



**Emilly Alves da Silva de Oliveira**

**Desenvolvimento e Implementação de  
Sistema de Rodas Amortecedoras em um  
Robô Móvel de Quatro Rodas**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador: Prof. Marco Antônio Meggiolaro

Rio de Janeiro  
Junho de 2025

## Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me permitido viver esse sonho. Sou grata por cada dia em que Ele me sustentou, me fortaleceu e me guiou até aqui. Esta conquista é mais uma etapa vencida com fé e perseverança.

Agradeço profundamente aos meus pais, meus maiores apoiadores, por me proporcionarem a oportunidade de estudar, por cada sacrifício silencioso e por sempre acreditarem no meu potencial. Tudo o que sou e conquistei até hoje tem muito do amor, da dedicação e da força que recebi deles.

Ao meu companheiro de vida, Matheus Amaral, meu eterno melhor amigo e maior incentivador, deixo minha gratidão mais sincera. Sem você, eu não teria tido forças para chegar até aqui. Você foi meu alicerce nos momentos de angústia, e também minha alegria nos momentos de superação. Obrigada por me dar o presente mais especial quando eu mais precisava: nossa cadelinha Pandora, que veio para somar, trazendo leveza, conforto e carinho nos dias mais difíceis desta reta final.

Sou profundamente grata também aos meus irmãos, que foram e sempre serão meus parceiros de vida. Em cada momento de cansaço ou incerteza, encontrei neles apoio, cumplicidade e motivação para seguir em frente.

Quero dedicar esta conquista, com todo meu amor, ao meu avô. Ele sempre foi uma fonte de inspiração e orgulho para mim. Sei que, se estivesse aqui, estaria vibrando com essa vitória. Concluir este curso é, acima de tudo, uma forma de honrar o seu nome e tudo o que ele representou na minha vida.

Aos amigos que colecionei ao longo da faculdade, meu sincero agradecimento por cada troca, cada abraço e cada memória compartilhada. Em especial, agradeço à Riobotz, que desde o meu primeiro período foi minha verdadeira escola. Foi ali que aprendi, na prática, o que é ser engenheira: nas madrugadas de laboratório, nos desafios, nas conquistas e, principalmente, na força do trabalho em equipe. Agradeço a todos os membros e amigos que tive o privilégio de conhecer e conviver dentro da equipe. Cada experiência, aprendizado e vitória vividos com vocês serão lembrados com carinho por toda a vida.

Por fim, um agradecimento especial ao professor e amigo Marco Antônio Meggiolaro, por ter me proporcionado a honra de aprender com ele e realizar minha iniciação científica. Seu apoio, generosidade e exemplo profissional foram essenciais nesta trajetória.

A todos vocês, meu mais profundo obrigado.

## Resumo

### **Desenvolvimento e Implementação de Sistema de Rodas Amortecedoras em um Robô Móvel de Quatro Rodas**

Este trabalho apresenta o projeto e a fabricação de um sistema de suspensão passivo baseado em rodas amortecedoras impressas em 3D para um robô móvel de pesquisa com quatro rodas. A solução utiliza geometrias celulares (núcleos honeycomb, colunas radiais, perfurações circulares e ranhuras vortex-slot) combinadas a elastômeros flexíveis (TPU 95A e resina fotopolimérica SLA), permitindo a absorção de impactos sem a necessidade de atuadores ativos.

O estudo abrangeu a seleção de materiais e parâmetros de manufatura aditiva, análises por elementos finitos para prever deformações sob carga e ensaios em bancada que compararam as novas rodas a configurações rígidas convencionais. Os resultados demonstraram redução significativa dos picos de aceleração vertical e manutenção do contato roda-solo, indicando maior estabilidade e menor consumo energético. Conclui-se que o design celular bio-inspirado aliado a elastômeros impressos em 3D constitui uma alternativa leve, econômica e de fácil manutenção para plataformas robóticas de pesquisa que operam em terrenos irregulares.

### **Palavras-chave**

Suspensão passiva; Robô Móvel; Manufatura aditiva; TPU; Resina Flexível; SolidWorks; FEA.

## **Abstract**

### **Development and Implementation of Shock-Absorbing Wheel System in a Four-Wheeled Mobile Robot**

This work presents the design and fabrication of a passive suspension system based on 3D-printed compliant wheels for a four-wheeled research mobile robot. The solution employs cellular geometries—honeycomb cores, radial struts, circular perforations and vortex-slot grooves—combined with flexible elastomers (TPU 95A and flexible SLA photopolymer resin), enabling impact absorption without active actuators.

The study encompassed material selection and additive-manufacturing parameter optimization, finite-element analyses to predict deformation under load, and bench-top tests comparing the new wheels with conventional rigid configurations. Results showed a significant reduction in peak vertical accelerations and sustained wheel-ground contact, leading to greater stability and lower energy consumption. The bio-inspired cellular design combined with 3D-printed elastomers thus offers a lightweight, cost-effective and low-maintenance alternative for research robotic platforms operating on uneven terrain.

### **Keywords**

Passive suspension; Mobile robot; Additive manufacturing; TPU; Flexible resin; SolidWorks; FEA.

# Sumário

1	Introdução	12
1.1	Motivação deste Trabalho	13
1.2	Objetivos	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Arquiteturas de Suspensão para Robôs Móveis	15
2.2	Tipologias de Rodas para Robôs Móveis	17
2.2.1	Síntese Comparativa dos Tipos de Rodas	20
3	Estudo das Rodas	22
3.1	Estudo do Movimento das Rodas	22
3.1.1	Rolamento Puro	23
3.1.2	Escorregamento	24
3.2	Tipos de Rodas em Solo Rígido	26
3.2.1	Rodas Elásticas	26
3.3	Interação Pneu e solo	28
3.3.1	Modelagem das Forças de Contato	28
3.3.2	Representação Simplificada da Força Vertical	30
3.4	Modelo de Pacejka (“Magic Formula”)	31
4	Materiais Elastoplásticos e Design Estrutural	32
4.1	Tecnologias de Impressão 3D	32
4.1.1	Modelagem por Deposição Fundida (FDM)	32
4.1.2	Estereolitografia com Máscara (mSLA)	33
4.2	Propriedade dos Materiais	35
4.2.1	Elastômero Termoplástico TPU 95A	35
4.2.2	Resina Flexível Resione F69	38
4.3	Estruturas <i>Honeycomb</i>	39
5	Modelagem e Fabricação das Rodas	42
5.1	Roda <i>Honeycomb</i>	43
5.2	Inspirações Naturais e Fundamentação da Estrutura Celular <i>Honeycomb</i>	45
5.2.1	Estrutura Celular Leve e Eficiente	48
5.2.2	Desempenho em Terrenos Irregulares	49
5.3	Roda Morphing	49
5.3.1	Funcionamento da Roda Morphing	50
5.3.2	Componentes e Projeto da Roda Morphing	50
5.4	Roda com Colunas Radiais	52
5.4.1	Arquitetura Estrutural	53
5.4.2	Desempenho em Superfícies Irregulares	54
5.5	Roda Perfurada Circular	54
5.5.1	Arquitetura Estrutural	55
5.5.2	Desempenho em Superfícies Irregulares	55
5.6	Roda <i>Vortex-Slot</i>	56

5.6.1	Arquitetura Estrutural	57
5.6.2	Desempenho em Superfícies Irregulares	57
6	Robô Móvel Experimental	<b>59</b>
6.1	Visão Geral	59
6.2	Componentes Essenciais do Robô	60
6.2.1	Estrutura	60
6.2.2	Sistema de Atuação	60
6.3	Modelagem Cinemática	63
6.3.1	Coordenadas generalizadas	63
6.3.2	Velocidade corporal	63
6.3.3	Restrição não-holonômica	64
6.3.4	Modelagem dinâmica	64
6.3.5	Sistema de coordenadas	65
7	Resultados	<b>67</b>
7.1	Estudo Estrutural via FEA	67
7.1.1	Deformação sob Peso Próprio	67
7.1.2	Simulação de Transposição de Obstáculos	72
7.1.3	Avaliação dos Resultados Obtidos	77
7.2	Ensaio Experimentais com o Robo Puma+	78
7.2.1	Deformação sob Peso Próprio	80
7.2.2	Simulação de Transposição de Obstáculo	81
8	Conclusões	<b>84</b>
A	Datasheet do Filamento TPU da Empresa Slim3d	<b>88</b>
B	Datasheet do Filamento PETG da Empresa Slim3d	<b>89</b>
C	Datasheet da Resina F69 da Empresa Resione	<b>90</b>

## Lista de figuras

1.1	Exemplo de Robô com Rodas em Ambiente Industrial	12
1.2	Exemplo de Robô Trabalhando com Exploração Espacial	13
2.1	Exemplo de Robô com Suspensão Rocker-Bogie	16
2.2	Exemplo de Suspensão Double Wishbone	16
2.3	Exemplo de Robô com Wheel-leg Passiva	17
2.4	Exemplo de Roda Omnidirecional do tipo Mecanum	18
2.5	Diagrama do Deslocamento Resultante dada a Rotação de cada Roda Mecanum	19
2.6	Exemplo da Roda do Tipo Morphing	20
2.7	Exemplo da Roda do Tipo Morphing Transpondo Obstáculos	20
3.1	Movimento de um Cilindro em Rolamento Puro	24
3.2	Roda rolando: Roda puxada (esquerda) por $P$ com atrito $FSR$ e torque interno $M$ (direita) gerando atrito $FSR$	25
3.3	Roda elástica em contato com o solo.	27
3.4	Distribuição de pressão na área de contato .	27
3.5	Representação tridimensional das forças $F_{xij}$ , $F_{yij}$ , $F_{zij}$ e torques associados atuando no ponto de contato roda-solo.	29
3.6	Modelos com suspensão tradicional.	30
4.1	Setup Utilizado para Impressão 3d por FDM	33
4.2	Funcionamento da Tela de LCD em Impressoras mSLA	34
4.3	Setup Utilizado para Impressão 3d por mSLA	35
4.4	Exemplo de Aplicação do Material TPU 95A.	36
4.5	Resina Flexível Resione F69	38
4.6	Exemplo do uso de Estrutura <i>Honeycomb</i> em Rodas	39
4.7	Elongarina do BMW i3 Reforçada com Núcleo <i>Honeycomb</i>	40
4.8	Propiedades Geométricas de uma Estrutura <i>Honeycomb</i>	40
5.1	Estrutura trabecular do osso longo (rede anisotrópica de placas ósseas que se alinham segundo os eixos de maior tensão).	45
5.2	Estrutura do corpo de uma esponja marinha	46
5.3	Estrutura da asa de uma libélula	46
5.4	Corte transversal da asa mostrando a aplicação da estrutura honeycomb no design de drone impresso em 3D	47
5.5	Pneu automotivo com estrutura celular.	47
5.6	Geometria em solados de calçados.	48
5.7	Comportamento da Roda ao variar o <i>Hub-Gap</i> entre 2 e 12mm	50
5.8	Anel de Tensionamento e Núcleo <i>Honeycomb</i> da Roda Morphing	52
5.9	Projeto no SolidWorks da Roda de Colunas Radiais	53
5.10	Roda no perfil de alívios circulares	55
5.11	Roda no perfil da loja Banebots	57
6.1	Robô Puma + desenvolvido no LabRob da PUC-Rio	59
6.2	Motor BLDC ODrive Dual Shaft - D5065 270Kv	61

6.3	Caixa de Redução Planetária DWNS da Empresa Robocore	61
6.4	Conjunto motor–reductor: Motor BLDC ODrive D5065 acoplado à caixa planetária DWNS.	62
6.5	Encoder óptico incremental.	63
6.6	Sistema de coordenadas no PUMA+	65
7.1	Resultados da Análise de Carga da Roda <i>Honeycomb</i>	69
7.2	Resultados da Análise de Carga da Roda com Colunas Radiais	70
7.3	Resultados da Análise de Carga da Roda Perfurada Circular	71
7.4	Resultados da Análise de Carga da Roda <i>Vortex-Slot</i>	72
7.5	Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda <i>Honeycomb</i>	74
7.6	Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda com Colunas Radiais	75
7.7	Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda Perfurada Circular	76
7.8	Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda <i>Vortex-Slot</i>	77
7.9	Montagem do Robô Puma + com 4 Rodas <i>Honeycomb</i> impressas em TPU	79
7.10	Amostra de Roda <i>Honeycomb</i> impressa em Resina Flexível	79
7.11	Deformação Gerada na Roda de TPU com o Peso do Robô	80
7.12	Deformação Gerada na Roda de Resina Flexível com o Peso do Robô	81
7.13	Deformação Gerada na Roda de TPU com Durante a Transposição de Obstáculos	82
7.14	Deformação Gerada na Roda de Resina Flexível com Durante a Transposição de Obstáculos	83
A.1	Filamento TPU da Empresa Slim3d para Impressão FDM	88
B.1	Filamento PETG da Empresa Slim3d para Impressão FDM	89
C.1	Resina F69 da Empresa Resione para Impressão mSLA	90

## Lista de tabelas

2.1	Comparação Qualitativa entre Diferentes Tipologias de Rodas	21
-----	---	----

## **Lista de Abreviações**

CAD = Desenho Assistido por Computador

FDM = Modelagem por Deposição de Material Fundido

TPU = Poliuretano Termoplástico

mSLA = Estereolitografia Mascarada

BLDC = Motor de Corrente Contínua sem Escovas

FEA = Análise por Elementos Finitos

## Lista de Símbolos

- $F_{zij}$  Força de contato vertical da roda  $i, j$ .
- $k_{tz}$  Rigidez vertical efetiva do núcleo honeycomb.
- $c_{tz}$  Coeficiente de amortecimento viscoelástico do TPU.
- $\Delta z_{ij}$  Compressão do pneu.
- $\dot{z}_{ij}$  Velocidade de compressão do pneu.
- $Y$  Variável de saída.
- $X$  Variável de entrada.
- $B$  Fator de rigidez inicial.
- $C$  Fator de forma.
- $D$  Pico da curva na “Magic Formula”.
- $E$  Curvatura na “Magic Formula”.
- $s$  Coeficiente de escorregamento.
- $r$  Raio da roda.
- $\omega$  Velocidade angular da roda.
- $v$  Velocidade linear do veículo.
- $P$  Força externa aplicada na roda.
- FSR Força de atrito estático máxima.
- $\mu_0$  Coeficiente de atrito estático.
- $W$  Peso efetivo sobre a roda.
- $M$  Momento motor aplicado ao cubo da roda.
- FRS Força de atrito gerada pelo torque interno.
- $K$  Constante de torque do motor BLDC.
- $R$  Razão de redução do redutor planetário.
- $\eta$  Eficiência nominal do redutor.
- $q$  Vetor de coordenadas generalizadas.
- $x$  Posição do robô no eixo  $x$ .
- $y$  Posição do robô no eixo  $y$ .
- $\phi$  Orientação angular do robô.

# 1

## Introdução

Robôs móveis com rodas (WMRs) vêm se destacando em inspeção, logística e serviços nos mais diversos ambientes industriais, laboratoriais e urbanos (Silva & Ferreira, 2023), como pode ser visto na Figura 1.1. Contudo, grande parte desses sistemas é dimensionado para operar sobre superfícies lisas, carecendo de recursos para lidar com a irregularidade presente em cenários reais (Oliveira et al., 2022). Degraus, soldas salientes, rejuntas desalinhadas e trechos corroídos geram vibrações que comprometem sensores, afrouxam conexões mecânicas e aceleram o desgaste estrutural (Carvalho & Moura, 2021). Esses distúrbios reduzem a estabilidade, prejudicam a navegação autônoma e elevam o consumo energético em correções de rota (Rossi et al., 2020).



Figura 1.1: Exemplo de Robô com Rodas em Ambiente Industrial

A discrepância entre o desempenho demonstrado em laboratório e a performance obtida em campo evidencia a necessidade de estratégias mecânicas passivas que mantenham o contato roda–terreno de forma estável, sem recorrer a sistemas ativos complexos, garantindo operação contínua e segura em condições adversas.

Essa limitação revela a lacuna entre o desempenho idealizado dos WMRs em laboratório e o resultado obtido em campo, motivando a busca por soluções que tornem a locomoção mais robusta e confiável. Esses cenários realçam a importância de estratégias mecânicas passivas capazes de manter o contato roda–terreno sem recorrer a sistemas ativos complexos, como na aplicação representada na Figura 1.2, assegurando operação contínua e segura

em condições adversas e abrindo espaço para novas pesquisas sobre interfaces de contato.



Figura 1.2: Exemplo de Robô Trabalhando com Exploração Espacial

## 1.1

### Motivação deste Trabalho

À medida que robôs móveis deixam o ambiente controlado dos laboratórios e passam a atuar em plantas industriais, portos e instalações de energia, eles se deparam com pisos metálicos gastos, juntas de dilatação desalinhadas, respingos de solda, desníveis de manutenção e até trechos invertidos, condições muito diferentes daquelas para as quais as rodas convencionais foram pensadas. Nessas superfícies, pequenas oscilações verticais ou perdas momentâneas de contato impactam diretamente a fusão de dados inerciais e visuais, reduzem a precisão de posicionamento e aceleram o desgaste de componentes mecânicos críticos.

Embora suspensões ativas ou atuadores de conformidade possam mitigar parte desses efeitos, tais soluções elevam a complexidade, o consumo energético e o custo de manutenção, fatores pouco compatíveis com a necessidade de operar de forma contínua, confiável e econômica em ambientes com presença de poeira, óleo e temperaturas elevadas.

Paralelamente, a evolução da manufatura aditiva em elastômeros tem aberto caminho para rodas maciças com geometrias internas que absorvem impacto sem recorrer a sistemas pneumáticos ou hidráulicos. No entanto, ainda faltam investigações que combinem essas geometrias com mecanismos passivos, capazes de garantir aderência e estabilidade mesmo quando a largura da superfície de apoio varia ao longo do trajeto.

Propor e validar um sistema baseado em molas que cumpra esse papel, sem adição de sensores ou atuadores, representa uma oportunidade concreta de tornar os robôs de inspeção mais robustos, autônomos e economicamente viáveis, preenchendo uma lacuna claramente identificada na literatura recente.

## 1.2

### Objetivos

Como objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso, estão:

- Desenvolvimento do conceito de suspensão integrada com componentes elastoméricos;
- Análise e seleção do polímero adequado, considerando rigidez, amortecimento e resistência à fadiga;
- Modelagem e simulação dinâmica para prever forças de contato, deslocamentos e consumo energético;
- Prototipagem aditiva e fabricação dos componentes de suspensão;
- Implementação de bancada experimental instrumentada para ensaios em trajetos retos, curvos e com desníveis;
- Validação experimental dos resultados, comparando desempenho com roda rígida sem suspensão;
- Análise comparativa de desempenho e elaboração de diretrizes de projeto para futuras plataformas de inspeção.

O objetivo principal deste trabalho é projetar, construir e validar um sistema de suspensão integrada passiva, baseado em elementos elastoméricos impressos em 3D que atuem como amortecedores, de modo a manter o contato contínuo entre um robô móvel e superfícies irregulares, garantindo estabilidade e navegabilidade mesmo em trechos com variação geométrica e alta rugosidade.

## 2

### Revisão Bibliográfica

A locomoção sobre rodas continua sendo a solução mais usada em robótica móvel graças à elevada eficiência energética, simplicidade construtiva e grande rapidez em superfícies planas (MAIN, 2023). Entretanto, ambientes reais impõem exigências diversificadas.

Nos últimos anos, a literatura tem investigado desde rodas convencionais aprimoradas, até mecanismos transformáveis e híbridos, buscando conciliar eficiência em terreno plano com capacidade de superar obstáculos (ARAI et al., 2022).

Este capítulo revisa sistematicamente esses avanços, classificando as rodas mais recorrentes, como também os tipos de suspensões mais encontrados na literatura, destacando estudos de caso recentes, vantagens, desvantagens e comparações nas dimensões de eficiência energética, manobrabilidade, complexidade e adequação a diferentes pisos.

#### 2.1

##### Arquiteturas de Suspensão para Robôs Móveis

Neste trabalho, antes de propor o sistema passivo, foram avaliadas as principais arquiteturas de suspensão empregadas em robôs móveis para terrenos irregulares. A seguir, descrevem-se sucintamente cada uma delas, destacando princípios de funcionamento, vantagens e limitações.

O modelo Rocker, descrito por Brody & Smith (2015), baseia-se em um braço rígido articulado em um pivô único. Seu funcionamento permite que, ao encontrar um obstáculo, o braço oscile de modo a elevar parcialmente a roda afetada, mantendo as demais em contato com o solo. Entre suas principais vantagens, destacam-se a simplicidade construtiva e o baixo custo. No entanto, apresenta como limitação o desempenho restrito a desníveis leves, sem manutenção do contato em rampas acentuadas.

Três anos depois, Li et al. (2018) apresentaram o sistema Rocker-bogie, composto por dois braços articulados em série (bogie) acoplados a um rocker central conforme apresentado na Figura 2.1. Essa configuração distribui a carga entre seis rodas, garantindo ao menos quatro pontos de apoio simultâneos, o que minimiza variações bruscas no centro de massa. As principais vantagens desse sistema incluem a excelente capacidade de transposição de obstáculos e a estabilidade em declives irregulares. Contudo, o maior número de articulações e a complexidade de controle resultam em aumento de peso e custo.

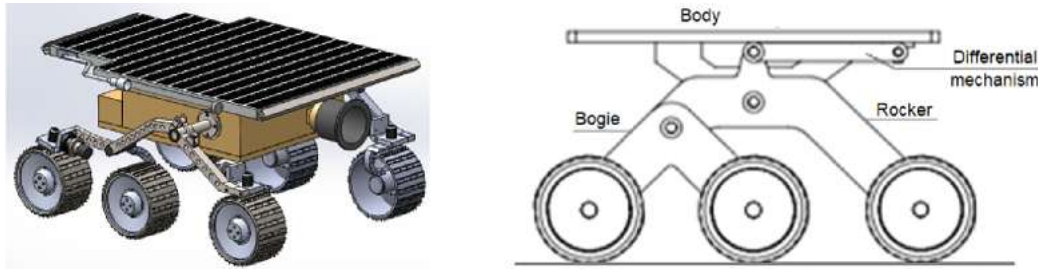


Figura 2.1: Exemplo de Robô com Suspensão Rocker-Bogie

O modelo Parallel-linked, proposto por Anderson & Zhao (2019), adota uma configuração em que cada roda é montada em um conjunto de braços paralelos que deslizam verticalmente. Esse arranjo permite absorver impactos verticais sem alterar a inclinação do chassi, mantendo o corpo do robô nivelado. Como vantagem, proporciona conforto e maior proteção aos componentes eletrônicos e sensores. Em contrapartida, demanda mais juntas e rolamentos, elevando os custos de fabricação e manutenção.

Mais recentemente, Kumar et al. (2024) apresentaram o modelo Double wishbone (quatro barras), baseado em suspensão independente composta por dois braços articulados em “A” (wishbones), um superior e um inferior, conectados ao chassi e ao cubo da roda. Na Figura 2.2 é possível observar um diagrama desse tipo de suspensão.

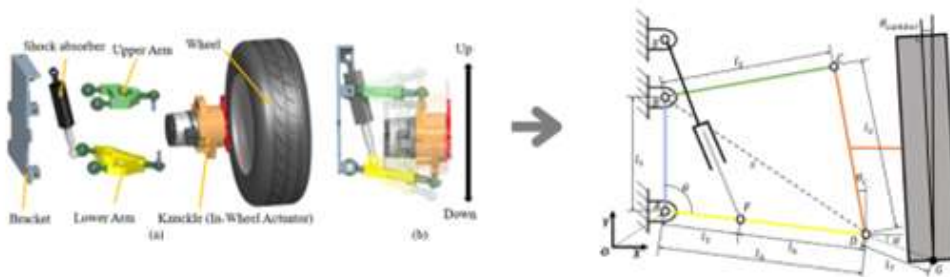


Figura 2.2: Exemplo de Suspensão Double Wishbone

Os braços controlam o movimento vertical da roda de forma independente, permitindo o ajuste de parâmetros como cambagem, curso de suspensão e centro de rolagem. Essa configuração permite afinação precisa da geometria da suspensão, garantindo melhor resposta a irregularidades e maior aderência. No entanto, exige maior complexidade mecânica, componentes adicionais como molas e amortecedores, além de apresentar custos mais elevados.

Além das suspensões articuladas, também foram avaliadas soluções embutidas diretamente nas rodas. No caso da Wheel-leg passiva (Figura 2.3),

segmentos da roda transformam-se em “pernas” durante o contato com obstáculos. A própria geometria da roda aciona a mudança de modo, permitindo a escalada direta de obstáculos sem troca de módulo nem necessidade de controle ativo. Contudo, essa abordagem implica em maior complexidade construtiva e aumento da massa inercial.

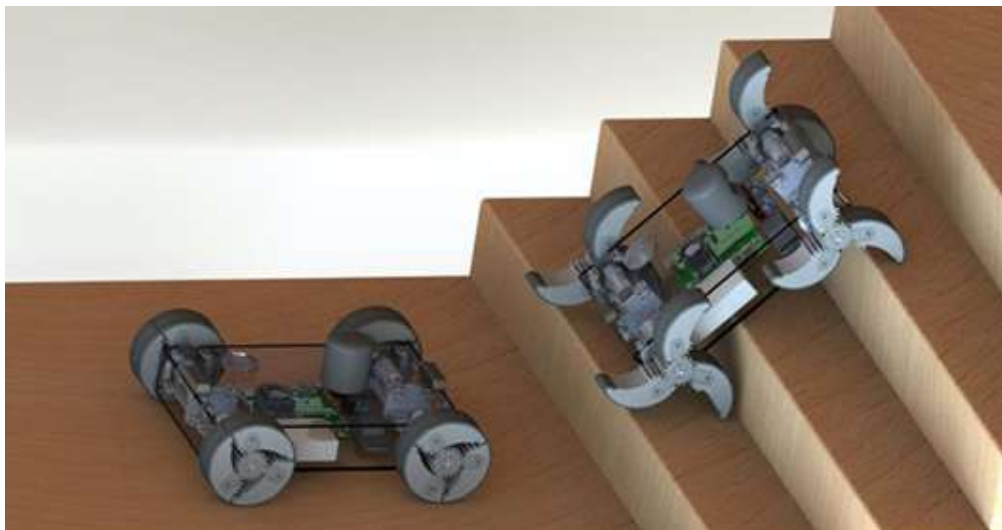


Figura 2.3: Exemplo de Robô com Wheel-leg Passiva

Por fim, a suspensão integrada elastomérica, que constitui o foco deste trabalho, representa uma solução mais recente e simplificada. Utiliza materiais plásticos flexíveis como TPU, PU ou resina elastomérica, incorporados diretamente à roda ou ao suporte estrutural, conferindo conformidade e amortecimento passivo. A deformação controlada do elastômero absorve vibrações e se adapta a pequenas variações no perfil do solo, dispensando articulações externas. Entre as principais vantagens estão o design simplificado, o baixo custo de manutenção e a eliminação de partes móveis tradicionais. Sua principal limitação está na necessidade de assegurar a durabilidade do material e compreender seu comportamento sob ciclos contínuos de carga.

## 2.2

### Tipologias de Rodas para Robôs Móveis

Diversas soluções de locomoção sobre rodas têm sido exploradas na robótica móvel, variando conforme as exigências de manobrabilidade, eficiência energética, capacidade de transposição de obstáculos e simplicidade construtiva. Entre os diferentes tipos disponíveis, quatro tipologias de rodas se destacam por sua recorrência na literatura recente e ampla aplicação em robôs móveis: rodas convencionais, omnidirecionais, transformáveis (wheel-leg) e híbridas.

As rodas convencionais rígidas, conforme descritas por Main (2023), representam uma das soluções mais difundidas na robótica terrestre. São compostas por rodas maciças ou pneumáticas de superfície contínua, com elevada eficiência de deslocamento em terrenos planos. Tais rodas são simples de implementar e possuem baixo custo, sendo amplamente utilizadas em aplicações industriais. Entretanto, apresentam desempenho limitado em terrenos irregulares, pois não conseguem transpor obstáculos com altura superior ao seu raio ( $R$ ) e não dispõem de capacidade intrínseca de amortecimento, o que compromete a estabilidade e a durabilidade dos componentes do sistema.

As rodas omnidirecionais, como as do tipo Mecanum ou omni, foram estudadas por Huang, Li e Wang (2021). Essas rodas utilizam roletes livres inclinados a  $45^\circ$  (no caso do Mecanum) ou a  $90^\circ$  (no omni), permitindo que o robô se mova lateralmente sem necessidade de esterçamento. Um exemplo deste tipo de roda, obtido na loja McMaster, pode ser observado na Figura 2.4.



Figura 2.4: Exemplo de Roda Omnidirecional do tipo Mecanum

Tal configuração proporciona excelente manobrabilidade, especialmente útil em ambientes confinados ou com trajetórias complexas, e seus padrões de movimento baseado na rotação de cada uma das rodas pode ser analisado na Figura 2.5. No entanto, essas rodas tendem a apresentar menor tração e níveis elevados de vibração devido ao contato descontínuo com o solo, o que limita seu uso em terrenos acidentados ou irregulares.

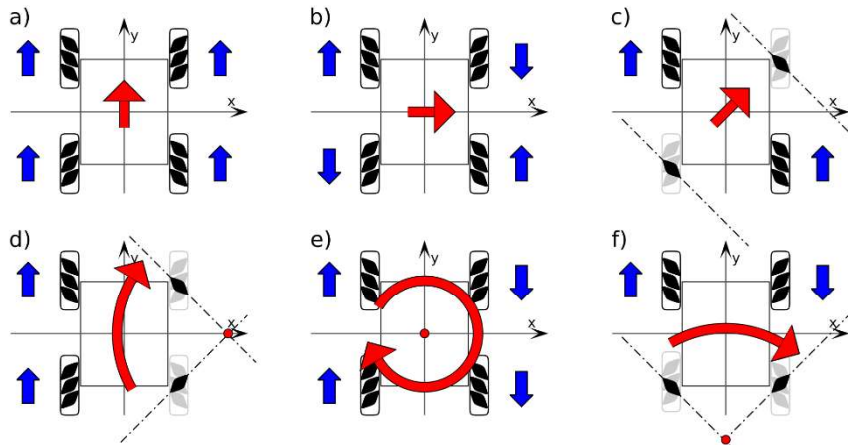


Figura 2.5: Diagrama do Deslocamento Resultante dada a Rotação de cada Roda Mecanum

As rodas transformáveis, ou wheel-leg, discutidas por Kim, Park e Lee (2022) e apresentadas anteriormente na Figura 2.3, são projetadas para se adaptar a terrenos desafiadores por meio da conversão parcial ou total de seus segmentos em pequenas pernas ou elos articulados. Essa capacidade de transformação permite a transposição de obstáculos com altura entre duas e três vezes o raio da roda ( $2-3 R$ ), superando limitações impostas às rodas tradicionais. Apesar de sua eficácia em cenários irregulares, essas rodas demandam soluções mecânicas mais complexas, incluindo atuadores adicionais e articulações móveis, o que acarreta aumento do peso, do consumo energético e dos custos de fabricação e manutenção.

As rodas híbridas, conforme descritas por Sabino, Oliveira e Sousa (2024), buscam integrar as vantagens dos sistemas de rodas convencionais com os mecanismos de perna. Essas soluções permitem alternar dinamicamente entre modos de locomoção com rodas (para deslocamentos eficientes em terrenos planos) e pernas (para escalada ou contorno de obstáculos), tornando o robô mais versátil. Embora promissoras, essas arquiteturas impõem desafios substanciais de integração, exigindo controle sofisticado, estrutura reforçada e maior número de componentes móveis, o que afeta diretamente a robustez e a confiabilidade do sistema.

Por fim, a arquitetura morphing-wheel, proposta por Park, Cheng e Lee (2025), representa uma abordagem inovadora que visa combinar a continuidade da rodagem com a adaptabilidade a obstáculos. Nessa solução, a roda possui geometria variável, podendo ajustar dinamicamente seu raio ou rigidez estrutural por meio de blocos articulados ou elementos flexíveis controlados mecanicamente. Na Figura 2.6 é possível observar esse tipo de roda.



Figura 2.6: Exemplo da Roda do Tipo Morphing

Com isso, torna-se possível transpor obstáculos com altura próxima a  $2.8 R$ , ao mesmo tempo em que se mantém o contato constante com o solo conforme Figura 2.7. Além disso, certos modelos incorporam elementos de amortecimento passivo, melhorando a estabilidade do robô durante o deslocamento.

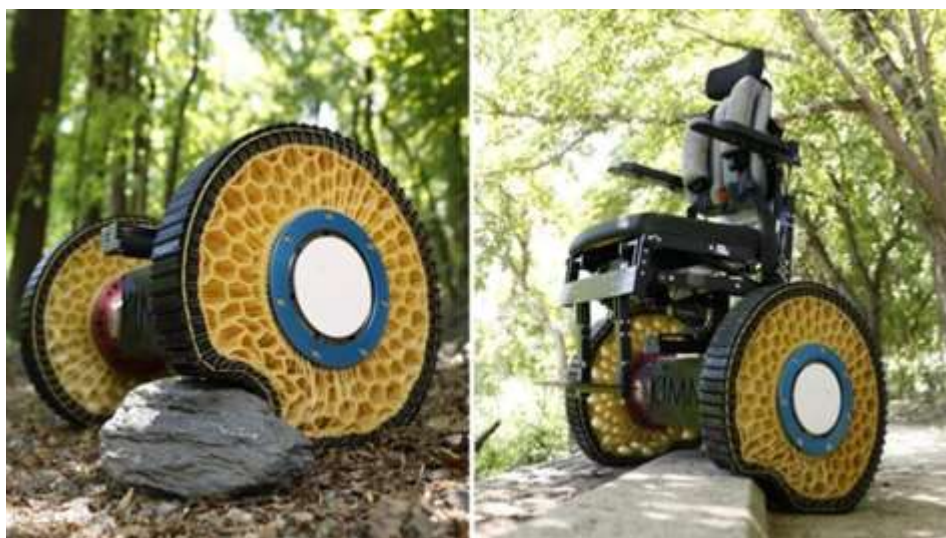


Figura 2.7: Exemplo da Roda do Tipo Morphing Transpondo Obstáculos

### 2.2.1

#### Síntese Comparativa dos Tipos de Rodas

Com base nos trabalhos discutidos nesta revisão, a Tabela 2.1 apresenta uma comparação qualitativa entre as principais tipologias de rodas aplicadas

em robôs móveis. São avaliados critérios diretamente relacionados ao desempenho em tarefas de inspeção industrial, incluindo eficiência energética, manobrabilidade, capacidade de superação de obstáculos, amortecimento intrínseco, complexidade construtiva e tração em solos macios. As informações foram organizadas de forma a facilitar a visualização das vantagens e limitações relativas de cada abordagem, conforme relatado na literatura recente.

Para fins de padronização e análise comparativa, foi adotada uma escala de pontuação de 1 (desempenho muito baixo) a 5 (desempenho muito alto) em cada critério. As cinco tipologias de rodas foram identificadas pelas letras A a E, onde A representa as rodas convencionais rígidas, B as rodas omnidirecionais, C as rodas transformáveis (wheel-leg), D as rodas híbridas, e E as rodas do tipo morphing.

Tabela 2.1: Comparação Qualitativa entre Diferentes Tipologias de Rodas

<b>Critério</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
Eficiência Energética	5	4	3	3	4
Manobrabilidade	2	5	3	3	3
Superação de Obstáculos	1	1	3	3	4
Amortecimento Intrínseco	1	1	3	3	5
Complexidade Construtiva	1	3	5	5	5
Tração em Solos Macios	1	1	3	3	5

## 3

### Estudo das Rodas

A modelagem das rodas é fundamental para reproduzir de forma realista seu comportamento dinâmico, bem como suas características de manobrabilidade e estabilidade. De acordo com sua construção, as rodas são divididas em dois tipos principais:

1. Rígidas, geralmente fabricadas em materiais metálicos ou plásticos de alta rigidez, e seu diâmetro efetivo permanece constante independente das irregularidades do terreno. Por isso, oferece modelagem matemática mais simples (rotação pura sem considerações de deformação), porém não absorve choques nem se adapta a superfícies acidentadas, o que pode aumentar vibrações e reduzir a tração em terrenos irregulares.
2. Elásticas, caracterizadas por incorporar elementos deformáveis (borracha, espuma, poliuretano ou estruturas celular *honeycomb*) que cedem elasticamente sob carga. Essa deformação controlada permite ao pneu “conformar-se” a pequenas irregularidades do solo, aumentando a área de contato, melhorando a tração e amortecendo impactos.

A modelagem requer considerar a relação não linear entre carga e deformação, mas resulta em maior capacidade de absorção de choques e conforto operacional. Essa concepção faz com que o conjunto roda-pneu funcione simultaneamente como mola, amortecedor e elemento de tração, simplificando a arquitetura mecânica e reduzindo o peso total, sem sacrificar sua capacidade de absorção de impactos e de atenuação de vibrações. Tais atributos são essenciais em robôs de inspeção que operam sobre superfícies irregulares, garantindo tanto a robustez estrutural quanto a estabilidade operacional.

#### 3.1

##### Estudo do Movimento das Rodas

Nas rodas de um robô móvel, acionadas internamente por motor e redutor, a função vai muito além de simplesmente suportar o peso: elas devem converter torque em força de tração e resistir a forças laterais para garantir controle direcional eficaz. Para isso, é essencial um alto coeficiente de adesão estática entre o material do pneu e o solo, evitando derrapagens e permitindo

a transmissão de elevados torques sem patinagem (Rajamani, 2006; Pacejka, 2002).

O comportamento do pneu distingue-se em dois regimes de movimento fundamentais:

- **Rolamento Puro:** Não há deslizamento no ponto de contato; a velocidade de translação do veículo ( $v$ ) está diretamente relacionada à velocidade angular ( $\omega$ ). Com isso temos máxima eficiência energética e mínima dissipação de energia por atrito.
- **Escorregamento (*slip*):** Parte da velocidade tangencial não se converte em deslocamento, gerando derrapagem e perdas por atrito dinâmico. Com isso temos uma geração de derrapagem, aquecimento do material e perdas por atrito dinâmico, além de possível instabilidade lateral.

A transição entre esses regimes é controlada pelo coeficiente de adesão  $\mu$ , que depende de fatores como: área de contato (maior área amplia a força de atrito ( $F \leq \mu * Fz$ )), velocidade de rotação (em algumas misturas de elastômero,  $\mu$  pode crescer com a velocidade até certo ponto) e condições do solo (superfícies com alta rugosidade ou umidade aumentam  $\mu$ , enquanto areia solta ou óleo o reduzem).

Esse entendimento é essencial para formular as restrições não-holonômicas do sistema, que impõem que o vetor velocidade do robô sempre permaneça tangente à direção de rolamento das rodas, e para prever com precisão o comportamento cinemático em curvas, acelerações e frenagens bruscas. Modelos de forças longitudinal e lateral incorporam o *slip ratio* e  $\mu$  para quantificar as forças geradas e orientar o controle de estabilidade do robô (Springer Handbook of Robotics, 2008; Pacejka, 2002).

### 3.1.1 Rolamento Puro

No regime de rolamento puro, a roda e o solo são considerados elementos rígidos. Quando uma roda gira sem deslizar sobre o solo, encontra-se em rolamento puro, de modo que o ponto de contato entre ambos não desliza nem escorrega. Isto significa que, instantaneamente, a velocidade relativa entre a superfície da roda e o solo naquele ponto é zero, ou seja,  $v_{rel} = 0$ . Consequentemente, toda a velocidade de avanço do veículo  $v$  resulta unicamente da velocidade angular da roda  $\omega$ , obedecendo à relação geométrica (onde  $r$  é o raio da roda):

$$v = \omega * r \tag{3-1}$$

Esse comportamento é representado na Figura 3.1, que mostra um cilindro rolando sem escorregar sobre uma reta: à medida que o cilindro gira, cada ponto do contorno superior descreve um traçado adiante, enquanto o ponto de contato momentâneo permanece fixo em relação ao solo.

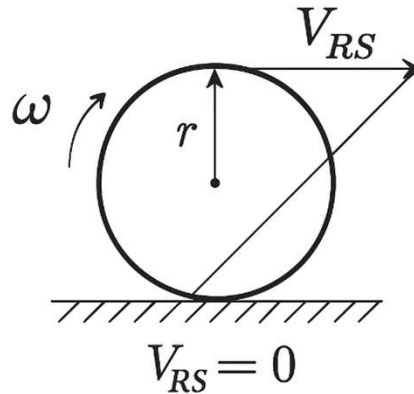


Figura 3.1: Movimento de um Cilindro em Rolamento Puro

Implicações do rolamento puro:

- Máxima eficiência de transmissão de torque: ausência de atrito dinâmico por escorregamento; apenas ocorre o atrito de rolamento, cujas perdas são muito menores.
- Cinemática exata: a Equação 3-1 permite calcular diretamente a posição e velocidade do robô a partir das leituras dos *encoders*, sem necessidade de compensar deslizamentos.
- Controle simplificado: as restrições que impõem movimento tangente à roda são facilmente aplicadas, pois a direção de deslocamento coincide com a tangente ao perfil da roda.

### 3.1.2 Escorregamento

O escorregamento ocorre quando há movimento relativo entre a superfície da roda e o solo, ou seja, quando a força de tração (ou frenagem) ultrapassa o limite de aderência. No regime de rolamento puro, não há deslizamento e vale a relação  $F \leq \mu_0 W$ , onde:

- $F$  é a força de tração (ou frenagem),
- $\mu_0$  é o coeficiente de atrito estático,
- $W$  é o peso atuando sobre a roda.

Se  $F$  exceder seu limite ( $F > \mu_0 W$ ), inicia-se o regime de escorregamento, no qual coexistem componentes de rolamento e de deslizamento. A intensidade desse deslizamento é quantificada pelo *slip ratio*  $s$ , definido, para tração, como:

$$s = \frac{r\omega - v}{r\omega}, \quad 0 < s \leq 1 \quad (3-2)$$

onde:

- $r$  é o raio da roda,
- $\omega$  é a velocidade angular,
- $v$  é a velocidade linear do veículo.

Valores de  $s$  próximos a zero indicam quase rolamento puro, enquanto  $s$  tendendo a 1 corresponde a deslizamento total (roda patinando). Na Figura 3.2, dois casos são ilustrados:

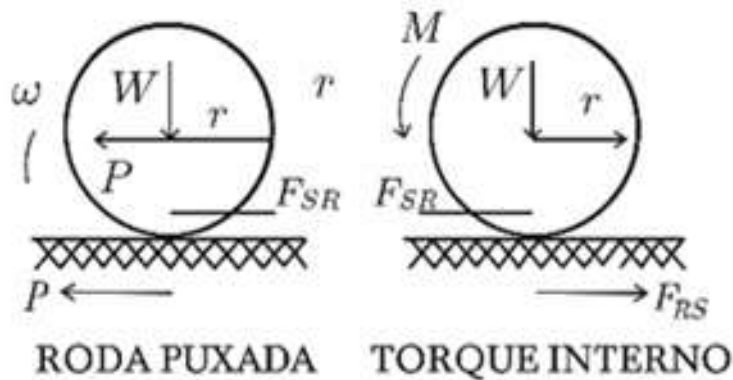


Figura 3.2: Roda rolando: Roda puxada (esquerda) por  $P$  com atrito  $FSR$  e torque interno  $M$  (direita) gerando atrito  $FRS$

- Roda puxada: uma força externa  $P$  puxa a roda, gerando uma reação de atrito  $FSR$  no sentido oposto até o limite  $FSR = \mu_0 W$ . Se  $P$  ultrapassar esse valor ( $P > \mu_0 W$ ), ocorre o escorregamento;
- Torque interno: um momento motor  $M$  aplicado ao cubo provoca atrito  $FRS = Mr$  no contato. Enquanto  $FRS = \mu_0 W$ , a roda ainda rola; quando  $FRS > \mu_0 W$ , o excesso de torque escapa em forma de deslizamento.

Em regime de escorregamento, parte do torque não se converte em deslocamento linear ( $v$ ), sendo dissipada como calor e desgaste do pneu, o que reduz a eficiência de tração.

## 3.2

### Tipos de Rodas em Solo Rígido

A rigidez relativa entre roda e solo é um fator determinante no comportamento de locomoção de um robô móvel. Neste trabalho, consideramos apenas rodas rígidas e rodas elásticas em contato com um solo também rígido, seguindo a classificação de (Bekker, 1969) e (Wong e Reece, 1966).

As rodas rígidas exibem deformações desprezíveis na região de contato, o que implica que toda a superfície de apoio se reduz a uma linha ideal. Nessa condição, as definições clássicas de rolamento puro e escorregamento permanecem válidas: no rolamento, não há movimento relativo entre a roda e o solo no ponto de contato; já no escorregamento, ocorre deslizamento quando a força de tração excede o limiar de adesão  $F > \mu_0 W$ , sendo  $W$  o peso efetivo sobre a roda e  $\mu_0$  o coeficiente de atrito estático. Em particular, se a roda parar de girar ( $\omega = 0$ ) mas o veículo continuar a movimentar-se, instaura-se o escorregamento total, e a força de resistência  $FSR$  pode ser expressa simplesmente por  $FSR = \mu_0 W$ .

Por outro lado, as rodas elásticas apresentam uma zona de contato distribuída, onde as deformações permitem armazenar energia elástica e dissipar parte dela viscoelasticamente, ainda assim, quando montadas sobre um solo rígido, a transição entre rolamento e escorregamento segue as mesmas condições definidas acima, com o coeficiente de adesão efetivo podendo variar em função da rigidez  $K_{\text{equivalente}}$  e do amortecimento  $d_w$  do pneu (Pacejka, 2002). Essa distinção é fundamental para modelar com precisão as restrições não-holonômicas e prever a dinâmica de manobra e frenagem do robô móvel.

#### 3.2.1

##### Rodas Elásticas

As rodas elásticas diferem fundamentalmente das rígidas ao apresentarem uma área de contato com o solo, em vez de uma linha tangencial Figura 3.3. Essa característica amplia a região de distribuição de carga, melhorando a aderência, mas também introduz fenômenos de deformação e deslizamento interno das fibras do material.

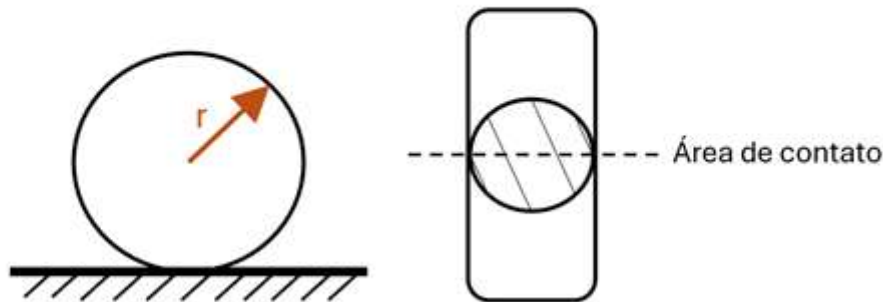


Figura 3.3: Roda elástica em contato com o solo.

Área de contato e distribuição de pressão uniforme

- A roda elástica apoia-se numa faixa larga sobre o solo, o que distribui a carga de forma mais uniforme.
- Sob aceleração positiva ou negativa, surgem regiões de fibras comprimidas (à frente do ponto de apoio) e tensionadas (atrás), como ilustrado na Figura 3.4, influenciando o torque transmitido.

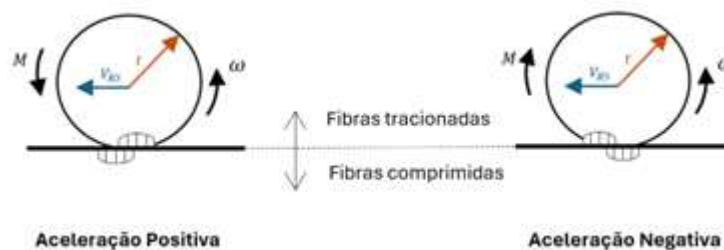


Figura 3.4: Distribuição de pressão na área de contato .

Durante o movimento, ocorre um deslizamento parcial das fibras: as regiões comprimidas do material expandem-se e escorrem ligeiramente sobre o solo, resultando em um deslizamento na ordem de 10 – 20% do raio da roda e permitindo a acomodação da deformação interna. Esse fenômeno atenua as vibrações transmitidas ao chassi, embora introduza pequenas perdas de energia devido ao atrito interno .

A transmissão de torque para o solo depende, por sua vez, do equilíbrio entre a rigidez elástica do elastômero e a tendência ao deslizamento. A máxima transferência de força ocorre imediatamente antes do escorregamento

generalizado da área de contato, momento em que a roda ainda mantém ampla aderência sem patinação significativa.

Diversos fatores influenciam a adesão entre roda e solo. O tipo de material (dureza, módulo de Young do elastômero) e as propriedades do solo são determinantes, assim como a rugosidade de contato, que envolve tanto a textura da banda de rodagem quanto as irregularidades do substrato. A geometria da roda incluindo largura, perfil da banda e rigidez estrutural, também modula o comportamento de aderência e deslizamento.

Design de rodas elásticas exige equilibrar três fatores-chave: a elasticidade, que determina a flexibilidade e a capacidade de absorção de choques; a rigidez estrutural, que deve suportar as cargas sem colapsar; e a geometria da banda de rodagem, responsável pela distribuição de carga e auto-limpeza. Combinados de forma adequada, esses elementos permitem maior conformidade e amortecimento em terrenos irregulares, mantendo a transferência eficiente de torque e evitando deslizamento interno excessivo.

### 3.3

#### Interação Pneu e solo

A interação entre roda e solo constitui o elo fundamental da locomoção em veículos terrestres. Esse fenômeno é regido pelas forças do contato entre o pneu e a superfície, determinando a capacidade do veículo em gerar tração, realizar frenagens e manter sua estabilidade direcional. A modelagem precisa dessas interações é essencial para prever o comportamento dinâmico do sistema veicular, especialmente em aplicações onde há exigência de desempenho elevado ou operação em terrenos adversos.

Essa interação é fortemente dependente das propriedades mecânicas do pneu (como rigidez longitudinal, lateral e vertical), das condições do solo (aderência, rugosidade, rigidez) e das características dinâmicas do movimento (velocidade, ângulo de deriva, escorregamento). Diferentes modelos foram propostos na literatura para representar essas forças, entre eles os modelos de Dugoff, Brush (Fiala), Magic Formula e Pacejka.

#### 3.3.1

##### Modelagem das Forças de Contato

As forças atuantes na interface pneu-solo são geralmente decompostas em três componentes principais:

- Força longitudinal ( $F_x$ ): gerada pela tração e pela frenagem; diretamente ligada ao *slip ratio*;

- Força lateral ( $F_y$ ): resultante do *side-slip angle*, responsável pelo comportamento em curvas;
- Força vertical ( $F_z$ ): resultante da carga normal sobre a roda, que influencia diretamente o nível de aderência disponível, que condiciona a magnitude máxima possível de  $F_x$  e  $F_y$ .

Além dessas, considera-se também o torque de autoalinhamento ( $M_z$ ), responsável por estabilizar a direção da roda devido ao deslocamento entre o ponto de aplicação da força lateral e o centro da roda.

Outras Forças Relevantes:

- Resistência ao rolamento: associada à dissipação de energia na deformação do pneu. Pode ser modelada como uma força contrária ao movimento proporcional ao peso  $F_z$  e ao raio efetivo de contato.
- Distribuição de pressão de contato: usualmente não uniforme, influenciada pela geometria do pneu e pela rigidez do solo.

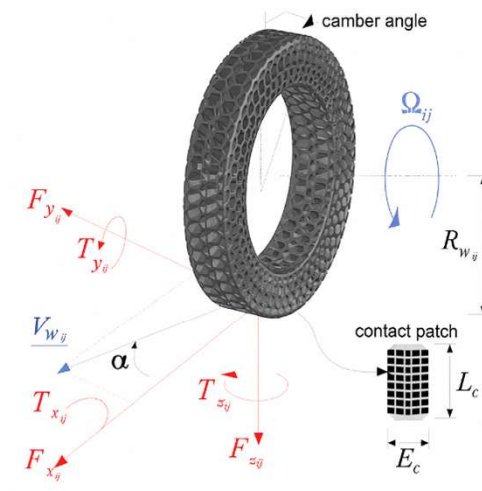


Figura 3.5: Representação tridimensional das forças  $F_{xij}$ ,  $F_{yij}$ ,  $F_{zij}$  e torques associados atuando no ponto de contato roda-solo.

$$\sigma_{ij} = \frac{-V_{wij} + \Omega_{ij}R_{wij}}{\max(V_{wij}, \Omega_{ij}R_{wij})} \quad (3-3)$$

onde:

- $V_{wij}$  velocidade longitudinal da roda;
- $\Omega_{ij}$  velocidade angular da roda;
- $R_{wij}$  raio da roda.

A força lateral  $F_{yij}$  depende do ângulo de deriva  $\alpha_{ij}$ , dado por:

$$\alpha_{ij} = \tan^{-1}\left(\frac{V_{wyij}}{V_{wxij}}\right). \quad (3-4)$$

### 3.3.2 Representação Simplificada da Força Vertical

Nos modelos de veículos convencionais (Figura 5.5) Figura 3.6 cada roda rígida liga-se ao chassi por elementos de suspensão, gerando massas não suspensas e múltiplos graus de liberdade. Ao substituir esses componentes por um pneu puramente elástico, obtém-se uma formulação mais enxuta. Para o projeto, todo o comportamento elástico-viscoelástico é concentrado na interface roda-solo. O movimento vertical da roda  $i, j$  em relação ao chassi reduz-se a uma deflexão  $z_{ij}$ . A força de contato é então aproximada por:

$$F_{z_{ij}} = -k_{tz} \Delta z_{ij} - c_{tz} \dot{z}_{ij}, \quad (3-5)$$

onde

- $K_{tz}$ - Rigidez vertical efetiva do núcleo *honeycomb*;
- $c_{tz}$  - Coeficiente de amortecimento viscoelástico do TPU;
- $\Delta z_{ij}$  - A compressão do pneu;
- $\dot{z}_{ij}$  - Velocidade de compressão (ou recuperação) do pneu.

Não há termos de aceleração relativa nem massa não suspensa, pois a roda está rigidamente fixada ao cubo e este, ao chassi. Assim, a Equação xxx descreve todo o intercâmbio de forças verticais com apenas dois parâmetros de ajuste ( $k_{tz}, c_{tz}$ ), obtidos por ensaio de compressão dinâmica.

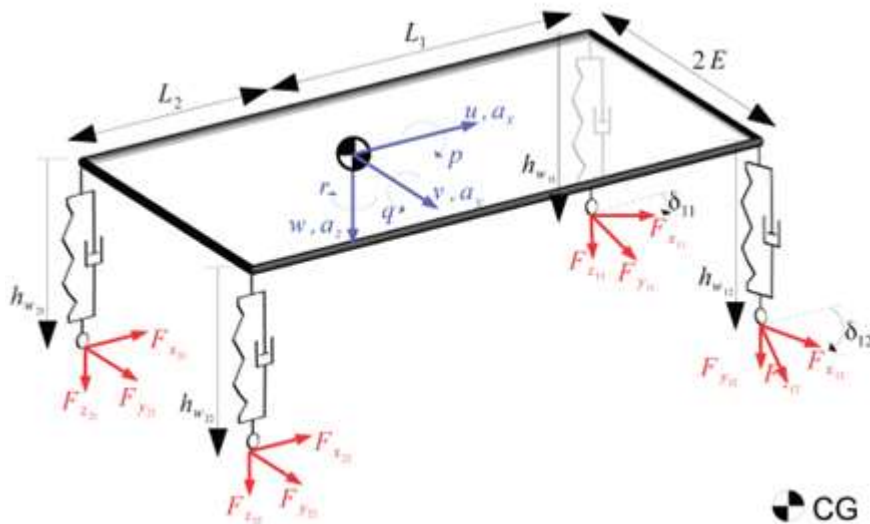


Figura 3.6: Modelos com suspensão tradicional.

A presença da elasticidade da roda substitui a necessidade de um sistema de suspensão tradicional e, ao mesmo tempo, introduz graus de liberdade elásticos ao modelo. Nesse caso, a deformação da carcaça do pneu feita em material

viscoelástico (TPU/ Resina Flexível) é responsável pelas deflexões nas direções vertical, longitudinal e lateral. Assim no modelo, a rigidez da estrutura da roda pode ser representada por molas nas direções  $x, y, z$ , acopladas diretamente à interface de contato solo-roda.

### 3.4 Modelo de Pacejka (“Magic Formula”)

A *Fórmula Mágica de Pacejka* é um modelo empírico amplamente utilizado para representar o comportamento não linear de pneus, baseado em curvas obtidas experimentalmente. Sua principal vantagem é a flexibilidade para representar com alta precisão tanto a força longitudinal quanto a lateral e o torque autoalinante, com base em escorregamento e carga vertical.

A equação geral da fórmula é:

$$Y = D \cdot \sin\left(C \cdot \tan^{-1}\left(B \cdot X - E\left(BX - \tan^{-1}(BX)\right)\right)\right) \quad (3-6)$$

onde:

- $Y$  saída (por exemplo,  $F_x$ ,  $F_y$  ou  $M_z$ );
- $X$  variável de entrada (razão de escorregamento  $\sigma$  para  $F_x$ , ângulo de deriva  $\alpha$  para  $F_y$ );
- $B$  fator de rigidez inicial;
- $C$  fator de forma;
- $D$  pico da curva (força ou torque máximo);
- $E$  fator de curvatura (saturações e transições suaves);
- $S_v$  e  $S_h$  deslocamentos vertical e horizontal, usados para refinamentos finos.

Para o robô móvel, cada parâmetro ( $B, C, D, E, S_h, S_v$ ) deve ser calibrado a partir de ensaios dinâmicos com as rodas viscoelásticas hhoneycomb, pois sua resposta difere de pneus pneumáticos convencionais. Mesmo assim, o modelo preserva toda a flexibilidade necessária para capturar fielmente a não-linearidade do contato roda-solo sob cargas variáveis.

## 4

# Materiais Elastoplásticos e Design Estrutural

As rodas desempenham um papel fundamental no desempenho de robôs móveis, especialmente quando operam em terrenos irregulares. Além de garantir a tração e a movimentação, elas influenciam diretamente na estabilidade, absorção de impactos e na forma como o robô interage com o ambiente. Por isso, a escolha dos materiais e o projeto da estrutura das rodas são etapas essenciais no desenvolvimento de sistemas de locomoção eficientes e confiáveis.

Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados na fabricação das rodas — com foco em TPU e resinas flexíveis — e as estratégias adotadas no projeto estrutural para atender aos requisitos do sistema. Também são abordadas as tecnologias de impressão 3D empregadas na produção dos protótipos, que possibilitaram explorar diferentes geometrias internas e comparar o desempenho dos materiais de forma prática e controlada.

### 4.1

#### Tecnologias de Impressão 3D

Para viabilizar a fabricação dos protótipos desenvolvidos neste trabalho, optou-se pela utilização de tecnologias de manufatura aditiva. A impressão 3D oferece uma série de vantagens quando comparada a métodos convencionais, sobretudo pela possibilidade de fabricar peças com geometrias complexas, sob demanda, e com excelente controle dimensional.

Além disso, o uso dessa tecnologia representa um importante recurso no processo de prototipagem, permitindo a construção de componentes personalizados e otimizados para os requisitos do projeto — como as variações geométricas dos núcleos internos das rodas. A liberdade de design torna possível explorar diferentes soluções estruturais com rapidez e baixo custo.

Neste trabalho, foram selecionadas duas tecnologias complementares: a Modelagem por Deposição Fundida (FDM) e a Estereolitografia com Máscara (mSLA). Cada uma apresenta características específicas e materiais disponíveis que favorecem seu uso conforme o tipo de peça a ser fabricada, sendo descritas nas próximas subseções.

#### 4.1.1

##### Modelagem por Deposição Fundida (FDM)

A tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) é uma das formas mais consolidadas de impressão 3D, sendo amplamente utilizada para a fabricação

de peças funcionais, protótipos e componentes estruturais. O processo consiste na extrusão de um filamento termoplástico aquecido, que é depositado camada por camada até formar a geometria desejada.

Neste projeto, que tem como foco a fabricação de rodas impressas em material flexível, a FDM se mostra especialmente adequada por permitir o uso de filamentos como o TPU Shore 95A. Esse material combina flexibilidade, boa resistência ao rasgo e durabilidade, características fundamentais para aplicações em que o componente entra em contato direto com o solo e deve suportar deformações cíclicas.

Na Figura 4.1 encontra-se apresentado o setup utilizado, com duas impressoras Ender 3 v2 e uma impressora Ender 3 Pro da marca Creality, durante o processo de impressão de rodas *honeycomb* que será apresentada e detalhada nos próximos capítulos.

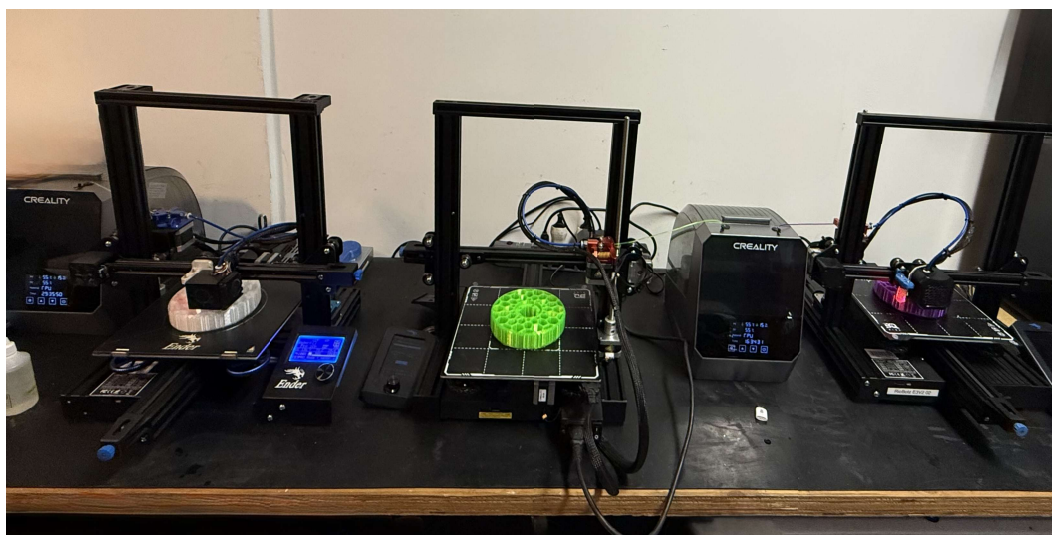


Figura 4.1: Setup Utilizado para Impressão 3d por FDM

Além da compatibilidade com materiais flexíveis, a FDM oferece uma relação custo-benefício favorável, sendo indicada para a produção de peças de maior volume e uso estrutural. Vale destacar que a tecnologia FDM também será utilizada para a fabricação de outras partes do sistema, incluindo os hubs das rodas, suportes dos sensores, carcaças para os motores e demais estruturas auxiliares.

#### 4.1.2 Estereolitografia com Máscara (mSLA)

A estereolitografia com máscara (mSLA) é uma tecnologia de impressão 3D baseada na fotopolimerização de resinas líquidas sensíveis à luz ultravioleta. Nesse processo, uma tela LCD atua como máscara digital (conforme

Figura 4.2), projetando imagens em alta definição que determinam quais regiões da resina serão solidificadas a cada camada. O resultado é uma peça com excelente precisão dimensional e acabamento superficial muito superior ao obtido por outras tecnologias, como a FDM.

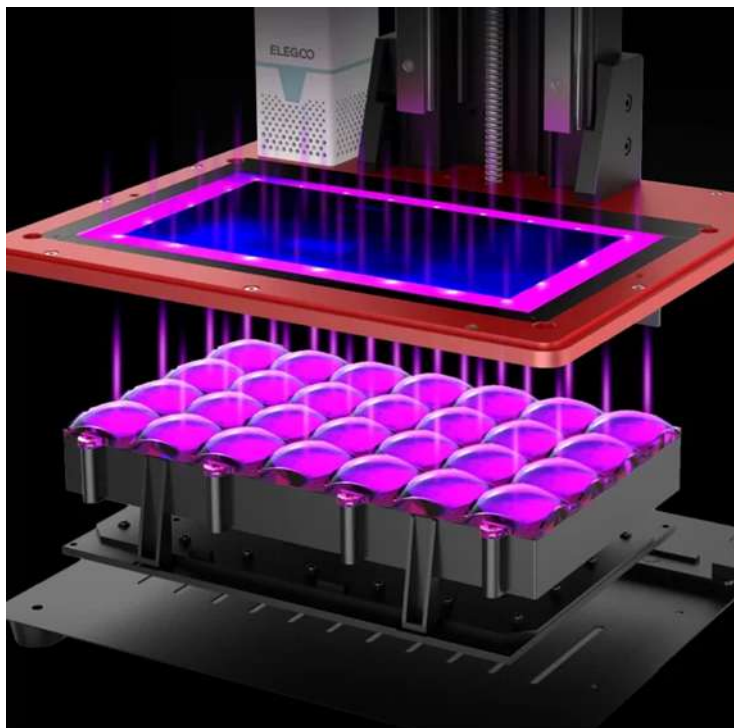


Figura 4.2: Funcionamento da Tela de LCD em Impressoras mSLA

Durante a impressão, o LCD permanece posicionado abaixo do tanque de resina e exibe sequencialmente as “sombras” digitais de cada camada. A luz UV emitida por uma matriz de LEDs atravessa as regiões transparentes da máscara curando seletivamente apenas as regiões desejadas da resina. Como toda a camada é solidificada de uma só vez, o processo é bastante eficiente e entrega excelente resolução, com camadas que podem chegar a espessuras de  $25\mu m$ , e tempo de impressão bem menor quando comparado à FDM.

Na Figura 4.3 encontra-se apresentado o setup utilizado, com uma impressora Photon Mono M5s Pro da marca Anycubic e uma Wash Cure para realizar o processo de pós impressão.

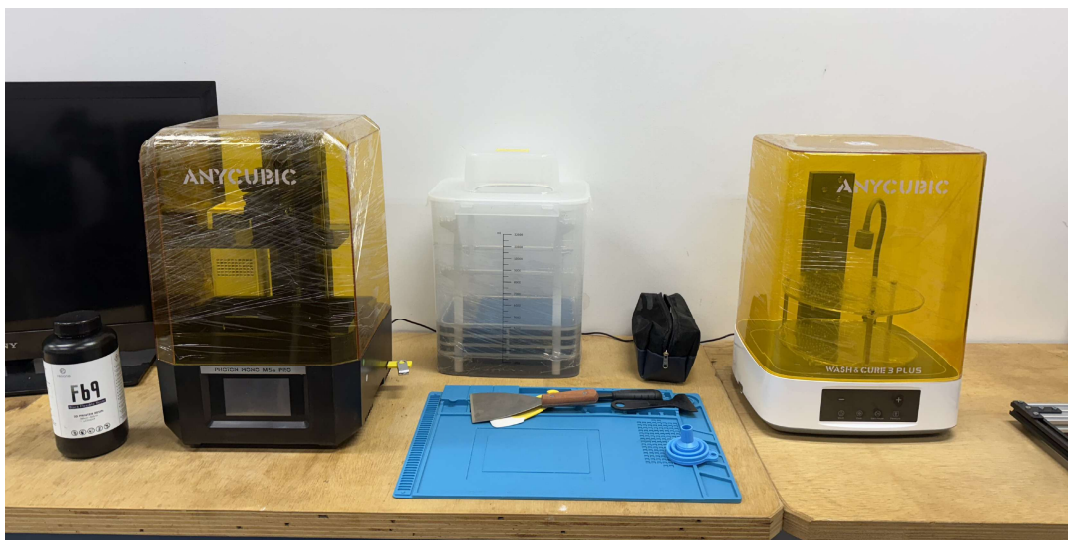


Figura 4.3: Setup Utilizado para Impressão 3d por mSLA

Um aspecto importante da impressão mSLA é o processo de pós-impressão, necessário para garantir a integridade física e química das peças. Após serem removidas da plataforma de impressão, as peças ainda contêm resíduos de resina líquida em sua superfície e, por isso, devem ser lavadas em álcool isopropílico para remoção completa do excesso de material. Em seguida, é realizada a cura final em câmara UV, etapa que promove o endurecimento completo da peça e melhora significativamente suas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional.

## 4.2

### Propriedade dos Materiais

Em um robô móvel de inspeção para terrenos irregulares, a seleção dos materiais das rodas é crucial para garantir desempenho e durabilidade. As rodas devem absorver impactos e vibrações do solo, adaptar-se a irregularidades para manter contato e tração, e resistir a esforços cíclicos sem falhar. Este capítulo analisa detalhadamente as propriedades físico-mecânicas dos dois materiais considerados para a fabricação das rodas do robô: o elastômero termoplástico TPU 95A (poliuretano termoplástico de dureza de 95 Shore A) e a resina flexível Resione F69.

#### 4.2.1

##### Elastômero Termoplástico TPU 95A

O poliuretano termoplástico TPU de dureza 95 Shore A (da Figura 4.4) foi selecionado para a confecção dos pneus do robô em virtude de um conjunto de propriedades mecânicas e ambientais particularmente adequadas a

aplicações móveis em terreno irregular. No nível microscópico, o TPU apresenta arquitetura em blocos alternados de segmentos rígidos — formados por cadeias de di-isocianato e extensores de cadeia — e segmentos flexíveis à base de polioliol. Esse arranjo confere ao material um comportamento híbrido entre plásticos de engenharia e borrachas: elevada elasticidade, mas com módulo e dureza suficientes para suportar carga sem colapsar.

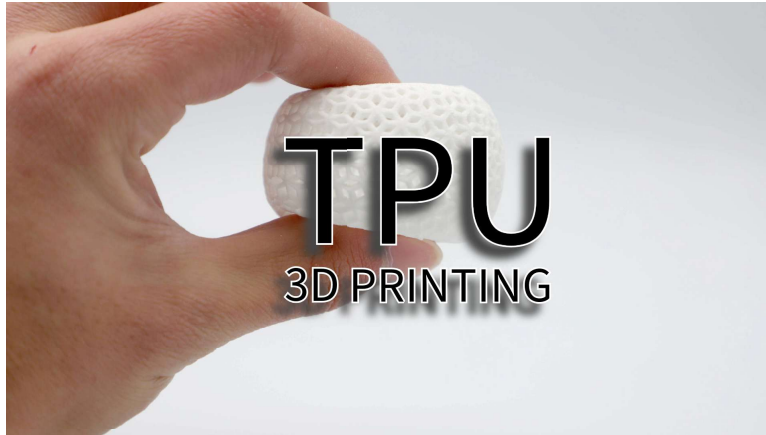


Figura 4.4: Exemplo de Aplicação do Material TPU 95A.

Regimes de deformação em tração em corpos impressos utilizando tecnologia FDM:

- Acomodação viscoelástica ( $\epsilon \approx 0 - 20\%$ ): reorientação das cadeias com baixo incremento de tensão;
- Endurecimento progressivo ( $\epsilon \approx 20 - 350\%$ ): tensão cresce de forma não linear até 30–40 MPa (peças fundidas podem atingir 50 MPa);
- Pós-crítico com histerese ( $\epsilon > 350\%$ ): perdas energéticas  $\approx 20\%$ , revelando dissipação interna de calor.

A área sob a curva tensão–deformação ultrapassa  $80 \text{ kJ m}^{-3}$ , evidenciando alta tenacidade e, conseqüentemente, grande capacidade de absorção de choque sem fratura — condição essencial para rodas submetidas a impactos repetitivos.

Análises dinâmico-mecânicas (*DMA*,  $1 \text{ Hz}$ ,  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) indicam módulo de armazenamento  $E$  de 50–90 MPa e fator de perda ( $\tan \delta$ ) 0,25, conferindo amortecimento interno eficaz: vibrações de alta frequência são convertidas em calor antes de alcançar o chassi. A dureza 95 Shore A ( 47 Shore D) garante rigidez para manter a geometria da roda, enquanto a alongação elástica  $> 300\%$  permite contornar pedras, sulcos ou degraus sem perda de tração.

A estabilidade térmica do TPU 95A é outro diferencial: o material mantém flexibilidade funcional entre 30 °C e +80 °C, sem transição vítrea relevante nesse intervalo. Em termos de fadiga, amostras impressas suportam mais de 10–10 ciclos a 100 % de deformação sem degradação significativa do módulo; já a resistência ao rasgo situa-se entre 20 e 80 kN m<sup>-1</sup>, garantindo que cortes iniciais não se propaguem sob cargas repetidas. Complementa-se a isso uma resistência moderada a óleos e umidade, aspectos importantes para ambientes industriais.

O TPU 95A escolhido fornecido pela Slim 3D, com certificação de qualidade para manufatura aditiva e o *datasheet* completo encontra-se no Apêndice A. Em síntese, o material escolhido oferece:

1. Tenacidade elevada para absorção de choques;
2. Amortecimento viscoelástico que mitiga vibrações;
3. Rigidez/elasticidade balanceadas para preservar forma e aderência;
4. Estabilidade térmica e química em condições variáveis;
5. Durabilidade frente a fadiga, abrasão e rasgo.

Tais atributos justificam sua adoção como material base das rodas, assegurando ao robô desempenho confiável, menor transmissão de vibrações aos sensores e longa vida útil em missões de inspeção sobre superfícies adversas.

Os benefícios diretos desse conjunto de propriedades para o robô podem ser resumidos da seguinte forma: a elevada tenacidade do TPU permite que os pneus absorvam impactos severos sem romper, protegendo tanto a estrutura mecânica quanto a eletrônica embarcada. O amortecimento viscoelástico inerente ao material atenua vibrações de alta frequência, reduzindo a transmissão de ruídos mecânicos aos sensores e aumentando a confiabilidade das medições.

O equilíbrio entre rigidez e elasticidade garante que a roda mantenha seu perfil sob carga, mas ainda se deforme o suficiente para contornar pedras ou degraus, preservando a tração. A estabilidade térmica e química assegura desempenho constante em climas extremos e na presença de óleos ou graxas, comuns em ambientes industriais. Por fim, a resistência superior à fadiga, abrasão e rasgo prolonga a vida útil dos pneus, diminuindo paradas para manutenção e, conseqüentemente, aumentando a disponibilidade operacional do robô.

### 4.2.2

#### Resina Flexível Resione F69

A Resione F69 (da Figura 4.5) é uma resina fotopolimérica “rubber-like” formulada para processos SLA/DLP, adquirida para ensaios comparativos de flexibilidade das rodas e material alternativo. Por tratar-se de um polímero termoendurecível, sua rede reticulada nasce durante a exposição à luz UV, originando uma matriz elástica cuja dureza típica situa-se em  $\approx 70$  Shore A (faixa 60–75 A). Essa maciez adicional, em relação ao TPU 95A, advém de uma densidade de reticulação mais baixa e de cadeias alifáticas longas que conferem grande mobilidade segmentar.



Figura 4.5: Resina Flexível Resione F69

Corpos-de-prova impressos apresentam alongamento na ruptura de 220–250 %, resistência à tração de 6–7 MPa e módulo elástico da ordem de 30 MPa. Em termos práticos, rodas em F69 exibem maior deformabilidade sob carga e, portanto, potencialmente maior área de contato e absorção de choque a 25 °C. O material também demonstra boa resistência ao rasgo ( $20\text{--}30 \text{ kN m}^{-1}$ ) e pode ser dobrado milhares de vezes sem fissurar, evidenciando resiliência cíclica aceitável para aplicações de prototipagem “soft”.

O ponto crítico da F69 é sua forte sensibilidade à temperatura. Dados do fabricante indicam aumento progressivo de dureza à medida que a temperatura cai; por volta de 5 °C a resina cruza a vizinhança de sua  $T_g$  (0–10 °C) e passa a comportar-se como um plástico rígido, perdendo a flexibilidade que exhibe a 20–25 °C. Embora permaneça dúctil e resistente a impactos frios, a capacidade

de amortecimento e conformidade da roda varia significativamente com o clima — cenário indesejável para robôs que precisam de desempenho previsível em campo aberto.

### 4.3

#### Estruturas *Honeycomb*

As estruturas do tipo *honeycomb* (ou colmeia) são conhecidas pela eficiência em combinar leveza com resistência mecânica. Formadas por células hexagonais repetidas, essas geometrias distribuem as tensões de maneira uniforme e controlam as deformações ao longo da estrutura. Por essas características, são amplamente aplicadas em setores como aeroespacial, automotivo e construção civil, especialmente em componentes que exigem rigidez com o mínimo de material. Na Figura 4.6 tem-se um exemplo de aplicação dessa estrutura no desenvolvimento de rodas.

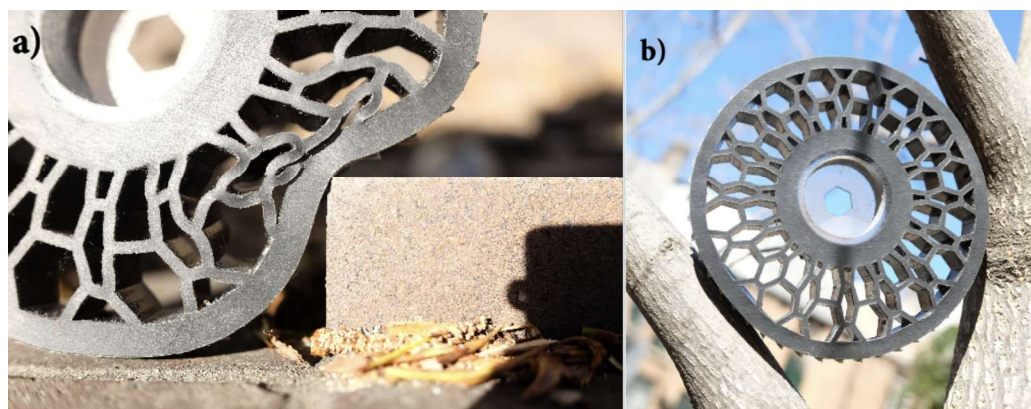


Figura 4.6: Exemplo do uso de Estrutura *Honeycomb* em Rodas

Além da rigidez específica, outro benefício importante está na capacidade de absorver impactos de forma progressiva, o que torna essas estruturas interessantes para aplicações em que o amortecimento passivo é desejável. A popularização da impressão 3D tornou ainda mais viável a fabricação dessas geometrias complexas, permitindo explorar seu uso em diferentes contextos, incluindo sistemas de locomoção robótica.

Embora os primeiros registros de uso desse padrão remontem a ornamentos de papel na China há cerca de 2 000 anos (Bitzer, 1997), foi somente em meados do século XIX que as cadeias celulares passaram a funcionar como núcleo de “sandwich panels” em aplicações como pontes e mobiliário. Após a Segunda Guerra Mundial, tornou-se possível fabricar núcleos honeycomb inteiramente em alumínio, o que levou à adoção generalizada desse núcleo em

componentes aeronáuticos (asas, flaps e painéis) devido à sua combinação única de baixo peso e elevada capacidade de absorção de impacto (Bitzer, 1997).



Figura 4.7: Elongarina do BMW i3 Reforçada com Núcleo *Honeycomb*

A célula hexagonal regular (Figura 4.8) é a mais comum e pode ser definida por quatro parâmetros principais: espessura da parede ( $t$ ), comprimento da aresta ( $l$ ), altura da célula ( $h$ ) e o ângulo entre as paredes ( $\theta$ ).

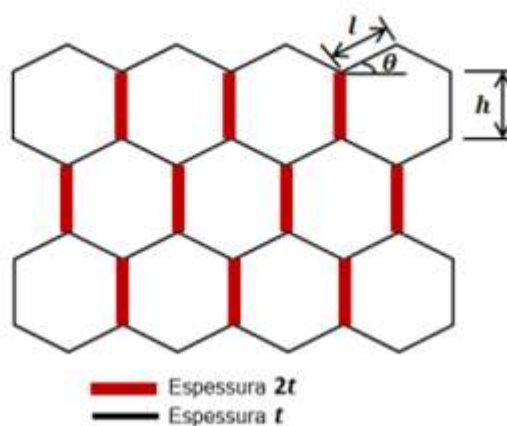


Figura 4.8: Propriedades Geométricas de uma Estrutura *Honeycomb*

A densidade do núcleo é diretamente proporcional à razão  $t/l$ , enquanto sua anisotropia estrutural se evidencia na diferença de rigidez entre o plano

XY (onde as células se deformam facilmente por flexão) e o eixo Z (direção de compressão e tração direta das paredes) (Gibson & Ashby, 1997).

Esse tipo de estrutura oferece uma boa relação entre peso e rigidez, especialmente no sentido transversal, além de uma boa capacidade de dissipar energia em impactos por meio da deformação controlada das lâminas. Esses atributos fundamentam sua aplicação neste trabalho, no qual este padrão celular será adaptado a rodas impressas de TPU e resina flexível para garantir amortecimento passivo e resistência dinâmica em superfícies irregulares.

## 5

### Modelagem e Fabricação das Rodas

A adoção de geometrias de rodas não convencionais pode alterar profundamente o desempenho de robôs *off-road* em terreno acidentado. Estruturas adequadas amortecem choques, garantem tração e preservam a estabilidade, requisitos discutidos nos capítulos anteriores.

Para cumprir as metas desejadas, optou-se pelo uso de materiais poliméricos elastoméricos impressos em 3D, notadamente TPU 95A (poliuretano termoplástico) e resinas flexíveis. Esses polímeros suportam alongamentos superiores a 200 % antes da ruptura, exibindo elevada tenacidade típica de elastômeros. Além disso, testes de laboratório e relatos de campo indicam que rodas impressas reduzem vibrações ao funcionarem como “suspensão passiva” e, simultaneamente, oferecem bons níveis de atrito superficial<sup>1</sup>.

Do ponto de vista estrutural, o emprego de arquiteturas celulares (por exemplo, honeycomb) justifica-se pela relação rigidez-peso e pela capacidade de dissipar energia por flambagem controlada de paredes internas (GIBSON & ASHBY, 1997). Essas malhas geram um platô de tensão durante a compressão, favorecendo o amortecimento progressivo de impactos.

Neste capítulo serão apresentados cinco modelos de roda fabricadas utilizando impressão 3D FDM e/ou SLA, cada um explorando um princípio estrutural distinto:

1. **Roda Sólida (base de rigidez):** referência rígida para comparar níveis de amortecimento;
2. **Roda Honeycomb Interno:** núcleo hexagonal para alta dissipação de energia e baixo peso;
3. **Roda Morphing (Variável em Rigidez):** aro externo em resina flexível cuja forma e rigidez podem ser moduladas por cabos tensionados radialmente, permitindo ajustar o diâmetro efetivo e a conformidade da roda conforme o terreno, conceito inspirado na variable-stiffness morphing wheel de Lee et al (2024);
4. **Roda Anéis Concêntricos:** bandas radiais flexíveis que controlam a deformação lateral;
5. **Roda Perfurada:** disco com matriz concêntrica de orifícios cilíndricos que diminui a massa e cria zonas de compressão radial, proporcionando

amortecimento passivo de impactos e aderência extra em solos irregulares.

6. **Roda Vortex-Slot:** aro em TPU com ranhuras inclinadas que atuam como molas internas, reduzindo peso e absorvendo impactos sem perder aderência.

Cada subseção deste capítulo concentrar-se-á exclusivamente nos aspectos de projeto e manufatura de cada roda; isto é, concepção geométrica, parâmetros de impressão (altura de camada, preenchimento, orientação de deposição) e massa resultante.

A caracterização mecânica e a avaliação em pista de testes serão apresentadas no capítulo seguinte (de resultados), juntamente com as simulações de elementos finitos.

Ao final deste capítulo será incluído um quadro-síntese listando os principais dados de projeto e impressão de cada modelo; o quadro comparativo de desempenho experimental aparecerá posteriormente, servindo de base para a definição da melhor configuração de roda para a próxima geração do robô de inspeção.

## 5.1

### Roda Honeycomb

A Roda Honeycomb utiliza uma estrutura interna no formato de favo de mel que absorve impactos de forma inteligente, garantindo desempenho suave em terrenos irregulares sem perder estabilidade em obstáculos grandes. Além disso, o projeto desta roda facilita a manutenção e permite a experimentação com diferentes materiais (TPU e resina) na sua construção.

O segredo para o desempenho desta roda está no núcleo em favo de mel com milhares de células hexagonais que trabalham em conjunto para distribuir esforços, deformar-se de forma previsível e voltar à forma original sem fadiga significativa.

Dessa forma, a roda funciona como uma mola radial graduada: a coroa externa, que primeiro toca o solo, cede facilmente a pequenas irregularidades, garantindo conforto e aderência; conforme a compressão avança em direção ao centro, as paredes internas mais confinadas oferecem resistência crescente, endurecendo o conjunto e evitando deformações excessivas. Esse gradiente de rigidez surge naturalmente do comportamento não linear de estruturas celulares e pode ser ajustado por projeto para obter o equilíbrio ideal entre absorção de impacto e sustentação.

O resultado é uma roda que suaviza micro-choques, mantém tração constante em terrenos irregulares e, ao mesmo tempo, preserva a estabilidade do robô diante de obstáculos maiores. Para entender esse desempenho, vale dividir o processo de deformação em três estágios consecutivos de absorção de energia: flexão elástica inicial, flambagem controlada progressiva e densificação completa.

### 1. Deformação Elástica Inicial

Logo que a roda toca um ressalto, as paredes de cada célula sofrem uma flexão elástica muito pequena com comportamento semelhante a comprimir levemente um pneu cheio de ar.

Sua função é a dissipação de micro-choques do solo; a energia é absorvida e imediatamente devolvida quando a carga some, fazendo a célula voltar ao formato original sem dano permanente.

### 2. Encurvamento Controlado (Flambagem)

Se o obstáculo é maior ou a carga aumenta, a tensão ultrapassa o limiar elástico: as paredes finas encurvam-se em flambagem controlada, de forma suavemente “programada”. As paredes dobram-se em ondas estáveis, criando regiões plásticas que consomem energia sem colapsar.

Sua função é manter a roda “macia” mesmo sob pressão mais alta, filtrando vibrações de média intensidade e evitando que trancos alcancem o chassi.

### 3. Densificação (Compressão Máxima)

Sob cargas ainda maiores, as ondulações se fecham até que paredes opostas entrem em contato, enchendo todos os vazios. Nessa etapa a capacidade de deformação é enfraquecida, resultando em uma rigidez brusca.

Sua função é impedir a falha completa da estrutura, garantindo sustentação, preservando a geometria da roda e assegurando tração para superar degraus ou transportar peso elevado.

## 5.2

### Inspirações Naturais e Fundamentação da Estrutura Celular *Honeycomb*

As arquiteturas celulares observadas na natureza fornecem um modelo de como alcançar leveza, rigidez graduada e eficiente dissipação de energia. Inspirados por essas soluções biológicas, adotamos o design honeycomb para o núcleo da roda deste projeto, aproveitando a manufatura aditiva para imprimir, em uma única peça, geometrias que variam sua rigidez conforme a carga aplicada.

### Inspirações em Estruturas Biológicas

Muitos organismos naturais exploram arquiteturas celulares para otimizar simultaneamente leveza, resistência e eficiência de energia. No interior dos ossos longos, o tecido trabecular Figura 5.1 organiza suas finas trabéculas segundo os eixos de maior tensão, criando um gradiente de densidade que confere rigidez onde necessário e espaço para dissipação de energia em impactos.



Figura 5.1: Estrutura trabecular do osso longo (rede anisotrópica de placas ósseas que se alinham segundo os eixos de maior tensão).

Nas profundezas do oceano, esponjas marinhas e estruturas fúngicas Figura 5.2 formam redes porosas de filamentos que equilibram a necessidade

de trocas de fluidos com a sustentação mecânica do corpo.



Figura 5.2: Estrutura do corpo de uma esponja marinha

As asas de libélula Figura 5.3 exibem micropadrões que se aproximam de superfícies de curvatura mínima (TPMS), garantindo rigidez local e autoportância em lâminas ultrafinas. Até os galhos vegetais fazem uso de células poliédricas reforçadas por lignocelulose para resistir tanto à compressão quanto à tração, distribuindo tensões de forma eficiente pelas paredes celulares.



Figura 5.3: Estrutura da as de uma libélula

### Transposição Tecnológica em Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva tem levado os princípios das arquiteturas celulares naturais a setores tão variados quanto a aeronáutica, a indústria automotiva e até a produção de calçados técnicos. No caso dos drones, núcleos honeycomb completamente fechados são impressos em FDM para substituir estruturas maciças: com isso, diminuem-se em até 30% o peso total da fuselagem e se corta em cerca de 50% o tempo de fabricação, resultando em maior autonomia de voo e rapidez no ciclo de desenvolvimento.



Figura 5.4: Corte transversal da asa mostrando a aplicação da estrutura honeycomb no design de drone impresso em 3D

Já na mobilidade terrestre, protótipos de pneus Figura 5.5 incorporam lattices internos que imitam o padrão hexagonal das colmeias. Por fim, no mercado de calçados esportivos Figura 5.6, entressolas com densidade variável são produzidas em poucos dias (em vez de quase um ano) graças a lattices projetados sob medida. Em todos esses exemplos, a adoção de geometrias honeycomb e TPMS revela-se capaz de ampliar ganhos de desempenho e eficiência energética.



Figura 5.5: Pneu automotivo com estrutura celular.

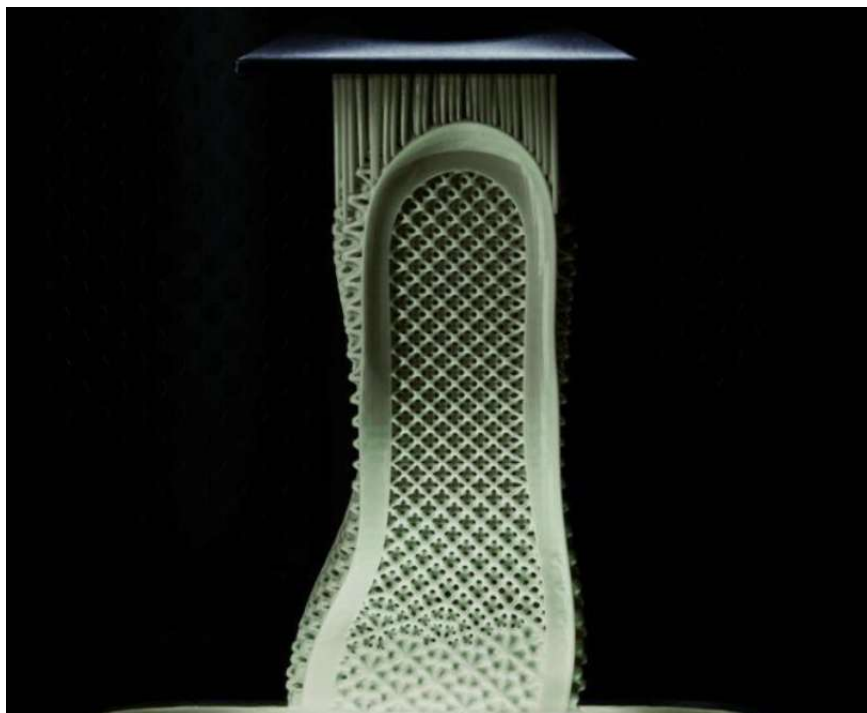


Figura 5.6: Geometria em solados de calçados.

### 5.2.1

#### Estrutura Celular Leve e Eficiente

A incorporação de uma malha celular hexagonal (estrutura do tipo favo de mel) no interior da roda proporciona diversos benefícios em termos de redução de peso e aumento de durabilidade. A geometria vazada dessa estrutura faz com que a roda tenha aproximadamente 30% menos massas em comparação a um disco sólido fabricado com o mesmo material (TPU). Essa diminuição de peso reduz a inércia a ser vencida pelos motores, facilitando o deslocamento do robô e aumentando a eficiência energética do sistema de tração.

Além disso, as células hexagonais promovem uma distribuição homogênea das tensões mecânicas ao longo de toda a circunferência da roda, evitando concentrações de tensão que poderiam causar fadiga prematura do material ou falhas localizadas. Consequentemente, a utilização dessa geometria resulta em maior durabilidade e vida útil da roda, mesmo sob condições de uso prolongado e em terrenos irregulares.

### 5.2.2

#### Desempenho em Terrenos Irregulares

A sinergia entre o núcleo celular leve, o anel externo e o cubo central rígido resultam em uma roda capaz de conciliar absorção de impactos, tração e manutenção simplificada, requisitos para veículos de inspeção que se deslocam sobre trilhas de paralelepípedos, areia fofa ou declividades acentuadas.

Esse tipo de estrutura, conforme apresentado anteriormente, atua como um mecanismo mola-amortecedor, que se deforma elasticamente quando transita por desníveis, absorvendo parcela significativa da energia cinética que seria transmitida ao chassi do robô.

O anel externo complementa esse efeito ao conformar-se às micro irregularidades do solo, aumentando a área real de contato e, conseqüentemente, o coeficiente de atrito efetivo. Esse comportamento é particularmente vantajoso em superfícies de baixa coesão, onde a aderência depende da capacidade do pneu em “engolfar” partículas soltas.

Testes em campo confirmaram que a roda Honeycomb mitiga vibrações de alta frequência e mantém tração mesmo sob declividades superiores a 20 %, preservando a estabilidade global do robô em cenários de areia, cascalho e pavimentação irregular. Logo, essa solução eleva a mobilidade e a robustez operacional do veículo, ao mesmo tempo em que preserva requisitos de leveza e modularidade impostos pela manufatura aditiva.

## 5.3

### Roda Morphing

A Roda Morphing é uma evolução direta da Roda Honeycomb, projetada para variar ativamente seu comportamento de rigidez por meio de um sistema de tensionamento de “cordas” (*spoke strings*) que envolvem o núcleo celular. Enquanto a roda *honeycomb* tem rigidez fixa definida em projeto (variação apenas por geometria das células), a Roda Morphing possui:

- Atuador linear integrado ao *hub*, capaz de deslocar o anel de tensionamento para dentro ou para fora do favo de mel;
- Cordas de alta resistência, dispostas radialmente entre o anel externo e o *hub*, normalmente feitas de fibra de Kevlar ou linhas de aço-coated;
- Mecanismo de ajuste contínuo, que estica ou relaxa essas cordas, alterando o “pré-tensionamento” dos elos da circunferência externa.

Quando o atuador puxa o anel de tensionamento para mais perto do centro a força radial contra as paredes hexagonais é aumentada. Esse estado

simula um material mais rígido, ideal para terrenos planos, onde minimiza a deformação e reduz o consumo de energia por histerese. Além disso, esse estado rígido proporciona melhor controle da trajetória e melhor resposta a acelerações.

Ao afrouxar as cordas, o núcleo *honeycomb* passa atuar e seu funcionamento é igual ao proposto na seção anterior que aborda a roda puramente composta por "favos de mel".

### 5.3.1 Funcionamento da Roda Morphing

O princípio de funcionamento desta roda lembra a tensão superficial de uma gota líquida, onde o sistema busca naturalmente o menor comprimento de circunferência, correspondente à energia potencial mínima e, ao ser esticado, armazena energia que é devolvida quando a tensão diminui, estabilizando rapidamente o formato circular.

O ajuste é feito variando o chamado *hub-gap*, ou seja, a folga radial entre o anel de tensionamento (que prende as cordas) e o hub rígido da roda. Na sequência de imagens da Figura 5.7 é possível verificar o comportamento da roda ao variar o *hub-gap* de 2 a 12mm.

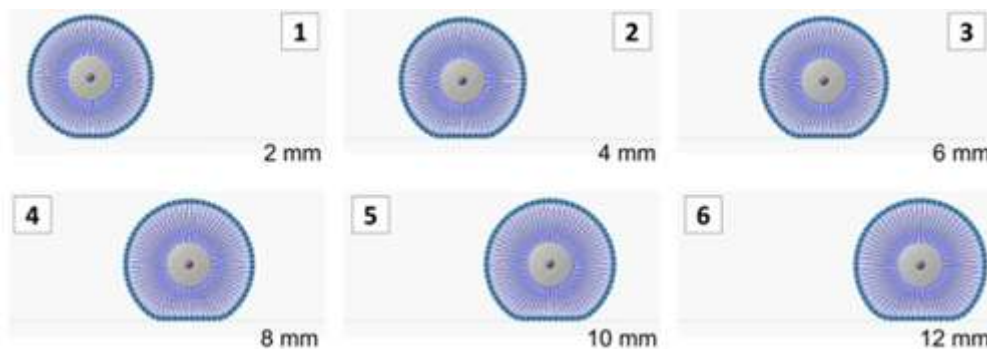


Figura 5.7: Comportamento da Roda ao variar o *Hub-Gap* entre 2 e 12mm

Esse mecanismo de ajuste contínuo permite ao robô alternar dinamicamente entre um modo “duro” (para alta velocidade e precisão) e um modo “macio” (para absorção de choques e conformação a terrenos irregulares), sem trocar de roda ou componente.

### 5.3.2 Componentes e Projeto da Roda Morphing

A Roda Morphing, conforme descrita por (Lee et al., 2024), é composta por três subsistemas fundamentais: *chain blocks*, anel de esponja (*soft sup-*

*porting structure*) e cordas integrados segundo a modelagem de *multibody dynamics* para viabilizar mudança ativa de rigidez. Os seguintes componentes contemplam este projeto de roda:

1. **Hub (Núcleo Rígido)**

Peça central fixa ao eixo do motor que suporta todo o conjunto e transmite o torque do eixo para a roda.

2. **Estrutura *Honeycomb* (Núcleo Macio)**

Conjunto de células hexagonais impressas material flexível que funciona como mola e amortecedor passivo, deformando-se de forma programada para absorver os impactos.

3. **Anel de Esponja (Soft Supporting Structure)**

Camada de espuma fina inserida entre o *honeycomb* e a periferia de elos rígidos que atua como amortecedor extra, preenchendo espaços e suavizando a transição de rigidez.

4. **Smart Chain Blocks (Blocos Articulados)**

Pequenos blocos rígidos, com funcionamento similar à elos de uma esteira, que gira livremente em torno de um pino e permite o deslizamento das cordas sem travamento.

5. **Spoke Strings (Cordas de Tensionamento)**

Fios ou cabos de alta resistência à tração, que ligam os elos ao anel de tensionamento da roda. Quando tensionados aumentam a rigidez da roda e quando soltos deixam a roda macia e o núcleo *honeycomb* passa a atuar.<sup>7</sup>

6. **Anel de Tensionamento**

Anel interno que fica entre o hub e o núcleo *honeycomb* responsável por prender as cordas e garantir o tensionamento das mesmas de forma ativa.



Figura 5.8: Anel de Tensionamento e Núcleo *Honeycomb* da Roda Morphing

Embora este conceito tenha sido completamente modelado e validado através do software SolidWorks optou-se por não desenvolver fisicamente o protótipo neste estágio. O maior desafio concentrou-se na integração do anel de tensionamento e no roteamento seguro das cordas, cujo tensionamento contínuo exigiria guias, sensores e interfaces elétricas complexas.

Em essência, a *Morphing Wheel* seria uma extensão ativa da Roda Honeycomb, mantendo toda a geometria celular leve e seu princípio de amortecimento e adicionando um anel de tensionamento móvel e um atuador capaz de ajustar, em tempo real, a tensão das cordas que circundam o núcleo. Assim, em vez de variar o comportamento apenas pela forma das células e via projeto, o robô poderia alternar dinamicamente entre um modo “soft” e um modo “hard” baseado no trajeto e terreno em que se deseja locomover.

## 5.4

### Roda com Colunas Radiais

A Figura 5.9 ilustra mais um conceito de roda flexível obtido por manufatura aditiva onde seis colunas cilíndricas estão dispostas radialmente entre um cubo e um anel externo de rodagem contínuo do mesmo material. Todo o conjunto é impresso em uma única etapa, sem interfaces coladas nem transições de material.



Figura 5.9: Projeto no SolidWorks da Roda de Colunas Radiais

A roda apresentada na Figura 5.9 possui um design inspirado na arquitetura de rolamentos, com colunas cilíndricas dispostas radialmente entre um cubo central e o anel externo de rodagem. Apesar da semelhança visual, trata-se de uma estrutura monolítica, sem elementos móveis ou interfaces entre componentes. As colunas internas funcionam como elementos flexíveis que absorvem deformações radiais e distribuem a carga de forma equilibrada ao longo da circunferência.

#### 5.4.1 Arquitetura Estrutural

A roda de anéis concêntricos foi projetada para ser fabricada como uma peça única em TPU, integrando diretamente a banda de rodagem e os elementos internos sem juntas ou colagens. Seu funcionamento estrutural apoia-se na interação entre o anel externo e um conjunto de colunas cilíndricas radiais que se estendem até o cubo central.

Ao entrar em contato com o solo, o anel de rodagem recebe a força normal, ajusta-se às microirregularidades do terreno, amplia a área de contato e aumenta o coeficiente de atrito. Essa força é então redistribuída ao longo da circunferência e convertida em componentes radiais que carregam as colunas, transmitindo a maior parte da carga em compressão axial ao cubo.

Em condições de uso, as colunas deformam-se elasticamente, oferecendo rigidez radial; sob sobrecargas, elas entram em flambagem estável, dissipando

energia de impacto sem risco de fratura. O cubo central intercepta esse fluxo de cargas e o transmite ao eixo motriz, além de suportar os esforços de tração e os momentos de frenagem.

#### 5.4.2

#### Desempenho em Superfícies Irregulares

Em terrenos de topografia irregular, a roda de anéis concêntricos demonstra um comportamento viscoelástico gradativo extremamente eficaz. Em superfícies de microrrelevo o anel externo deforma-se localmente, aumentando a área de contato real e amortecendo vibrações de alta frequência. Esse efeito previne o “quique” e mantém a tração mesmo quando algumas colunas radiais perdem momentaneamente a carga. Em solos de baixa coesão a combinação entre a elasticidade do anel e o espaçamento entre colunas “engolfa” partículas soltas, elevando o coeficiente de atrito e reduzindo derrapagens.

Diante de descontinuidades mais pronunciadas, como raízes salientes ou degraus de até 40 mm, as colunas entram em flambagem controlada, absorvendo grande parte da energia de impacto antes que ela chegue ao chassi, enquanto o anel preserva seu perfil externo, permitindo que o veículo supere obstáculos sem perder estabilidade.

### 5.5

#### Roda Perfurada Circular

A variação “anel perfurado” incorpora dois cinturões concêntricos de furos cilíndricos que atravessam a espessura da roda. Essa estratégia diminui a massa em relação a um disco maciço e cria câmaras de ar capazes de deformar-se quando o pneu é comprimido. Do ponto de vista mecânico, contudo, a distribuição de vazios em formato circular mostra-se menos eficiente que a malha hexagonal da roda Honeycomb. As paredes entre os furos trabalham quase exclusivamente à flexão pura; diferem, portanto, das células hexagonais, cujo arranjo fechado reparte os esforços simultaneamente em flexão e cisalhamento e permite caminhos múltiplos de redistribuição de carga.

Conseqüentemente, a roda perfurada apresenta: (i) maior concentração de tensões nas junções entre o anel externo e as colunas sólidas que circundam o cubo, (ii) menor rigidez radial gradativa (a transição do regime flexível para o regime rígido ocorre de forma mais brusca, reduzindo a faixa útil de amortecimento) e (iii) tendência mais pronunciada à flambagem global (quando submetida a impactos repetitivos, já que os furos, ao contrário das células fechadas, não se apoiam mutuamente).



Figura 5.10: Roda no perfil de alívios circulares

### 5.5.1

#### Arquitetura Estrutural

Esse conceito foi projetada para ser impressa monoliticamente em TPU Shore 95A ou em resina flexível integrando o cubo central maciço ao anel de rodagem externo por meio de duas fileiras concêntricas de colunas cilíndricas perfuradas. Essas colunas atuam primariamente em compressão axial: sob cargas baixas deformam-se elasticamente, amortecendo microirregularidades; em sobrecargas, entram em flambagem estável, dissipando energia de impacto sem colapso súbito. A disposição concêntrica dessas colunas assegura a distribuição uniforme das cargas entre o anel e o cubo, eliminando pontos críticos de tensão. A impressão em peça única garante continuidade do material, TPU para maior resistência ao desgaste ou resina para detalhes mais finos e elimina junções coladas que poderiam comprometer a durabilidade.

### 5.5.2

#### Desempenho em Superfícies Irregulares

Em superfícies de microrrelevo, como paralelepípedos ou cascalho fino, o anel perfurado se conforma localmente ao solo pela compressão diferencial das paredes entre os orifícios, ampliando a área de contato e elevando o

coeficiente de atrito. Em solos soltos (areia fofa ou terra), cada célula de ar “abraça” grãos, reduzindo a tendência ao deslizamento. Ao enfrentar desníveis moderados, os sulcos perfurados filtram vibrações de alta frequência, enquanto a flambagem controlada das colunas absorve impactos mais intensos sem falha global. Apesar dessas vantagens, a concentração de tensões ao redor dos furos impõe atenção rigorosa ao diâmetro e espaçamento das perfurações para evitar fissuras prematuras.

## 5.6

### Roda *Vortex-Slot*

Esse conceito de roda ranhurada foi inicialmente inspirado em experiências práticas com a equipe de robótica, RioBotz, da PUC-Rio. Em robôs de combate, é comum o uso de rodas fabricadas em resina com núcleo ranhurado, pois proporcionam: maior sobrevivência a impactos, melhor tração para manobras e uma modularidade conveniente (rápida substituição e reconfiguração de conjuntos de roda). Projetadas para aliviar resistência estrutural, capacidade de amortecimento e alívio de peso, características fundamentais para suportar os impactos intensos dessas competições sem perder agilidade ou robustez. Ao trazer esse princípio para o contexto da robótica de inspeção, o objetivo é obter os mesmos benefícios: absorção passiva de vibrações, redução de massa e melhor adaptação a superfícies irregulares. Posteriormente, ao pesquisar soluções comerciais semelhantes, foi identificado que a empresa Banebots fabrica rodas com design similar, conhecidas como *compliant wheels* ou *flex wheels*, muito utilizadas em robôs móveis e de combate.

Essas rodas possuem ranhuras inclinadas ao longo da circunferência, segmentando a banda de rodagem em "raios" flexíveis. Quando submetidas a uma carga ou impacto, essas seções se deformam elasticamente, absorvendo parte da energia ao invés de transmiti-la diretamente ao eixo, funcionando, na prática, como uma suspensão embutida. A geometria inclinada das ranhuras ajuda a distribuir melhor os esforços, evitando concentrações de tensão e permitindo uma deformação mais progressiva. Além disso, a variedade de durezas disponíveis (como as versões de 30A a 60A oferecidas pela Banebots) permite ajustar o grau de flexibilidade conforme a aplicação. Por serem impressas ou moldadas como uma única peça, essas rodas também contribuem para a simplicidade construtiva, e são ideais para robôs de baixa a média velocidade, onde a conformidade do sistema é mais importante do que a rotação extrema. Esse tipo de solução, além de eficiente e leve, elimina a necessidade de sistemas de suspensão complexos, otimizando o desempenho em terrenos desafiadores.

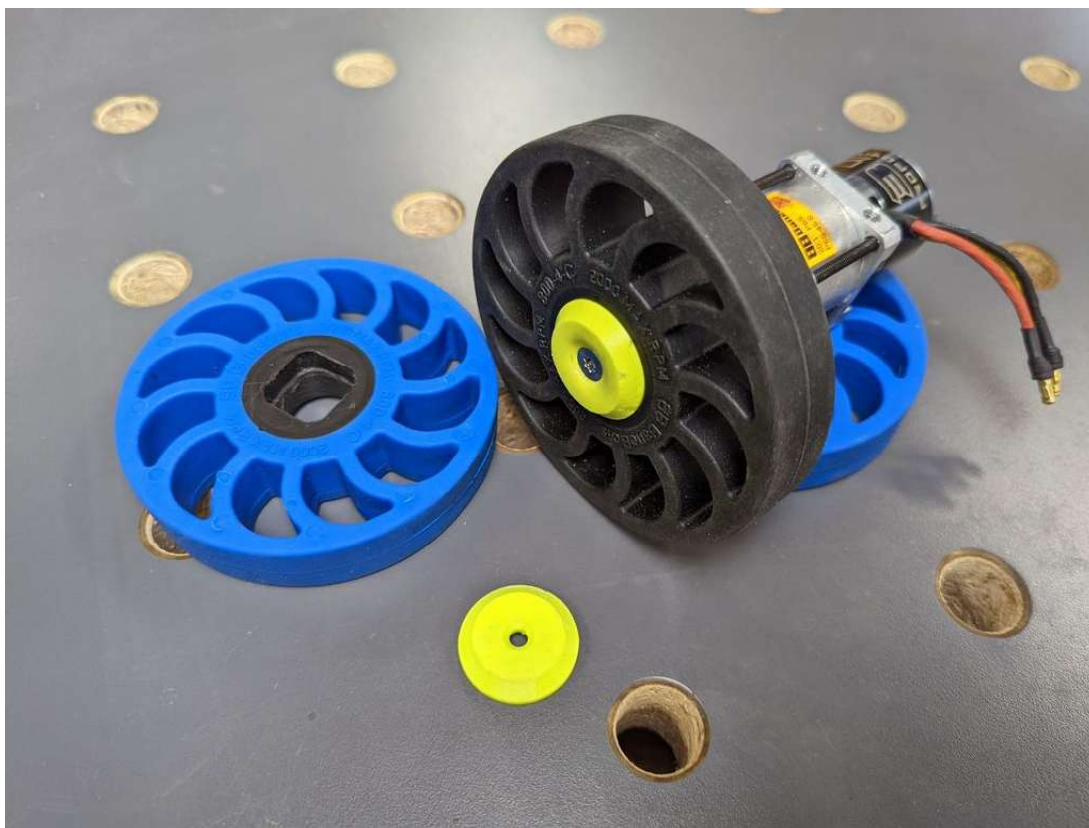


Figura 5.11: Roda no perfil da loja Banebots

### 5.6.1

#### Arquitetura Estrutural

Essas lâminas inclinadas agem como elementos de mola-com-amortecedor: deformam-se em flexão quando submetidas a cargas moderadas, filtrando vibrações de alta frequência; ao exceder o limite elástico, elas escalonam a flambagem controlada, absorvendo impactos sem colapsar repentinamente. A continuidade de material garante ausência de zonas de concentração de tensões em interfaces, enquanto o padrão vórtice das ranhuras equaliza a distribuição radial de esforço, assegurando resistência uniforme a torções e compressões.

### 5.6.2

#### Desempenho em Superfícies Irregulares

Em contato com superfícies acidentadas, o anel Vortex-Slot conforma-se ao relevo graças à flexibilidade localizada de suas lâminas inclinadas. As ranhuras permitem que o material “penetre” fissuras e fraturas do solo, aumentando a área de contato real e elevando o coeficiente de atrito, sobretudo em terrenos de baixa coesão. Durante a passagem sobre obstáculos, a resposta

elástica inicial das lâminas filtra microdesníveis, enquanto a flambagem gradual sob pressões maiores amortiza impactos sem repiques bruscos. Se a compressão prossegue até o fim das fendas, a espessura restante do anel assume a rigidez necessária para vencer degraus mais altos. Dessa forma, o design Vortex-Slot equilibra conforto, tração e robustez, embora exija cuidadosa definição de largura e profundidade das ranhuras a fim de evitar concentração excessiva de tensões em cargas cíclicas.

## 6

### Robô Móvel Experimental

Este capítulo apresenta a plataforma móvel diferencial, que será utilizada para validação do estudo deste trabalho. São descritos seus aspectos mecânicos, cinemáticos e dinâmicos, bem como o sistema de acionamento, sensoriamento e as hipóteses de modelagem que embasam os capítulos seguintes.

#### 6.1

##### Visão Geral

Projetado no Laboratório de Robótica da PUC Rio (LabRob), o robô móvel diferencial de quatro rodas, Puma +, é uma plataforma de pesquisa em locomoção e técnicas de controle. Seu chassi de alumínio estrutural abriga, de forma compacta, os módulos de bateria, a eletrônica de comando e os conjuntos roda-motor, conforme apresentado na Figura 6.1 abaixo.

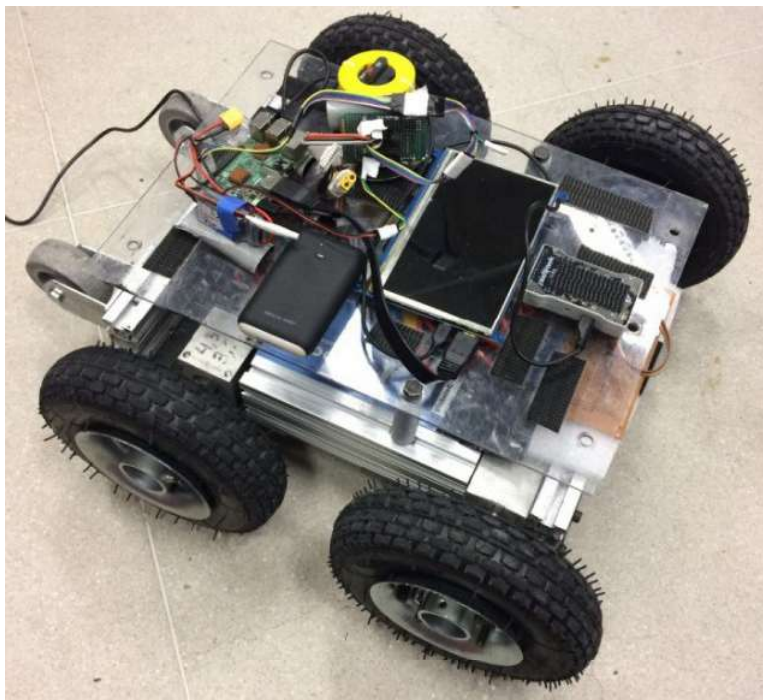


Figura 6.1: Robô Puma + desenvolvido no LabRob da PUC-Rio

A locomoção do robô é garantida por quatro motores BLDC, cada um acoplado a uma caixa de redução planetária, que transmite torque diretamente à respectiva roda por meio de um eixo rígido. Essa cadeia cinemática (motor → redutor → eixo → roda) proporciona alta densidade de potência, simplicidade mecânica e permite o acionamento independente de cada lado.

Neste projeto, o sistema de suspensão está incorporado nas próprias rodas, especialmente projetadas para essa função. Cada roda combina, de forma integrada, as funções de mola e amortecedor.

## 6.2

### Componentes Essenciais do Robô

#### 6.2.1

##### Estrutura

O robô possui um chassi leve e rígido, construído com perfis de alumínio estrutural 3060mm ligados por cantoneiras e parafusos. Essa solução modular simplifica ajustes de geometria e facilita a fixação de sensores, eletrônica e bateria dentro do quadro. A base inferior é fechada por uma chapa de aço de 2mm, que aumenta a resistência a torções e protege os componentes contra impactos vindos do solo.

#### 6.2.2

##### Sistema de Atuação

O módulo motor–reductor do robô é composto por um motor BLDC D5065 270 kv da empresa ODrive, capaz de entregar até 70 W sob 24 V. Acoplada diretamente ao eixo do motor, a caixa planetária DWNS, apresenta relação de redução  $R=26:1$  e eficiência nominal de  $\eta = 0,85$ , garantindo o balanceamento ideal entre velocidade e torque na transmissão. Essa combinação motora de alta densidade de potência e reductor de precisão resulta em um conjunto compacto, robusto e de resposta dinâmica rápida, permitindo o acionamento independente de cada roda com elevada capacidade de tração e controle.

##### Motor BLDC ODrive D5065 270Kv

- Potência nominal: 70W sob 24V
- Constante de torque:  $K = 0,036N.m/A$
- Velocidade sem carga: 6480RPM(270KV24V)



Figura 6.2: Motor BLDC ODrive Dual Shaft - D5065 270Kv

### Redutor Planetário DWNS

- Relação de redução:  $R = 26 : 1$
- Eficiência nominal:  $= 0,85$



Figura 6.3: Caixa de Redução Planetária DWNS da Empresa Robocore

O robô também é equipado com encoders ópticos incrementais — modelo AMT102-V, da CUI Devices — montados no eixo de cada motor. Com resolução de até 2048 pulsos por volta, esses sensores medem a posição e a velocidade angular da transmissão em tempo real. Os pulsos são usados pelo controlador para fechar o elo de realimentação de velocidade e torque, garantindo resposta rápida e estável mesmo quando a carga varia. A integração desses pulsos permite estimar a distância percorrida, formando a base da odometria do robô e servindo de entrada para algoritmos de navegação.

Nas imagens a seguir Figura 6.4 e Figura 6.5 é possível visualizar a montagem completa do sistema de atuação: o motor BLDC acoplado à caixa planetária e, na extremidade oposta, o encoder AMT102-V fixado por um suporte impresso em 3D. Essa disposição evidencia a linha cinemática contínua — eixo do motor, redutor e eixo de saída — bem como o posicionamento do sensor de posição

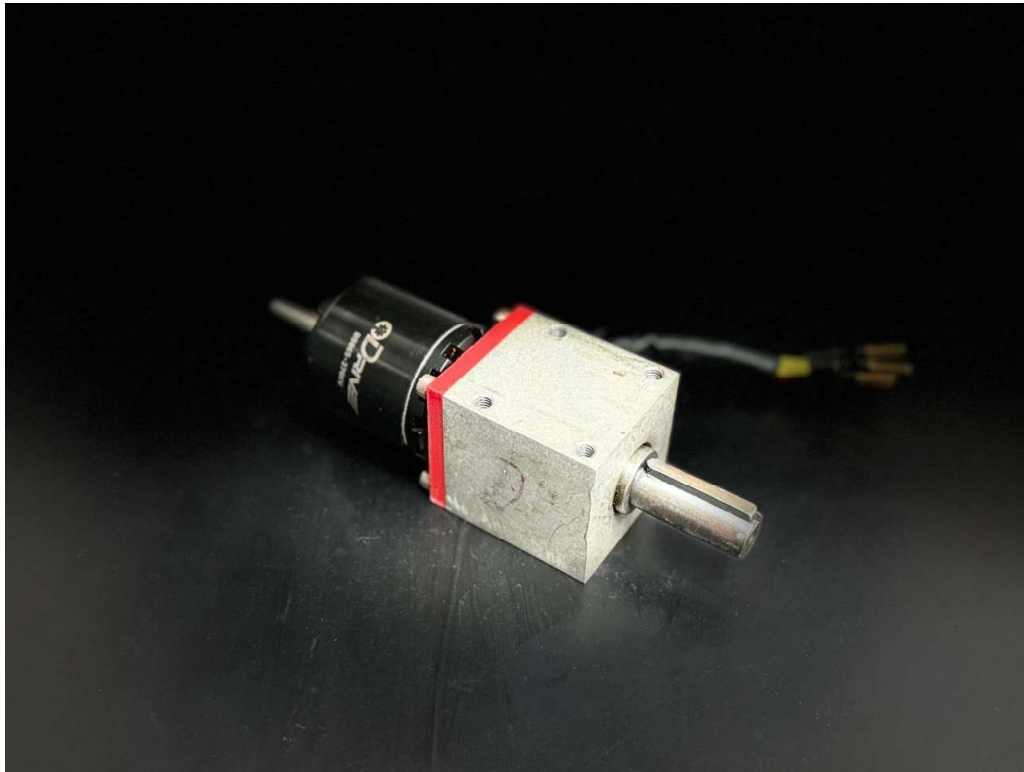


Figura 6.4: Conjunto motor–reductor: Motor BLDC ODrive D5065 acoplado à caixa planetária DWNS.

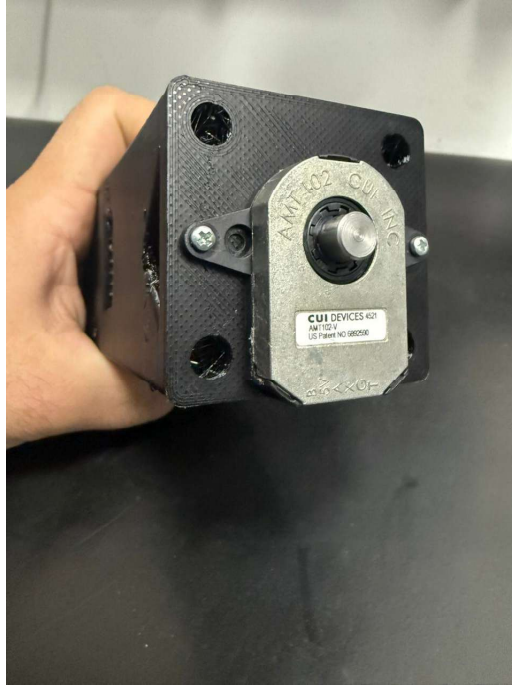


Figura 6.5: Encoder óptico incremental.

### 6.3 Modelagem Cinemática

#### 6.3.1 Coordenadas generalizadas

Para representar de forma compacta a pose planar do robô no referencial inercial  $\{I\}$ , definem-se as *coordenadas generalizadas*

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & y & \phi \end{bmatrix}^T, \quad (6-1)$$

onde  $(x, y)$  localizam o ponto de interesse  $P_2$  no plano  $X_I Y_I$  e  $\phi$  é o ângulo de guinada do chassi medido a partir do eixo  $X_I$ . Com essa escolha, a configuração do robô é descrita por três graus de liberdade, suficientes para capturar translações e rotação no plano.

#### 6.3.2 Velocidade corporal

A velocidade linear do ponto de referência  $P_2$ , expressa no sistema inercial  $\{I\}$ , é obtida a partir da velocidade medida no corpo do robô (sistema  $\{B\}$ ) por meio de uma rotação plana. A relação é dada por

$$\dot{\mathbf{p}}_I = R_{IB}(\phi) \dot{\mathbf{p}}_B, \quad (6-2)$$

em que a matriz de rotação plano-plano é

$$R_{IB}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}.$$

Na Eq. (6-2):  ${}^* \dot{\mathbf{p}}_B = [v_x \ v_y]^\top$  é a velocidade do ponto  $P_2$  medida no referencial corporal  $\{B\}$ ;  ${}^* \dot{\mathbf{p}}_I$  é a mesma velocidade expressa no referencial inercial  $\{I\}$ ;  ${}^* \phi$  é o ângulo de orientação do chassi em relação ao eixo  $X_I$ .

Essa transformação garante que componentes lineares e angulares permaneçam consistentes entre os dois sistemas de coordenadas durante a movimentação do robô no plano.

### 6.3.3

#### Restrição não-holonômica

Para o robô diferencial analisado, admite-se ausência de derrapagem lateral. Esse requisito impõe o vínculo cinemático

$$\dot{x} \sin \phi - \dot{y} \cos \phi = 0, \quad (6-3)$$

o qual elimina deslocamento transversal e passará a ser considerado implicitamente na modelagem dinâmica.

### 6.3.4

#### Modelagem dinâmica

Seguindo a formulação lagrangiana, a dinâmica planar do robô pode ser escrita de forma compacta:

$$M \ddot{\mathbf{q}} + F \dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{r} B(\phi) \boldsymbol{\tau}, \quad (6-4)$$

com

$$M = \text{diag}(m, m, I_{P_2}), \quad F = \text{diag}\left(\frac{4d_w}{r}, \frac{4d_w}{r}, \frac{4b^2 d_w}{r}\right),$$

$$B(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & \cos \phi & \cos \phi & \cos \phi \\ \sin \phi & \sin \phi & \sin \phi & \sin \phi \\ b & -b & b & -b \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4]^\top.$$

**Forma escalar expandida** Expandindo (6-4), obtém-se o sistema de EDOs

$$\begin{cases} m \ddot{x} + \frac{4d_w}{r} \dot{x} = \frac{\cos \phi}{r} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4), \\ m \ddot{y} + \frac{4d_w}{r} \dot{y} = \frac{\sin \phi}{r} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4), \\ I_{P_2} \ddot{\phi} + \frac{4b^2 d_w}{r} \dot{\phi} = \frac{b}{r} (\tau_1 + \tau_2 - \tau_3 - \tau_4). \end{cases} \quad (6-5)$$

Essas três equações descrevem completamente as dinâmicas de translação e rotação do robô *Trekking*, incluindo o amortecimento viscoso equivalente  $d_w$  embutido nas rodas.

### Parâmetros do modelo

$m$  massa total do robô;

$I_{P_2}$  momento de inércia em torno do eixo vertical que passa pelo centro geométrico  $P_2$ ;

$r$  raio de cada roda;

$b$  meia-distância lateral entre rodas (metade do *track-width*);

$d_w$  coeficiente de amortecimento equivalente de cada pneu.

#### 6.3.5

#### Sistema de coordenadas

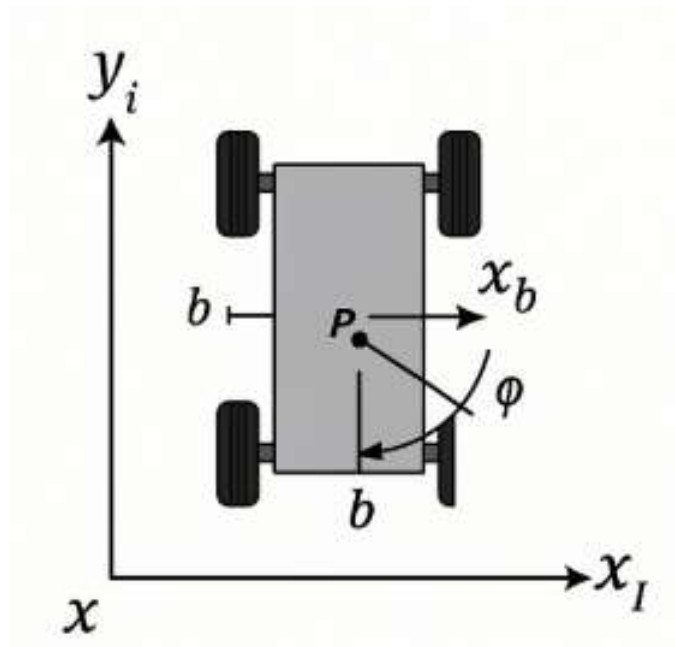


Figura 6.6: Sistema de coordenadas no PUMA+

O diagrama da Figura 6.6 mostra o robô visto de cima, com:

- **Referencial inercial**  $\{I\}$ : eixos  $X_I$  (horizontal) e  $Y_I$  (vertical);
- **Referencial corporal**  $\{B\}$ : origem em  $P_2$  e eixo  $x_b$  apontando para a frente do robô; o ângulo  $\phi$  mede a rotação do corpo relativamente a  $X_I$ ;
- **Meia-distância lateral**  $b$  entre cada par de rodas.

Esse sistema é a base para interpretar o vetor  $\mathbf{q} = [x \ y \ \phi]^\top$  e para aplicar a equação dinâmica (6-4).

## 7

### Resultados

A seção de resultados deste trabalho apresenta uma análise abrangente dos modelos de roda desenvolvidos. Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos através de simulações de elementos finitos realizadas no software SolidWorks e análise experimentais utilizando o robô Puma + apresentado anteriormente.

#### 7.1

##### Estudo Estrutural via FEA

Para avaliar o comportamento mecânico das rodas desenvolvidas, foram realizadas simulações por elementos finitos (FEA) utilizando o software SolidWorks Simulation. O objetivo foi comparar a resposta das diferentes geometrias internas sob condições de uso típicas, considerando tanto a deformação sob o próprio peso quanto situações mais severas de contato com obstáculos.

Antes da realização das simulações, foi estabelecido um conjunto de critérios uniformes para garantir a comparabilidade entre os diferentes modelos de roda. Todas as geometrias possuem o mesmo diâmetro externo, largura total e perfil de rodagem, variando apenas a estrutura interna do núcleo, o que implica diferenças apenas na distribuição de massa e na resposta estrutural local.

As condições de carga, direção da força e regiões de aplicação foram mantidas idênticas entre os casos simulados, assegurando uma comparação justa entre os diferentes conceitos. Da mesma forma, os pontos de fixação da roda ao eixo ou hub foram padronizados em todos os modelos, com a mesma geometria de apoio e restrições.

##### 7.1.1

##### Deformação sob Peso Próprio

A primeira análise FEA teve como objetivo avaliar o comportamento estrutural das rodas sob o próprio peso, simulando a condição de repouso com carga gravitacional aplicada. Essa simulação é relevante para identificar o nível de deformação estática de cada modelo, especialmente no plano vertical, onde se observa o afundamento radial da banda de rodagem e a distribuição das tensões na região do núcleo.

Para esta análise, foram adotadas as seguintes configurações e premissas:

- Tipo de estudo: Estático linear
- Material atribuído: TPU 95A (com módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade definidos com base nas especificações do fabricante e datasheet presente no ??)
- Malha: Rede de elementos tetraédricos com refino automático nas regiões de transição entre o núcleo e a banda de rodagem
- Fixações: Restrições aplicadas ao eixo do cubo central da roda, impedindo translações e rotações em todos os eixos
- Carga aplicada: Aceleração gravitacional padrão ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ), atuando sobre toda a geometria da roda, utilizando a própria massa como fonte de carga
- Objetivo: Observar o deslocamento máximo radial e o padrão de distribuição de tensões internas

Os resultados, assim como esperado, indicam que a magnitude da deformação estática está diretamente relacionada à geometria interna de cada roda. As capturas dos resultados de tensão e deformação obtidos no estudo de cada uma das rodas se encontram a seguir.

### Roda *Honeycomb*

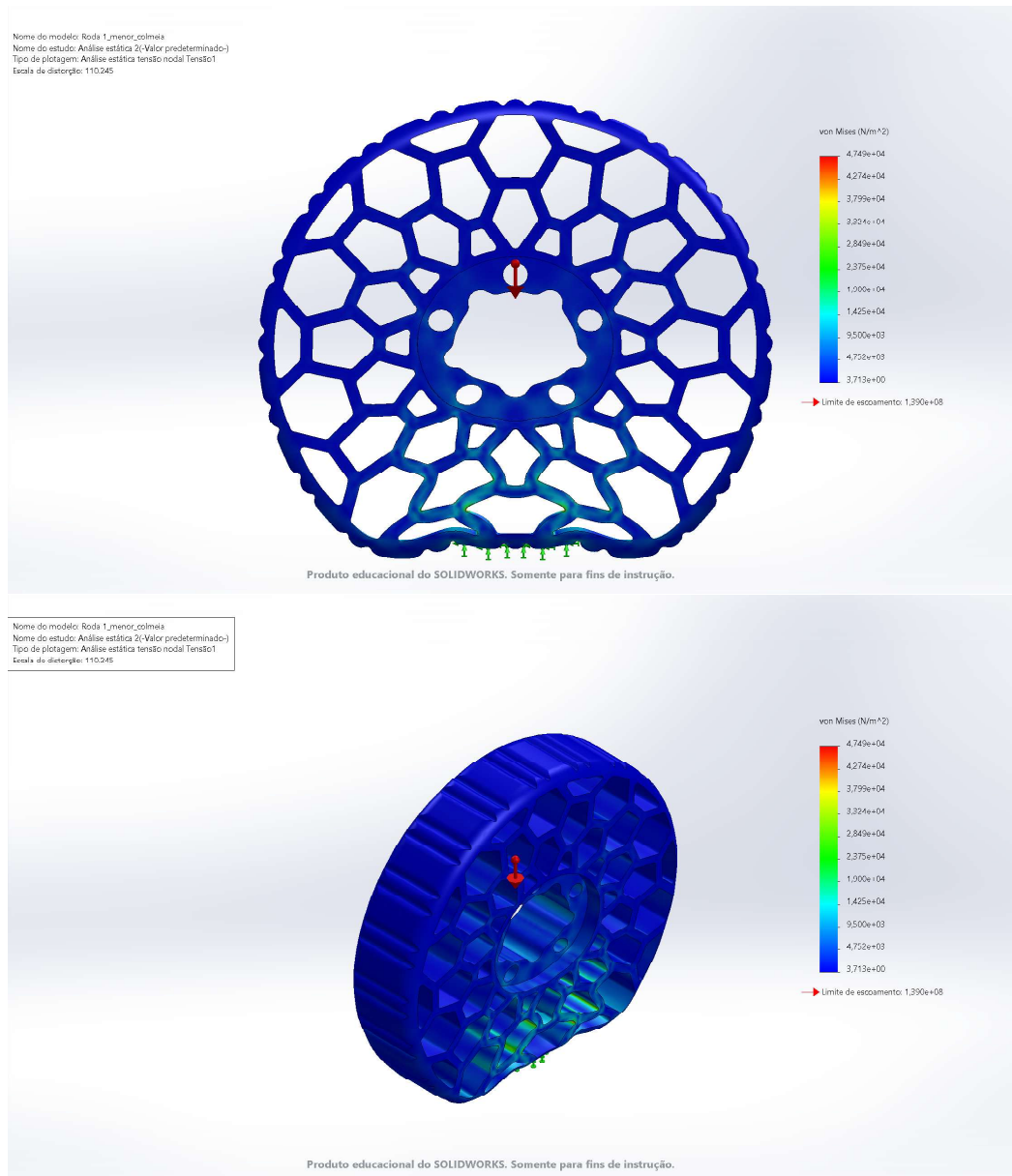
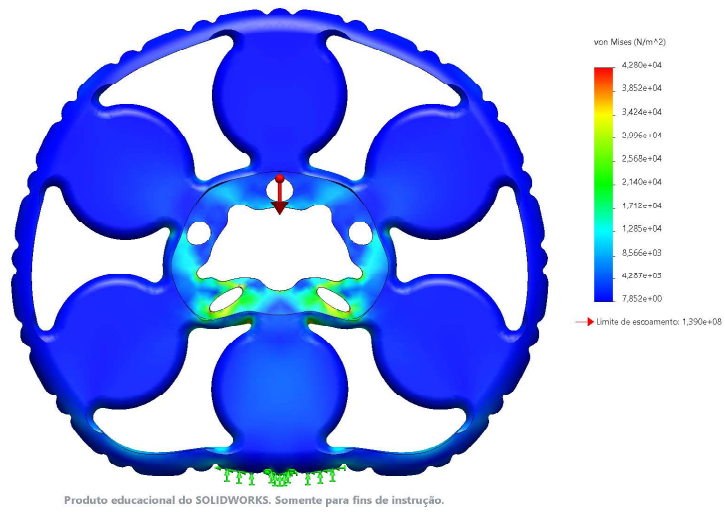


Figura 7.1: Resultados da Análise de Carga da Roda *Honeycomb*

### Roda com Colunas Radiais

Nome do modelo: Roda\_1\_menor\_rolamento  
 Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)  
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1  
 Escala de distorção: 87,628,6



Nome do modelo: Roda\_1\_menor\_rolamento  
 Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)  
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1  
 Escala de distorção: 87,628,6

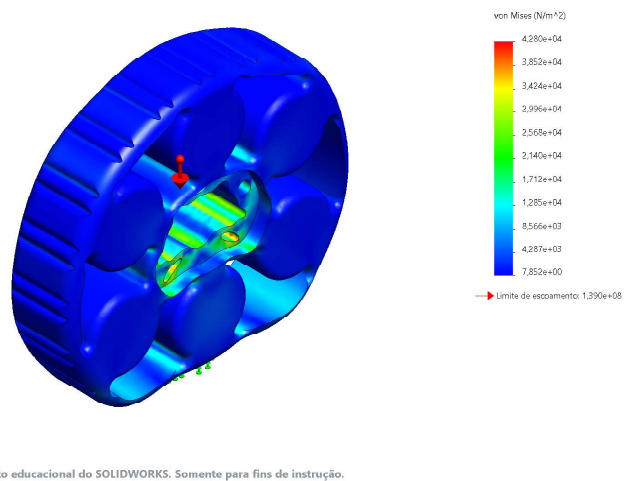


Figura 7.2: Resultados da Análise de Carga da Roda com Colunas Radiais

### Roda Perfurada Circular

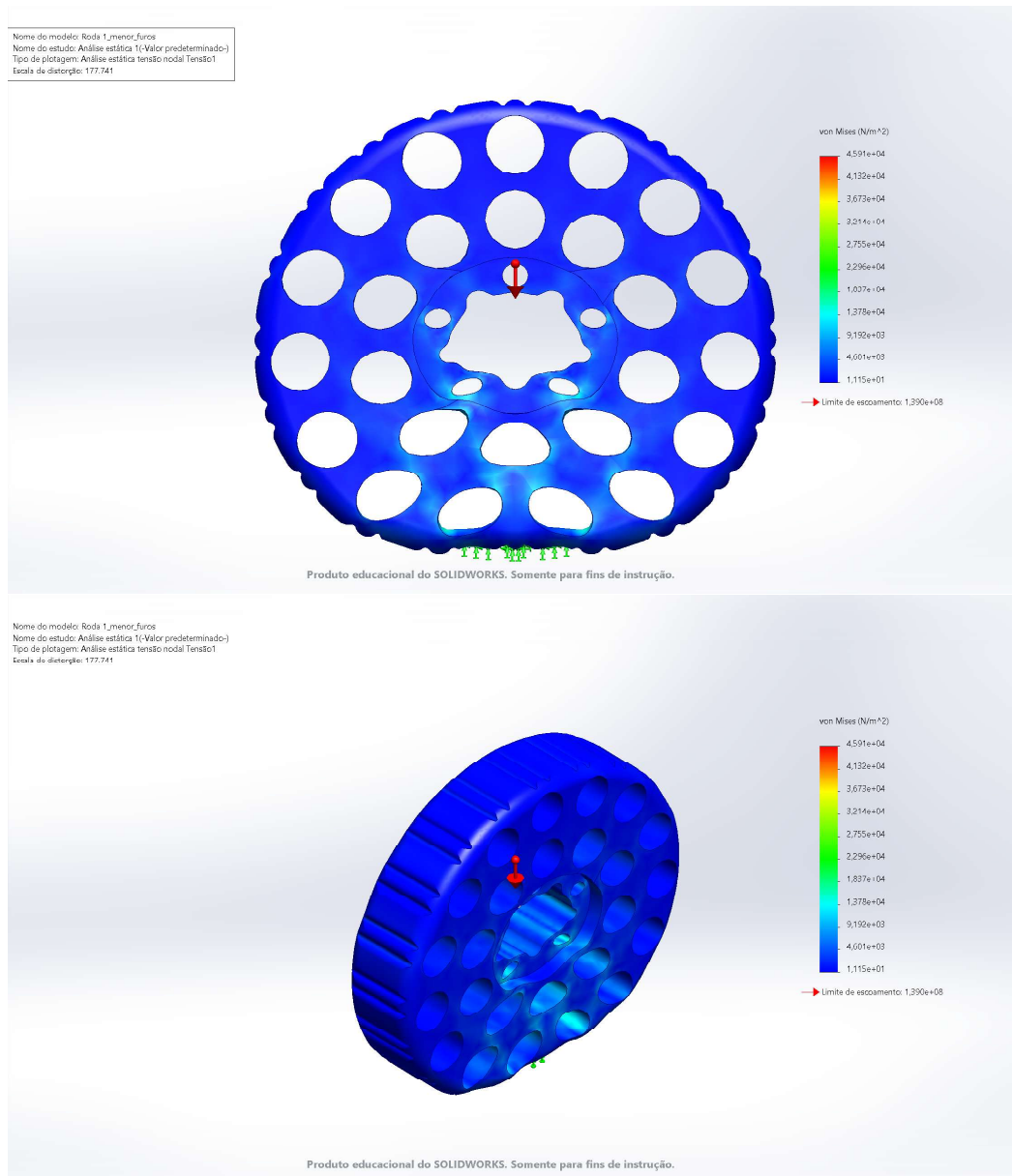
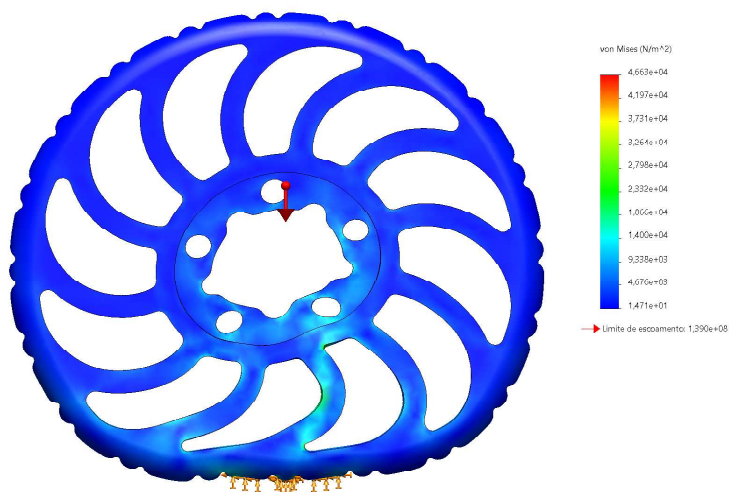


Figura 7.3: Resultados da Análise de Carga da Roda Perfurada Circular

## Roda *Vortex-Slot*

Nome do modelo: Roda\_1\_menor\_banebots  
 Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)  
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1  
 Escala de distorção: 92,5675



Nome do modelo: Roda\_1\_menor\_banebots  
 Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)  
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1  
 Escala de distorção: 92,5675

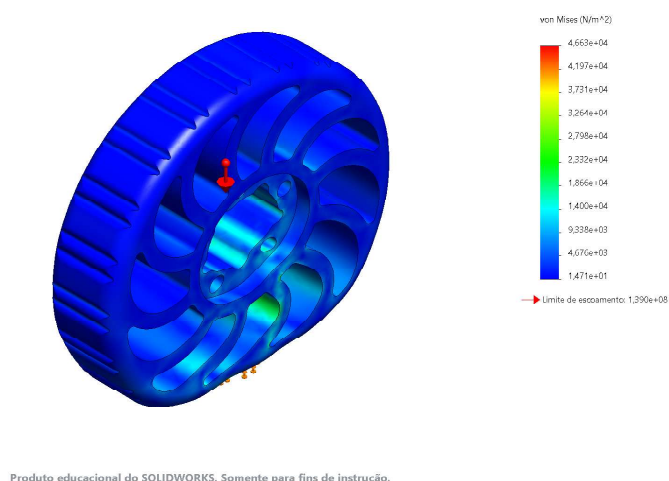


Figura 7.4: Resultados da Análise de Carga da Roda *Vortex-Slot*

### 7.1.2

#### Simulação de Transposição de Obstáculos

A segunda leva de simulação teve como objetivo avaliar o comportamento estrutural das rodas frente a uma carga concentrada aplicada sobre a banda de rodagem, representando uma situação de impacto localizado típico da transposição de pequenos obstáculos ou imperfeições no solo. Essa análise permite observar a capacidade local de deformação, o padrão de dissipação de tensões e o grau de conformidade de cada geometria.

Para esta análise, foram adotadas as seguintes configurações e premissas:

- Tipo de estudo: Estático linear
- Material atribuído: TPU 95A (mesmas propriedades do caso anterior)
- Malha: Rede de elementos tetraédricos com refino automático nas regiões de transição entre o núcleo e a banda de rodagem
- Fixações: Cubo central da roda rigidamente fixado, simulando o apoio fixo no eixo do robô
- Carga aplicada: Força concentrada, aplicada pontualmente sobre a banda de rodagem, perpendicular à superfície, em posição intermediária entre o centro e a borda lateral da roda
- Objetivo: Avaliar o deslocamento localizado e o padrão de distribuição de tensões internas, com foco na resposta estrutural à transposição de obstáculos

As capturas dos resultados de tensão e deformação obtidos no estudo de cada uma das rodas se encontram a seguir.

### Roda *Honeycomb*

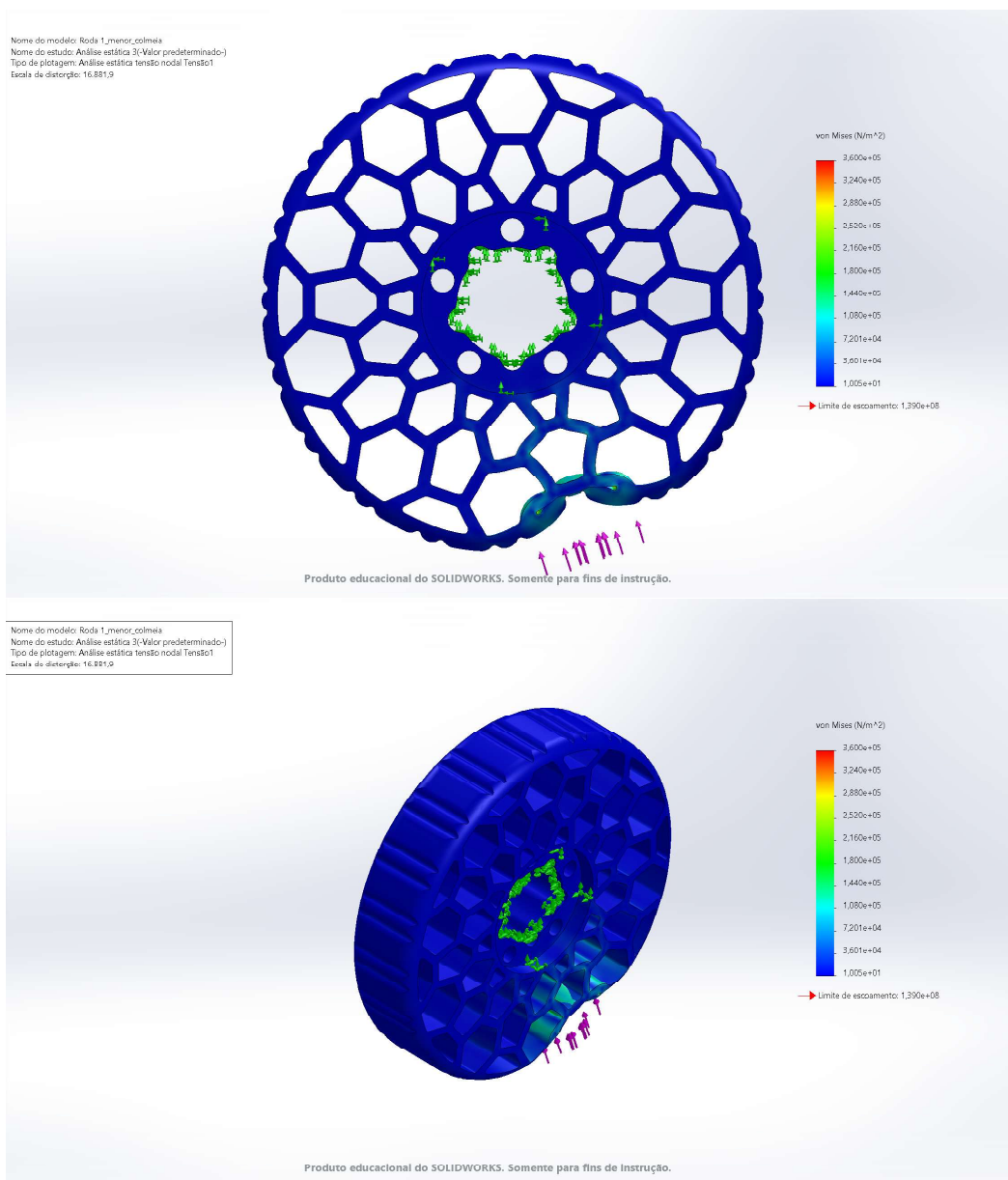
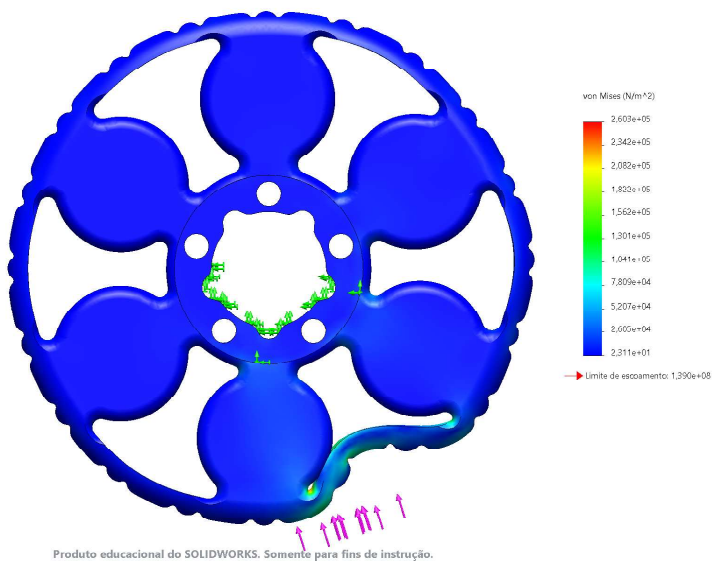


Figura 7.5: Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda *Honeycomb*

### Roda com Colunas Radiais

Nome do modelo: Roda\_1\_menor\_rolamento  
 Nome do estudo: Análise estática 2: Valor predeterminado(-)  
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1  
 Escala de distorção: 20,944,2



Nome do modelo: Roda\_1\_menor\_rolamento  
 Nome do estudo: Análise estática 2: Valor predeterminado(-)  
 Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1  
 Escala de distorção: 20,944,2

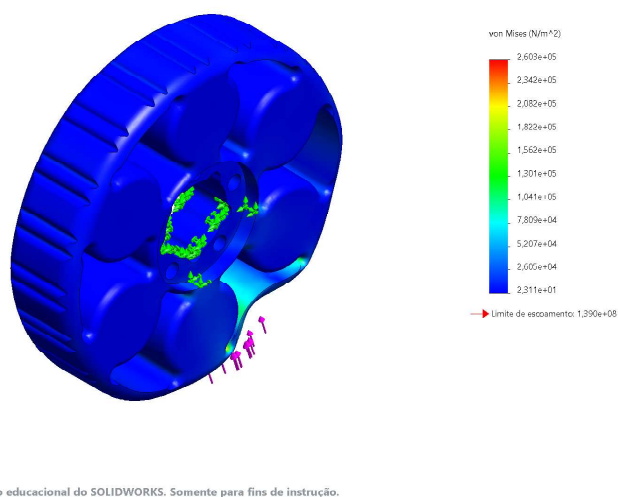


Figura 7.6: Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda com Colunas Radiais

### Roda Perfurada Circular

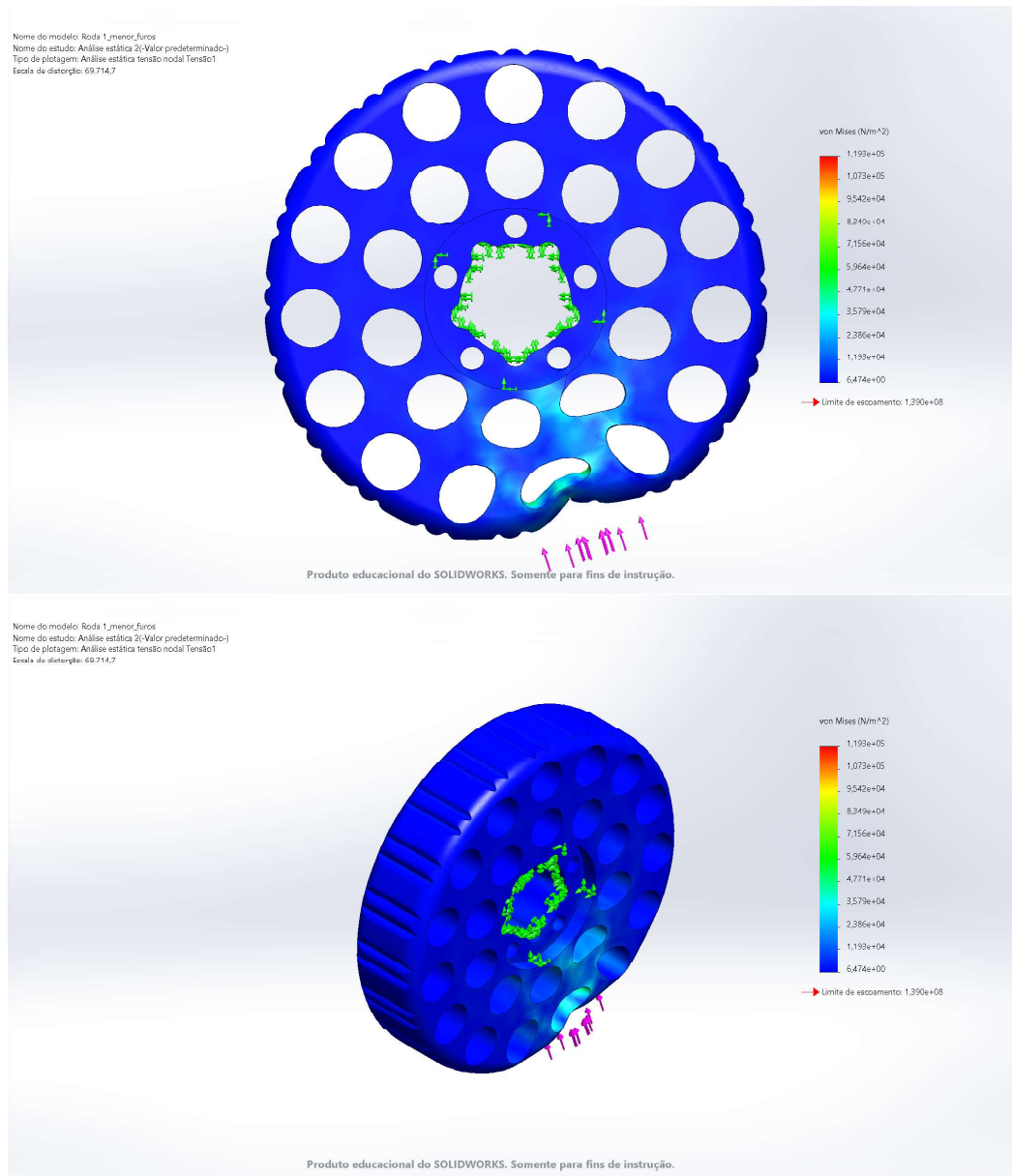


Figura 7.7: Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda Perfurada Circular

## Roda *Vortex-Slot*

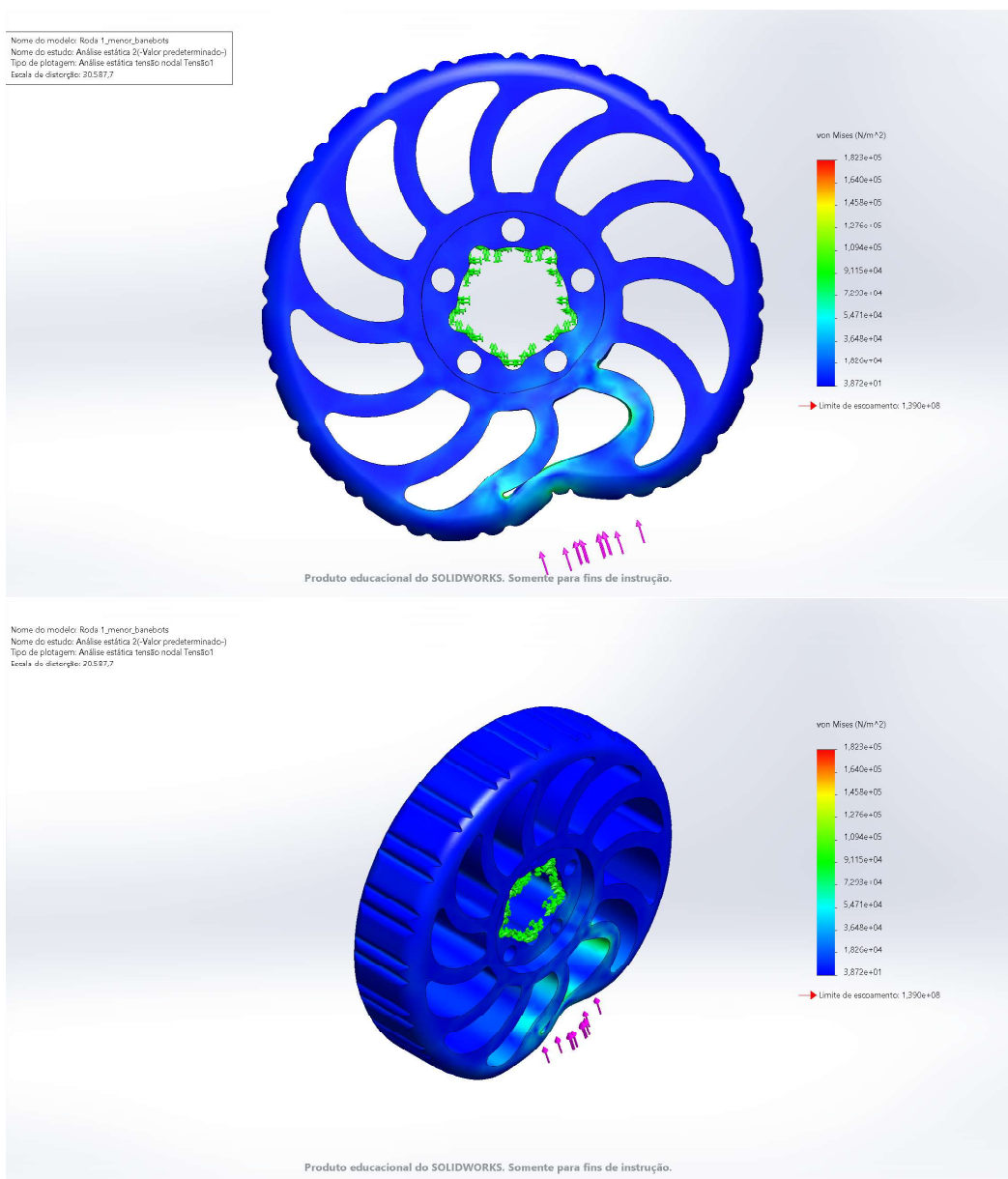


Figura 7.8: Resultados da Análise de Transposição de Obstáculo da Roda *Vortex-Slot*

### 7.1.3 Avaliação dos Resultados Obtidos

A análise comparativa das simulações FEA confirma que todas as geometrias internas atenderam ao requisito primordial de suportar o peso do robô e acomodar impactos localizados, mas com respostas mecânicas marcadamente distintas.

A malha honeycomb combinou o menor afundamento radial com tensões suavemente distribuídas, sendo a opção mais equilibrada para unir rigidez e conforto. As colunas radiais sustentaram a carga com folga, mas concentraram tensões nos encontros coluna-banda, o que pode acelerar fadiga. O núcleo perfurado mostrou deformação mais alta — útil para amortecer impactos, mas menos robusto a ciclos prolongados. Por fim, o vortex-slot situou-se entre os extremos: adaptação razoável a obstáculos, tensões moderadas, porém sem a uniformidade do honeycomb.

Em conjunto, os dados apontam a arquitetura honeycomb como a melhor candidata para aplicações em que durabilidade e estabilidade são prioritárias, enquanto as demais geometrias oferecem graus variados de conformidade para cenários onde a absorção de impacto pese mais que a vida útil.

## 7.2

### Ensaio Experimentais com o Robo Puma+

Com base nos resultados obtidos nas simulações FEA, foi possível comparar o desempenho estrutural das diferentes geometrias internas propostas para as rodas. Entre os modelos avaliados, a estrutura com núcleo honeycomb apresentou o comportamento mais equilibrado, combinando rigidez adequada, boa deformação elástica e eficiente dissipação de tensões, tanto sob peso próprio quanto diante da aplicação de cargas concentradas.

Esse desempenho superior, aliado à simplicidade construtiva do modelo e à distribuição homogênea das tensões observada nas simulações, motivou a escolha da geometria honeycomb como a mais promissora para aplicação prática no robô Puma+. No entanto, devido às limitações de tempo de fabricação (cada roda exigiu aproximadamente 1 dia e 5 horas de impressão contínua) e à necessidade de realizar análises experimentais, optou-se por fabricar e testar apenas um modelo geométrico nesta etapa.

Foram, portanto, produzidas quatro unidades da roda com núcleo honeycomb, impressas em TPU 95A, destinadas à montagem e avaliação direta no robô Puma+. Após a conclusão das impressões, as rodas foram então montadas no robô e preparadas para a realização dos testes experimentais, conforme Figura 7.9.

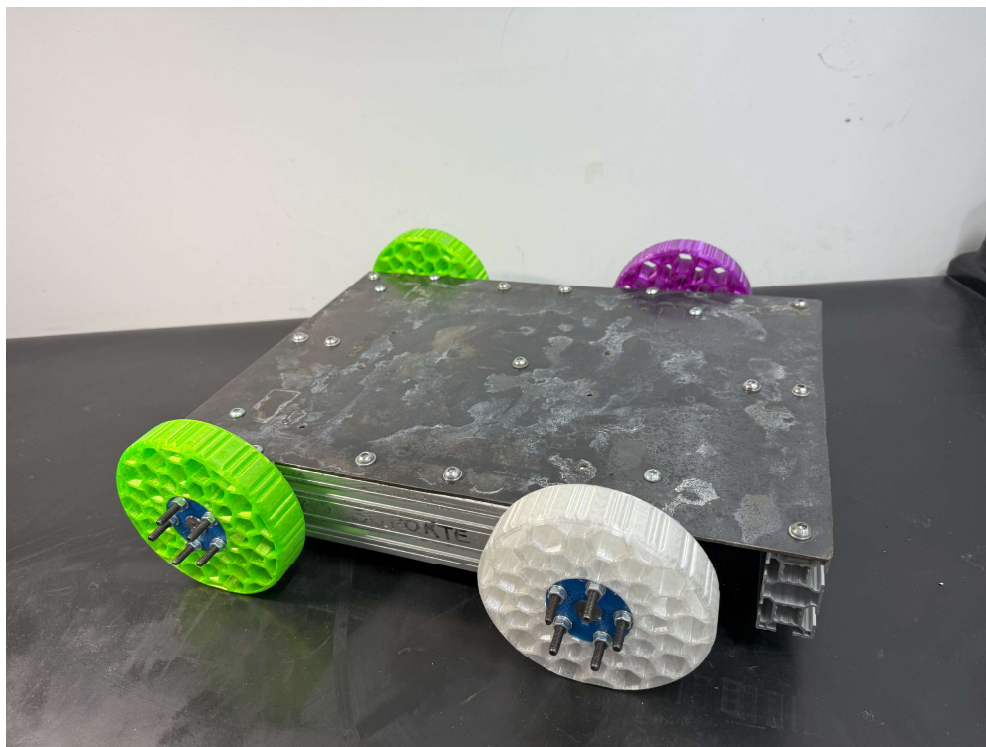


Figura 7.9: Montagem do Robô Puma + com 4 Rodas *Honeycomb* impressas em TPU

Além das peças em TPU 95A, também foram impressas amostras do modelo honeycomb em resina flexível, utilizando tecnologia mSLA, conforme Figura 7.10. O objetivo foi realizar uma comparação entre os materiais, avaliando diferenças no comportamento mecânico, rigidez, acabamento e resposta elástica das rodas produzidas por FDM e por mSLA.



Figura 7.10: Amostra de Roda *Honeycomb* impressa em Resina Flexível

Embora o tempo de fabricação por mSLA seja significativamente menor (com cada roda sendo concluída em cerca de 3 horas), o custo da resina fotopolimérica é consideravelmente mais alto que o do filamento de TPU, o que

representa uma desvantagem em aplicações que demandam múltiplas unidades ou ciclos de teste. Ainda assim, as amostras em resina fornecem uma referência útil para análise comparativa de desempenho entre tecnologias de impressão e materiais empregados.

### 7.2.1 Deformação sob Peso Próprio

O primeiro ensaio consistiu em posicionar o robô em repouso sobre uma superfície plana, com toda a massa do sistema atuando diretamente sobre as rodas conforme Figura 7.11. Essa configuração permitiu observar a deformação estática da banda de rodagem causada pelo peso do robô. Visivelmente, foi possível notar um leve afundamento radial das rodas, especialmente na região inferior das células do núcleo, indicando uma resposta elástica uniforme. Após a remoção do robô, as rodas retornaram à sua forma original, sem qualquer deformação permanente, demonstrando a eficiência do comportamento resiliente da geometria *honeycomb*.

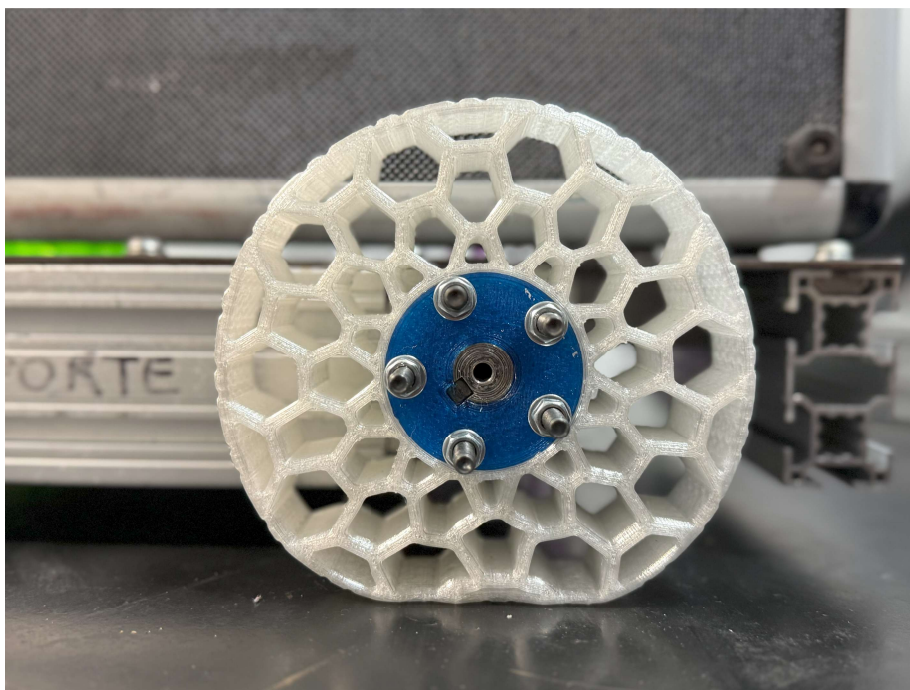


Figura 7.11: Deformação Gerada na Roda de TPU com o Peso do Robô

O mesmo procedimento foi repetido com um conjunto de rodas impressas em resina flexível, montadas no robô em substituição às rodas de TPU. O resultado observado encontra-se na Figura 7.12.

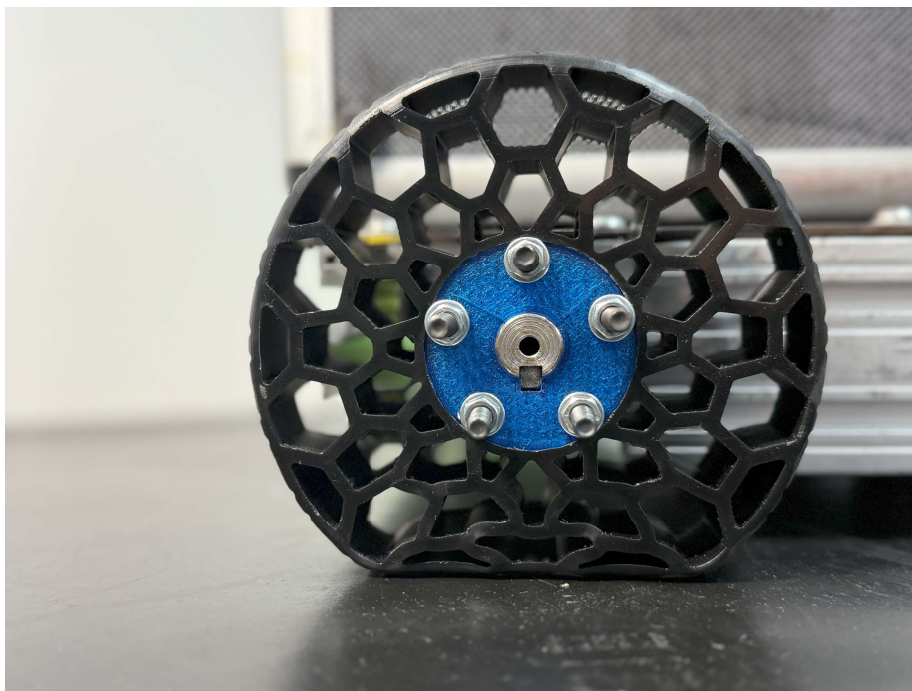


Figura 7.12: Deformação Gerada na Roda de Resina Flexível com o Peso do Robô

### 7.2.2

#### Simulação de Transposição de Obstáculo

No segundo teste experimental, buscou-se simular a condição de transposição de obstáculos, aplicando uma carga concentrada na banda de rodagem da roda. Para isso, o robô foi posicionado de forma que uma de suas rodas ficasse apoiada sobre um bloco rígido, representando um degrau ou saliência comum em terrenos irregulares. Neste caso, utilizou-se uma barra de alumínio estrutural, atuando como uma lombada artificial, com o objetivo de replicar as condições impostas na simulação no SolidWorks.

Inicialmente, o ensaio foi realizado com as rodas impressas em TPU. Observou-se uma deformação localizada nas células inferiores do núcleo honeycomb, com boa distribuição de carga ao longo da malha, e o resultado dessa análise pode ser observado na Figura 7.13.

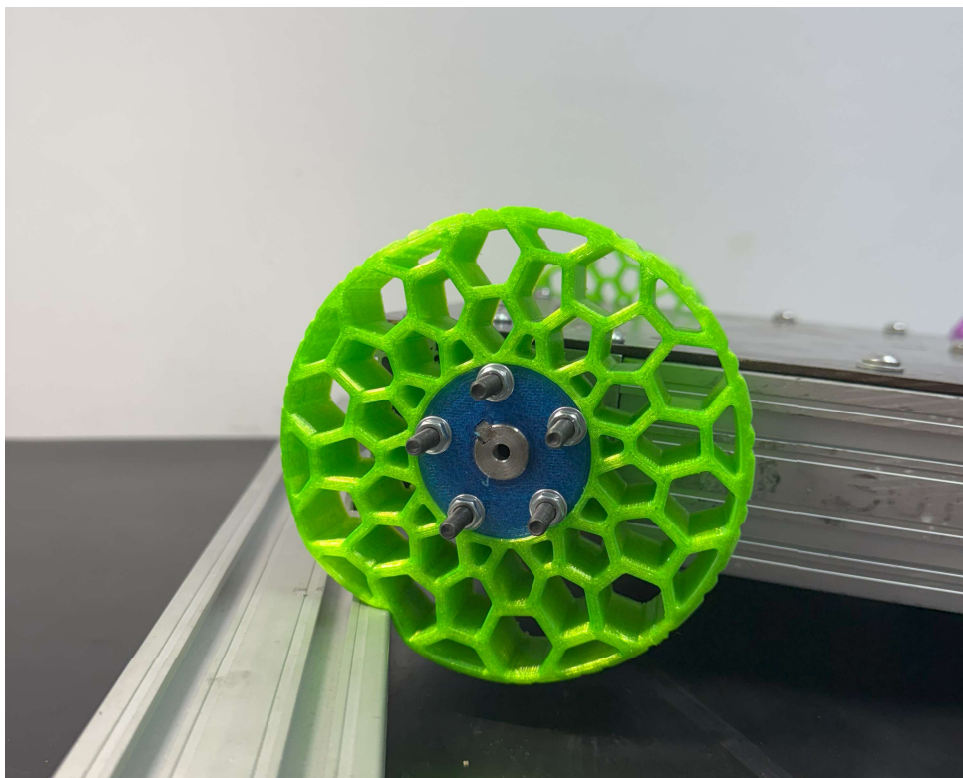


Figura 7.13: Deformação Gerada na Roda de TPU com Durante a Transposição de Obstáculos

A estrutura se comportou de forma elástica, com retorno completo à sua forma original após a remoção do obstáculo, sem danos visíveis ou fadiga aparente. A conformação progressiva do núcleo demonstrou capacidade de amortecimento passivo, validando o desempenho previsto nas análises computacionais.

O mesmo teste foi então repetido utilizando a roda impressa em resina flexível, nas mesmas condições de apoio e carga. E, o resultado observado encontra-se na Figura 7.14.

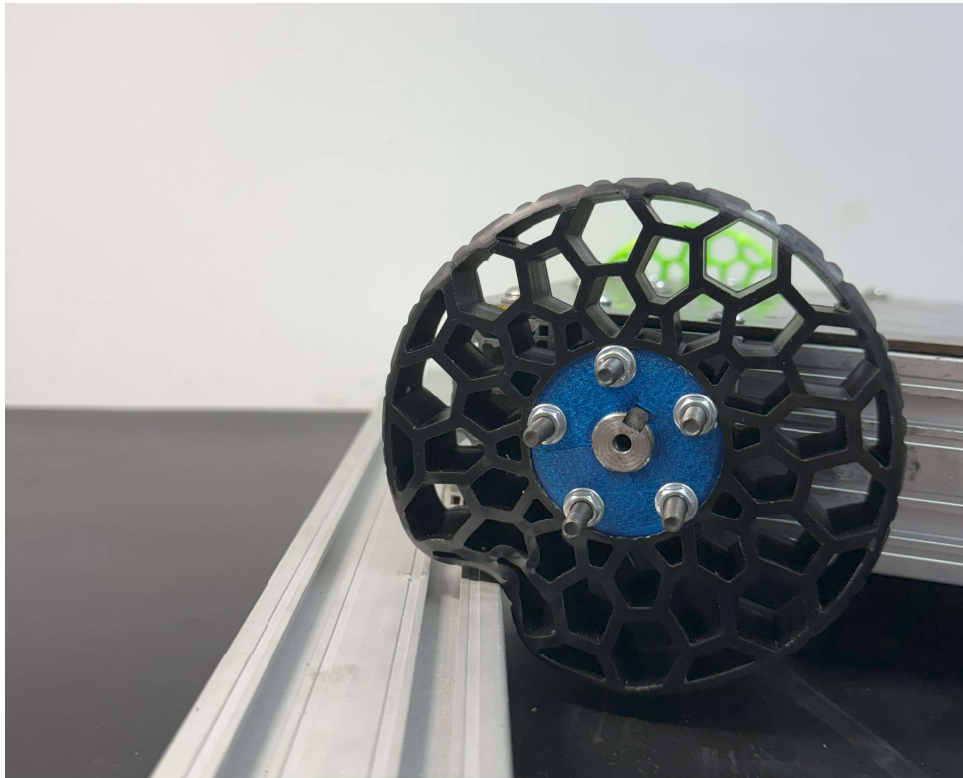


Figura 7.14: Deformação Gerada na Roda de Resina Flexível com Durante a Transposição de Obstáculos

## 8

### Conclusões

O presente trabalho atingiu seu objetivo central de demonstrar que a conformidade estrutural embutida em rodas impressas em 3D pode substituir, com vantagens, suspensões articuladas convencionais em robôs móveis de pesquisa que operam sobre pisos irregulares. A partir de uma revisão sobre arquiteturas de suspensão e tipologias de rodas, identificou-se que a adoção de materiais elastoméricos combinados a geometrias celulares era a estratégia mais promissora para garantir contato contínuo roda-terreno sem o acréscimo de atuadores, molas ou amortecedores externos.

O desenvolvimento concentrou-se em cinco conceitos estruturais (honeycomb, morphing, colunas radiais, perfurações circulares e vortex-slot) modelados em CAD e avaliados por elementos finitos. As simulações mostraram que o núcleo honeycomb oferecia o equilíbrio mais robusto entre rigidez radial, dissipação de energia e homogeneidade de tensões, tanto no regime de carga estática quanto na transposição de obstáculos localizados.

Para a etapa experimental, fabricaram-se quatro rodas honeycomb em TPU 95A por FDM e outras duas em resina fotopolimérica flexível por mSLA. Os ensaios qualitativos em trajetos com desníveis confirmaram os indícios numéricos: ambas as versões deformaram-se progressivamente, reduziram vibrações transmitidas ao chassi e evitaram perdas momentâneas de tração. Entretanto, as rodas de resina exibiram deformações radiais sensivelmente maiores sob a mesma carga, sugerindo maior capacidade de absorção de impacto, mas também alertando para possíveis limitações de durabilidade e resistência quando comparadas ao TPU. Nenhum dos protótipos apresentou falhas estruturais após ciclos repetidos, validando a robustez do conceito.

Os resultados obtidos comprovam que a impressão 3D de elastômeros, aliada a projetos celulares bio-inspirados, constitui uma alternativa leve, de baixo custo e fácil manutenção para incrementar a robustez de plataformas robóticas em ambientes adversos. As principais contribuições deste estudo são: (i) a validação de um método de dimensionamento que integra simulação FEA e prototipagem rápida e (ii) a demonstração prática de um sistema de suspensão totalmente passivo livre de uniões articuladas.

Algumas limitações, entretanto, merecem menção. O número de amostras prototipadas restringiu a análise estatística; além disso, os testes concentraram-se em trajetórias de curta duração e não contemplaram ciclos de fadiga de longo prazo. Trabalhos futuros deverão (a) ampliar o espectro de ensaios com as rodas

morphing e vortex-slot, que prometem rigidez ajustável e adaptação dinâmica; (b) instrumentar o robô para registrar acelerações de forma quantitativa; (c) investigar a degradação de TPU e resina sob carregamentos cíclicos elevados; e (d) explorar compósitos multimateriais ou infill graduado, combinando a durabilidade do TPU com a elevada conformidade da resina.

## Referências Bibliográficas

ANDERSON, R.; ZHAO, H. (2019). **Parallel-linked suspension for mobile robots.**

ASPRONE, D.; et al. (2013). **Energy-absorbing behaviour of honeycomb sandwich panels.**

AUERSVALDT, B. S. (2014). **Aplicações de estruturas celulares em absorvedores de impacto.**

BITZER, T. (1997). **Honeycomb Technology.** London: Chapman & Hall.

BRODY, P.; SMITH, J. (2015). **Rocker suspension for planetary rovers.**

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. (2009). **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 8 ed. Hoboken: Wiley.

CARVALHO, T.; MOURA, L. (2021). **Mechanical reliability of industrial mobile robots in rough floors.**

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. (1997). **Cellular Solids: Structure and Properties.** 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press.

ISAAC, K.; OLUWOLE, O. (2015). **Crash-force efficiency in cellular cores.**

JONES, N. (2012). **Structural Impact.** 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press.

KRAYDEN. (2017). **Honeycomb Core Materials – Technical Bulletin.**

KUMAR, S.; et al. (2024). **Double-wishbone suspension for all-terrain robots.**

LEE, J.-Y.; KIM, H.; SONG, S.-H.; & et al. (2024). **Variable-stiffness morphing wheel inspired by the surface tension of a liquid droplet.** *Science Robotics*, 9, eadl2067. DOI 10.1126/scirobotics.adl2067.

LI, Y.; et al. (2018). **Six-wheel rocker-bogie chassis: design and analysis.**

MARKUS. (2013). **BMW i3 carbon honeycomb rail.** Press release / blogpost.

MERAN, C.; TOPRAK, M.; MUGAN, A. (2014). **Collapse behaviour of aluminium honeycombs under impact.**

NAZIR, A.; ABATE, K. M.; KUMAR, A.; & JENG, J.-Y. (2019). **A state-of-the-art review on types, design, optimization and additive**

**manufacturing of cellular structures.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 3489–3510. DOI 10.1007/s00170-019-04085-3.

PACEJKA, H. B. (2002). **Tire and Vehicle Dynamics.** Oxford: Butterworth-Heinemann.

RAJAMANI, R. (2006). **Vehicle Dynamics and Control.** New York: Springer.

ROSSI, M.; et al. (2020). **Energy-aware control for rough-terrain robots.**

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (eds.). (2008). **Springer Handbook of Robotics.** Heidelberg: Springer.

SILVA, A.; FERREIRA, P. (2023). **Industrial mobile-robot inspection: a survey.**

WILBERT, S.; et al. (2011). **Anisotropy in honeycomb crash absorbers.**

## A

### Datasheet do Filamento TPU da Empresa Slim3d

Material flexível com bom alongamento, resiste a impactos e movimentos repetitivos sem desgaste ou rachaduras. Excelente redução de vibração e resistente a óleos e graxas, podendo ser utilizado em vedações.



Figura A.1: Filamento TPU da Empresa Slim3d para Impressão FDM

#### Características do Material

- Peso: 0.8 kg (embalagem selada a vácuo)
- Diâmetro Nominal: 1.75mm
- Tolerância dimensional: +/- 0.05mm
- Dureza: Shore A 92,5 +/-0,5
- Temperatura do bico de impressão: 190-220 °C
- Temperatura da mesa de impressão : 0-60 °C
- Densidade: 1,22 g/cm<sup>3</sup> (ISO 1183)
- Resistência à tração: 50 MPa (ISO 527)
- Tensão de tração a 100% de alongamento: 14 MPa (ISO 37)
- Tensão de tração a 300% de alongamento: 26 MPa (ISO 37)
- Alongamento na ruptura: 550% (ISO 527)
- Resistência ao rasgo: 130 KN/m (ISO 34-1)
- Deformação de compressão: 30 °C (ISO 815 - 23°C)

## B

### Datasheet do Filamento PETG da Empresa Slim3d

Material reciclável com alta transparência e brilho, alta transmissão de luz, boa tenacidade, excelente resistência mecânica e estabilidade química, suporta até 80 ° C (temperatura de transição vítrea) sem deformações.



Figura B.1: Filamento PETG da Empresa Slim3d para Impressão FDM

#### Características do Material

- Peso: 1 kg (embalagem selada a vácuo)
- Diâmetro Nominal: 1.75mm
- Tolerância dimensional: +/- 0.05mm
- Temperatura do bico de impressão: 220-250 °C
- Temperatura da mesa de impressão : 60-90 °C
- Densidade: 1,26 g/cm<sup>3</sup> (ISO 1183)
- Resistência à tração: 48 MPa (ISO 527 5mm/min)
- Deformação até a ruptura: 180% (ISO 527 5mm/min)
- Resistência à flexão: 65 MPa (ISO 178:2001)
- Resistência a impacto: 10,5 KJ/m<sup>2</sup> (ISO 180)
- Módulo de flexão: 1900 MPa (ISO 178:2001)

## C

### Datasheet da Resina F69 da Empresa Resione

A F69 é uma resina flexível do tipo borracha, indicada para impressão 3D de peças com boa elasticidade, alta alongação e resistência ao rasgo. Ideal para componentes que exigem flexibilidade moderada, como pneus, juntas, vedações e articulações móveis, sua formulação permite que a peça dobrada volte ao formato original sem fissuras.



Figura C.1: Resina F69 da Empresa Resione para Impressão mSLA

#### Características do Material

- Peso: 1.0 kg (embalagem selada a vácuo)
- Dureza: Shore A 60 - 75
- Densidade líquido: 1,079 g/cm<sup>3</sup> (ASTM D4052-22)
- Densidade cured: 1,150 g/cm<sup>3</sup> (ASTM D4052-22)
- Resistência à tração: 6,59 MPa (ASTM D412-06)
- Módulo de elasticidade: 31,59 MPa (ASTM D412-06)
- Alongamento na ruptura: 222–255% (ASTM D412-06)
- Resistência ao rasgo: 17,59–47,2 kN/m (ASTM D624-98)
- Absorção de água (24h): 1,74% (ASTM D570-?)