podem ser calculados, no caso de uma tensão axial, utilizando a fórmula básica de tensão média (Equação 10), pois nestes locais a tensão em cada ponto específico da área de seção da barra será aproximadamente a tensão média.

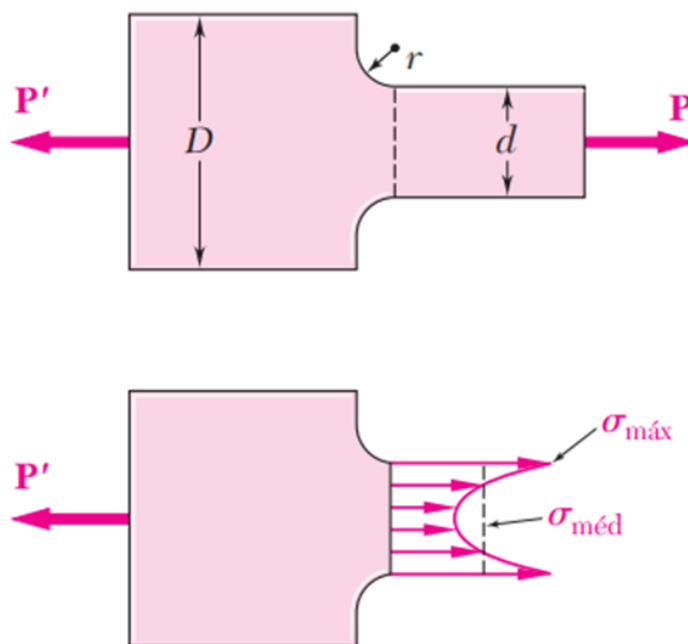
No entanto, para regiões próximas ao local de aplicação da carga ou próximas a um concentrador de tensão o Princípio de Saint-Venant não se aplica, pois as tensões em cada ponto da seção de área podem se diferir muito da tensão média obtida pela Equação 10. Essa diferença pode ser observada na Figura 10, que ilustra um caso em que há redução da área de seção da barra. Neste contexto, as regiões próximas ao adocamento apresentam maiores valores de tensão a depender do raio do adocamento, sendo que a tensão máxima pode ser expressa pela Equação 12.

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{med}} \quad (12)$$

O valor de K é obtido experimentalmente e gráficos que relacionam K com a

proporção r/d (raio do adoçamento / espessura da barra) podem ser encontrados em diversas bibliografias de mecânica dos materiais, não só para este caso de adoçamento como também para furos em chapas, mudança de diâmetro em eixos etc.

Figura 10 – Distribuição de tensões próximas a um concentrador de tensão.



Fonte: Beer (2011)

Para o presente estudo serão, portanto, identificados possíveis concentradores de tensões, bem como sua natureza, de maneira que seja possível avaliar se ocorreria falha nestes locais e em quanto tempo ocorreriam. Desse modo, estes pontos específicos poderão ser otimizados para melhoria da durabilidade e resistência mecânica geral da estrutura completa da cesta de basquete.

2.3 Modelagem e Simulação com Métodos dos Elementos Finitos

O estudo de melhoria da resistência à fadiga de uma cesta de basquete irá se embasar na execução em sequência de três passos principais:

- Identificar os pontos críticos mais passíveis de falha no conjunto tabela-cesta;
- Propor soluções de melhoria, seja manualmente ou por meio de recursos do *software*;
- Comparar as soluções encontradas com o esquema original para definir qual é a melhor proposta.

Para as três etapas citadas, é necessário calcular os esforços internos gerados nos elementos do conjunto a partir do contato da bola no aro. Estes cálculos seriam

extremamente complicados de se realizar sem a utilização do método dos elementos finitos, que aproxima com bastante confiabilidade os resultados simulados. Segundo Fish (2009, p.1),

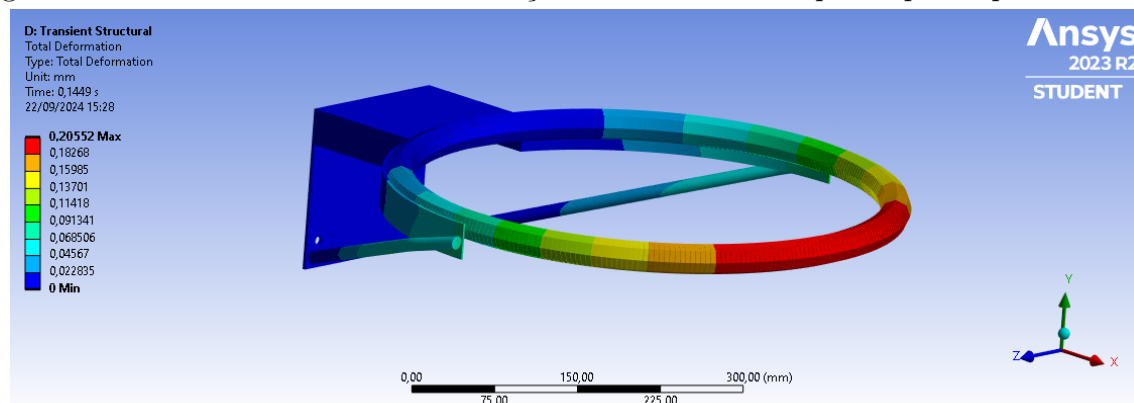
Muitos fenômenos em engenharia e ciências podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais. Em geral, solucionar essas equações por meio de métodos analíticos clássicos [...] pode ser quase impossível. O método dos elementos finitos (MEF) é a aproximação numérica com a qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de modo aproximado.

O autor ainda complementa que o *MEF* consiste em cinco etapas:

1. **Pré-processamento:** subdivisão do domínio do problema em elementos finitos.
2. **Formulação dos elementos:** desenvolvimento de equações para os elementos.
3. **Montagem:** obtenção do sistema global de equações a partir das equações individuais dos elementos.
4. **Resolução das equações.**
5. **Pós-processamento:** determinação de valores de interesse, tais como tensões e deformações, e a obtenção da visualização das respostas.

A última etapa gera o resultado visual que permite extrair informações da simulação executada, como distribuição de tensões ou temperatura ao longo de uma superfície. A Figura 11 ilustra um exemplo de simulação MEF executada em um modelo de biela. Neste caso é possível visualizar que, caso os resultados expressos sejam de tensões, há algumas regiões sofrendo maiores efeitos de esforços internos (*cor vermelha*) e outras onde praticamente não há tensão (*cor azul escuro*).

Figura 11 – Análise via MEF da deformação de um aro de basquete após impacto da bola.



Fonte: Autor.

O software utilizado para simular e obter os resultados do presente estudo será o da desenvolvedora ANSYS, que fornece um *workbench* gratuito para estudantes. Este

workbench proporciona acesso a diversas frentes de análise MEF, como por exemplo análise estrutural estática, dinâmica explícita, LS-DYNA (implícita), fluxo de calor em um objeto etc.

3 DESENVOLVIMENTO

Devidamente revisada a bibliografia necessária para desenvolvimento do estudo de melhoria da resistência mecânica de uma cesta de basquete, é possível iniciar o desenvolvimento do estudo. Este capítulo abordará o problema por meio de **4 etapas sequenciais**:

1. **Obtenção das condições de contorno:** primeiramente, é imprescindível calcular as variáveis de entrada da simulação, como: vetor força gerado pela impacto da bola no aro e resistência mecânica dos materiais que compõem a tabela de basquete.
2. **MEF para sistema-modelo:** montagem em software do conjunto modelo (obtido de uma cesta existente no mercado), aplicação das condições de contorno e obtenção dos resultados desejados.
3. **MEF para obtenção de novos modelos:** idealizar ou gerar por meio do software novos *assemblies* para o sistema original, buscando uma maneira construtiva que proporcione maior resistência à fadiga.
4. **Comparação dos resultados:** verificar a partir das últimas simulações feitas se foi obtido um ganho de resistência mecânica no conjunto se comparado ao modelo original. Avaliar se o modelo gerado é viável de se implementar no mercado em âmbitos financeiro e construtivo.

Cada uma das 4 macro etapas listadas acima serão apresentadas nas seções subsequentes. Ao longo do projeto, diversas iterações foram realizadas, isto é, por vezes foi julgado necessário regredir e refazer uma etapa anterior para refinamento dos resultados.

3.1 Obtenção da Condições de Contorno

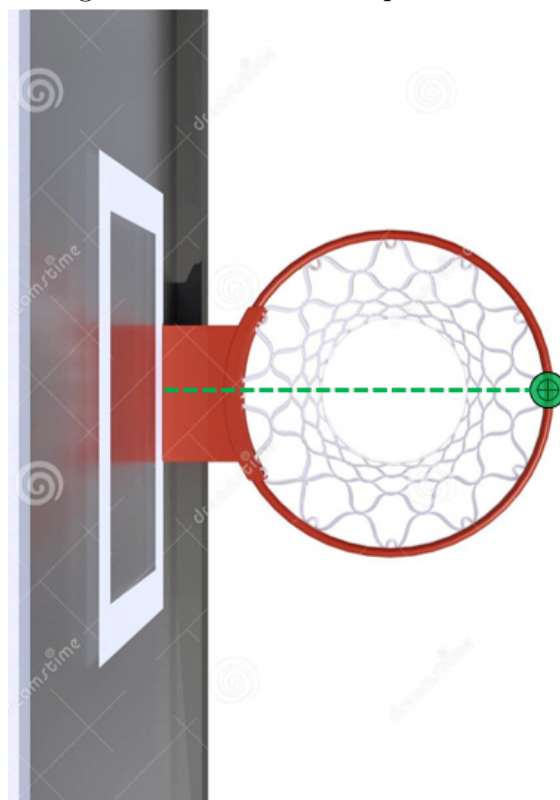
Para os cálculos efetuados neste capítulo, muitas vezes foi necessário o estabelecimento de premissas. Todas as premissas utilizadas foram escolhidas a partir de algum embasamento estatístico/científico ou simplesmente com base em algum modelo já existente e serão devidamente explanadas.

3.1.1 Força de impacto da bola no aro

A primeira variável a ser calculada é a força de contato da bola com o aro no instante do impacto, de modo que deverá ser estabelecido um vetor que representa essa força. O estudo principal do presente relatório será avaliar quantos ciclos de ocorrência desta força de impacto o conjunto da tabela de basquete suportará antes de falhar e, portanto, a definição de um valor confiável faz-se de extrema importância.

A primeira *premissa* de cálculo será a de que cada contato da bola com o aro ocorrerá no ponto do aro que fica mais distante da tabela, conforme indicado pela Figura 12. Este ponto fica alinhado ao centro da fixação aro-tabela e, por ser o ponto mais distante do local de junção, também representa o pior caso de geração de momento a partir do impacto.

Figura 12 – Ponto de impacto da bola com o aro.



Fonte: <https://pt.dreamstime.com/hoop-de-basquetebol-sobre-fundo-branco-exibiçãosuperior-d-renderização-para-design-image238373653>. Acesso em: 17/07/2024.

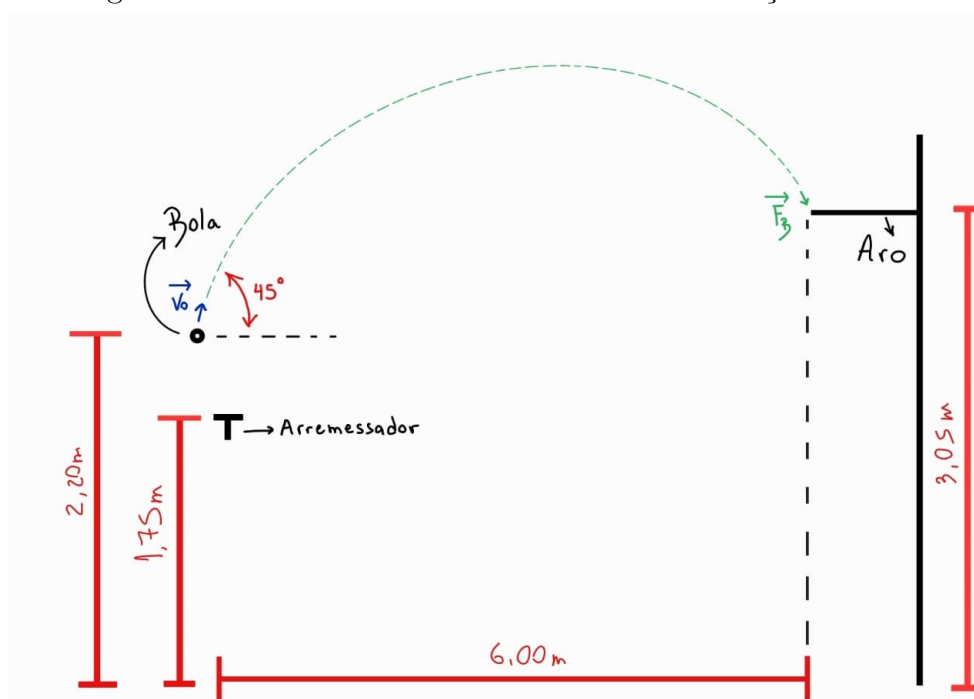
É claro que o ponto indicado na Figura 12 representa o ponto de maior momento fletor, mas não necessariamente o ponto mais crítico no sentido de gerar esforços no conjunto da cesta. Isso porque outros pontos mais laterais gerariam não só flexão como também torção, o que a longo prazo pode ser mais prejudicial à resistência mecânica do objeto. Apesar disso, como para determinar o ponto crítico seria necessária um prolongado estudo à parte, para esta monografia considerar-se-á como ponto de impacto da bola no aro aquele indicado na Figura 12.

Baseando-se nisso, elaborou-se o diagrama de percurso da bola de basquete após o arremesso, conforme Figura 13. Para tal, foram utilizadas as seguintes premissas:

- **Altura do arremessador:** 1,75m. A altura média do homem brasileiro nascido em 1996 é de aproximadamente 175cm. ((NCD-RISC), 2016)

- **Altura da bola no momento do arremesso:** 2,20m. Com o arremessador de 1,75m de altura soltando a bola acima da sua cabeça após um salto comum efetuado em chutes de 3 pontos, a altura de saída da bola pode chegar a 220cm (medição realizada através de experimentos realizados pelo autor).
- **Distância do arremessador para a cesta:** 6,00m. Distância oficial utilizada em jogos amadores e profissionais desde a linha de 3 pontos ao aro na direção rente à cesta de basquete.
- **Altura do aro:** 3,05m. Altura oficial utilizada em jogos amadores e profissionais desde o chão até o aro fixado à tabela.
- **Ângulo de arremesso:** 45°. Ângulação considerada ideal para conversão de pontos a partir deste local de arremesso, conforme estudado no capítulo 2.

Figura 13 – Percurso da bola arremessada em direção à cesta.



Fonte: autor.

Primeiramente, deve-se encontrar o vetor que representa a velocidade da bola no momento do impacto. Para tal, utiliza-se a equação que define o movimento oblíquo de uma partícula após arremesso. Esta equação pode ser obtida isolando t na Eq. 1 e substituindo na Eq. 2, gerando o seguinte:

$$y = y_0 + v_0 \cdot \sin \theta_0 \left(\frac{x - x_0}{v_0 \cdot \cos \theta_0} \right) - \frac{g}{2} \left(\frac{x - x_0}{v_0 \cdot \cos \theta_0} \right)^2 \quad (13)$$

Da equação acima, todas as variáveis, com exceção da velocidade inicial, são

conhecidas. É necessário, portanto, descobrir a velocidade inicial de arremesso necessária para que a bola atinja o ponto determinado da cesta de basquete. Substituindo as variáveis conhecidas:

$$3,05 = 2,2 + v_0 \cdot \sin 30^\circ \left(\frac{6 - 0}{v_0 \cdot \cos 45^\circ} \right) - \frac{9,81}{2} \left(\frac{6 - 0}{v_0 \cdot \cos 45^\circ} \right)^2$$

$$\implies v_0 = 8,28 \text{ m/s}$$

Portanto, a velocidade de arremesso é de $v_0 = 8,28 \text{ m/s}$ de modo que a bola atinja a posição previamente indicada do aro. Logo, de acordo com a Eq 3, a velocidade vertical da bola na hora do contato é:

$$v_y^2 = (8,28 \cdot \sin 45^\circ)^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot (3,05 - 2,2)$$

$$\implies v_y = \pm 4,2 \text{ m/s}$$

Como sabe-se que a bola já estará, a esse momento, no movimento descendente de encontro ao aro, tem-se que $v_y = -4,2 \text{ m/s}$. A velocidade horizontal v_x , por sua vez, é apenas a decomposição da velocidade inicial no eixo x e se mantém constante, pois não há aceleração nessa direção, ou seja:

$$v_x = v_0 \cdot \cos \theta = 8,28 \cdot \cos 45^\circ$$

$$\implies v_x = 5,85 \text{ m/s}$$

O módulo da velocidade da bola *antes* do contato será, portanto:

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(-4,2)^2 + 5,85^2}$$

$$\implies v_a = 7,2 \text{ m/s}$$

Em posse do vetor de velocidade da bola no imediato momento antes do impacto, o próximo passo é encontrar a *força* que isso gera no aro. Primeiramente, alguns dados sobre a bola de basquete são necessários e foram obtidos no livro de regras oficiais da Federação Internacional de Basquete (FIBA) acerca dos equipamentos. Conforme estabelecido pela FIBA (2022), bola de basquete precisa:

- Ter uma massa de 600g.
- Ao ser largada de uma altura de 1,8m, atingir no retorno uma altura de 1,035 a 1,085 metros.

Com isso, aplica-se a Eq. 5 para encontrar o *coeficiente de restituição* da bola de basquete oficial:

$$e = \sqrt{\frac{1,8}{1,06}} = 0,77$$

É importante ressaltar que o coeficiente calculado aplica-se para o impacto entre bola e **piso**, que apresenta rigidez muito maior que um aro de basquete fixado por parafusos a uma tabela. Neste contexto, o coeficiente de restituição apresentaria um valor menor na situação estudada. Apesar disso, o coeficiente de 0,77 calculado será utilizado por hipótese simplificadora no estudo realizado.

Logo, como $e = v_d/v_a$, tem-se que a velocidade depois do contato entre bola e aro será:

$$v_d = 0,77 \cdot 7,2 = 5,54 \text{ m/s}$$

Utilizando a Eq. 6, e considerando como eixo positivo a direção e sentido do *vetor velocidade* no momento antes do contato com o aro, obtém-se:

$$I = 0,6 \cdot (-5,54) - 0,6 \cdot 7,2 = -7,644 \text{ N.s}$$

Para aplicar a Eq. 7 que fornecerá o valor do vetor *força* aplicada pelo impacto da bola no aro, falta encontrar o tempo de contato entre bola e aro antes da bola voltar para o ar. Esse valor pode ser obtido utilizando-se a Eq. 8, mas não se conhece a constante de rigidez k da bola de basquete.

Em falta de uma constante obtida experimentalmente para o objeto em questão, será utilizada uma aproximação com base na rigidez k de uma bola de tênis. Segundo Cross (1999), a constante de rigidez de uma bola de tênis oficial é dada por, aproximadamente, $k_t = 2 \cdot 10^4$. Além disso, a ITF (2020) estabelece que uma bola de tênis oficial deve ter uma pressão interna de 7 psi, enquanto que - conforme visto na fundamentação teórica da seção 2 - a bola de basquete ideal possui pressão interna de 8 psi.

Como a constante de rigidez é diretamente proporcional à rigidez dos objetos em colisão, será utilizada a relação $8/7 = 1,143$ para aproximar a constante k da bola de basquete. Esta, como é 1,143 vezes mais rígida que a bola de tênis, deverá ter uma constante de rigidez de aproximadamente:

$$k = 1,143 \cdot 2 \cdot 10^4 = 2,286 \cdot 10^4$$

Como a constante de rigidez pode ser obtida com exatidão apenas por meio de ensaios, será utilizada a simplificação calculada a partir do valor para bola de tênis.

Com isso, a Eq. 8 estabelece o tempo de contato entre bola e aro:

$$t_c = \pi \sqrt{\frac{0,6}{2,286 \cdot 10^4}} = 0,0161 \text{ s}$$

O tempo então é de 16 ms e, portanto, o módulo da Força gerada (*tanto na bola quanto no aro, conforme 2ª Lei de Newton*) é calculada por meio da Eq. 7:

$$F_b = \frac{7,644}{0,0161} = 474,93 \text{ N}$$

As componentes deste vetor podem ser calculados utilizando-se as obtidos para velocidade: $v_x = 5,85$ m/s e $v_y = -4,2$ m/s. Sabe-se que, por trigonometria, o ângulo de contato bola-aro em relação ao eixo x estabelecido na Figura 13 é de:

$$\arctan\left(\frac{-4,2}{5,85}\right) = -35,68^\circ = -0,62267 \text{ rad}$$

Com isso, têm-se por fim as componentes:

$$F_{b_x} = 474,93 \cdot \cos(-35,68^\circ) = 385,80 \text{ N}$$

$$F_{b_y} = 474,93 \cdot \sin(-35,68^\circ) = -276,98 \text{ N}$$

3.1.2 Tabela de Basquete

A tabela/aro de basquete a ser utilizada como modelo para o projeto foi escolhido com base no custo e popularidade. Um dos produtos encontrados tinha alto número de vendas realizadas e possuía preço na faixa de R\$800-R\$1000, que foi uma das menores faixas de preço encontradas para o conjunto completo de tabela. A Figura 14 ilustra o modelo selecionado.

Figura 14 – Tabela modelo do mercado.



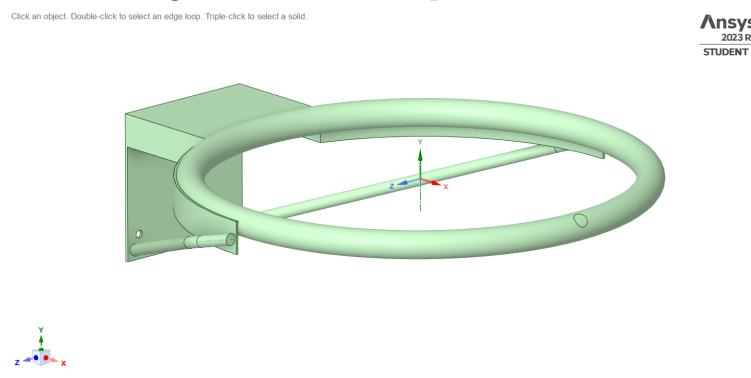
Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br>. Acesso em: 13/07/2024.

Na maioria dos conjuntos encontrados no mercado, o aro era composto por aço 1020 ou semelhante, a tabela por madeira MDF e criadas para serem fixadas em paredes de concreto, com parafusos em aço de baixo carbono ligando estas diferentes partes.

O modelo em questão possui um aro com diâmetro de 450mm, que é padrão em partidas oficiais de basquete segundo a FIBA (2022), tendo 28,2mm de área de seção. O restante das medidas utilizadas foi estimado por observação das imagens da tabela modelo utilizada.

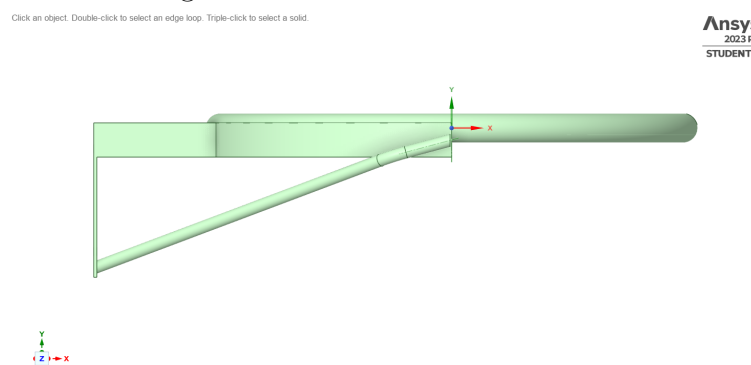
Com estas medidas, elaborou-se a geometria da cesta no *SPACE CLAIM* do **ANSYS WORKBENCH**, obtendo-se o ilustrado nas Figuras 15 a 18.

Figura 15 – Vista de perfil da cesta.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 – Vista lateral da cesta.



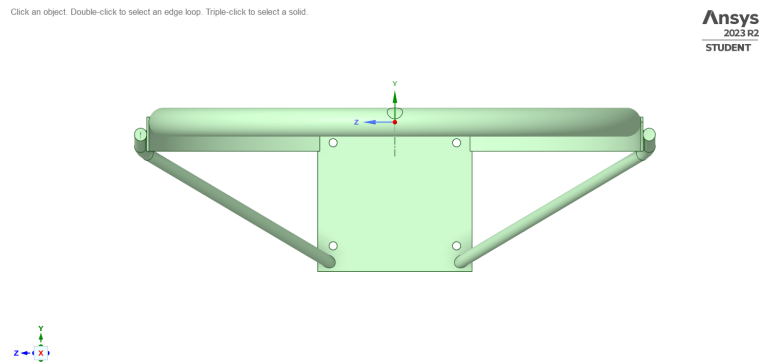
Fonte: Elaboração própria.

Por fim, como material da cesta de basquete, optou-se por utilizar o aço estrutural (*structural steel*) pois, apesar da biblioteca de materiais do ANSYS WORKBENCH fornecer dados para o aço carbono 1020, o leque de propriedades não é completo. O aço estrutural, material base do software, apresenta um variado leque de propriedades, inclusive a Curva S-N que é essencial para análise de fadiga do sistema.

Optou-se então por prosseguir com o aço estrutural, cujas propriedades principais (curva de deformação-tensão, tensão de escoamento e tensão de falha) são bastante semelhantes às do aço carbono 1020. A Figura 19 apresenta as propriedades do material escolhido.

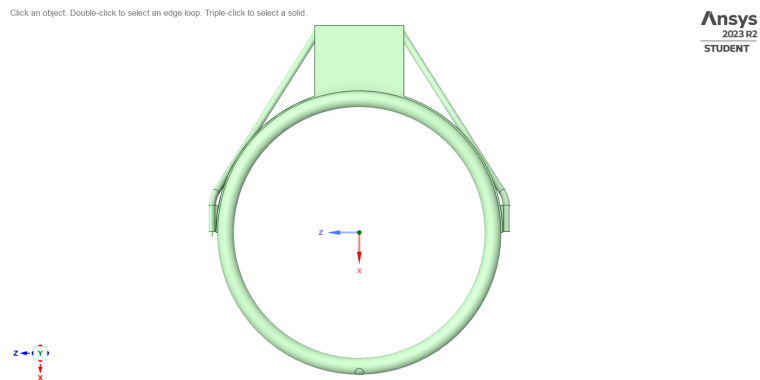
Dentre as principais características, além da Curva S-N ilustrada na figura, tem-se:

Figura 17 – Vista frontal da cesta



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 – Vista superior da cesta.



Fonte: Elaboração própria.

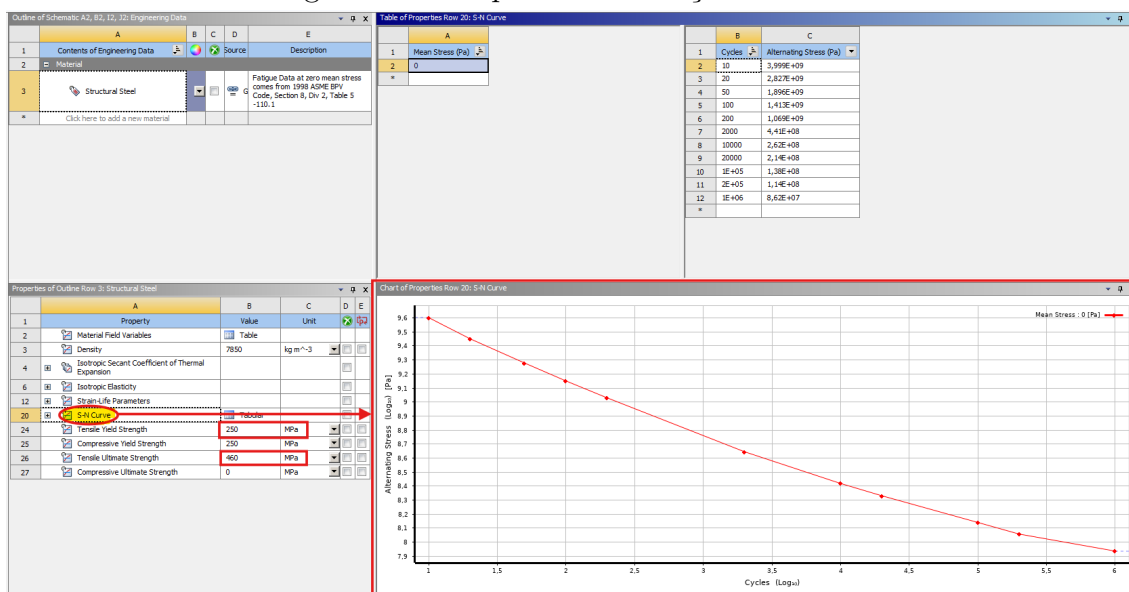
- **Densidade:** 7850 kg/m³.
- **Tensão de escoamento:** 250 MPa.
- **Tensão de fratura:** 460 MPa.

3.2 Modelagem

Com as condições de contorno estabelecidas, dá-se início à modelagem do problema no espaço "Mechanical" do Ansys Workbench. A aproximação ao problema inicia-se por meio de uma análise estática, para dessa maneira ter mais eficácia no refinamento da malha utilizada e da maneira como as condições de contorno são aplicadas à geometria.

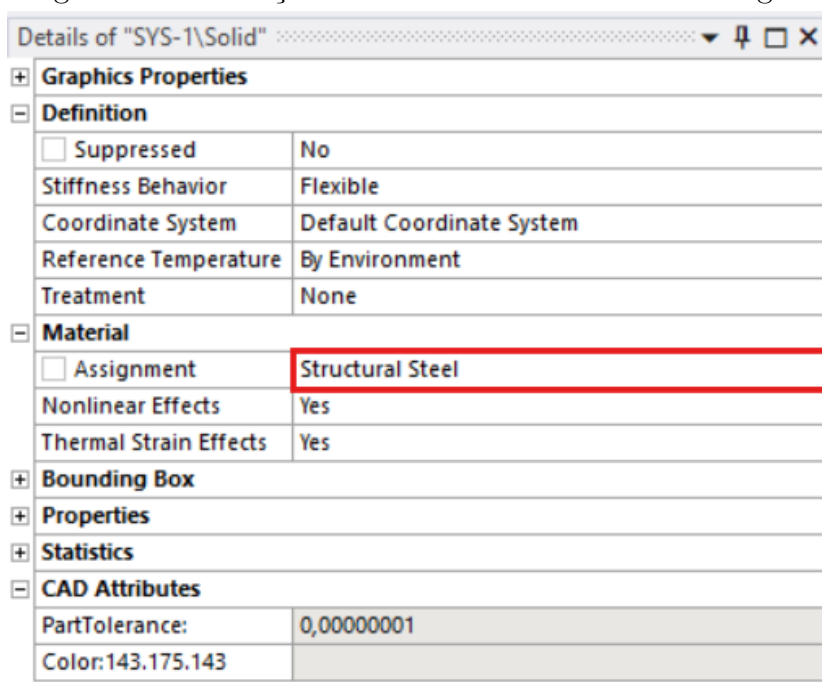
A princípio, com a geometria carregada no espaço de modelagem mecânica do ANSYS, foi definido o material do aro conforme Figura 20.

Figura 19 – Propriedades do aço estrutural.



Fonte: ANSYS WORKBENCH 2023 R2.

Figura 20 – Definição do material da cesta na modelagem.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.1 Análise Estática e Refinamento de Malha

Para que seja possível confiar que os resultados finais obtidos representem com precisão os efeitos reais causados na cesta pelo impacto da bola de basquete, é imprescindível que a malha seja bem estabelecida. Para tal, sabe-se que quanto menor o tamanho dos elementos, maior a qualidade da malha, no entanto, há um aumento na necessidade

de processamento pelo computador. Neste contexto, o refinamento da malha deve ser desenvolvido buscando o meio termo ideal entre:

- Qualidade da malha.
- Custo computacional.

Se sobrepondo a estas características balizadoras, há um limitador na versão **ESTUDANTE** do ANSYS WORKBENCH:

- Número máximo de nós: 128k.

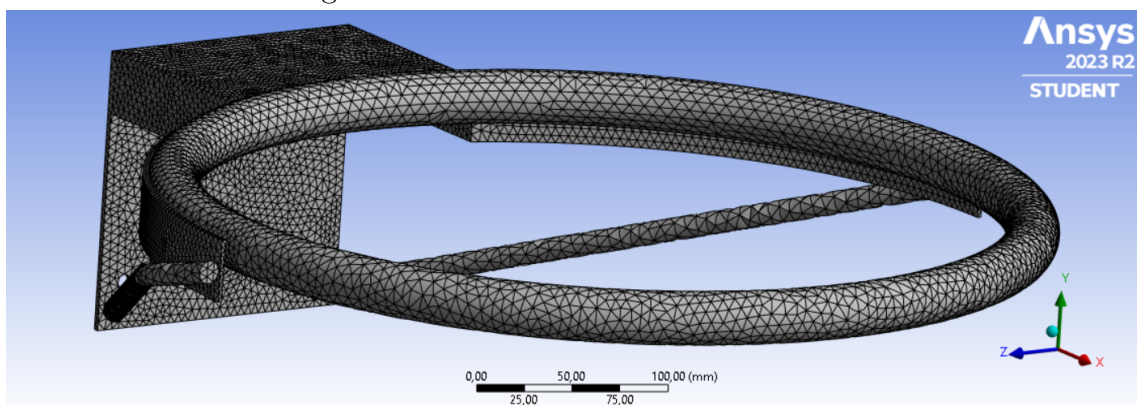
3.2.1.1 Primeira iteração

Estabelecidos estes requisitos, formulou-se a primeira malha do sistema, apresentada na Figura 21, cujas principais características foram:

- Tipo do elemento: tetraedro linear.
- Tamanho geral de malha: 10mm.
- Tamanho da malha em regiões críticas: 4,5mm.
- Transição: rápida.
- Resolução: 7.
- Número de nós: 121.048.

Sendo "regiões críticas" aquelas seções em formato de chapa e próximas às junções entre as geometrias do aro.

Figura 21 – Primeira tentativa de malha.



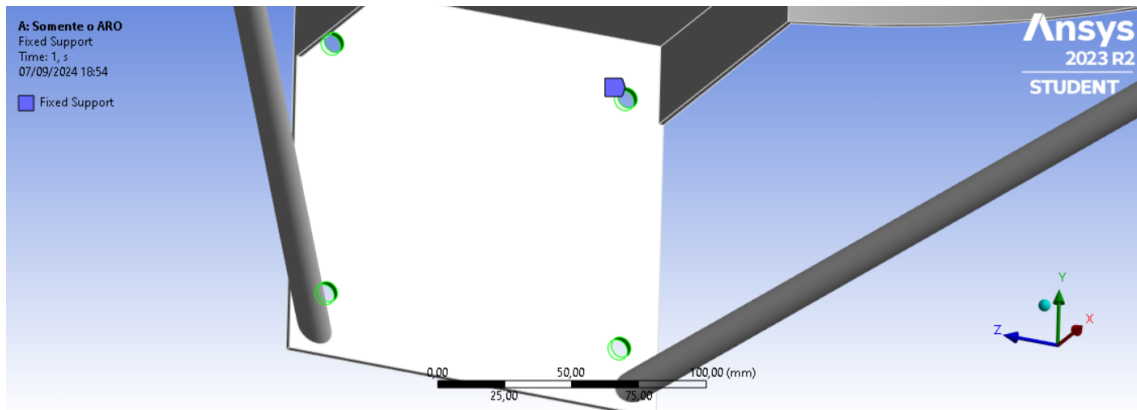
Fonte: Elaboração própria.

Com a primeira malha gerada, modelou-se o problema estrutural estático com as

seguintes condições de contorno:

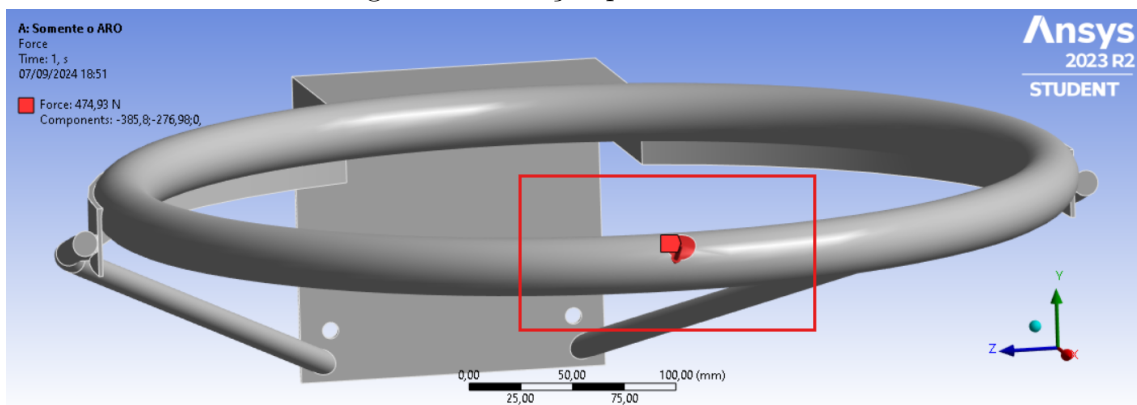
1. **FIXAÇÃO DO ARO** nas faces internas dos furos dos parafusos de fixação, conforme Figura 22. Nestas faces foram bloqueados todos os graus de liberdade (engaste);
2. **APLICAÇÃO DE FORÇA** distribuída na superfície de contato da bola com o aro no impacto, conforme Figura 23. A superfície de contato foi aproximada.

Figura 22 – Fixação do aro.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 23 – Força aplicada no aro.



Fonte: Elaboração própria.

Além disso, para verificar a precisão da malha foram obtidos os resultados de Tensão Equivalente (Von-Mises) em três modalidades diferentes:

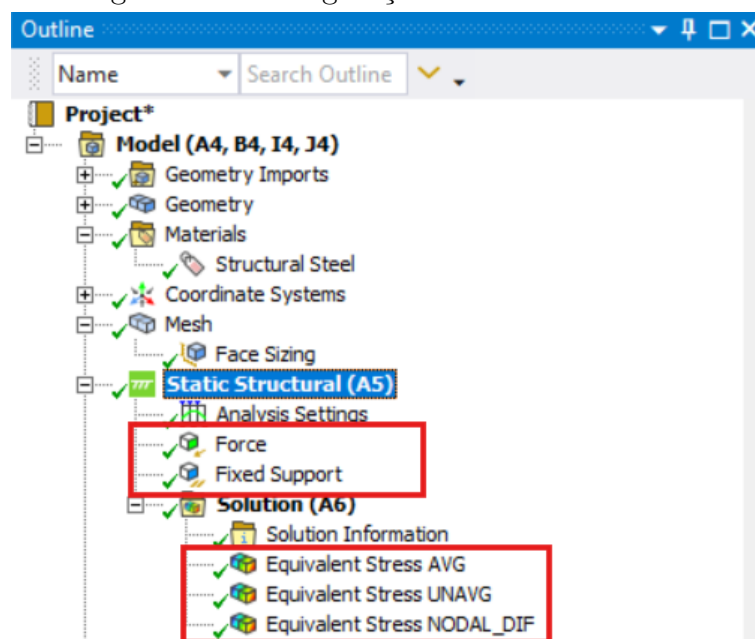
1. Nivelado (*averaged*);
2. Não nivelado (*unaveraged*);
3. Diferença nodal (*nodal difference*).

Enquanto **Nivelado** calcula os valores dos nós com base na média entre os valores de tensão obtidos nos elementos em torno deste nó, **Não nivelado** utiliza o valor de apenas

um dos elementos. Já **diferença nodal** ajuda a mensurar a magnitude da diferença entre estas 2 tensões obtidas. O ideal é que as tensões obtidas em cada tipo possuam valores bem próximos, de modo que a diferença nodal se aproximará de zero. Neste caso, será possível chamar o modelo de **”Independente da Malha”**, pois os resultados gerados não terão sofrido interferência da malha, o que poderia comprometer a precisão dos resultados.

Desse modo, a configuração da análise estática ficou como representada na Figura 24.

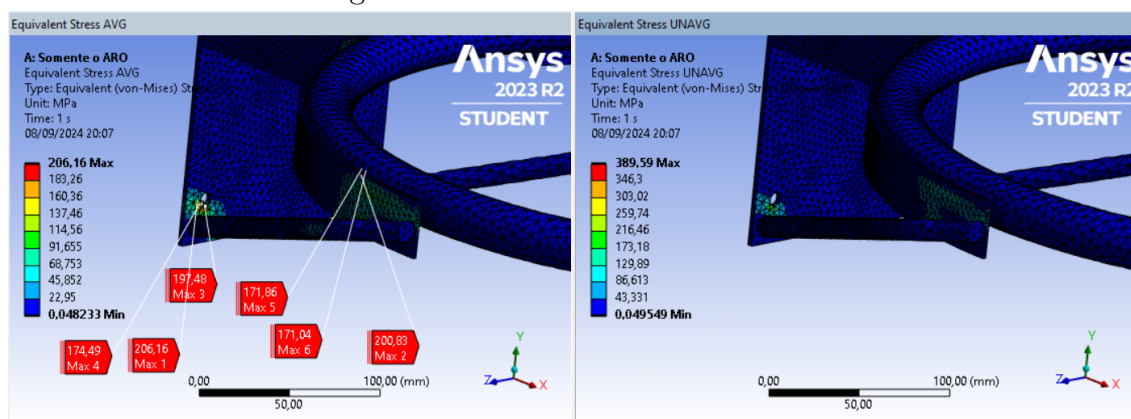
Figura 24 – Configuração da análise estática.



Fonte: Elaboração própria.

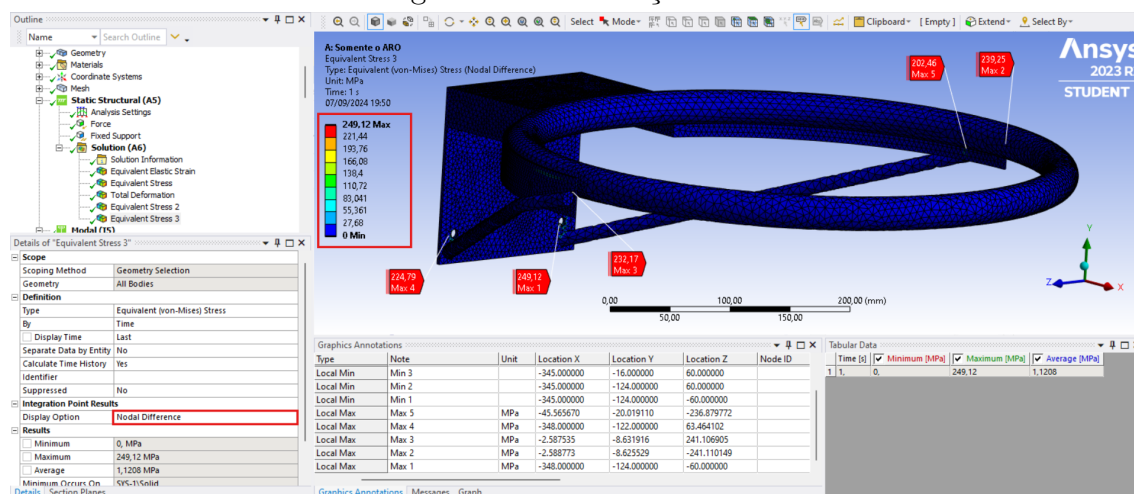
Para avaliar então a qualidade da malha gerada, comparou-se os resultados obtidos nas 3 modalidades de cálculo conforme ilustrado pelas Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Nivelado x Não nivelado.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Diferença nodal.



Fonte: Elaboração própria.

Observando os resultados, fica evidente uma grande distinção entre os resultados obtidos, o que pode indicar baixa qualidade da malha gerada. No entanto, o consumo computacional para resolução do problema em cima desta malha já foi bastante alto, então reduzir o tamanho dos elementos não seria uma opção viável. Para otimizar, então, a qualidade da malha sem exceder o limite de 128 mil nós do Ansys Student, necessitaram-se outras alternativas.

3.2.1.2 Segunda iteração

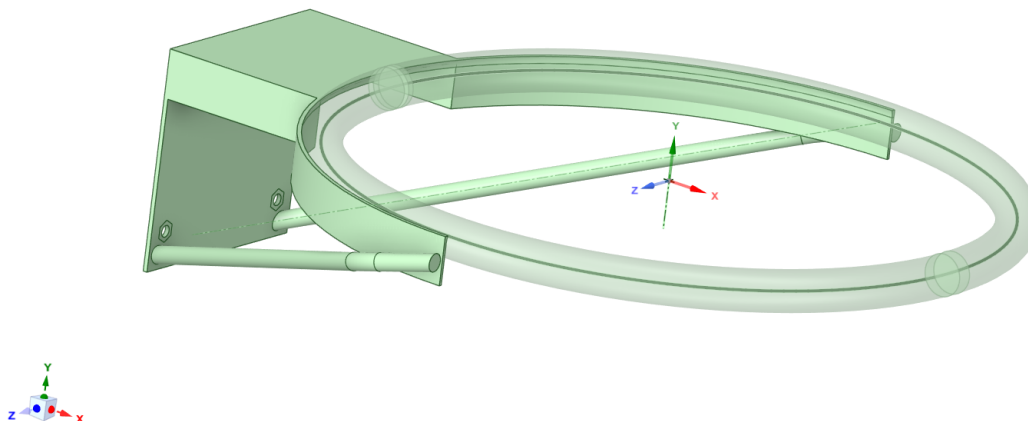
Neste contexto, como na região circular da cesta (onde fica presa a rede - será chamada de ARO a partir deste ponto), as tensões e os gradientes de tensão gerados foram muito baixos, decidiu-se por trocar a formulação desta seção da cesta. Antes definida como um elemento **sólido**, foi trocada no *space claim* para elemento **viga** (*beam*), que otimiza a formulação de malha em elementos de viga. Assim, a geometria da cesta passou a ser conforme ilustrada na Figura 27.

Novamente no espaço de modelagem mecânica do Ansys, o elemento de viga foi fixado por meio de solda distribuída linearmente ao restante do aro. Além disso, foram alterados alguns valores característicos da malha (destacados em negrito):

- Tipo do elemento: tetraedro linear.
- Tamanho geral de malha: **5mm**.
- Tamanho da malha em regiões críticas: **3mm**.
- Transição: **lenta**.
- Resolução: 7.

Figura 27 – Vista de perfil da cesta (aro definido como viga).

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

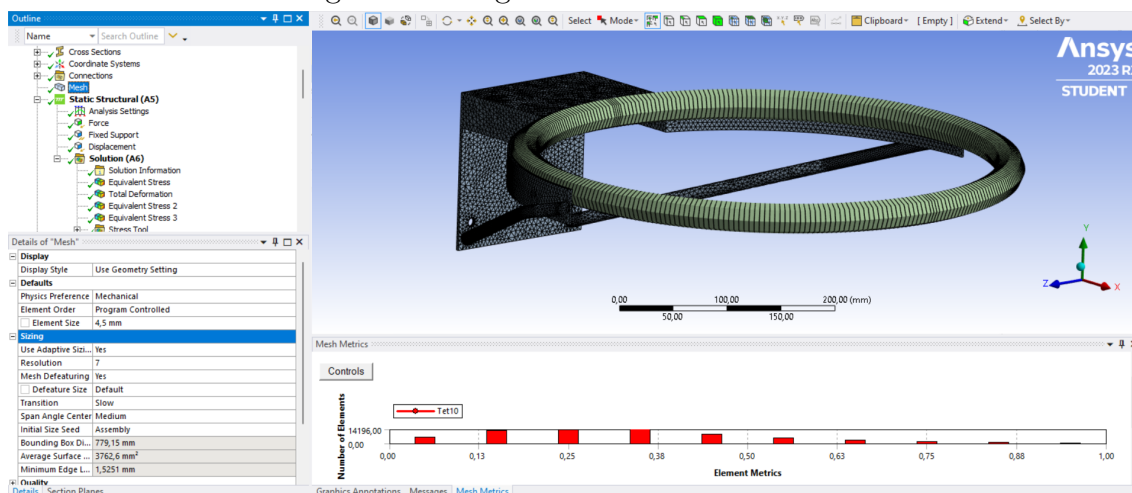


Fonte: Elaboração própria.

- Número de nós: 116.220.

Com a simplificação do elemento viga, tornou-se viável desta vez refinar os elementos conforme valores acima, ao passo que o número total de nós se manteve abaixo do limite de 128k, até mesmo reduzindo um pouco em relação à primeira malha gerada. A nova configuração de malha pode ser observada na Figura 28. Ainda nesta figura, observa-se as estatísticas de assimetria (*skewness*), que é um bom índice de refinamento de malha. O ideal é que seja o menor possível, não ultrapassando muito o valor de 0,95. Na malha gerada, apenas 0,2% dos elementos apresentar um valor de assimetria acima de 0,9, portanto neste sentido a malha está qualificada.

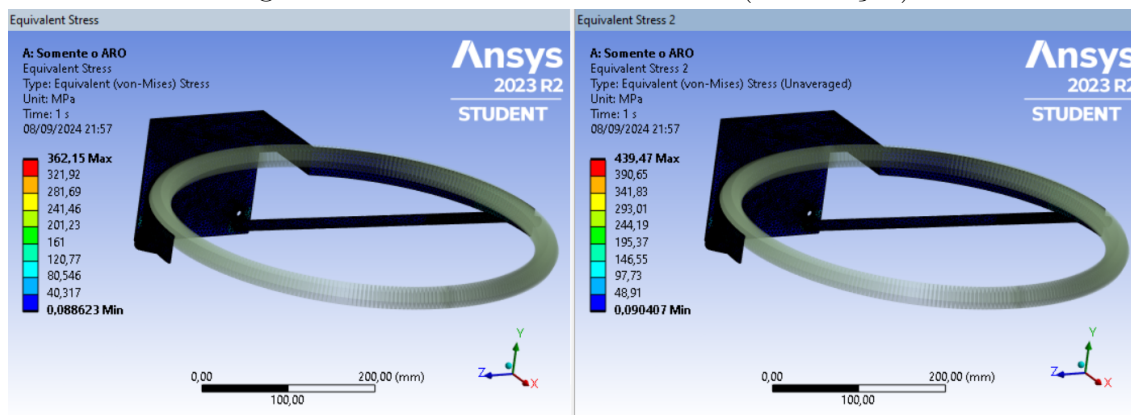
Figura 28 – Segunda tentativa de malha.



Fonte: Elaboração própria.

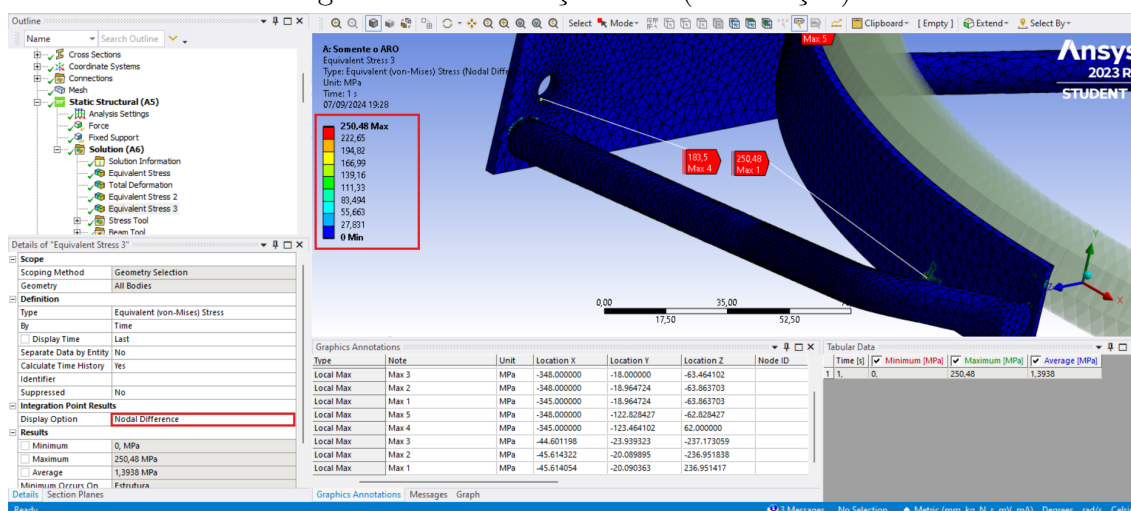
Com as mudanças, os novos resultados da análise estática, para avaliação da confiabilidade da malha, ficam como mostrado nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Nivelado x Não nivelado (2ª iteração).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Diferença nodal (2ª iteração).

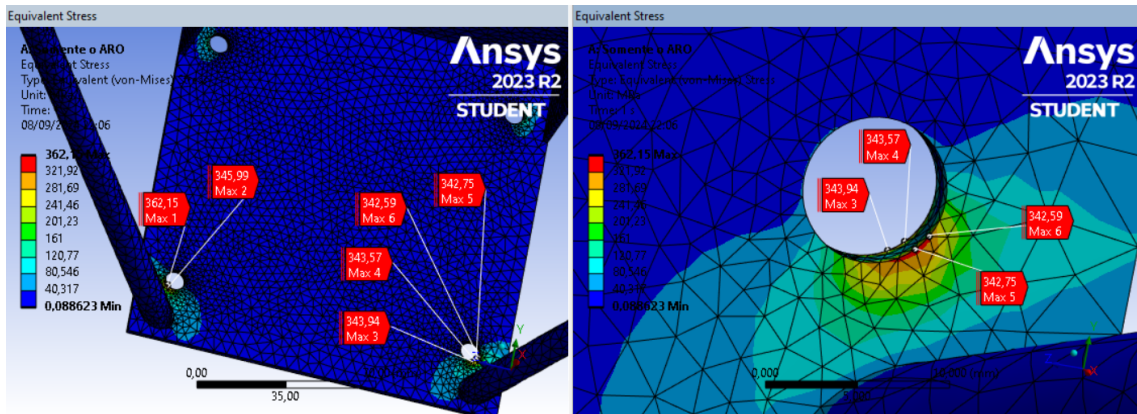


Fonte: Elaboração própria.

Avaliando os resultados, é possível reparar que a tensão máxima identificada aumentou muito, com valores acima de 300 MPa em alguns pontos. Isso aconteceu pois o refinamento da malha revelou alguns pontos concentradores de tensão, evidenciados na Figura 31. Estes pontos estão localizados exatamente no entorno dos furos de fixação, onde foi imposto o engaste da cesta.

Os valores de tensão nesta região ultrapassam bastante o limite de escoamento do material, chegando próximo até mesmo do limite de fratura. Portanto, fica evidente que a modelagem não está condizente com a realidade, e o problema provavelmente se dá pela maneira como a cesta foi fixada, já que na realidade existe movimento relativo entre parafuso e face interna do furo, além de haver uma pequena folga entre eles.

Figura 31 – Pontos com alta concentração de tensão.

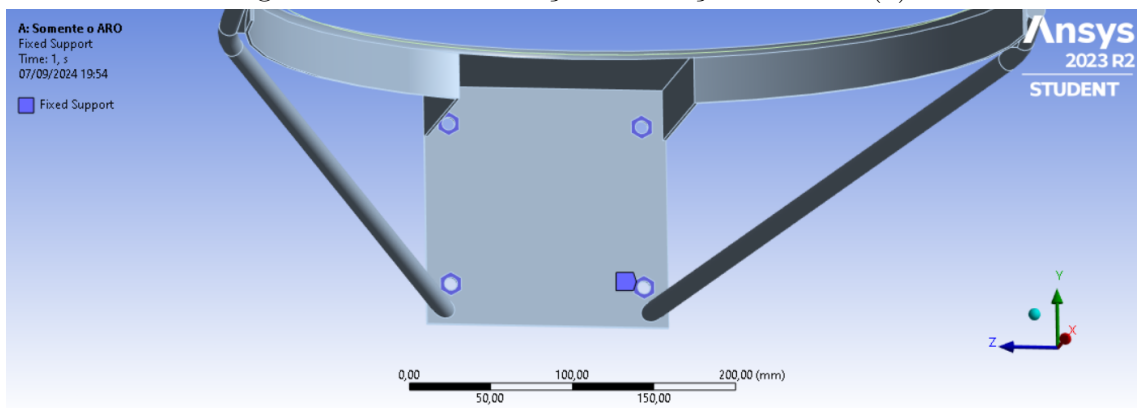


Fonte: Elaboração própria.

3.2.1.3 Terceira iteração

Com o objetivo de sanar este problema com o concentrador de tensão extrapolado, alterou-se a condição de contorno de fixação da cesta. Desta vez, visto que o parafuso é fortemente pressionado contra a chapa de fixação do aro, engastou-se as faces correspondentes ao contato da cesta com o parafuso de cabeça hexagonal e bitola 8mm. Além disso, como a face de fixação da cesta é, também, pressionada contra a tabela de madeira quando instalada, bloqueou-se o movimento da face de fixação nessa direção. A nova condição está ilustrada nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Nova condição de fixação da cesta (1).

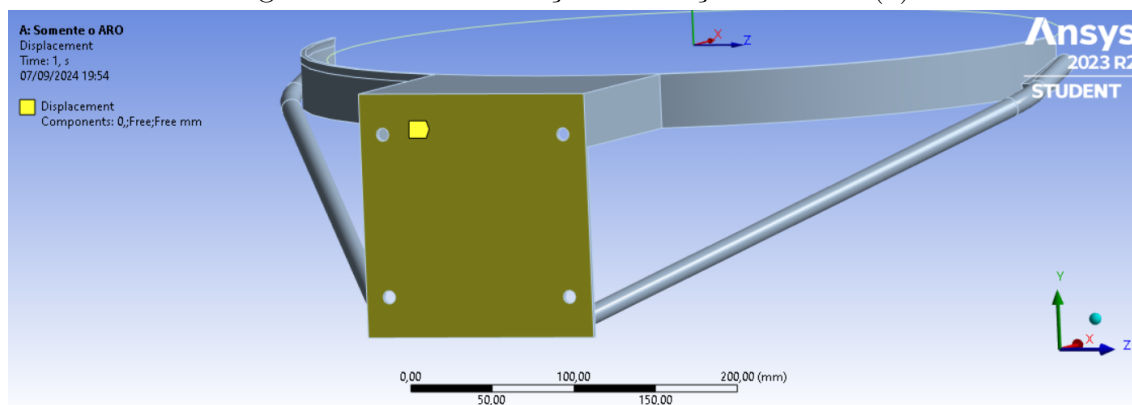


Fonte: Elaboração própria.

Além disso, refinou-se a maneira de fixação das diferentes geometrias do aro. Conforme evidenciado pela Figura 34, foram criados contatos representativos de solda entre o aro e a chapa curva da cesta, e entre a chapa curva da e a "viga" cilíndrica que conecta ela na chapa de fixação da cesta.

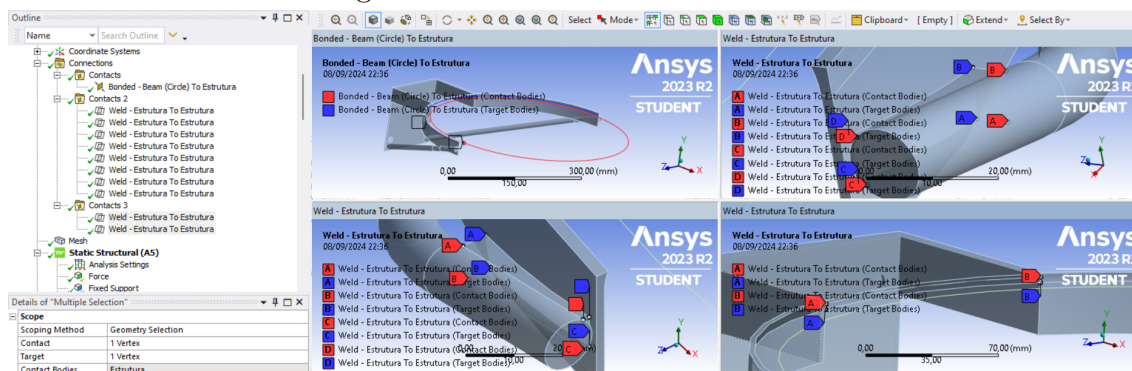
Conforme resultados obtidos na simulação estática desta vez e ilustrados nas Figuras 35 e 36, as tensões são mais realistas e os cálculos do tipo "nivelado" e "não nivelado" convergiram mais, além da diferença nodal máxima ter reduzido significativamente.

Figura 33 – Nova condição de fixação da cesta (2).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 – Pontos de solda criados.

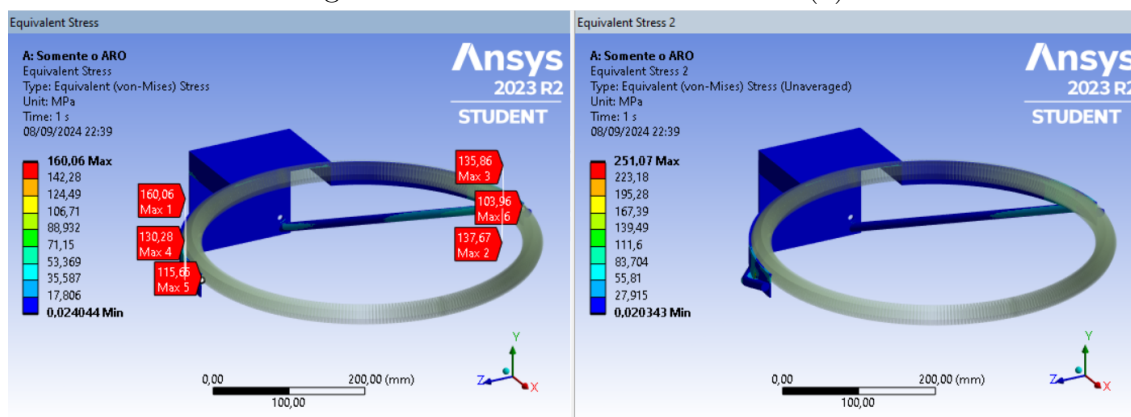


Fonte: Elaboração própria.

Com as últimas mudanças, o alto valor para diferença nodal foi identificado somente em uma pequena região de todo o sistema, que é aquela representada na Figura 36. Fora esta seção (de ambos os lados da cesta), dificilmente a diferença nodal ultrapassa 15 MPa.

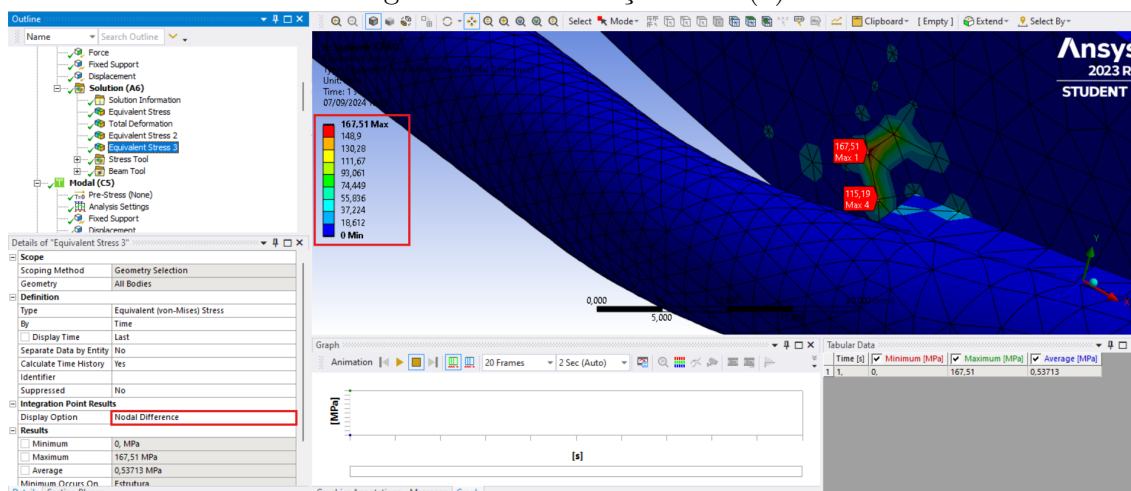
Como a redução de malha já não é mais possível dado o limite de nós, além do custo computacional já estar bem elevado, esta malha será mantida apesar do problema desta região. Os resultados finais deverão ser avaliados com cautela, tendo o entendimento de que nesta pequena parte da cesta a confiabilidade do resultado não é tão alta quanto ela é no restante da geometria.

Figura 35 – Nivelado x Não nivelado (3).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 – Diferença nodal (3).



Fonte: Elaboração própria.

3.2.2 Análise Dinâmica

Concluído o refinamento da malha, é possível iniciar sem grandes problemas as análises mais adequadas ao problema, que é um caso dinâmico de impacto entre dois objetos.

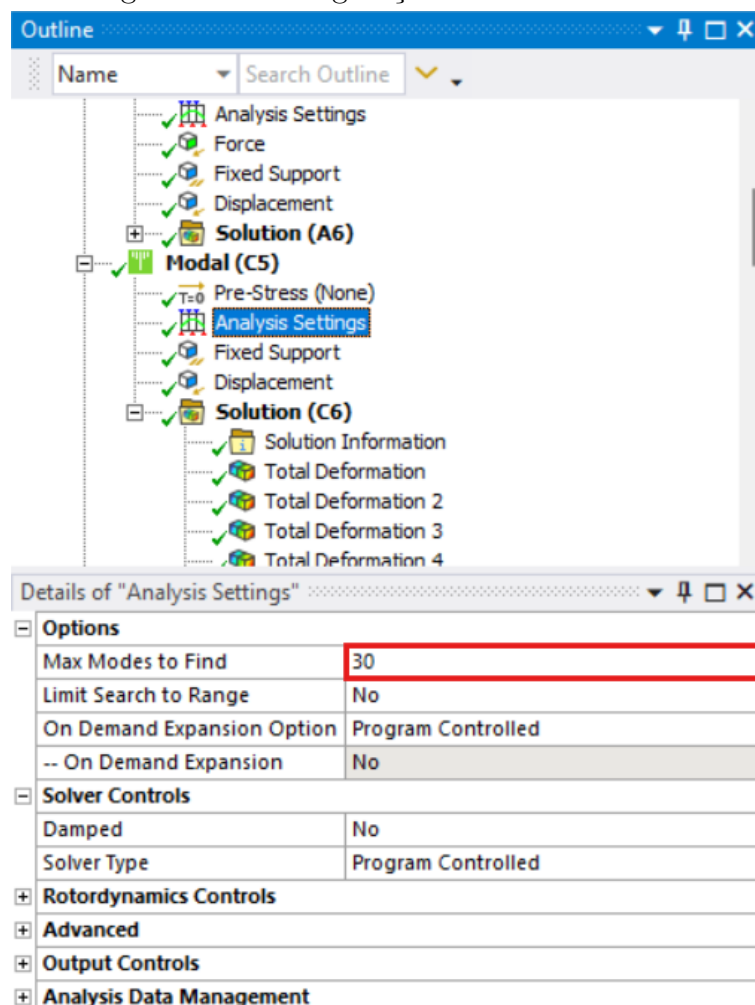
Esta aproximação ao caso iniciou-se com uma análise modal, seguida de uma transiente em cima dos resultados modais. Esse tipo de estudo proporciona uma visualização rica das formas modais de vibração de uma geometria, além de exigir menor consumo computacional. Após, a modelagem foi submetida a uma análise transiente completa para adquirir um resultado mais robusto.

3.2.2.1 Modal e Transiente por Superposição Modal

Para a análise modal, foram utilizadas as mesmas fixações da estática e, após alguns testes, definido que a geração de 30 modos de vibração seria ideal. A Figura 37

mostra esta configuração, enquanto a Figura 38 ilustra o primeiro modo de vibração gerado, excitado na frequência de 49,25 Hz.

Figura 37 – Configuração da análise modal.



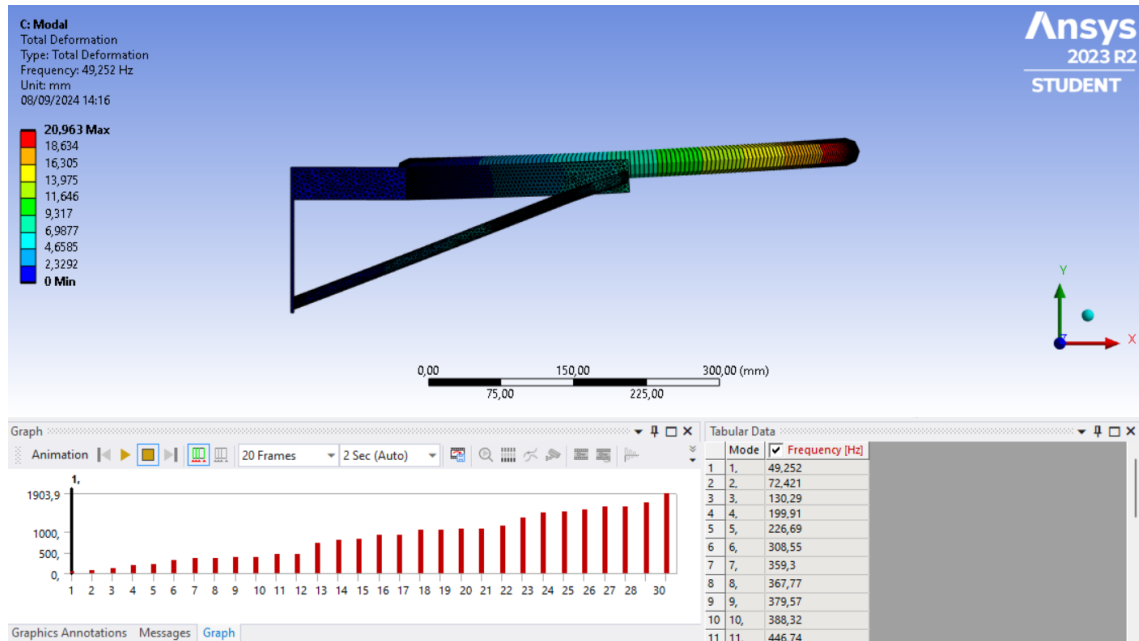
Fonte: Elaboração própria.

Para conferir se a quantidade de formas modais geradas foi suficiente para geração confiável de resultados, avaliaram-se os resultados, mostrados na Figura 39, de taxa de massa efetiva do conjunto, disponíveis na janela de "Informação da solução" do Ansys Mechanical, seção de simulação modal.

As taxas de translação situam-se acima de 83%, enquanto as de rotação acima de 71%, que são valores razoáveis. O ideal nesta taxa é chegar o mais próximo possível de 100%, no entanto, acrescentar formas modais na análise aumenta consideravelmente o tempo computacional de cálculo dos resultados.

No presente estudo, testou-se a simulação com 60 modos de vibração, elevando em até 7% os valores das taxas de massa efetiva, porém o tempo para executar a simulação foi muito alto e os resultados se diferiram bem pouco daqueles apresentados para 30 formas modais. Portanto, definiu-se suficiente continuar com a utilização de 30 formas.

Figura 38 – Primeiro modo de vibração da cesta.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Tabela de taxas de massa efetiva.

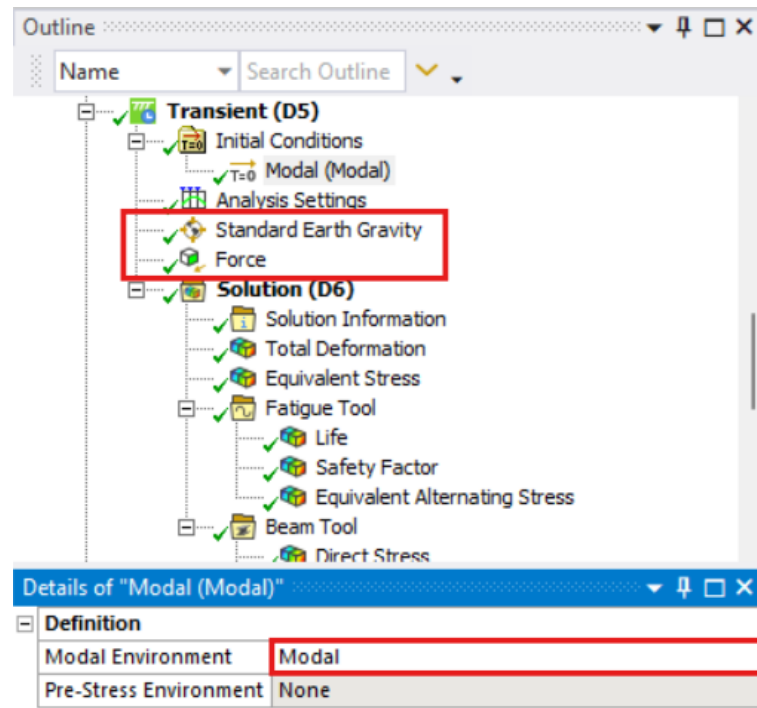
Mode	Frequency [Hz]	X Direction	Y Direction	Z Direction	Rotation X	Rotation Y	Rotation Z
12	467,53	2,3711e-008	1,0037e-007	1,3889e-004	2,6572e-002	5,6269e-002	1,0653e-006
13	734,6	0,10367	5,1623e-004	7,381e-008	6,7709e-009	1,5888e-007	7,9629e-004
14	804,19	1,3481e-007	2,3562e-006	0,12683	3,1322e-004	0,14133	7,268e-006
15	809,5	3,9417e-003	4,7161e-003	4,2811e-005	3,1793e-007	4,5381e-005	1,5757e-002
16	908,95	1,1857e-007	1,6164e-006	0,16745	9,8083e-004	0,17939	5,0518e-006
17	918,57	2,0934e-006	9,3447e-004	3,6605e-004	1,761e-006	3,9497e-004	2,6721e-003
18	1024,5	6,803e-007	1,5415e-006	4,5776e-003	1,3155e-003	4,9933e-003	2,1732e-006
19	1040,4	4,9173e-004	5,116e-003	3,7427e-006	2,5143e-007	2,1163e-006	1,2276e-002
20	1052,5	2,5602e-005	6,2714e-006	4,7854e-003	5,6024e-005	4,2788e-004	2,5014e-008
21	1054,	1,9171e-002	1,8151e-003	1,0664e-005	6,1241e-008	2,9712e-006	1,5216e-003
22	1125,8	1,6793e-007	4,0611e-008	4,0816e-002	2,203e-003	0,10888	4,3627e-008
23	1319,	1,5208e-008	9,7622e-008	4,4521e-004	1,5259e-005	7,2368e-004	3,807e-008
24	1456,3	0,11139	8,9775e-005	3,2474e-007	2,9961e-008	6,1505e-007	6,5726e-005
25	1468,8	1,1699e-004	4,0058e-005	1,1843e-002	4,4399e-003	2,3502e-002	1,8711e-006
26	1524,4	1,2924e-002	2,6162e-003	3,788e-005	4,5557e-006	5,5993e-005	2,2894e-004
27	1584,9	3,7942e-004	1,3414e-003	2,4047e-006	1,6195e-005	1,6059e-005	3,3747e-004
28	1591,1	1,1837e-004	6,7489e-007	3,3623e-007	1,916e-006	2,154e-006	2,5973e-004
29	1677,2	4,217e-008	3,6638e-005	6,9936e-003	9,1479e-003	1,8996e-002	8,3507e-006
30	1903,9	0,11023	1,126e-003	1,3252e-004	2,3974e-005	5,8799e-004	1,7163e-003
Sum		0,82976	0,9144	0,90182	0,95494	0,76762	0,71277

Fonte: Elaboração própria.

Com a análise modal definida, é possível iniciar o estudo da transiente modal, que foi configurada conforme Figura 40 em 2 passos (*steps*).

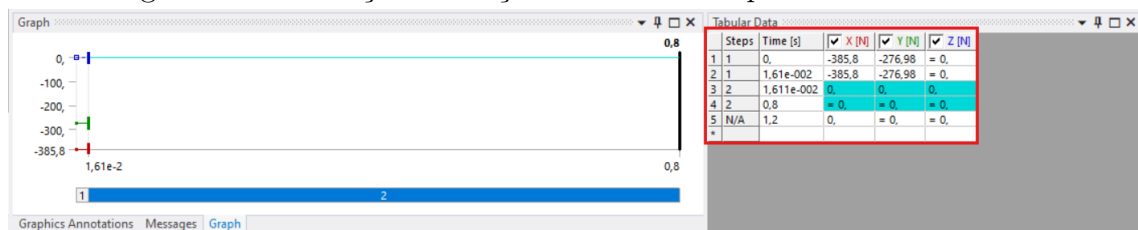
Observa-se que foi incluído o efeito da força de gravidade terrestre, além da aplicação da força de impacto da bola de maneira dinâmica. Assim como evidenciado na Figura 41, a força de impacto é aplicada no primeiro passo, com magnitude média e duração de 16,1 ms conforme calculado previamente. Após, o sistema fica livre de forças externas, com taxa de amortecimento de 2% e roda até 0,8 s, com tempo de passo (*time step*) de 1,61 ms. A Figura 42 comprova que neste tempo o sistema já estabilizou.

Figura 40 – Configuração da análise transiente modal.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 41 – Tradução da força dinâmica de impacto da bola no aro.



Fonte: Elaboração própria.

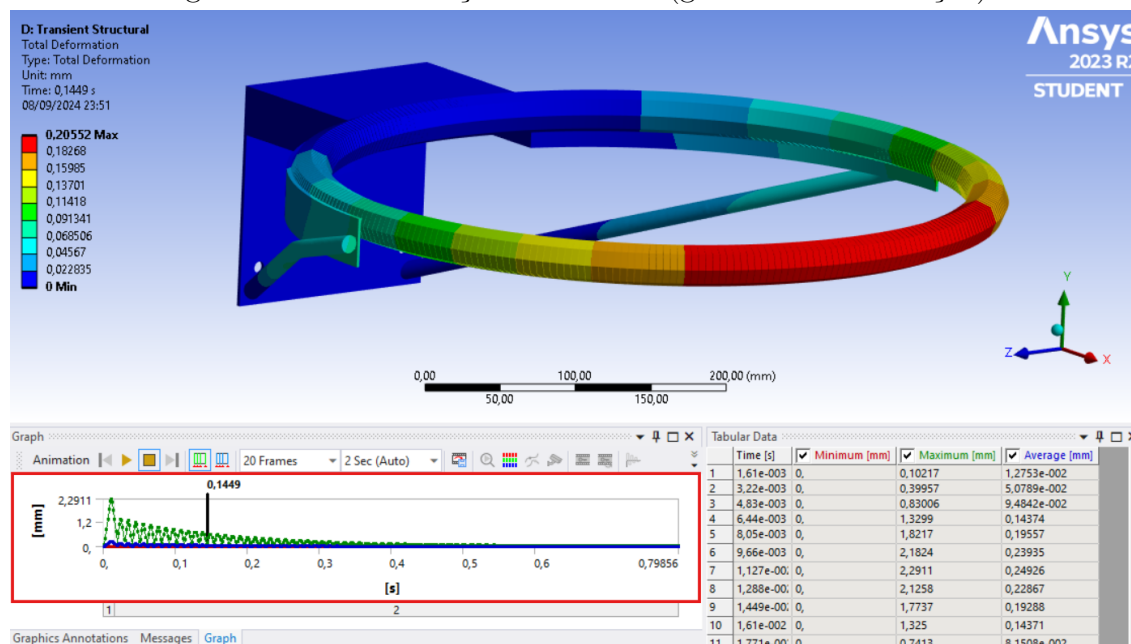
3.2.2.2 Transiente Completa

Para esta análise, balizando-se em adquirir a maior quantidade de pontos possíveis sem elevar muito o tempo de cálculo do software, foram aplicadas as seguintes características para tamanho dos passos:

Passo 1

- Tempo final do passo: 0,0161s.
- Primeiro intervalo de plotagem: 0,001s.
- Intervalo mínimo de plotagem: 0,0005s.
- Intervalo máximo de plotagem: 0,00161s.

Figura 42 – Estabilização do sistema (gráfico de deformação).



Fonte: Elaboração própria.

Para escolha dos intervalos de plotagem, foi definido como maior intervalo possível um décimo do tempo de aplicação de força: $0,0161/10 = 0,00161$. Além disso, o menor valor de frequência encontrado na análise modal foi de 49,25 Hz, e recomenda-se que o passo seja de pelo menos $\frac{1}{60}$ da frequência. Como o passo de 0,00161 também se enquadra neste requisito, foi considerado como um valor adequado para a simulação.

Passo 2

- Tempo final do passo: 0,8s.
- Primeiro intervalo de plotagem: 0,006s.
- Tamanho mínimo de plotagem: 0,003s.
- Tamanho máximo de plotagem: 0,008s.

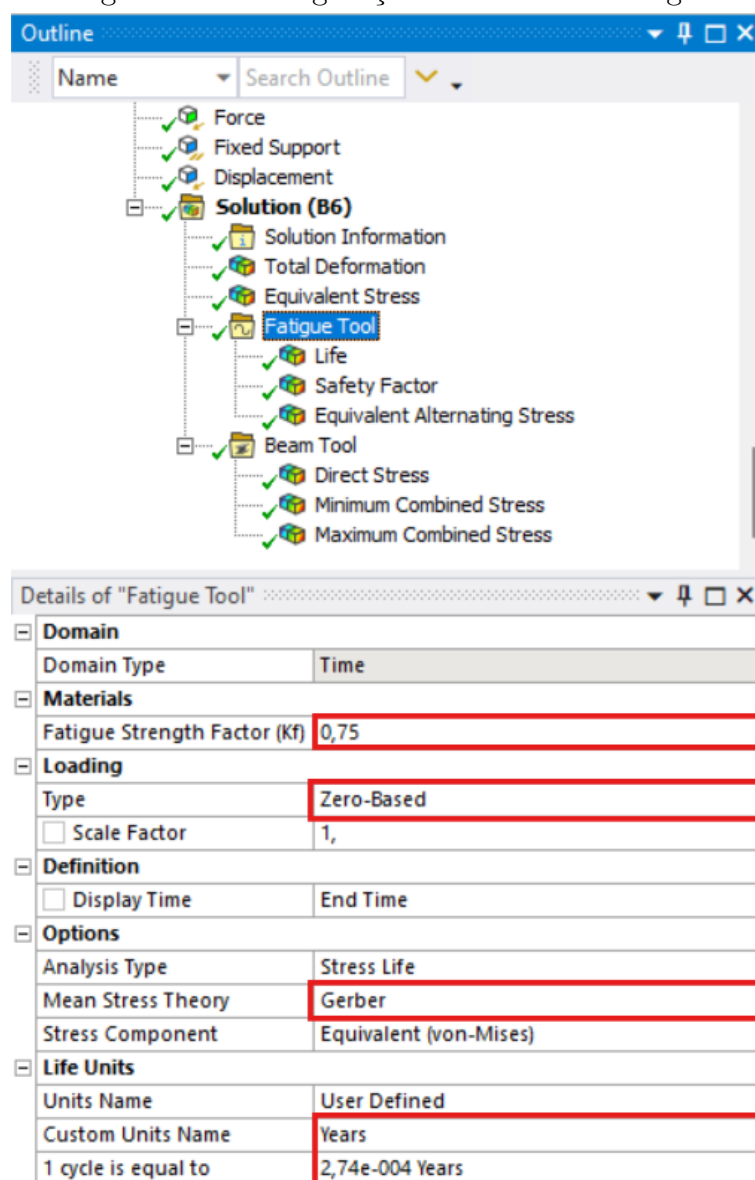
O comportamento de estabilização do sistema foi semelhante ao obtido na transiente modal, portanto as configurações definidas (obtidas após alguns testes) são satisfatórias.

Por fim, para análise de **fadiga** do sistema, foram estabelecidos os parâmetros conforme Figura 43, no qual:

- **Fator de resistência a fadiga (Kf) = 0,75**, pois em cestas nesta faixa de preço a fabricação do produto não possui controle rigoroso das propriedades do material, além do fato de que o sistema fica exposto a intempéries, já que muitas vezes é alocado ao ar livre.

- **Tipo: a partir do zero** uma vez que a força é aplicada desde o zero até seu valor máximo repetidas vezes.
- **Teoria de tensão média: Gerber** que, segundo Budynas e Nisbett (2014), é o mais apropriado para materiais dúcteis.
- **Unidade de medida personalizada: Years.** Contagem do tempo de vida em anos, considerando média de 10 impactos por dia.

Figura 43 – Configuração da análise de fadiga.



Fonte: Elaboração própria.

Com isso, **a modelagem está completa** e é possível extrair dela os resultados da simulação e observar como a geometria da cesta de basquete se comporta dinamicamente após o impacto da bola no aro.

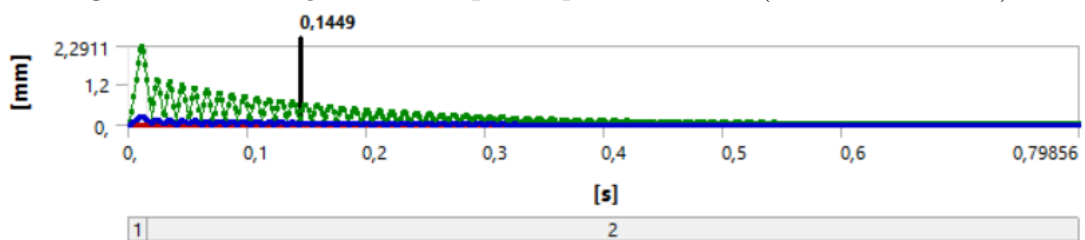
4 RESULTADOS

Para o objetivo do presente estudo, que é estudar possíveis pontos de falha na estrutura da cesta de basquete, os resultados de maior interesse são os de tensão. Dentro do ambiente Ansys Mechanical foram, portanto, calculadas as seguintes reações internas no corpo:

1. **Tensão equivalente:** tensão de Von-Mises, que é capaz de proporcionar individualmente uma visibilidade bastante completa dos esforços internos gerados em um corpo. Não costuma ser utilizada no cálculo de fadiga, mas dá informações importantes sobre potenciais pontos de falha do material.
2. **Tensão direta:** tensão nos elementos de viga. Como a malha das vigas dentro do software é gerada de uma maneira diferente, a visualização da tensão nos elementos viga é feita por meio do cálculo da tensão direta.
3. **Tensão alternada equivalente:** tensão apropriada para cálculo de fadiga, representando o esforço oscilatório que é gerado pela repetição de ciclos de uma carga.

Para enriquecer a visualização do efeito vibratório gerado no aro, é interessante também observar como ocorreu o amortecimento do aro. Este fenômeno é evidenciado pelo resultado de **deslocamento** e é representado pelas Figuras 44 e 45 (transiente modal e completa, respectivamente).

Figura 44 – Vibração do aro após impacto da bola (transiente modal).



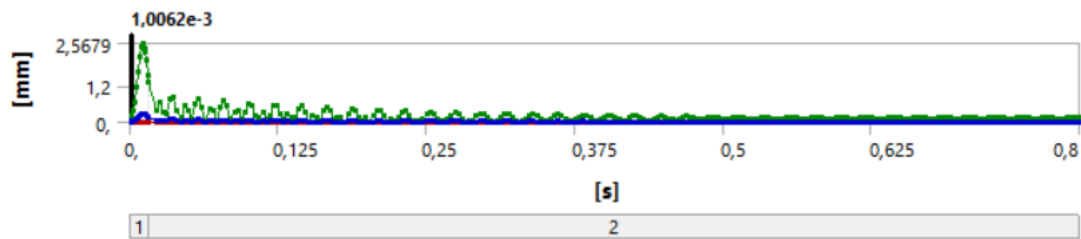
Fonte: Elaboração própria.

Uma diferença curiosa é que o amortecimento da cesta na análise modal acontece gradualmente, enquanto na completa isso ocorre de maneira brusca, reduzindo bastante a amplitude de vibração no momento imediato após o impacto da bola. Apesar disso, o tempo para estabilização do sistema é semelhante, próximo a 0,5 segundo.

Com estas premissas, foram então gerados os resultados tanto na análise **transiente modal** quanto na **transiente completa** para efeito de comparação, possibilitando maior confiabilidade dos resultados.

Os valores de tensão foram calculados para cada passo estabelecido na modelagem,

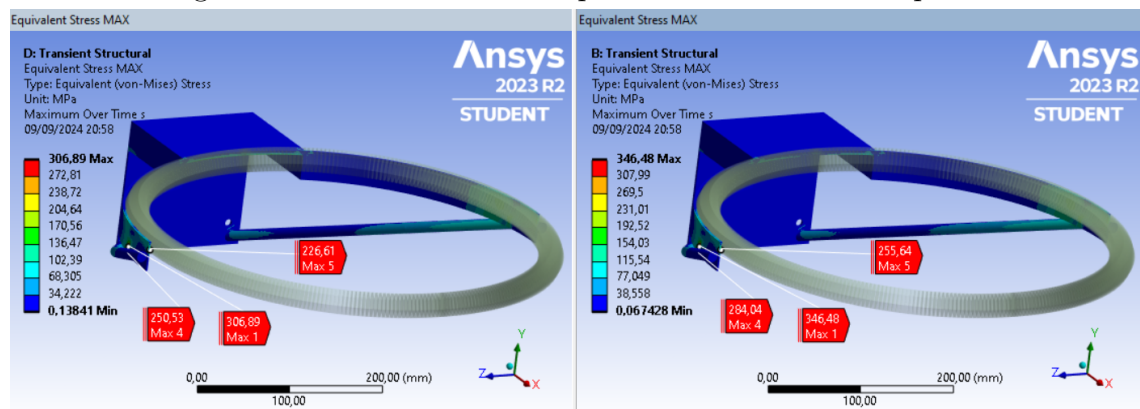
Figura 45 – Vibração do aro após impacto da bola (transiente completa).



Fonte: Elaboração própria.

para um total de 496 pontos, portanto serão aqui indicados apenas os mais relevantes. As tensões máximas obtidas ao longo do tempo podem ser observadas nas Figuras 46 e 47, enquanto a tensão alternada, que é uma só, está ilustrada na Figura 48.

Figura 46 – Tensão máxima equivalente: Modal x Completa.



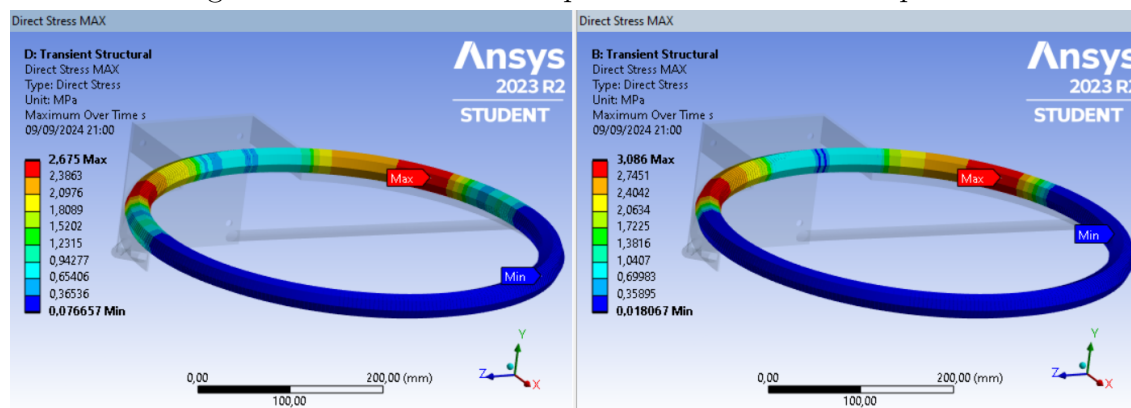
Fonte: Elaboração própria.

Primeiro, para a máxima tensão equivalente de Von-Mises obtida ao longo do tempo (Fig. 46), foram identificados valores de alta ordem de grandeza em ambos os tipos de análises (acima dos 300 MPa, o que é acima do limite de escoamento do aço carbono 1020). No entanto, esse alto nível de tensão foi gerado em apenas um ponto dos 496 gerados, na metade do tempo de impacto da bola (que é o momento mais crítico), e na região da cesta onde já havia sido identificado alto gradiente de tensão na análise estática.

Além disso, a preocupação com este momento de alta tensão é amenizada quando se avalia o resultado de tensão alternada equivalente (Fig. 48). Neste caso, fica evidente que a análise modal não foi eficaz para obtenção desse tipo de tensão, visto que entregou valores bastante elevados em uma mesma região de junção do aro com a chapa de fixação, o que vai de encontro com resultados obtidos para tensão de Von-Mises em todos os casos.

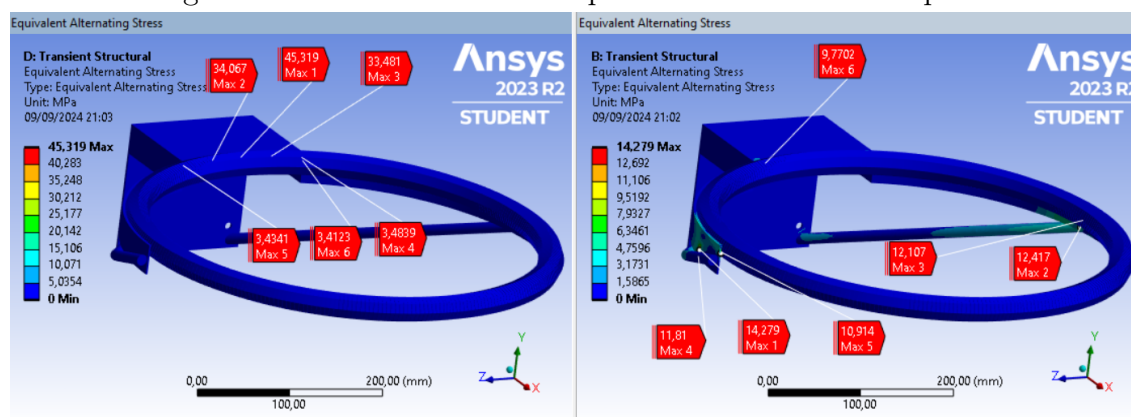
Por outro lado, na transiente completa as regiões de maior tensão se harmonizam com aquelas identificadas anteriormente, o que traz solidez ao resultado, e neste caso os valores encontrados foram bem mais baixos, o que significa que haverá maior resistência da cesta à falha por fadiga.

Figura 47 – Tensão direta equivalente: Modal x Completa.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 48 – Tensão alternada equivalente: Modal x Completa.



Fonte: Elaboração própria.

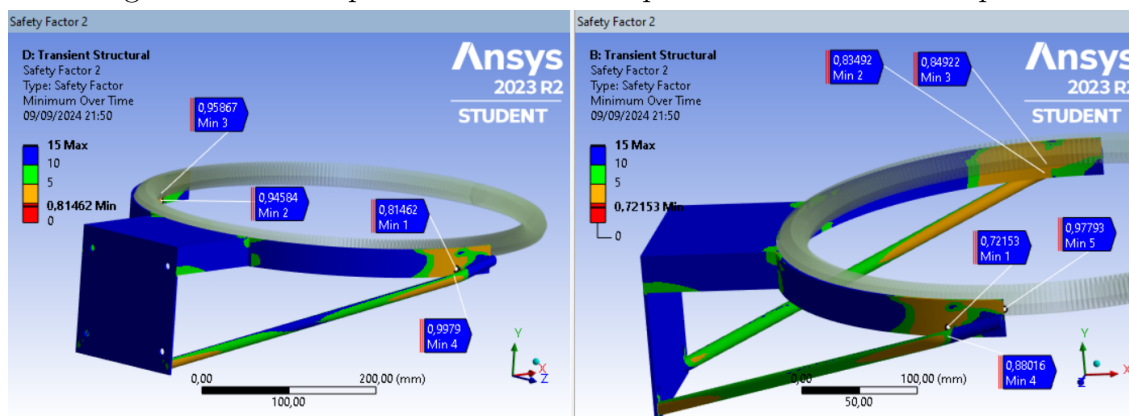
Por fim, a máxima tensão direta no aro (elemento de viga, Fig. 47), foi de magnitude bem reduzida, deixando claro que esta região possui alta resistência ao efeito causado pelo impacto da bola de basquete e, portanto, não deve falhar nem mesmo com alta ocorrência de ciclos.

Com os resultados obtidos e interpretados, foram extraídos finalmente os **fatores de segurança**, obtidos comparando-se as tensões geradas no corpo da cesta de basquete com alguma medida de referência. Utilizou-se uma referência para cada tipo de aproximação ao problema (falha por máxima tensão equivalente e por fadiga), conforme o que segue:

- **Falha:** tensão equivalente de Von-Mises ao longo do tempo é comparada com a tensão de escoamento do material (no caso do aço estrutural, 250 MPa).
- **Fadiga:** tensão alternada equivalente é utilizada dentro da teoria de Gerber para avaliar o desgaste por fadiga de materiais dúcteis. O valor de referência é de 5 anos de duração para a cesta, considerando-se a média de 10 impactos diários entre a bola e o aro.

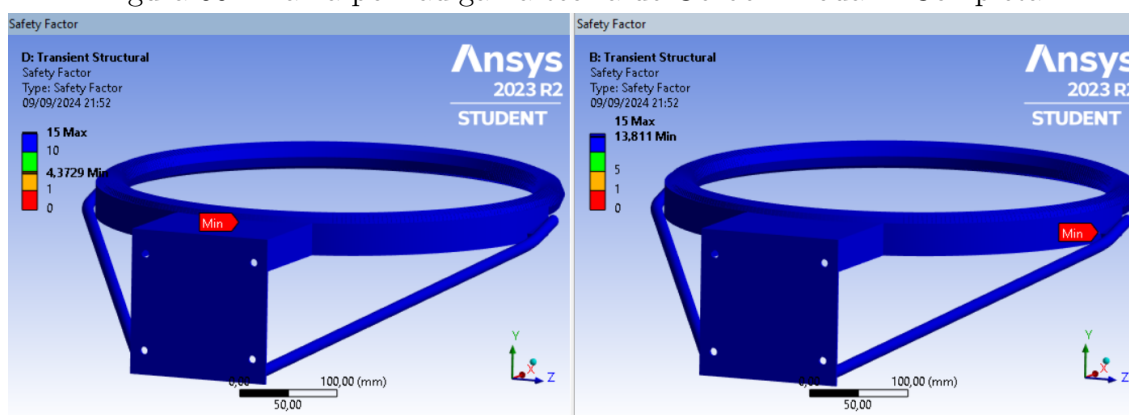
Em cima destas componentes foram, então, calculados os Fatores de Segurança ao longo do tempo simulado (0,8 segundo), sendo que os menores valores identificados estão representados na Figura 49. Já a análise do Fator de Segurança de falha por fadiga, utilizando-se da teoria de Gerber, pode ser observada na Figura 50.

Figura 49 – Falha por máxima tensão equivalente: Modal x Completa.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 50 – Falha por fadiga na teoria de Gerber: Modal x Completa.



Fonte: Elaboração própria.

Na análise de falha que se embasa na comparação em cada ponto temporal da tensão equivalente de Von-Mises com a tensão limite de escoamento, verificou-se, no tempo mais crítico (10,68 ms), 4 a 5 pontos isolados de potencial falha do material, onde o Fator de Segurança $FS < 1$. Por outro lado, na avaliação de falha por fadiga, o FS apresenta valores bastante confortáveis ao longo de toda a geometria da cesta de basquete.

Essas duas observações em conjunto indicam que deve haver cautela na análise daquela região da cesta onde os Fatores de Segurança ficaram abaixo de um (na teoria de falha por máxima tensão equivalente), visto que os nós onde há falha foram isolados e ocorrem em um intervalo de tempo de apenas 5 milissegundos. Ainda assim, é evidente que os pontos de maior atenção devem ser nas conexões entre diferentes partes da cesta

(normalmente soldadas), como na junção entre aro-chapa de fixação ou na junção entre o aro-cilindros.

Com a obtenção dos resultados de **mínimo Fator de Segurança** gerados no corpo da cesta a partir do impacto de uma bola de basquete na região do aro, tem-se o necessário para tiradas de conclusões a respeito do fenômeno estudado. É possível avaliar não só as resistências mecânicas instantânea e temporal (por ciclos de carga), como a confiabilidade dos resultados gerados. Neste contexto, antes de partir para as conclusões definitivas, no entanto, algumas informações já podem ser abstraídas dos resultados obtidos.

Primeiramente, no campo da modelagem propriamente dita, ficou claro que ainda cabem maiores refinamentos para precisão dos resultados. Uma maneira de otimizar a resolução dos problemas seria, além de modificar o elemento do aro para tipo "viga", alterar toda a chapa de fixação para casca (*shell*), de modo a reduzir ainda mais o número de nós nestes pontos, reduzindo o tempo de cálculo pelo software ou então podendo refinar mais a malha em outros pontos.

Ainda nessa instância, outro ponto que agregaria muito no procedimento de modelagem e principalmente na confiabilidade das condições de contorno e nos resultados, seria avaliar alguns valores com cálculos realizados à mão, sem a utilização direta do software. Por exemplo, a magnitude da força de impacto entre bola e aro, que foi calculada via impulso, poderia ter maior confiabilidade se fosse obtida também por outro método, como o método de energia apresentado por Beer (2011).

Uma mudança que foi considerada, porém a após a análise conclui-se que poderia afetar negativamente os resultados da simulação, seria considerar as duas barras laterais da cesta como elemento de "viga". Isso porque, nestes elementos foram identificados valores consideráveis de tensão, logo a simplificação de elemento sólido para viga poderia empobrecer a confiabilidade de resultados importantes.

Por outro lado, na esfera da análise dos resultados, ficam evidentes dois aspectos: os pontos mais frágeis do aro são nas proximidades das soldas; o aro por si só não é o elo fraco do conjunto completo da cesta. Com isso, entende-se que a geometria geral do aro estudado oferece boa resistência mecânica e em elaboração de um novo modelo esta condição de contorno deve ser mantida.

Apesar disso, como as maiores tensões são geradas nas proximidades das regiões de junção da cesta (pontos e linhas de solda), fica evidente que o maior ponto de atenção durante a fabricação das cestas de basquete deve ser na conexão entre as diferentes partes do aro. As atividades de solda devem possuir o controle de qualidade mais rígido, visto que as simulações realizadas no presente estudo consideram uma solda ideal, portanto uma pequena falha nos pontos e linhas de solda poderia significar falha precoce do aro estudado.

Para otimização de material, as chapas de fixação devem apresentar uma espessura menor do que as chapas que se conectam no aro (região circular da cesta), pois na primeira

região supracitada as tensões geradas são consideravelmente menores do que na segunda. Como essas duas regiões são conectadas também por solda, um controle de qualidade maior deve ser aplicado no momento da montagem.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Retomando o objetivo principal do presente estudo "análise da possibilidade de melhoria da resistência mecânica de uma cesta de basquete", é cabível dizer que não atingiu-se o resultado final (de desenvolver um modelo mais eficaz que seja aplicável no mercado), mas propiciou a geração de informações valiosas no caminho deste desenvolvimento.

Como primeiro ponto, no que tange o Método de Elementos Finitos, ficou evidente que é um processo delicado, no qual uma modelagem incorreta pode criar resultados enganosos. Deve ser desenvolvido aos poucos, encontrando pontos de melhoria e refinando a modelagem até que os valores calculados ao final do procedimento sejam equivalentes à realidade. O presente projeto foi capaz de gerar resultados realistas, mas que parecem confiáveis apenas até certo ponto, mostrando que até para uma geometria única e de baixa complexidade, a qualidade da malha e das condições de contorno são de absoluta importância. Para validar completamente um modelo MEF, o ideal seria juntamente com a simulação, executar testes práticos com sensores para medição das tensões, o que não é algo simples.

Neste contexto, mesmo em conhecimento das limitações da simulação, é imprescindível reconhecer os ganhos do projeto desenvolvido. Primeiramente, como o material utilizado para o aro na simulação é compatível com a realidade e os resultados de deformação e vibração temporal do objeto apresentaram magnitudes bastante realistas se comparadas com o observado na prática, pode-se validar o cálculo da força de impacto causada pela bola no aro. Mesmo utilizando-se de diferentes maneiras de fixação da cesta, a deformação ao longo do tempo observada foi bastante semelhante ao que acontece na realidade, portanto **a magnitude de velocidade e força calculada é completamente válida.**

Ademais, outra importante informação abstraída das simulações foi que, mesmo com indicadores de alta tensão equivalente (Von-Mises) em determinados pontos da cesta no momento do impacto, a falha por fadiga **não ocorre**. As tensões alternadas equivalentes não são suficientes para ocasionar falha por fadiga na geometria da cesta em menos de 50 anos, conforme análise transiente completa.

Pontuadas as interpretações acima, tornam-se evidentes dois grandes pontos de melhoria do presente estudo:

- **Refinamento de malha** nos pontos próximos às ligações entre diferentes partes da cesta (soldas) para avaliar se os nós que apresentam alta tensão concentrada (e alto gradiente) representam de fato a realidade.
- **Expansão da modelagem**, concluindo o estudo acima do aro como objeto isolado, e partindo para montagem do conjunto completo da cesta, tabela e parafusos, com fixação em parede de alvenaria ou concreto. As deteriorações dos modelos acessíveis

de tabelas de basquete, sejam em locais públicos ou particulares, são amplamente visíveis, portanto se não ocorre falha na geometria da cesta, é porque definitivamente ela ocorre em outro local, como por exemplo na junção dos parafusos que conectam a cesta na tabela e na parede.

Com os resultados gerados pelo presente trabalho, existe maior possibilidade de expandir a modelagem do conjunto aro-tabela com sólido embasamento, uma vez que foram validadas a força de impacto da bola no aro e a resistência à fadiga da cesta, além de quais são os pontos críticos mais carregados. Com os resultados autênticos que esta simulação poderia produzir, tornaria-se viável a elaboração final de um modelo mais acessível de tabela de basquete, possibilitando a maior democratização da prática do basquete.

REFERÊNCIAS

- AUSTIN. **What are Basketballs Made Of? A Look at the top 3 Materials Used Today.** 2024. Disponível em: <<https://www.ballerinstinct.com/what-are-basketballs-made-of/>>. Acesso em: 27 jun. 2024.
- BEER, F. P. **Mecânica dos Materiais, 5. ed.** [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2011.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Mechanical Engineering Design.** 9th. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0073398204.
- BURKHALTER, D. Simulation-driven design of a portable basketball hoop system. **Proceedings**, 2020.
- CODA, H. B. **Mecânica dos Sólidos, Volume I.** [S.l.]: EESC/USP, 2017.
- CROSS, R. The bounce of a ball. **American Journal of Physics - AMER J PHYS**, v. 67, p. 222–227, 03 1999.
- FIBA, I. B. F. **Official Basketball Rules 2022, Basketball Equipment.** [S.l.]: FIBA, 2022.
- FISH, J. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos.** [S.l.]: LTC, 2009.
- FONTANELLA, J. J. **The Physics of Basketball.** [S.l.]: The Johns Hopkins University Press, 2006.
- ITF, I. T. F. **ITF Rules of Tennis 2020.** [S.l.]: ITF, 2020.
- MADEHOW. **Basketball.** 2024. Disponível em: <<https://www.madehow.com/Volume-6/Basketball.html>>. Acesso em: 27 jun. 2024.
- MYBASKETBALLACADEMY. **Air Pressure for Basketball.** 2023. Disponível em: <<https://www.mybasketballacademy.com/en/blog/air-pressure-for-basketball/#:~:text=The%20standard%20air%20pressure%20for%20a%20basketball%20varies,the%20low%20end%29%20at%206.5%20to%208.5%20PSI.>> Acesso em: 27 jun. 2024.
- (NCD-RISC), N. R. F. C. A century of trends in adult human height. **eLife**, eLife Sciences Publications, Ltd, v. 5, p. e13410, jul 2016. ISSN 2050-084X. Disponível em: <<https://doi.org/10.7554/eLife.13410>>.
- RESNICK, H. . **Fundamentals of Physics, Volume One, Ninth Edition.** [S.l.]: Jearl Walker, 2012.
- SANTOS, A. M. M. M. **Esportes no Brasil: situação atual e propostas para desenvolvimento.** [S.l.]: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 1997.
- TOLEDO, R. N. **Os Fundamentos da Física - Mecânica, Volume Um, 9ª edição.** [S.l.]: Moderna, 2007.
- UNIVERSITY, C. Basketball: The physics of the 3-point shot. **ScienceDaily**, 2014.
- WILSON. **NBA Official Game Basketball.** 2024. Disponível em: <<https://www.wilson.com/en-us/product/nba-official-game-basketball-wz10025#colorsteamname=54557&size=52577>>. Acesso em: 27 jun. 2024.