



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



RODRIGO DE OLIVEIRA TEOTÔNIO

**PROJETO DE DISPOSITIVO ROBÓTICO COM SISTEMA
INTERCAMBIÁVEL DE LOCOMOÇÃO PARA INSPEÇÃO DE
TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

**OURO PRETO - MG
2021**

RODRIGO DE OLIVEIRA TEOTÔNIO

rodrigo.teotonio@aluno.ufop.edu.br

**PROJETO DE DISPOSITIVO ROBÓTICO COM SISTEMA
INTERCAMBIÁVEL DE LOCOMOÇÃO PARA INSPEÇÃO DE
TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof Dr. Diogo Antônio de Sousa.

Coorientador: MSc. Luiz Guilherme Dias de Barros.

**OURO PRETO – MG
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T314p Teotonio, Rodrigo de Oliveira .
Projeto de dispositivo robótico com sistema intercambiável de locomoção para inspeção de tubulações industriais. [manuscrito] / Rodrigo de Oliveira Teotonio. - 2021.
76 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa.
Coorientador: Me. Luiz Guilherme Dias de Barros.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Robôs. 2. Tubulação. 3. Tubulação industrial - Inspeção. 4. Tubos.
5. Projeto Mecânico. 6. Esteiras. 7. Rodas. I. Barros, Luiz Guilherme Dias de. II. Sousa, Diogo Antônio de. III. Universidade Federal de Ouro Preto.
IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodrigo de Oliveira Teotônio

Projeto de dispositivo robótico com sistema intercambiável de locomoção para inspeção de tubulações industriais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 03 de dezembro de 2021

Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2021, às 19:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0257742** e o código CRC **8281099C**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.012708/2021-33

SEI nº 0257742

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

Aos meus familiares e amigos

AGRADECIMENTO

Agradeço a minha família, por serem a base de tudo que sou.

Aos meus amigos, por fazerem parte de tudo que tornei.

Ao meu orientador Diogo Antônio de Sousa, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Ao meu coorientador Luiz Guilherme Dias de Barros, pelo suporte em todas as etapas de desenvolvimento desse projeto.

Aos professores da Engenharia Mecânica e colegas de graduação, que viveram comigo cada degrau da minha formação.

E, por fim, à Universidade Federal de Ouro Preto, por ser uma instituição de excelência e qualidade de ensino.

“Há três métodos para ganhar sabedoria: primeiro, por reflexão, que é o mais nobre. Segundo, por imitação, que é o mais fácil. E terceiro, por experiência, que é o mais amargo”.

Confúcio

RESUMO

Tubulações são utilizadas para os mais variados fins na indústria para o transporte de fluídos. Estes, devido suas características muitas vezes corrosivas ou abrasivas, ocasionam processos de desgastes químicos e físicos nos tubos. Assim, a inspeção de tubulação surge com o intuito de se evitar falhas - que geram um grande custo econômico, além de colocar pessoas em risco. Nesse contexto, a utilização de robôs surge como uma forma de manutenção preventiva, tornando possível inspecionar tubulações nas mais variadas condições. Diversas plataformas foram desenvolvidas nos últimos anos com este intuito, porém, muitos são os desafios principalmente no quesito de movimentação. Durante uma inspeção são encontrados diversos obstáculos, tais quais descontinuidades, partes alagadas, obstruções, dentre outras. Além disso, muitos desses dispositivos são importados, tendo um alto custo de aquisição/manutenção. Assim, o presente trabalho se propõe a construir um dispositivo robótico com componentes disponíveis no mercado nacional através da incipiente impressão 3D. São apontados na revisão bibliográfica conceitos de engenharia de projetos, robôs de inspeção, sistemas de locomoção, parâmetros de projeto, materiais de construção mecânica e principais eletrônicos embarcados. A pesquisa é de caráter exploratório, visando estudar a aplicação de um robô para rotina de inspeção de tubulações em uma mineradora, adotando uma abordagem mista (qualitativa e quantitativa). Foi desenvolvido para o dispositivo foi desenvolvido um sistema intercambiável de movimentação, utilizando rodas e esteiras – dois dos principais sistemas de movimentação utilizados nos robôs presentes na literatura. Sua construção é por meio de módulos para facilitar a intercambialidade e desempenho foi medido de acordo com parâmetros como robustez, estabilidade, capacidade de tração e dirigibilidade. Foram comparados o desempenho do robô para cada módulo, concluindo que o módulo de rodas desempenha melhor em termos de mobilidade, enquanto o de esteiras, possui maior estabilidade e capacidade de tração.

Palavras-chave: Robô. Tubulação. Inspeção. Tubos. Projeto Mecânico. Esteiras. Rodas

ABSTRACT

Tubes have many uses inside the fluid transport industry. Fluids' corrosive or abrasive characteristics cause chemical and physical wear processes in the pipes. Thus, the inspection of pipes is used to prevent failures, which generates high costs and puts people at risk. For that, the use of robots appears as a form of preventive maintenance, enabling the inspection of pipes under the most diverse conditions. Several platforms have been developed in recent years for this application; however, there are many challenges, especially regarding movement. During an inspection, it is possible to find several obstacles, such as discontinuities, flooded parts, obstructions, among others. Furthermore, many of these devices are imported, having a high acquisition or maintenance cost. Thus, the present work proposes constructing a robotic device with electronic components that are easy to buy off-the-shelf in the national market. Most mechanical components are built through incipient additive manufacturing except parts with dimensional tolerances or movement functions, like pulleys and shafts. An interchangeable locomotion system is developed using wheels and tracks: two of the main approaches used in robots present in the literature. Its construction is in modules to facilitate the interchangeability between those systems. The performance is measured according to parameters such as strength, stability, traction capacity, and handling. The robot performance for each module is compared, concluding that the wheel module performs better in terms of mobility while the track module has greater stability and traction capacity.

Keywords: Robot. Pipe. Inspection. Tubes. Mechanic Project. Track. Wheels.

LISTA DE SIMBOLOS

ΔW – Carga transferida;

A_Y – Aceleração em função da gravidade;

W e P e G – Força peso;

h e Y – Altura do CG;

t e L – Distância entre eixos;

θ – ângulo de inclinação;

B – Bitola;

F_a – Força de atrito;

μ – Coeficiente de atrito;

m – Massa;

g – Aceleração da gravidade;

F_t – Força de tração;

k_t – Coeficiente de tração;

Q_r – Força de resistência ao rolamento;

f – coeficiente de resistência ao rolamento;

T_{out} – Torque transmitido;

T_{motor} – Torque gerado;

GR – Razão de transmissão;

η – Eficiência de transmissão;

ω_L – Velocidade angular roda direita;

ω_R – Velocidade angular roda esquerda;

R – Raio efetivo;

σ – Tensões normais;

τ – Tensões cisalhantes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de classificação tubulações quanto ao emprego.	2
Figura 2: As fases do projeto e suas interações.	7
Figura 3: Classificação de robôs pelo ambiente e mecanismo de interação.	9
Figura 4: Componentes robô SOLO da RedZone.	9
Figura 5: Métodos de locomoção de robôs de tubulação.	10
Figura 6: Tipos de estabilidade.	13
Figura 7: Cálculo de estabilidade lateral.	14
Figura 8: Força de atrito em uma roda.	15
Figura 9: Forças no plano inclinado.	16
Figura 10: Tipos de banda de rolagem.	18
Figura 11: Fluxograma de desenvolvimento do projeto.	28
Figura 12: Diagrama hierárquico dos módulos construtivos do robô.	31
Figura 13: Peso e dimensões gerais movimentação por esteiras.	32
Figura 14: Peso e dimensões gerais movimentação por rodas.	32
Figura 15: Estimativa localização centro de gravidade de versão de esteiras e rodas.	33
Figura 16: Módulo do corpo do robô.	33
Figura 17: Corpo e suportes do tether e demais cabos de comunicação.	34
Figura 18: Tampa dianteira do Módulo do Corpo.	35
Figura 19: Tampa traseira do Módulo do Corpo.	35
Figura 20: Módulo do Motor.	37
Figura 21: Cálculo de tensão de Von Misses por elementos finitos.	38
Figura 22: Cálculo de deslocamento por elementos finitos.	38
Figura 23: Montagem do Módulo de Esteiras.	39
Figura 24: Montagem do Módulo de Rodas.	40
Figura 25: Módulo de Suportes.	41
Figura 26: Diferentes configurações para o Módulo de Esteiras.	42
Figura 27: Tração máxima por inclinação dos módulos de rodas e esteiras.	43
Figura 28: Tração máxima por inclinação dos módulos de rodas e esteiras.	44
Figura 29: Diagrama de transferência de carga.	45
Figura 30: Tensão de Von Misses e deformação do suporte dianteiro do Módulo de Esteiras.	47
Figura 31: Tensão de Von Misses e deformação do suporte traseiro do Módulo de Esteiras.	47
Figura 32: Tensão de Von Misses e deformação do suporte dianteiro do Módulo de Rodas.	48

Figura 33: Tensão de Von Misses e deformação do suporte traseiro do Módulo de Rodas. ...	48
Figura 34: Comparação geral rodas e esteiras.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficiente de tração.	17
Tabela 2: Coeficiente de rolamento de acordo com o tipo de piso.....	19
Tabela 3: Fator de eficiência de transmissão de potência.	20
Tabela 4: Tabela de variáveis e indicadores.....	29
Tabela 5: Propriedades do motor Dynamixel.....	36
Tabela 6: Ângulos de tombamento.....	42
Tabela 7: Valores de deformação, tensão de Von Misses e peso para diferentes materiais de construção do corpo.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Engenharia de projetos	7
2.2	Inspeção de tubulações	8
2.3	Robôs de inspeção	8
2.4	Sistemas de locomoção.....	10
2.4.1	Rodas	10
2.4.2	Esteiras	12
2.5	Parâmetros de projeto	12
2.5.1	Esforços solicitantes	12
2.5.2	Estabilidade	13
2.5.3	Capacidade de tração	14
2.5.4	Dirigibilidade.....	20
2.5.5	Robustez	21
2.6	Materiais de construção	22
2.6.1	Aço	22
2.6.2	Alumínio.....	22
2.6.3	Polímeros plásticos.....	23
2.7	Eletrônicos embarcados	23
2.7.1	Atuadores.....	23
2.7.2	Visão Mecânica	24

2.8	Sistemas de comunicação.....	25
2.9	Software empregado.....	25
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Tipos de pesquisa.....	26
3.2	Materiais e métodos.....	27
3.3	Variáveis e indicadores.....	29
3.4	Instrumento de coleta e tabulação de dados	30
3.5	Considerações finais do capítulo	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Desenvolvimento	31
4.1.1	Módulo do Corpo	33
4.1.2	Módulos de Movimentação	36
4.2	Resultados gerais	48
5	CONCLUSÕES.....	51
5.1	Recomendações	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Segundo Telles (2005), tubos podem ser entendidos como condutos fechados rígidos de seções circulares ocas, com espessura de parede determinada e destinados ao transporte de fluidos. O conjunto desses tubos e seus diversos acessórios é denominado tubulação. Já condutos flexíveis são denominados mangueiras ou mangotes.

Historicamente, a utilização de tubulações está associada a diversas civilizações da antiguidade. Na grande Roma, os centros urbanos eram providos de água encanada para consumo público; na Grécia antiga, o esgoto era transportado e enterradas ou deslocadas para lugares distantes por tubos; os sumérios desenvolveram dutos de irrigação de terraços; e no Egito foi desenvolvido um sistema para controle de fluxo para as águas do Nilo, sendo usado em irrigação e, até mesmo, para abastecer o palácio do faraó Keóps, através de tubos de cobre (LANDI, 1993).

De acordo com Henauth e Vasconcelos (2013) a idade média se mostrou um período sem avanços significativos, o assunto só foi retomado por Leonardo da Vinci (1452 – 1519). Este expressou conceitos, de modo elementar, dos princípios da continuidade, de escoamento e de máquinas hidráulicas. Sendo assim, diversos avanços nesse sentido foram tomados. Dentre estes, foram desenvolvidos tubos de ferro no século XV e, posteriormente, os tubos de aço que hoje dominam o mercado, no século XIX.

Portanto, o surgimento de tubulações está diretamente associado ao fato de o ponto de armazenagem ou geração de um determinado fluido estar distante do seu ponto de utilização. Ainda segundo Landi (1993), se na antiguidade as aplicações envolviam o transporte de água, com o avanço da atividade industrial foi necessário o desenvolvimento de sistemas para diversos outros tipos fluidos de trabalho.

Conforme descrito por Telles (2005), as tubulações industriais podem ser de menor ou maior importância, porém, quase todas essas são essenciais ao funcionamento industrial. Sobre custos, Telles (2005) afirma que tubulações industriais representam 20 a 25% do custo total de instalação, 40 a 50% do custo total de montagem e 20% do custo total do projeto em uma planta industrial.

São diversas as formas de classificação enquanto tubulações industriais: quanto ao emprego, ao processo de fabricação, ao fluido conduzido, ao material utilizado, ao diâmetro da

tubulação, dentre outros. Especialmente quanto ao emprego, as tubulações são classificadas em dois grandes grupos como exemplificado na Figura 1 (TELLES, 2005).

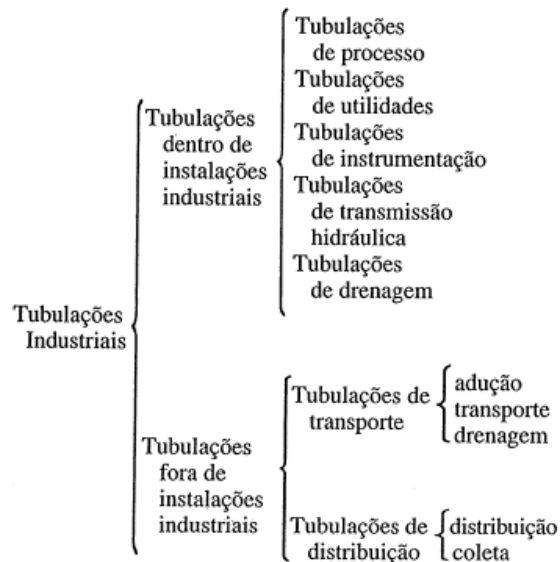


Figura 1: Diagrama de classificação tubulações quanto ao emprego.
Fonte: Telles (2005)

O primeiro subgrupo da Figura 1 são as tubulações de dentro de instalações industriais. Essas são divididas em de processo, que fazem o transporte de fluídos que constituem atividade básica da indústria; de utilidades, que servem de auxiliares ao processo produtivo, sendo responsáveis por refrigeração, arrefecimento, dentre outras. Tubulações de instrumentação e de transmissão hidráulica que são, respectivamente, responsáveis pelo acionamento de sistemas pneumáticos e hidráulicos; e, por fim, de drenagem, que coletam e conduzem ao destino conveniente os fluidos efluentes de um processo industrial.

Por outro lado, o segundo subgrupo da Figura 1 é representado pelas tubulações de fora de instalações industriais e são divididos entre as transporte, que deslocam líquidos e gases a longas distâncias; e as de distribuição, que são redes ramificadas de distribuição de fluidos fora das instalações industriais.

Ainda segundo Telles (2005), uma tubulação também pode ser classificada de acordo com o fluído transportado. Estes, dentro do contexto industrial, podem ser classificados como água, vapor, óleo, ar, gás, rejeitos ou outros. São diversos os fluídos e seus estados encontrados no processo industrial. A água, por exemplo, pode ser doce ou salgada. Sendo doce, potável ou

industrial. Ou ainda estar na forma de vapor, e, principalmente, misturada com outros elementos – água misturada com minério para facilitar escoamento.

Os tubos dentro do contexto industrial estão sujeitos aos mais variados mecanismos de falha de acordo, tanto com a natureza do fluído, quanto o tipo de operação. O que é evidenciado por Souza (2004), que ainda acrescenta que as falhas mais comuns nas tubulações ocorrem por corrosão, desgaste, danos físicos, fissuração ou a combinação entre estes.

De acordo com a Associação Brasileira de Corrosão (2020), a corrosão se dá pela deterioração de materiais por ação química, eletroquímica ou eletrolítica do meio, sendo ou não associada com esforços mecânicos. O processo de corrosão é acelerado pelo fluxo de acordo com propriedades do fluído, bem como condições de trabalho, tais quais: temperatura, PH, velocidade de escoamento, teor de oxigênio, dentre outros (FINAMORE, 2016; KUMAR *et al.* 2020; JING *et al.* 2021).

O desgaste, por sua vez, está relacionado com grandes perdas em manutenção. Tubulações industriais estão sujeitas ao desgaste devido ao tipo de escoamento, fluído escoado e parâmetros de operação (SILVA, 2011). Na indústria de mineração, tubulações que entram em contato direto com a polpa de minério, que é de alta viscosidade e contém óxidos de alta dureza, sofrem grandes danos por desgaste abrasivo (MÀSCIA,2002).

Danos físicos estão relacionados a esforços mecânicos suportados pelas tubulações. Estes podem ser devido as condições de trabalho do fluido, como pressão e dilatação induzida por temperatura; mas também por ação do vento, sobrecargas derivadas de pancadas e esforços de montagem (BIZZO, 2018).

A fissura, por sua vez, pode se iniciar de defeitos estruturais, metalúrgicos ou os induzidos em serviço. Está acontece por uma descontinuidade do material que acarreta perda de seção transversal em tubulações (ROSA, 2002; BRESCIANI *et al.* 2011). Os defeitos induzidos em serviço podem ser causados ou propagados pelos dos demais mecanismos de falha (corrosão, desgaste e danos físicos). Fissuras podem se propagar gerando ruptura súbita – fenômeno responsável por sérios acidentes de trabalho podendo gerar, inclusive, mortes (SOUZA, 2004).

A inspeção de tubulações é essencial na prevenção de possíveis falhas e etapa imprescindível em um processo de manutenção produtiva. Muitas falhas não ocorrem de forma repentina, sendo desenvolvidas ao longo do tempo: falha potencial (XENOS, 2014).

Dentro desse contexto, a inspeção visual é comumente utilizada, sendo um método eficaz no qual permite observar pequenas fissuras e demais defeitos como incrustações, deformações, dentre outros. Porém, grandes desafios surgem durante esse tipo de inspeção devido aos tubos não se encontrarem de forma acessível, podendo estar enterrados, passarem por terreno de difícil acesso, estarem suspensos, serem longos e estreitos, dentre outros.

Diante do exposto, o trabalho propõe o desenvolvimento de uma opção de inspeção de tubulações de acordo com a demanda de uma mineradora, respondendo a seguinte problemática:

Como desenvolver o projeto mecânico de dispositivo robótico com fabricação majoritariamente aditiva, movimentação eficiente, proteção IP67 e estrutura compacta de fácil adaptação para inspeção de tubulações industriais?

1.2 Justificativa

Dentro do cenário de dispositivos robóticos de inspeção, diversos avanços estão sendo feitos na utilização de câmeras, sensores e equipamentos, capazes de realizar não só inspeções visuais, mas também ensaios não destrutivos na tubulação. Porém, segundo Rashid *et al.* (2020), grande parte dos problemas durante uma inspeção advém da dificuldade de locomoção dessas plataformas robóticas diante os diferentes diâmetros, curvas, dobras e ligações das tubulações a serem inspecionadas. Além disso, são destacados possíveis obstáculos como discontinuidades, partes alagadas, obstruções, dentre outras; que também dificultam a locomoção dessas plataformas.

Ainda, como é evidenciado em Jeferson *et al.* (2014), o pouco incentivo à inovação tecnológica faz com que a maior parte desses robôs comercializados no Brasil sejam totalmente importados ou apenas montados localmente com a maioria dos componentes importados, possuindo assim um baixo nível de nacionalização. Isso torna a manutenção dessas plataformas onerosas e inviabilizam atividades de inspeção em tubulações em condições que possa proporcionar riscos a integridade física do robô.

Uma saída para estes problemas vai de encontro do atual avanço dos métodos de manufatura aditiva. Segundo Zapparoli (2019), a impressão 3D traz benefícios tanto no sentido de liberdade de projeto, tanto permitindo geometrias antes limitadas ao movimento de máquinas-ferramenta quanto viabilizando geometrias ocas e consolidação de componentes em

peças únicas. Essas vantagens permitem a diminuição dos custos, especialmente de produção em baixa escala – o custo unitário é muito semelhante ao custo de milhares de unidades uma vez que o método dispensa ferramentas como estampos e moldes; além de permitir adaptabilidades nos modelos, sendo ideal para desenvolvimento de protótipos.

Dentro da indústria de mineração pesquisada, um robô foi desenvolvido previamente sob a demanda de inspecionar ambientes difícil acesso, como tubulações, galerias de drenos e barragens, moinho, dentre outros. Sua construção é robusta, pensada para transpor os obstáculos destes ambientes, e preparada para embarcar equipamentos eletrônicos necessários. Assim, esse dispositivo é mais efetivo na inspeção de ambientes confinados e tubulações maiores que 22” (AZPURUA *et al.* 2019).

O trabalho surgiu do projeto de pesquisa do Espeleo diante das dificuldades encontradas pelas plataformas de inspeção de tubulação presentes no mercado e o emergente método de fabricação aditivo, se justificando por propor um sistema inovador de locomoção utilizando de método de impressão 3D plástica. O projeto é objeto de depósito de patente no INPI de número BR 10 2021 010685 9 e trabalho apresentado na edição de 2021 do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica (COBEM).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver um dispositivo robótico com grau de proteção IP67 para inspeção visual de tubulações com diâmetros reduzidos, que seja confeccionado em sua maioria em peças facilmente encontradas no mercado nacional e produzidas por manufatura aditiva (impressão 3D de plástico), e possua um sistema de locomoção intercambiável (rodas e esteiras) para melhor adaptação as condições de inspeção.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico sobre engenharia de projetos e robôs de inspeção
- Estabelecer parâmetros para avaliar o desempenho de robôs de inspeção;
- Estabelecer um procedimento metodológico de desenvolvimento para o projeto levando em consideração os limitantes de operação;
- Desenvolver um projeto mecânico de uma plataforma robótica visando inspeção de tubulações industriais;

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho é dividido em cinco capítulos, de forma a estruturar o desenvolvimento do projeto. O presente capítulo apresenta a contextualização do problema, trazendo as importâncias e desafios da utilização de tubulações nos processos industriais. O segundo capítulo traz um referencial bibliográfico, com o estudo dos principais conceitos envolvendo aplicação de robôs em inspeção de tubulações, elencando parâmetros de projeto e componentes de construção.

Nos capítulos 3 e 4 são apresentados, respectivamente, a metodologia de desenvolvimento de um projeto mecânico e suas condições de contorno, e apresentação e discussão dos resultados obtidos. Se conclui o trabalho no Capítulo 5, que retoma os principais pontos elencados durante o trabalho, sugerindo futuros caminhos para avanço da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Engenharia de projetos

Projeto pode ser entendido como empreendimento ou como concepção de engenharia, porém, as definições tanto para um como para o outro, convergem em conceitos importantes. A partir dessa convergência, projeto pode ser definido por uma atividade que envolve pessoas, prazo, recursos, qualidade e custos; sendo organizado em uma sequência de atividades coordenadas com o objetivo de uma entrega final (MELHADO, 1994)

As atividades que devem ser realizadas dentro de um projeto são definidas como etapas, e a forma em que estas são executadas configuram a metodologia de projeto. Segundo Norton (2013), um projeto começa em um estágio de definição, passando pelo desenvolvimento de um projeto preliminar, que é detalhado e documentado.

Enquanto Norton (2013) apresenta uma ideia mais linear de projeto, Shigley (2005) propõe um modelo baseado em interações. Em termos de etapas, este começa pelo reconhecimento de uma necessidade, objeto ponto de partida para definição do problema, no qual vai ser trabalhado pelas etapas de sínteses, análise e otimização, e a solução encontrada é validada pela avaliação. Porém, para Shigley (2005), dependendo da natureza da tarefa, essas etapas são repetidas ao longo do desenvolvimento, como ilustrado na Figura 2.

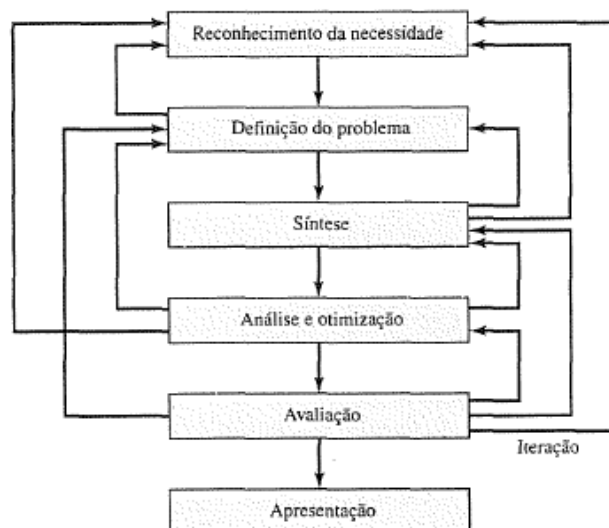


Figura 2: As fases do projeto e suas interações.
Fonte: Shigley (2005)

2.2 Inspeção de tubulações

A inspeção de tubulações surgiu com a necessidade de acompanhar os estados de degradação dos milhões de quilômetros de tubulações instaladas por todo mundo, evitando falhas que podem gerar graves acidentes, grandes perdas e terríveis acidentes ambientais.

Um estudo realizado por Kelso (2018) acompanhou por mais de nove anos as tubulações dos Estados Unidos, relatando nesse período mais de 5500 acidentes, com incidência de mais de 600 lesões que levaram a mais de 125 mortes. Em termos de perda, o estudo realizado por Barton *et al.* (2020) relata que mais de três bilhões litros de água são desperdiçados no Reino Unido por dia por consequência de vazamentos. E ainda, de acordo com estudo realizado por Belvederesi *et al.* (2018), dos acidentes envolvendo falhas em tubulação entre os anos de 2010 e 2017, 53% levaram a contaminação do solo, 41% causaram um desequilíbrio em biomas sensíveis e 85% do produto lançado no meio ambiente não pode ser recuperado.

Porém, tubulações podem estar dispostas em ambientes que, quando não inviabilizam a inspeção, podem colocar operadores em grande situação de perigo. Nesse sentido, robôs estão sendo cada vez mais utilizados por minimizarem a exposição de trabalhadores a estes riscos, além de proporcionarem uma diminuição no tempo de inspeção e melhora da precisão (BLYTH, 2017).

2.3 Robôs de inspeção

Segundo Silva *et al.* (2015), o termo robô tem origem tcheca e surgiu com a ideia de um homem mecânico que realizava atividades complexas como falar ou andar, na condição de servo. Segundo definição do R.I.A (Associação Industrial de Robôs), “robô é um manipulador reprogramável e multifuncional projetado para mover materiais, partes, ferramentas ou dispositivos especializados através de movimentos variáveis programados para desempenhar uma variedade de tarefas.”.

Porém, dentre os robôs que são atualmente empregados na indústria, estes podem ser divididos de acordo com o ambiente empregado. Desta definição, além dos robôs manipuladores, ditos fixos, contemplados pela definição do R.I.A, existem os robôs móveis. Estes são, por contraste, capazes de se mover e realizar tarefas em ambientes cuja condições podem representar restrições de movimentação a seres humanos. Essa classificação é apresentada na Figura 3 (BEN-ARI e MONDADA, 2018).

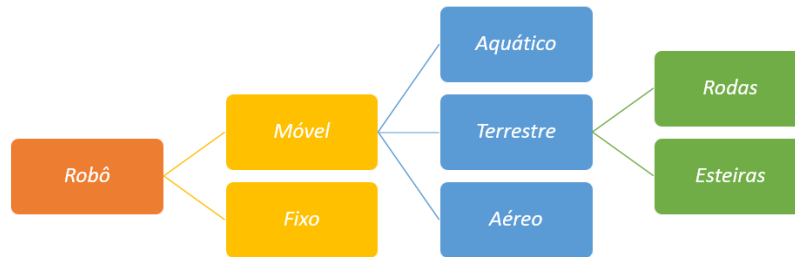


Figura 3: Classificação de robôs pelo ambiente e mecanismo de interação.
Fonte: Adaptado de Ben-Ari e Mondada (2018).

Dentre as aplicações mais comuns para robôs móveis apresentadas por Mester (2006), estes podem ser responsáveis pela limpeza, como os robôs autônomos que faxinam o chão de residências; ter função de mapeamento, como apresentado por Wolf *et al.* (2009), no qual robôs desenvolvem modelos 3D computacionais de ambientes reais; ou ainda realizar inspeções, como o robô SOLO (Figura 4), que de acordo com RedZone (2021), é responsável pela inspeção de tubulações de esgoto.

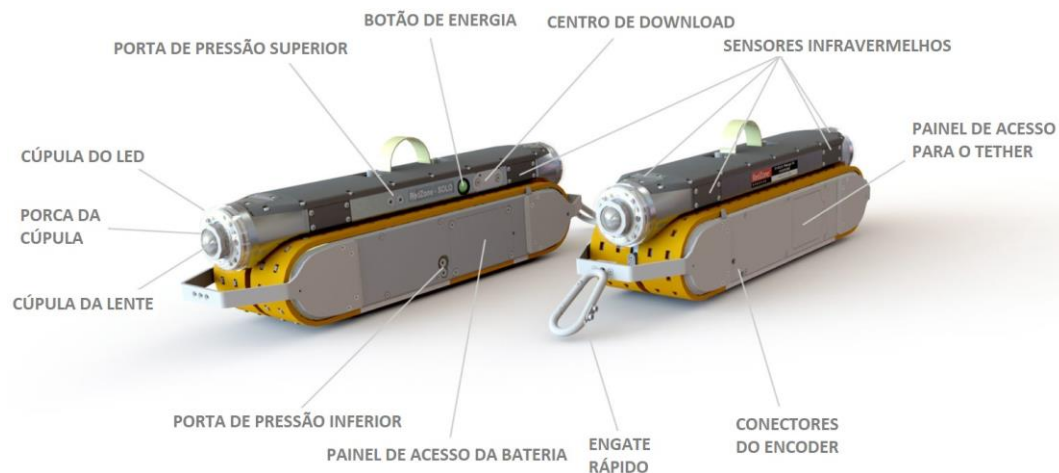


Figura 4: Componentes robô SOLO da RedZone.
Fonte: Adaptado de RedZone (2021)

Uma vez estabelecido o ambiente e a aplicação de um robô móvel, há uma grande gama de configurações e programações que devem ser levadas em conta. Assim, são estabelecidas como diretrizes do projeto a escolha (i) do material de construção, (ii) dos eletrônicos

embarcados, (iii) do mecanismo de movimentação, (iv) do sistema de comunicação e (v) do software empregado (FISHER *et al.* 2021).

2.4 Sistemas de locomoção

Robot Locomotion é o termo em inglês que define a capacidade de um dispositivo robótico alterar ativamente ou regular sua posição e orientação no espaço. A expressão surgiu com o avanço das pesquisas no campo no final dos anos cinquenta, e os diferenciou imediatamente de robôs capazes de mover pelo seu ambiente, utilizado em linhas de produção industrial que, através de uma base fixa, manipula objetos dentro do seu raio de atuação (OSTROWSKI, 2002).

O ato de se locomover, entretanto, é objeto de estudo anterior, sendo essencial à existência de qualquer ser vivo. Segundo Zonfrilli *et al.*, (2005), na natureza existem diversos meios de locomoção (patas, asas e afins), bem como diferentes tipos de locomoção (correr, andar, nadar, voar e afins). Com o avanço da tecnologia, diversos outros meios de locomoção foram desenvolvidos pelo homem, dentre estes se destacam a invenção da roda, esteiras, trilhos, dentre outros.

Segundo Roslin *et al.* (2012) na inspeção de tubulação, em específico, diversos métodos de movimentação foram desenvolvidos nas últimas décadas. A Figura 4 descreve alguns robôs baseados em diferentes meios de locomoção, tais quais: rodas, esteiras, cobra, pernas, largata e PIG;

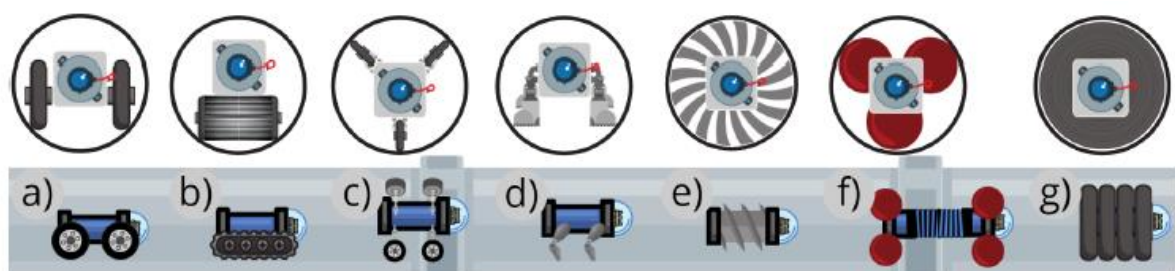


Figura 5: Métodos de locomoção de robôs de tubulação.
Fonte: Ismail *et al.* (2012)

2.4.1 Rodas

De acordo com Bondar (2018), as rodas foram o primeiro meio de locomoção inventado pelo homem. Estudos datam seu desenvolvimento no final da Idade do Cobre (3600/3500–3000/2800 AC), sendo um dos avanços mais relevantes do período. No decorrer dos milênios,

rodas auxiliaram o homem nas mais variadas atividades como o transporte de cargas pesadas, por exemplo.

A locomoção via roda é utilizada para robôs que devem se movimentar nos mais variados tipos de ambientes por proporcionarem uma navegação eficiente, estável e de fácil construção mecânica. Entretanto, é mais efetiva em ambientes regulares, com menos incidência de obstáculos e superfície mais firme (SAUDABAYEV *et al.* 2015).

As configurações de locomoção de um robô variam de acordo com (i) número de rodas, (ii) tipo de tração e (iii) tipo de esterçamento, sendo este o ato de girar a roda para esquerda ou direita, mudando seu sentido de rotação. As principais configurações de locomoção são: *Single Wheel Drive*, *Differential Drive*, *Synchro-Drive* e *Ackermann Steering* (BRÄUNL, 2006).

Um robô é dito de Direção em Única Roda (*Single Wheel Drive*) quando possui tanto o controle de tração como o de esterçamento em uma única roda, sendo esta responsável pela movimentação do dispositivo. Nesse tipo de sistema, são utilizadas duas rodas de apoio na parte traseira para satisfazer a condição de estabilidade de três pontos de apoio (RUBIO *et al.* 2019).

Já um robô Diferencial (*Diferencial Drive*) possui dois atuadores montados no mesmo eixo em lados opostos (esquerdo e direito) do dispositivo. Portanto, este tipo de sistema é formado por duas rodas com tração independente e não possui capacidade de esterçamento; além de pelo menos mais uma roda para ponto de apoio. Mecanicamente esse tipo de sistema é mais simples que o de tração por uma única roda por não necessitar esterçamento do eixo de direção, porém seu controle é mais complexo por requerer a sincronização de duas rodas (MATTHEW e HIREMATH, 2016).

A Tração Síncrona (*Synchro-Drive*) é quando o robô utiliza de sistemas de controle de tração e esterçamento em suas três rodas. Estas ainda funcionam de forma síncronas, esterçando e tracionando nas mesmas, respectivamente, direção e velocidade. Este tipo de robô pode movimentar em todas as direções, porém, por não ter rodas de apoio, não consegue mudar o sentido de direção em movimento (TÁTAR, HAIDUC e MÂNDRU, 2015).

Por fim, a Direção Ackermann (*Ackermann Steering*) é a utilizada na maioria dos automóveis e funciona com duas rodas com controle de esterçamento na dianteira e duas rodas com controle de tração na traseira. Uma das desvantagens desse sistema é a necessidade de um raio de curvatura mínima, não conseguindo girar no próprio eixo (ZHAO *et al.* 2013).

2.4.2 Esteiras

O desenvolvimento de veículos movidos por esteiras data de 1770, quando uma patente foi registrada no nome de Richard Lovell Edge, na Inglaterra. A patente descrevia uma “estrada de ferro portátil” construída de pedaços de madeira que conectava as rodas dianteiras e traseiras por um cordão (JAHANIAN e KARAMI, 2006).

A locomoção por esteiras foi usada amplamente em tanques durante as 1ª e 2ª Guerra por representarem um método de transporte robusto, capaz de sobrepor os obstáculos de um campo de batalha. Seu design é utilizado em robôs que precisam de locomover por ambientes irregulares (JAHANIAN e KARAMI, 2006).

Segundo Sandin (2003), os dois principais componentes mecânicos de esteiras são as polias e as correias. As diferentes configurações de polias resultam em diferentes geometrias de esteiras, sendo que as polias podem variar tanto em posicionamento quanto em tamanho.

Em termos de configuração, ainda segundo Bräunl (2006), o sistema de movimentação por esteiras pode ser considerado uma variação do modelo Diferencial. Desta forma, o esterçamento é feito pelo diferencial de velocidade entre as esteiras direita e esquerda. Uma vantagem desse sistema para o sistema Diferencial por rodas é a área de contato contínua das esteiras, que proporcionam melhor tração (SANDIN, 2003).

2.5 Parâmetros de projeto

Define parâmetros de projetos as principais variáveis que norteiam o funcionamento e funcionabilidade de um projeto mecânico. Esses parâmetros podem ser premissas, que levam em conta recursos disponíveis e condições de uso – a serem determinadas na parte de metodologia de projeto; bem como métricas de performance (MÜLLEER, 2003). Para o caso de robôs de tubulações, as métricas de projeto podem ser no sentido de capacidade de mobilidade e qualidade de inspeção, se limitando este trabalho às métricas de mobilidade.

2.5.1 Esforços solicitantes

Segundo Rocha (2015), qualquer ângulo de inclinação causado pela sobreposição de obstáculos ocasiona uma alteração da distribuição de carga nos pontos de apoio de forma que, essa variação pode ser representada pela Equação 1, segundo Rocha (2015), na qual ΔW é a variação de carga no eixo, W é o peso do veículo, A_Y é a aceleração em termos em função da gravidade, t é a distância entre eixos e h é a altura do centro de gravidade.

$$\Delta W = \frac{W A_y h}{t} \quad (1)$$

Ainda, de acordo com a Young e Freedman (2015) a aceleração (A_y) pode ser escrita em função do ângulo de inclinação (θ) conforme a Equação 2.

$$\tan(\theta) = A_y \quad (2)$$

2.5.2 Estabilidade

Segundo Ekuase *et al.* (2015), a estabilidade de um corpo pode ser medida através da projeção do seu centro de gravidade sob sua base, conforme ilustrado na Figura 6. Enquanto essa projeção se encontra dentro da área da base é dito que o sistema se encontra em equilíbrio estável, ou seja, tende a voltar a sua posição de equilíbrio. Uma vez que o centro de gravidade se projeta para fora dessa base, o corpo se encontra em equilíbrio instável, tendendo ao desequilíbrio a partir de qualquer perturbação.

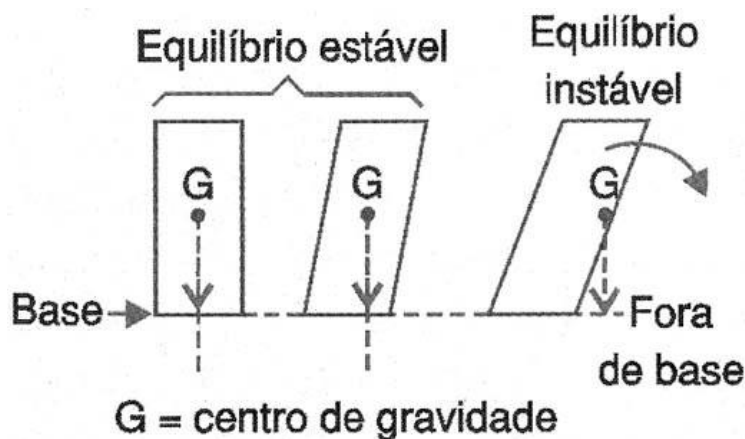


Figura 6: Tipos de estabilidade

Fonte: Estabilização dinâmica de veículos de duas rodas, Instituto NCB, [s.a]

Uma vez fora do equilíbrio, o corpo tende a tomba, visto que o tombamento pode danificar componentes e ocasionar a perda de tração e/ou direção, é desejável que o dispositivo seja mais estável o possível (ROCHA *et al.* 2019). Segundo Messuri and Klein (1985), apud.; Pereira *et al.* (2012), a estabilidade pode ser quantificada tanto por métodos estáticos, como por métodos dinâmicos. Uma vez que o robô se movimenta em baixas velocidades, se utiliza a métrica estática, fazendo o cálculo do ângulo de tombamento

Segundo Pavan (2015), o ângulo de tombamento é a inclinação máxima para um veículo se manter em equilíbrio estático. Conforme ilustrado na Figura 7, esse ângulo (α) depende da altura do centro de gravidade (Y) e bitola do robô (B) de acordo com a Equação 3, conforme anunciado por Pavan (2015).

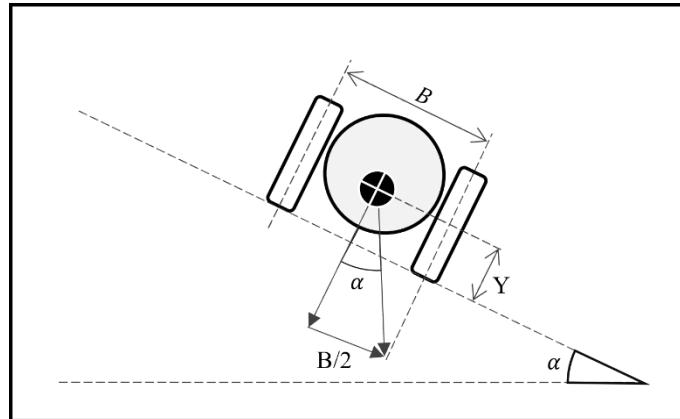


Figura 7: Cálculo de estabilidade lateral.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{B}{2Y} \right) \quad (3)$$

2.5.3 Capacidade de tração

De acordo com Nicolazzi, Rosa e Leal (2001), a tração é a força gerada nos atuadores e transmitidas pelo sistema de transmissão de um veículo para o solo, gerando movimento. Entretanto apenas uma porcentagem do que é produzido no motor e de fato convertida em movimento. O estudo de perda por transmissão pode ser quantificado através de principais fenômenos: atrito, aderência, resistência ao rolamento e eficiência de transmissão (WERLANG E SILVEIRA, 2013).

2.5.3.1 Atrito

Segundo Werlang e Silveira (2013), atrito é a força que resiste ao movimento relativo de superfícies sólidas. Neste caso, o movimento de rotação das rodas/esteiras gera uma força ($-F_e$) no sentido oposto de movimento do veículo no solo, que por sua vez exerce a reação (F_e) no sentido oposto, sendo responsável pela movimentação do veículo conforme Figura 8.

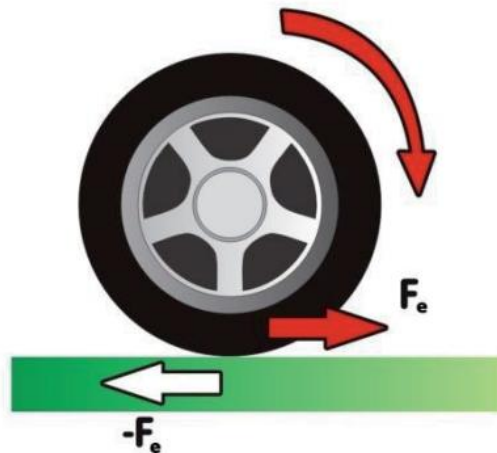


Figura 8: Força de atrito em uma roda.
Fonte: Werlang e Silveira (2013)

Assim, a tração é igual a força de atrito máxima capaz de se produzir na superfície de contato esteiras/rodas com o chão, e pode ser calculada de acordo com Equação 4, conforme anunciado por Young e Freedman (2015), na qual a força de atrito (F_a) é proporcional a força normal (N) por meio da constante de coeficiente de atrito entre superfícies (μ).

$$F_a = \mu N \quad (4)$$

A força normal (N) que um corpo aplica em uma superfície é igual a força peso (P) (OLIVEIRA, LOTI e QUEIROZ, 2017), de acordo com a Equação 5, conforme descrito por Quartuccio (2017). Por outro lado, a força peso (P) é a multiplicação da massa (m) pela aceleração da gravidade (g) conforme Equação 6, para o plano inclinado em θ graus, conforme lustrado na Figura 9, a força peso pode ser calculada conforme Equação 7 (YOUNG e FREEDMAN, 2015).

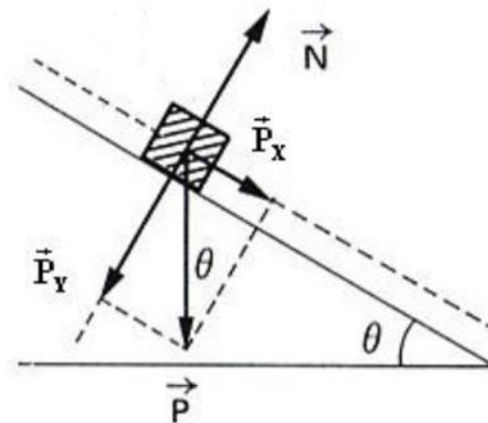


Figura 9: Forças no plano inclinado.
 Fonte: Adaptado de Young e Freedman, (2015)

$$P = N \quad (5)$$

$$P = mg \quad (6)$$

$$P = mg \cos(\theta) \quad (7)$$

Conforme descrito por Young e Freedman, (2015), aplicando a Equação 5 em 6 e substituindo na Equação 7 se tem o cálculo da força de atrito (F_a) em função do ângulo de inclinação (θ) massa (m) e aceleração da gravidade (g) conforme Equação 8.

$$F_a = \mu mg \cos(\theta) \quad (8)$$

O equivalente ao coeficiente de atrito no estudo de transmissão é o coeficiente de tração. Este é definido como a quantidade do peso do dispositivo que é transformado em força de tração (FEREZINI, 2010; SOUSA, 2015). O coeficiente de tração (k_t) varia com o tipo de solo e tipo de tração de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Coeficiente de tração.

Condição	Pneu		Esteira	
	k_t	k_r	k_t	k_r
Pista concreto seca	0,84 - 1,10	0,02 - 0,03	-	-
Estrada de terra solo seco	0,80 - 0,70	0,05	1,25 - 1,00	0,06
Solo agrícola seco	0,65 - 0,50	0,06 - 0,08	0,85	0,07
Solo agrícola úmido	0,60 - 0,45	0,10 - 0,15	-	-
Limo úmido pastoso	0,15	0,20	0,65	0,10
Areia solta de praia	0	0,35	0,55	0,20

Fonte:Cañavate *apud* Varella (1989).

O análogo da Equação 8 utilizando o coeficiente de tração é representado conforme Equação 9, na qual F_t é a força de tração e k_t é o coeficiente de tração.

$$F_t = k_t mg \cos(\theta) \quad (9)$$

2.5.3.2 Aderência

Segundo Dias e Thaumaturgo (2001) a adesão é um fenômeno físico-químico responsável por impedir o movimento relativo entre duas superfícies. A aderência pode ser por atrito, química ou mecânica.

As duas primeiras são abordadas no tópico de atrito e são quantificadas pelo coeficiente de tração (k_t) da Tabela 1 uma vez que este varia de acordo com as superfícies em contato, que leva em consideração propriedades químicas e rugosidade características de materiais (FOLQUENIN 2016).

De acordo com Oliveira (2008) a aderência mecânica é em função de forças de compressão que surgem perpendiculares a nervuras e irregularidades de superfícies, ou seja, barreiras físicas que impedem o movimento relativo. Para o caso de rolamento as nervuras da superfície da banda de rolagem em contato com as irregularidades do piso são responsáveis pela aderência mecânica (PEREIRA *et al.* 2012).

A aderência mecânica varia com a geometria das texturas (FOLQUENIN, 2016). Para o caso de pneus, por exemplo, para cada aplicação há uma banda de rolagem apropriada, de

forma a maximizar a adesão e transmissão de potência (NICOLAZZI, ROSA e LEAL, 2001). Algumas de suas variações podem ser observadas na Figura 10.

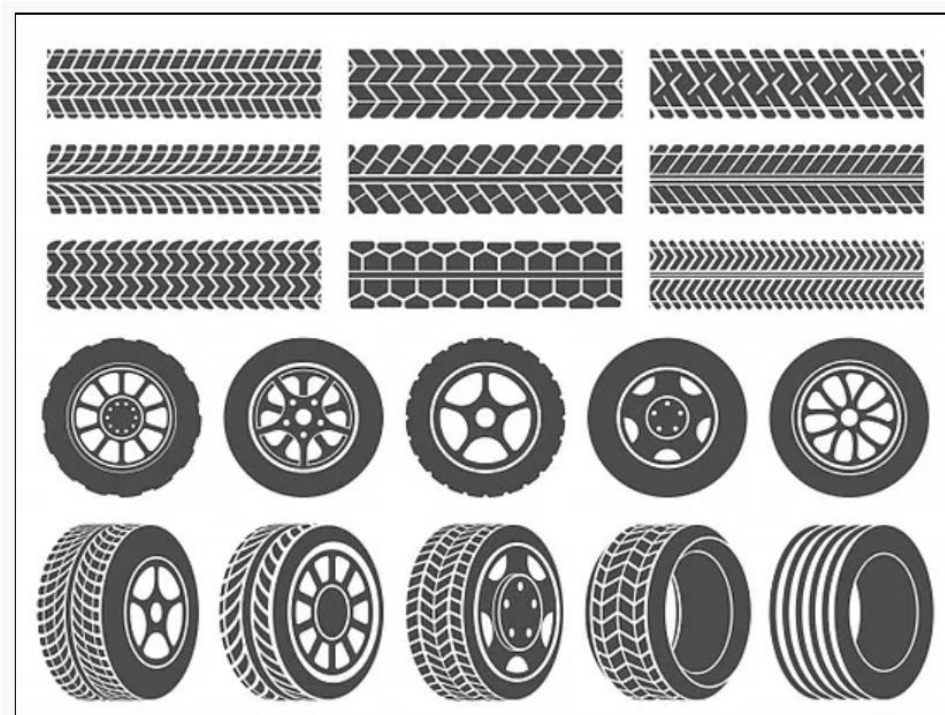


Figura 10: Tipos de banda de rolagem.
Fonte: Sharing Robotics for Education (2021)

De forma geral, grandes sulcos diminuem a força de tração em superfícies lisas, mas melhoram para caso de superfícies muito irregulares (FRANCESCHI e ANTONELLO, 2014). O aumento da banda de rolagem aumenta a capacidade de tração, porém também aumenta a força de esterçamento da roda (MILLIKEN e MILLIKEN, 1995). E, por fim, os sulcos servem para escoamento de fluidos (água, óleo e afins) que podem promover o escorregamento entre a superfície de rolagem e o solo, favorecendo fenômenos como a derrapagem ou aquaplanagem (para veículos em altas velocidades) (PEREIRA *et al.* 2012)

2.5.3.3 Resistência ao rolamento

Segundo Eger (2007), resistência ao rolamento é uma força que se opõe ao movimento do veículo, obtida pela somatória das perdas de energia relacionadas ao fenômeno de rolamento. Assim, a força de resistência de rolamento (Q_r) pode ser calculada de acordo com a Equação 10, na qual f é o coeficiente de resistência ao rolamento, G é o peso do veículo e α é a inclinação da pista.

$$Qr = fG \cos (\alpha) \quad (10)$$

O coeficiente de rolamento é disposto de acordo com o tipo de piso, conforme exemplificado na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficiente de rolamento de acordo com o tipo de piso.

Tipo de piso	Valor de “f”
Asfalto liso	0,010
Cimento rugoso	0,014
Paralelepípedo	0,020
Pedras irregulares	0,032
Pedra britada solta	0,080
Areia solta	0,100 a 0,300
Barro	0,100 a 0,400
Neve Profunda	0,075 a 0,300

Fonte: Nicolazzi, *apud* Eger, (2007)

2.5.3.4 Eficiência de transmissão

Durante a transmissão de potência, podem acontecer perdas nos rolamentos, no engrenamento, por bombeamento de óleo e nos elementos de sincronização e de vedação (FERNANDES *et al.* 2015). Para o caso de um robô de inspeção em específico, se considera as perdas por engrenamento e elementos de sincronização.

O primeiro caso ocorre devido ao atrito entre o anel sincronizador (polias) e o elemento de sincronização (correias), podendo haver, na falta de atrito, escorregamento relativo entre estes. Já o segundo acontece devido a cinemática do engrenamento, que pode ocasionar perdas por atrito e deformação (MACHADO,2018).

Young e Freedman (2015) descreve a força de tração transmitida (T_{out}) em relação a gerada (T_{motor}), considera apenas a transmissão de potência, pode ser calculada de acordo com

a Equação 11, na qual GR é a razão de transmissão e η é a eficiência de transmissão (PATTON e COPIOLI, 2007).

$$T_{out} = T_{motor} GR \eta \quad (11)$$

Alguns valores de eficiência de transmissão para engrenagens e polias podem ser observados conforme Tabela 3.

Tabela 3: Fator de eficiência de transmissão de potência.

Tipo	η
Correias planas	0,96 – 0,97
Correias em V	0,97 – 0,98
Correntes silenciosas	0,97 – 0,99
Correntes Renold	0,95 – 0,97
Rodas de atrito	0,95 – 0,98
Engrenagens fundidas	0,92 – 0,93
Engrenagens usinadas	0,96 – 0,98

Fonte: Adaptado de Magela *et al.* (2017)

2.5.4 Dirigibilidade

A mobilidade pode ser traduzida como capacidade de fazer curvas, sendo, quanto menor for o raio da curva que o robô conseguir fazer, melhor sua mobilidade. O raio mínimo de curvatura do robô é definido por raio efetivo, portanto, quanto menor o raio efetivo, melhor a mobilidade (MAULANA *et al.* 2014).

Como já visto, para o caso de um robô diferencial as curvas são feitas por uma diferença nas velocidades angulares da roda direita (ω_L) e esquerda (ω_R). De acordo com Chese (2009), o raio efetivo (R) pode ser calculado conforme Equação 12, no qual L é a distância entre eixos do robô.

$$R = \frac{L(\omega_L + \omega_R)}{2(\omega_R - \omega_L)} \quad (12)$$

2.5.5 Robustez

De acordo com Stark e Woods, *apud*. Silva (1998), variáveis relacionadas à geometria, esforços e propriedades mecânicas, em um sistema estrutural, estão sujeitas a variações de caráter aleatório. Desta forma, projetos de máquinas ou equipamentos devem levar em consideração essas incertezas para seu dimensionamento com o intuito de se evitar falhas.

Nesse sentido, para se analisar comportamentos de componentes em situações de funcionamento ou em situações críticas, é adequado o emprego de métodos de elementos finitos (FEA) (CAMPILHO *apud* SILVA, 2017).

O Método dos Elementos Finitos (FEA) é uma técnica numérica usada para solucionar problemas de campo descritos por um conjunto de equações diferenciais parciais. Bastante aplicado nas mais variadas áreas da engenharia, como projetos de máquina, sistemas acústicos, eletromagnetismo, mecânica dos sólidos, dinâmica dos fluidos, entre outros (NEPOMUCENO, 2016).

De acordo com Azevedo (2003) são etapas para solução de um problema por FEA sua caracterização através de um modelo físico, matemático e numérico, respectivamente. O modelo físico se dá pela modelagem das características de geometria, material de construção e interação do corpo com o ambiente. No modelo matemático é inserido os fenômenos físicos ao corpo aplicados, fazendo sua caracterização matemática através de equações diferenciais. Por fim, o modelo numérico é responsável por resolver o modelo matemático.

Em específico ao modelo numérico, há uma discretização do problema, dividindo uma determinada geometria complexa em um número finito de partes geométricas – denominadas nós. Para cada nó é descrito um tensor, que permitem o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões utilizando da teoria de Von Misses (ÁVILA, 2019)

Amuchastegui (2016) enuncia que a teoria de energia de distorção máxima, ou teoria de Von Misses, considera que o escoamento de determinado material acontece quando a energia de deformação devido a um carregamento multiaxial é igual a energia de distorção de um corpo em prova de tração (limite de escoamento). Desta forma, ainda segundo Amuchastegui (2016), a cada nó é aplicado a equação de Von Misses (Equação 13), e a partir das tensões normais (σ)

e tensões cisalhantes (τ) se obtém uma tensão equivalente (σ_{von}) que é comparado com a tensão de escoamento do material para cada segmento da peça.

$$\sigma_{von} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}{2}} \quad (13)$$

2.6 Materiais de construção

2.6.1 Aço

O aço ainda é o material mais usado na engenharia pelo seu custo-benefício e propriedades como alta resistência mecânica, alta usinabilidade, alta soldabilidade, dentre outros. Diversos elementos de máquina catalogados como polias e chavetas, por exemplo, são encontrados comumente em aço (ZOLIN, 2008).

Sua classificação é feita, conforme normas DIN/SAE, pela porcentagem de carbono, elementos químicos adicionados (além de ferro e carbono) e tipo de processamento. Um aço de baixo carbono sem elementos de liga, por exemplo, pode ser SAE1020 (para 0,2% de carbono) ou SAE1045 (para 0,45% de carbono) (NASCIMENTO, 2007)

2.6.2 Alumínio

O alumínio representou grandes avanços para os materiais de construção mecânica por possuir propriedades interessantes para as mais diversas aplicações da engenharia. Dentre essas propriedades, é possível destacar a alta relação resistência/peso, o alto grau de trabalhabilidade, considerável ductilidade, excelente condutividade térmica e alta resistência à corrosão (GEORGANTZIA *et al.* 2021)

Analogamente ao aço, as ligas de alumínio também são classificadas de acordo com sua composição química e processamento pela a IADS (Sistema Internacional de Designação de Liga) (BRUNATTO, 2016)

Na construção de robôs, o alumínio traz tanto vantagens como desvantagens. Dentre as vantagens, possibilita a construção estruturas mais leves que em aço, suporta ambientes mais agressivos por sua resistência a corrosão e admite qualquer geometria de peça. As desvantagens

estão relacionadas a dificuldades de solda e reparo de peças em alumínio, assim como seu alto custo de aquisição (STOJANOVIC *et al.* 2018)

2.6.3 Polímeros plásticos

As propriedades dos polímeros, aliado à sua viabilidade econômica, o colocou como material principal para as mais diversas aplicações. Com o avanço dos termoplásticos e a crescente necessidade da indústria eletroeletrônica em componentes cada vez menores e mais leves, o plástico ocupou papel de destaque, substituindo, inclusive, metais. Para os robôs, por exemplo, o plástico é amplamente utilizado nos componentes eletrônicos, no corpo e, até mesmo em alguns componentes estruturais. Nesse sentido, os robôs vêm conseguindo se tornar cada vez menores, leves e funcionais (KUTZ, 2017)

Porém, a utilização dos plásticos na engenharia só foi alavancada pelo desenvolvimento de processos de fabricação. Na indústria, o plástico é moldado, a depender de geometria da peça e o volume de peças em que se quer produzir, por injeção plástica, extrusão, moldagem por sopro, moldagem por vácuo, impressão 3D, dentre outros (CIRINO *et al.* 2017).

A impressão 3D, em especial, assumiu papel central nesse contexto por possibilitar a fabricação de peças mais complexas, impossíveis por métodos tradicionais de fabricação (apesar de não representar diferencial competitivo em escala, auxilia na prototipagem e construção de moldes para peças de linha de produção) (ZHANG *et al.* 2019).

Como descrito em Ortiz-Acosta e Moore (2018), os métodos de impressão 3D, também conhecidos como manufatura aditiva, tampouco se limitam a plásticos, apesar de tecnologias de impressão de metal ainda serem incipientes. A produção de qualquer peça por impressão 3D começa pela modelagem de um arquivo em um software CAD, que é salvo como STL (formato comum aos softwares de impressoras), para posteriormente ser lido em *G-Code* – linguagem programação comumente usada para operar máquinas como as de usinagem CNC.

2.7 Eletrônicos embarcados

2.7.1 Atuadores

Segundo Barbosa e Silveira (2011), atuadores são dispositivos de um sistema de controle utilizado para converter sinais elétricos em ações requeridas pelo sistema. Os atuadores podem ser pneumáticos, hidráulicos e elétricos.

Os pneumáticos são utilizados quando existe necessidade de um movimento de alta velocidade e pouca resistência, ou seja, movimentação de cargas mais baixas. Estes são acionados através de ar comprimido e são aplicados amplamente em linhas de produção, podendo perfurar, montar, mover, embalar, dentre outros.

Já os hidráulicos são a antítese dos pneumáticos, sendo utilizados para movimentar grandes cargas a menores velocidades e maior precisão. Seu acionamento é feito através de líquidos, como óleos e afins. Sua aplicação envolve instrumentos como prensas, empilhadeiras, tratores, dentre outros.

Por fim, os atuadores elétricos são os mais utilizados na indústria de uma forma geral, pela facilidade de instalação e controle. Estes convertem energia elétrica em cinética, sendo um dos seus mais comuns exemplos os motores elétricos.

Motores elétricos são divididos entre o tipo de corrente, podendo variar entre corrente contínua ou alternada. Enquanto motores de corrente alternada são mais comumente utilizados por fornecerem um bom desempenho a menor custo, os de corrente contínua são mais compactos e precisos e funcionando sob um grande espectro de velocidades com alta possibilidade de controle, sendo amplamente utilizado em robôs, em que a fonte de alimentação geralmente é de corrente contínua (baterias) (LIMA e SILVA, 2017).

2.7.2 Visão Mecânica

Segundo Davies (2012), Visão Mecânica (*Machine Vision*) é a área de estudo de softwares e hardwares utilizados para orientação operacional de dispositivos robóticos com base na captura e processamento de imagens. São seus principais elementos: iluminação, câmera e análise.

A luz tem como função iluminar o objeto a ser inspecionado, podendo variar de acordo com o tipo de incidência. Um objeto é representado via imagem de acordo com a luz que este reflete, portanto posicionar câmera e fontes de luz é item chave para obtenção de imagens precisas. A câmera varia de acordo com a qualidade de imagem a ser obtida. A qualidade da imagem está associada tanto a capacidade da câmera em obter imagens nítidas nas situações de iluminação estabelecidas, mas também em ter a resolução necessária para aferição adequada sob determinada condição a ser inspecionada.

As imagens capturadas podem tanto serem diretamente analisadas por um operador humano, quanto por *softwares*. Quando utilizado *softwares*, são utilizados sensores processadores de imagem com o intuito de retirar as informações requeridas por métodos matemáticos. Quando analisada por operadores humanos, estas são simplesmente exibidas em monitores, e estes tomam conclusões de acordo com sua capacidade técnica e experiência.

2.8 Sistemas de comunicação.

A comunicação com os componentes eletrônicos de um robô podem ser, no geral, ou via cabo ou sem fio (*wireless*). Segundo Marques *et al.* (2016), as duas soluções possuem seus pontos altos e baixos.

A conexão via cabo possui maior autonomia e qualidade de conexão em condições sem infraestrutura para aplicações sem fio. Porém, é limitado pelo comprimento do cabo, que ainda pode ficar preso ou se romper, atrapalhando a movimentação do robô.

Por outro lado, a conexão sem fio, além da infraestrutura de sinal, também depende do ambiente de inspeção. Solos com alto teor de metais pode proporcionar interferência atrapalhando o sinal e, caso o robô entre em uma zona sem cobertura, pode ser perdido durante uma inspeção.

2.9 Software empregado.

Segundo Ciccozzi *et al.* (2017), softwares são empregados em três principais sentidos: (i) proporcionar fácil configurabilidade e (ii) desempenhar funções específicas de forma funcional ao usuário e (iii) tornar os robôs inteligentes a ponto de tomar decisões próprias.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de pesquisa

De forma mais abrangente, o conhecimento científico, segundo Marconi e Lakatos (2003), se difere do conhecimento vulgar (provido do senso comum) “nem pela veracidade nem pela natureza do objeto conhecido”, mas sim pela forma em que se é obtido. Portanto, a ciência não é caminho único ao conhecimento, mais a sistematização de métodos que suportam ou não uma teoria inicial (CIRIBELLI, 2003).

Gil (1999) organiza os diferentes métodos científicos em sua definição de pesquisa, classificando-as de acordo com seus (i) objetivos gerais e (ii) procedimentos técnicos. Outra classificação também cara é feita por Knechtel (2014), que divide também enquanto o ponto de vista da (iii) forma de abordagem.

No que desrespeita aos objetivos gerais, uma pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com determinado assunto possibilitando o aprimoramento de ideias e construção de hipóteses. A pesquisa descritiva, por outro lado, visa identificar determinadas características sobre determinado tema e estabelecer correlações entre variáveis. Por fim, a pesquisa explicativa visa observar e determinar fatores para ocorrência de determinados fenômenos em estudo.

Enquanto aos procedimentos técnicos, uma pesquisa pode ser embasada em estudos já existentes (bibliográfica), em documentos (documental), em testes e simulações (experimental), em interrogação direta de pessoas (levantamento), em coleta de dados em campo (estudo de campo), em determinado acontecimento (estudo de caso), em testes e simulações a partir do fato passado (ex-post-facto), e na percepção do próprio pesquisador inserido no fato a ser estudado (pesquisa-ação).

Por fim, uma pesquisa pode ser quantitativa ou qualitativa. A primeira aborda determinado assunto ou sob perspectiva de números, quantificando variáveis e as medindo através de estatística, enquanto a segunda usa de subjetividade, analisando a realidade de determinados fenômenos a partir da influência das variáveis envolvidas no processo.

Dado o exposto, o presente trabalho se classifica como uma pesquisa exploratória, com vistas em apresentar o estudo de caso de um dispositivo robótico de inspeção de tubulação. Ainda, a pesquisa é mista, pois propõe avaliar a influência de determinadas variáveis tanto quantitativa quanto qualitativas no desempenho do dispositivo como por exemplo a mobilidade,

sendo avaliado a capacidade em se realizar curvas, transpor obstáculos e se locomover em tubulações; e robustez, que leva em conta se a construção é suficientemente robusta para o uso.

3.2 Materiais e métodos

Diante da importância da inspeção visual como método de prevenção de falhas, acidentes e perdas, a empresa estudada apresentou a demanda de um dispositivo robótico capaz de inspecionar tubulações menores que 22” (558,8mm) – diâmetro mínimo que demais plataformas da empresa conseguem inspecionar; com incidência de obstruções e partes alagadas.

Com o intuito de ser utilizada em campo, a plataforma deve ter componentes capazes de serem montados e desmontados de forma intuitiva, rápida e sem necessidade de ferramentas especiais; bem como ser de fácil manutenção, dando preferência a componentes comerciais e processos de fabricação usuais, de forma que qualquer peça possa ser reposta em um curto período a baixo custo. Por fim, que se dê preferência a componentes eletrônicos já disponíveis na empresa ou que seja de fácil aquisição no mercado nacional, evitando altas taxas e longos prazos de importação em caso de falha.

Diante do exposto, foram elencadas premissas para o projeto, de forma que o robô consiga atender aos objetivos propostos de forma eficiente e efetiva, ainda levando em conta condições de inspeção que comumente são encontradas e equipamentos já disponíveis no laboratório. São elas:

1. O dispositivo robótico tem como função inspecionar tubulações industriais de diâmetros menores que 22” (558,8mm) na condição de interrupção de escoamento do fluido (desativadas).
2. Diante de condições de campo não controladas, o robô vai estar sujeito a ambientes muito agressivos, podendo conter particulados que podem danificar os componentes internos, ou ter de passar por trechos alagados ou submersos. Assim, se justifica a utilização do grau de proteção que atenda aos critérios de certificação IP-67 (totalmente vedado em relação a poeira e protegido a imersão de até um metro por trinta minutos em relação a água).
3. Devido a disponibilidade do método de impressão 3D na empresa e de suas vantagens, todos os componentes devem ser fabricados por manufatura aditiva

- salvo peças estruturais e componentes que necessitam de tolerância dimensional de montagem.
- 4. Devido as diferentes condições de inspeção, apesar de sempre se exigir estabilidade, para algumas situações é mais importante parâmetros de dirigibilidade para desviar de obstáculos e fazer curvas; outros a robustez para sobrepor pedras e descontinuidades se faz mais importante. Nesse sentido, o robô deve aliar o melhor dos sistemas de esteiras e rodas, com mecanismo intercambiável de locomoção.
- 5. Ser de fácil montagem e desmontagem, sendo de fácil intercambialidade e possuindo fácil acesso a todos os seus componentes tanto mecânicos como elétricos, facilitando a manutenção.
- 6. A tração é via atuador elétrico, sendo este o motor MX-64AT da DYNAMIXEL.

A partir das premissas foi desenvolvido um projeto conceitual com o auxílio de *softwares* de modelagem 3D, estabelecendo como meta a inspeção de tubulações de 10” (254 mm). O motor serviu como ponto de partida para desenvolvimento do projeto, seguido da estrutura de movimentação e do corpo – que foram desenvolvidas de forma a alocar os componentes eletrônicos e serem o mais compacto possível.



Figura 11: Fluxograma de desenvolvimento do projeto.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O desenvolvimento do projeto seguiu o fluxo detalhado na Figura 11. Conforme exemplificado, primeiro foram detalhados os elementos de transmissão (polias, correias e eixos) presentes no sistema de locomoção de esteiras, em sequência foi desenvolvida a estrutura do corpo visando alocar demais componentes eletrônicos.

Com o intuito de interligar os sistemas, foi desenvolvido a estrutura de suportes, na qual foram especificados elementos de fixação (parafusos, porcas, anéis elásticos, arruelas, fecho rápido, chavetas e helicóide) e elementos de apoio (rolamentos e guias) em paralelo com elementos de vedação (juntas, retentores e passa cabos).

O sistema de locomoção por rodas foi desenvolvido por último de forma análoga ao sistema de esteiras e, apesar do desenvolvimento linear, todas as etapas de projeto implicaram em alterações nas etapas anteriores, fazendo uso de múltiplas interações durante seu desenvolvimento.

Por fim, elementos estruturais foram calculados com o auxílio de softwares por análise de elementos finitos, e elementos de transmissão de potência foram calculados de acordo com literatura apropriada. A partir da finalização do projeto detalhado, todas as peças foram devidamente especificadas, indicando tolerâncias de montagem, material de construção, referência (para elementos comerciais) e identificação. As peças foram fabricadas.

3.3 Variáveis e indicadores

Segundo Marconi e Lakatos (2003), a ciência é constituída por um nível de observação de fatos, outro de formulação de hipóteses e, por fim, o estabelecimento de teorias. A ponte entre o primeiro e segundo nível ocorre através do enunciado de variáveis.

Pela definição de Gil (1999), variável pode assumir diferentes valores e aspectos de acordo com vasos particulares ou circunstanciais. Portanto, variáveis podem assumir diferentes valores, e, a operacionalização desses valores são feitos através dos indicadores, ou seja, são responsáveis por mensurar de maneira prática questões implícitas das variáveis. Na Tabela 4 é exemplificado a variável e indicadores referentes ao presente estudo.

Tabela 4: Tabela de variáveis e indicadores.

VARIÁVEL	INDICADORES
Robô de inspeção de tubulação	Eletrônicos embarcados
	Condições de inspeção
	Materiais disponíveis
	Processo de fabricação disponíveis
	Esforços atuantes
	Método de inspeção
	Software empregado

Fonte: Pesquisa direta (2021)

3.4 Instrumento de coleta e tabulação de dados

Os dados foram obtidos através de revisão bibliográfica, coletando informações já disponíveis na literatura, bem como através da análise de experimentos práticos realizados tanto em laboratório, quanto em situações reais de inspeção.

Os dados obtidos são apresentados em figuras e tabelas, sendo elaboradas em softwares como Powerpoint®, SolidWorks® e Excel®.

3.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram expostos a metodologia utilizada para desenvolvimento do projeto, bem como os objetivos do trabalho enquanto pesquisa científica, estando este de acordo com o objetivo proposto. No próximo capítulo são apresentados os resultados, estabelecendo discussões acerca das variáveis usadas para direcionar o desenvolvimento do protótipo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenvolvimento

O dispositivo robótico proposto foi inteiramente modelado em 3D através do *software* SolidWorks®. Dividido entre módulos estruturais que são responsáveis por alocação de componentes eletrônicos e estruturação do robô e módulos de movimentação, que são responsáveis por tração. Um diagrama hierárquico dos módulos pode ser observado na Figura 12.

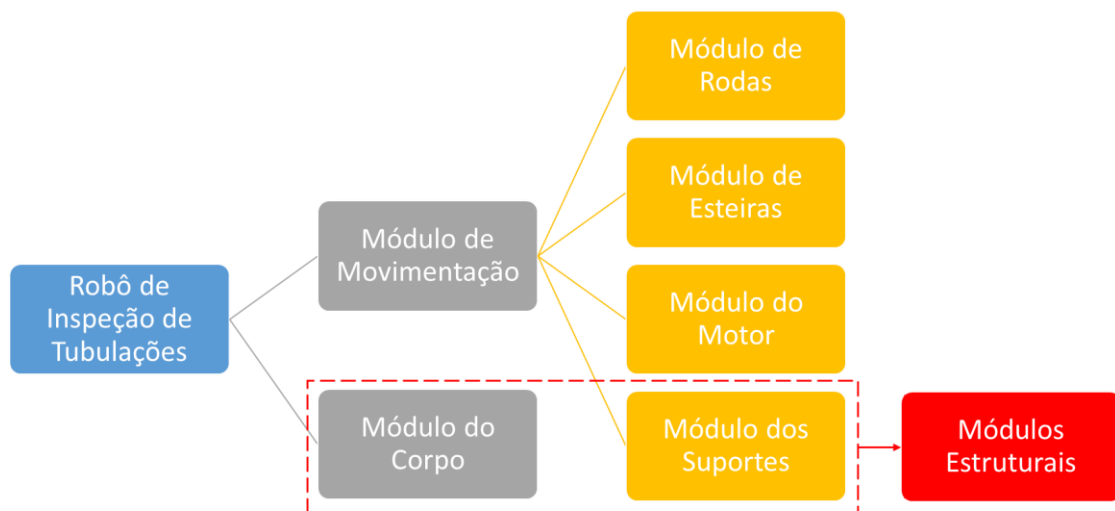


Figura 12: Diagrama hierárquico dos módulos construtivos do robô.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O robô pode ser montado tanto com movimentação por esteiras quanto por rodas, havendo um sistema intercambiável de movimentação. Os Módulo do Corpo e Módulo do Motor são comuns tanto a ambos os Módulo de Rodas e Módulo de Esteiras, sendo que, cada um destes possui um Módulo de Suportes.

As dimensões gerais, bem como peso e coordenadas do centro de gravidade foram estimadas com o auxílio do SolidWorks® e estão dispostas, nas Figuras 13, 14 e 15 respectivamente.

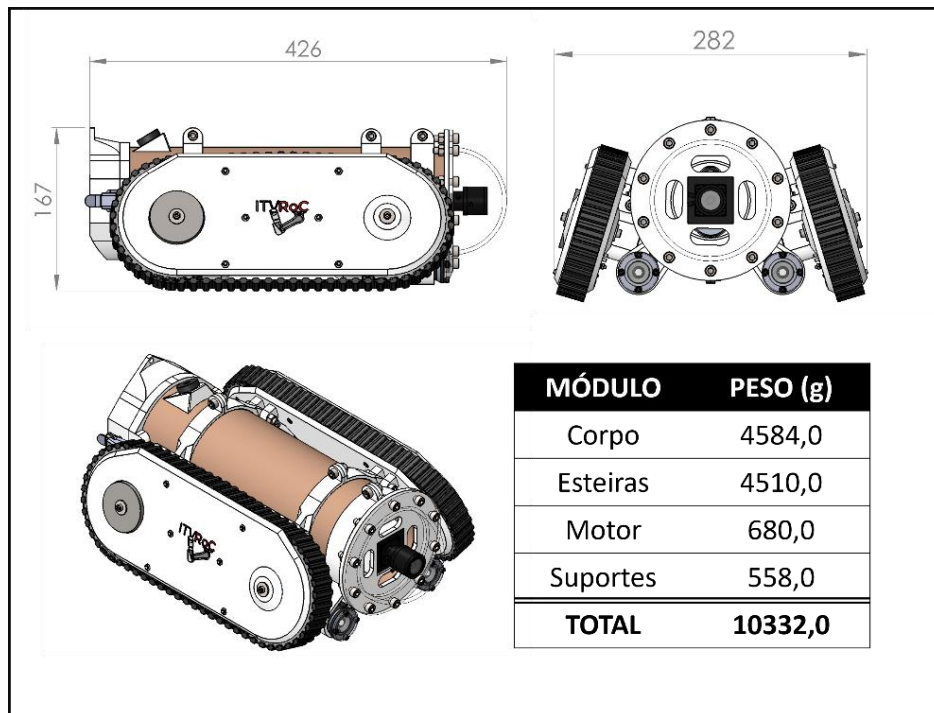


Figura 13: Peso e dimensões gerais movimentação por esteiras.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

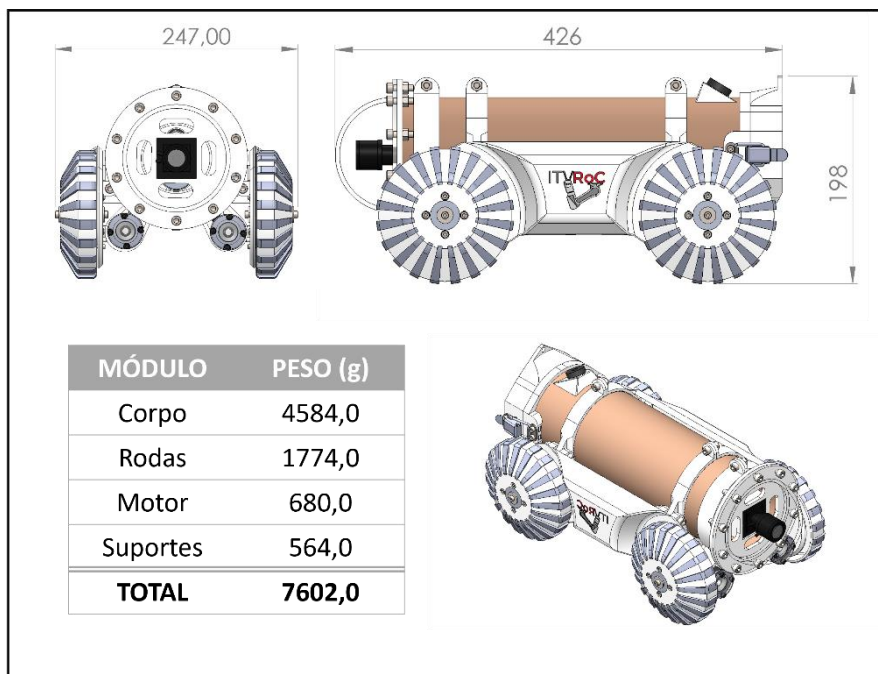


Figura 14: Peso e dimensões gerais movimentação por rodas.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

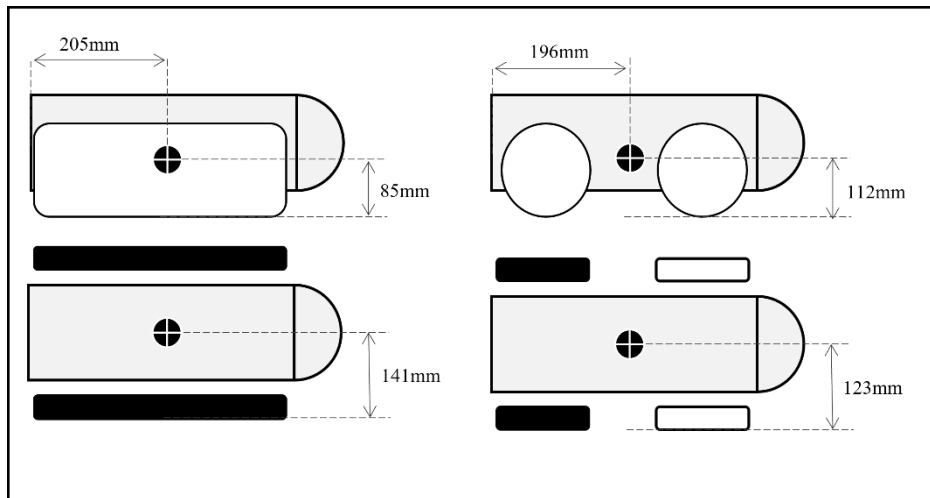


Figura 15: Estimativa localização centro de gravidade de versão de esteiras e rodas.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

4.1.1 Módulo do Corpo

O Módulo do Corpo é responsável pela alocação de todos os componentes eletrônicos, salvo o motor e os LED's dianteiros, e é comum aos módulos de movimentação. Este é composto pelo (i) corpo, (ii) tampa dianteira, (iii) tampa traseira e (iv) suporte passa cabos conforme Figura 16.

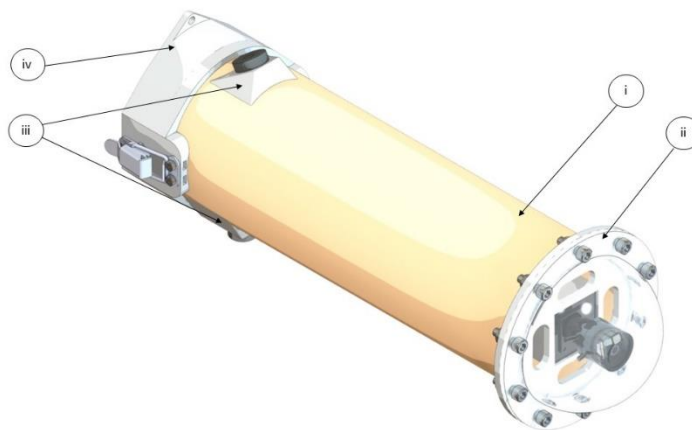


Figura 16: Módulo do corpo do robô.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O corpo é uma tubulação de PVC com 110mm de diâmetro e 6,1mm de espessura. Foi utilizada a tubulação com a intenção de facilitar a fabricação, uma vez que tubos dos mais diversos materiais são vendidas em diâmetros e espessuras comerciais.

As dimensões são definidas com base de um diagrama inicial dos componentes, visando o diâmetro mínimo possível para alocação de todos os componentes eletrônicos. Já o material é um compromisso entre o menor peso possível e robustez necessária para conferir rigidez ao robô.

Conforme ilustrado na Figura 17, foi efetuado dois cortes na parte superior e inferior da tubulação. Estes são responsáveis por alocar os suportes para o cabo do tether (23x25mm) e outros cabos (60x40 mm) utilizados para comunicação com componentes eletrônicos externos ao corpo.

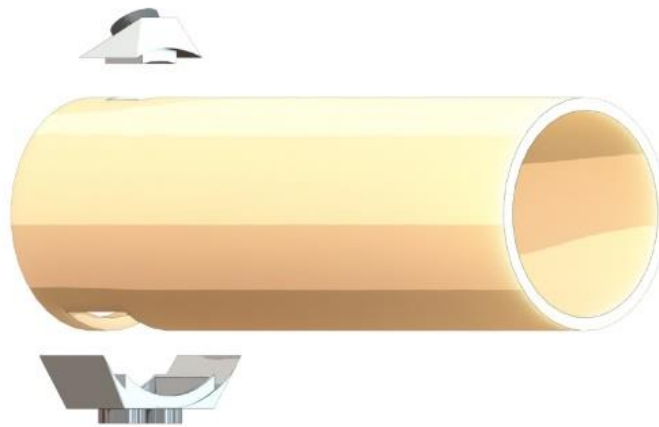


Figura 17: Corpo e suportes do tether e demais cabos de comunicação.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

A tampa dianteira é responsável por alocar a câmera de inspeção, fornecendo visão ampla, resistência a possíveis impactos, vedação contra água e poeira é fácil acesso para manutenção e substituição da câmera dianteira. Como pode ser observado na Figura 18, a montagem é composta por uma tampa impressa em 3D, que é colada no corpo e serve como fixação para uma cúpula utilizada comumente em câmeras GoPro.

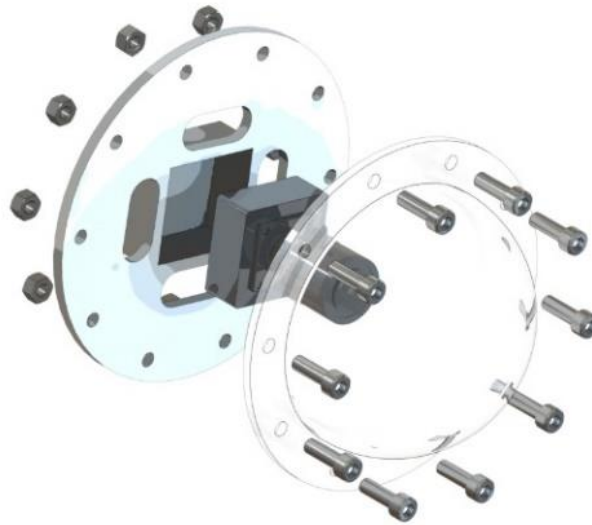


Figura 18: Tampa dianteira do Módulo do Corpo.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

A tampa traseira faz o acesso ao interior do robô, fornecendo fácil manutenção de componentes eletrônicos internos, alocação de câmera e iluminação de ré. Como pode ser observado na Figura 19, sua montagem é composta por uma carcaça mais externa e outra mais interna, ambas impressas em 3D. Entre estas é alocado com silicone neutro uma placa de policarbonato visando fornecer vedação para o sistema, bem como visão para a câmera e iluminação de ré. Um aro é colado no corpo do robô e um dispositivo de fecho rápido faz a fixação da tampa com o corpo através de um mecanismo similar à de potes herméticos.

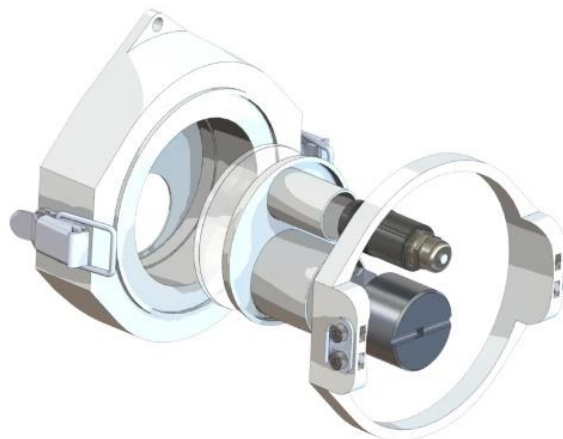


Figura 19: Tampa traseira do Módulo do Corpo
Fonte: Pesquisa direta (2021)

4.1.2 Módulos de Movimentação

Com o intuito de se desenvolver um sistema de locomoção que funcione tanto para rodas como para esteiras e devido a boa mobilidade e construção mecânica simples (BRÄUNL, 2006) foi escolhido o sistema de locomoção Diferencial para o protótipo.

O detalhamento dos Módulos de Movimentação partiu da escolha do motor da Dynamixel MX-64AT de especificações técnicas conforme Tabela 5. Este foi definido conforme disponibilidade no laboratório, sendo utilizado duas unidades dele.

Tabela 5: Propriedades do motor Dynamixel.

Nome do modelo		MX-64AT
MCU		Cortex-M3 (72 [Mhz], 32 [bit])
Tensão de entrada	Mínimo [V]	10.0
	Recomendado [V]	12.0
	Máximo [V]	14.8
Características de performance	Voltagem [V]	12.0
	Torque de eixo [N-m]	6.0
	Corrente [A]	4.1
	Velocidade sem carga [rpm]	63.0
	Corrente sem carga [A]	0.15

Fonte: Dynamixel (2021).

Diante da inspeção em ambientes alagados, foi necessário o enclausuramento do motor uma vez que ele não possui proteção IP67 - exigência de projeto para transitar em ambientes alagados. Optou-se por utilizar duas tampas, que fixam o motor e envolvem conforme a Figura 20. A essa construção foi denominado Módulo do Motor.

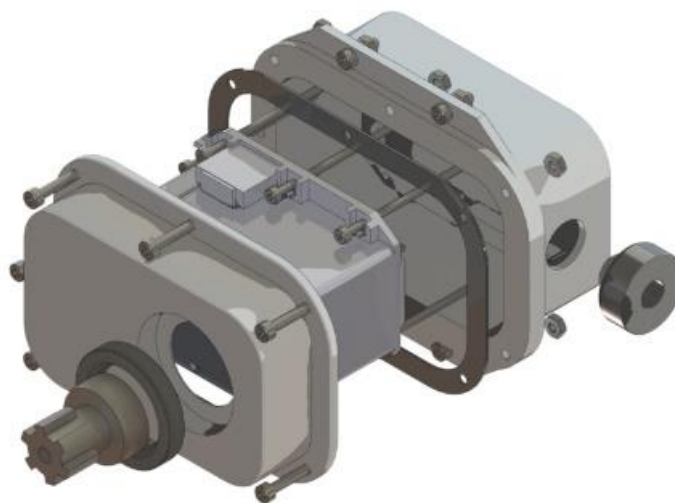


Figura 20: Módulo do Motor.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

A vedação do sistema é feita por três métodos diferentes. Os cabos do motor saem através de passa cabos comercial, que possui certificação IP67, enquanto a interface entre as duas tampas é vedada através de uma borracha nitrílica que é comprimida com o aperto de parafusos. Por fim, o eixo motor é vedado através de um retentor, alocado em uma das tampas.

A tampa responsável pela alocação do passa cabos é feita em impressão 3D, enquanto a responsável pela alocação do retentor é usinada para assegurar a tolerância dimensional de montagem do retentor. O motor é fixado na tampa impressa também por parafusos. Já o eixo do motor é usinado e transmite potência através de estrias, tanto com na interface com o motor, tanto com as rodas/polias. O cálculo das estrias foi feito com base na norma DIN 5462 e foi feito um estudo de elementos finitos com os valores de torque informado pelo fabricante.

Conforme apresentado nas Figuras 21 e 22, a tensão de Von Misses máxima é inferior ao limite de escoamento do material 4340 fornecido pelo software (710Mpa), bem como a deflexão máxima também atende os parâmetros de rigidez para se manter dentro das tolerâncias de montagem e diminuir perdas de transmissão por deformação (MACHADO, 2018).

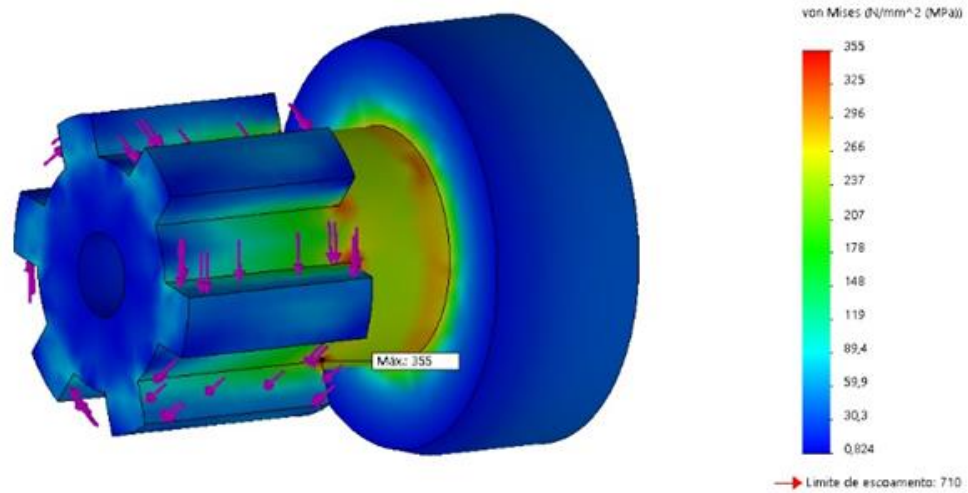


Figura 21: Cálculo de tensão de Von Mises por elementos finitos
Fonte: Pesquisa direta (2021).

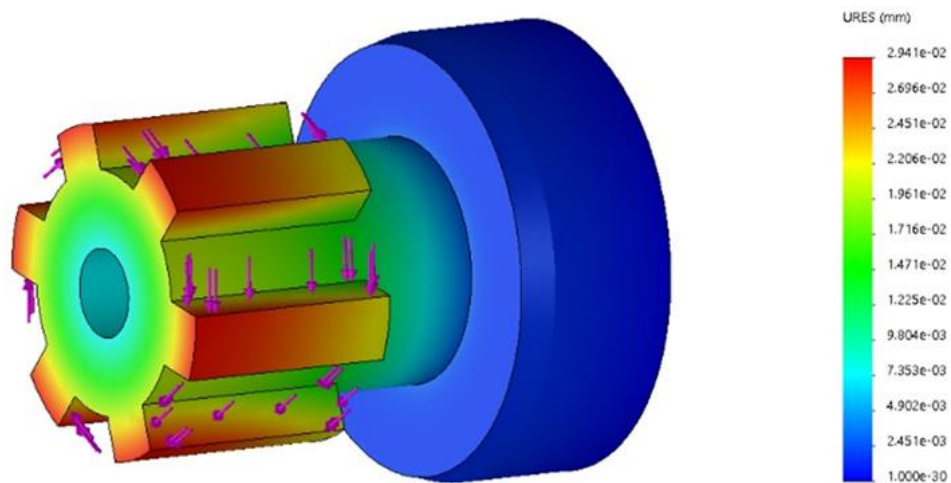


Figura 22: Cálculo de deslocamento por elementos finitos
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O módulo do motor é comum tanto ao Módulo de Esteira quanto ao Módulo de Roda. O primeiro tem construção mecânica dividida em (i) eixo traseiro, (ii) eixo dianteiro, (iii) tensionador e (iv) placas laterais e (i) correia e sua montagem é ilustrada na Figura 23.

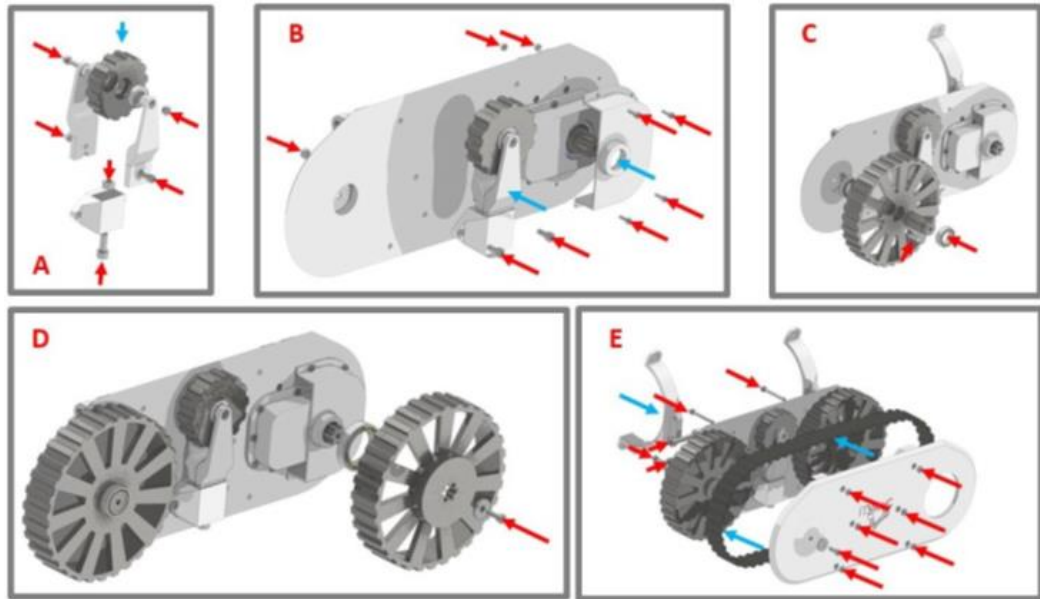


Figura 23: Montagem do Módulo de Esteiras
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Na Figura 23A é exemplificado a montagem do tensionador. Este é composto por uma polia fixada através de dois rolamentos que são apoiados em um suporte bipartido que desliza sobre uma base ambos impressos em 3D. O tensionador se faz necessário para esticamento adequado da correia evitando que esta pule dentes da polia, o que diminui a eficiência de transmissão, prejudicando a transmissão de torque (MACHADO, 2018).

Já na Figura 23B é efetuado a alocação do tensionador, suporte da polia traseira e Módulo do Motor na placa lateral interna ao robô. A base do tensionador é fixada de forma que seu suporte fique livre para empurrar a polia contra a correia de acordo com o aperto do parafuso localizado na parte inferior da base. O eixo traseiro é o eixo motor do sistema, sendo a polia apoiada em um suporte impresso em 3D e o Módulo do Motor posicionado de forma que se garanta a transmissão à polia.

A Figura 23C é exemplificado a montagem do eixo dianteiro. Este é composto pela polia movida, que é alocada em um eixo usinado, sendo sua interface feita através de uma chave. O conjunto é acoplado entre as placas laterais e apoiado por dois rolamentos, garantindo movimento livre.

A montagem do eixo traseiro é finalizada na Figura 23D, de forma que a polia é apoiada em seu suporte através de um rolamento que, com o fechamento com a placa lateral externa ao

robô na Figura 23E, se permita o engate rápido do Módulo do Motor sem a necessidade reposicionar a correia de montagem - também exemplificada na Figura 23E.

As polias são componentes comerciais, usinadas para adequação no projeto e, juntamente com as correias, têm perfil de dentes H (passo de ½”) e foram escolhidas de forma a favorecer o fenômeno de aderência mecânica conforme (CHASE, 2009), facilitando a transmissão de torque.

Já o Módulo de Rodas é mecanicamente mais simples que o Módulo de Esteiras, podendo ser dividido em (i) roda, (ii) eixo dianteiro, (iii) eixo traseiro e (iv) placa interna. Sua montagem é ilustrada na Figura 24.

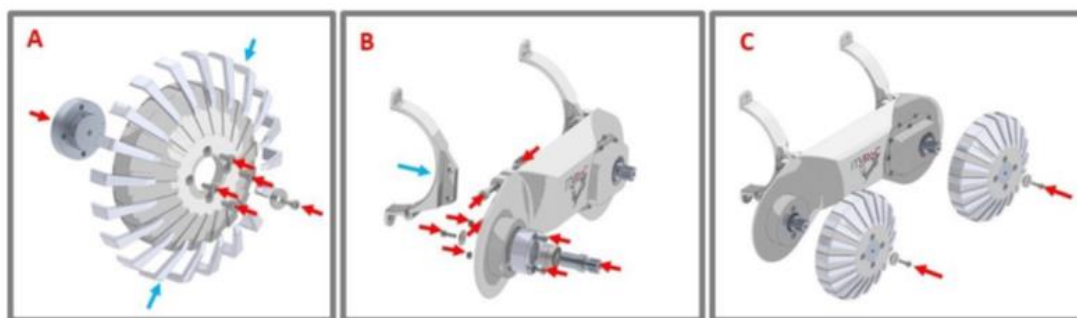


Figura 24: Montagem do Módulo de Rodas.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

A etapa Figura 24A exemplifica a montagem do conjunto das rodas. Sua montagem é feita pela fixação da estrutura da roda em si, impressa em 3D, em um cubo de roda usinado através de parafusos. Travas são também impressas em 3D, porém em material maleável, com o intuito também de favorecer o fenômeno de aderência mecânica conforme (CHASE, 2009).

Na Figura 24B é feita a montagem do eixo dianteiro. Neste caso, ele é fixado na placa interna por interface de um aro usinado, isso porque os rolamentos responsáveis pela fixação do eixo são presos através de um anel elástico, que precisa de tolerância dimensional de montagem.

Na Figura 24C é fixado as rodas tanto no eixo dianteiro quanto no traseiro. Neste caso, o eixo traseiro é composto somente pelo Módulo do Motor, alocado analogamente ao Módulo de Esteiras, na placa interna. Este faz interface com o cubo de roda, transmitindo torque às rodas.

A construção dos suportes foi feita de forma a possibilitar a intercambialidade entre esteira e rodas da forma mais simples possível, e ainda permitindo a fácil alteração do posicionamento das rodas e/ou esteiras, adicionando ângulos de cambagem. Para isso, sua construção é feita integralmente em impressão 3D, podendo ser impresso diferentes configurações de suporte de acordo com diferentes demandas.

Na Figura 25 é exemplificado o processo de troca entre o Módulo de Esteiras para o de Rodas. Na etapa A é feita a retirada dos parafusos da interface do suporte com o Módulo do Corpo, que funcionam como uma abraçadeira, fixando no corpo através do atrito de uma superfície estriada com a tubulação PVC.

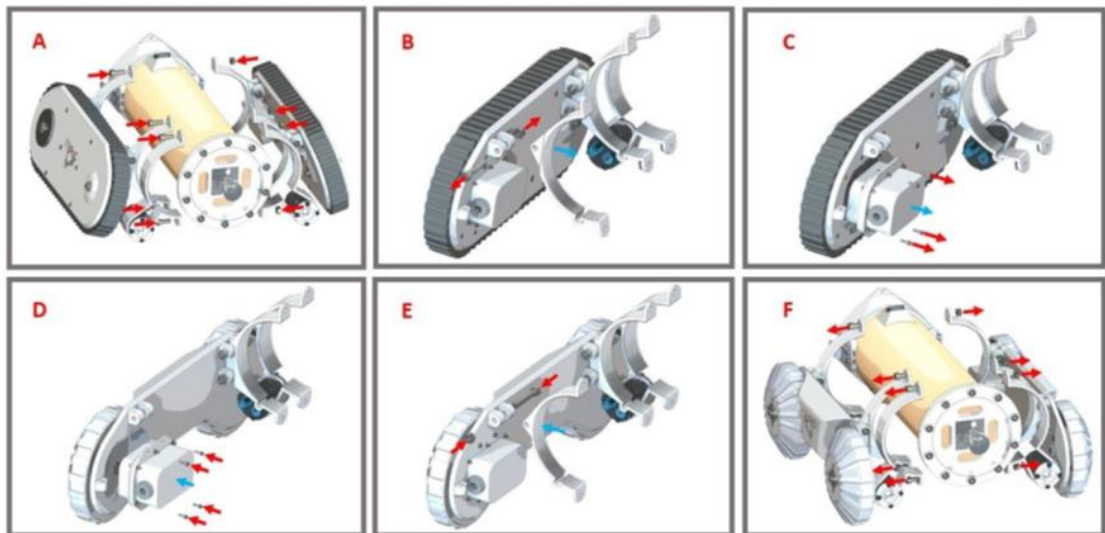


Figura 25: Módulo de Suportes.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Na Figura 25B é feita a retirada no suporte traseiro, sendo este fixo por um único apoio, por um parafuso na placa lateral interna. Os suportes dianteiros e dos LEDs são posicionados de na placa lateral interna de forma análoga, porém possuem dois pontos de fixação e não necessitam serem retirados.

Na Figura 25C é feita a retirada dos Módulos do Motor do de Rodas, e inserido no Módulo de Esteiras na Figura 25D e as Figura 25.E e 25.F são análogas a 25.B e 25.C, respectivamente. Ainda, os LEDs encaixam através de pequena interferência nos suportes e são fixados por fita adesiva dupla face, sendo seus fios guiados ao passa cabos inferior ao robô pelos demais pares de suporte.

A Figura 26 exemplifica duas configurações de suportes distintas, responsável por diferentes ângulos de cambagem para as esteiras. Na Figura 26A a inclinação é de 17° e na Figura 26B é de 35° . Diferentes inclinações podem ser aplicadas em diferentes diâmetros de tubulação, com o intuito de se aumentar a superfície de contato com a tubulação, melhorando a tração do dispositivo.

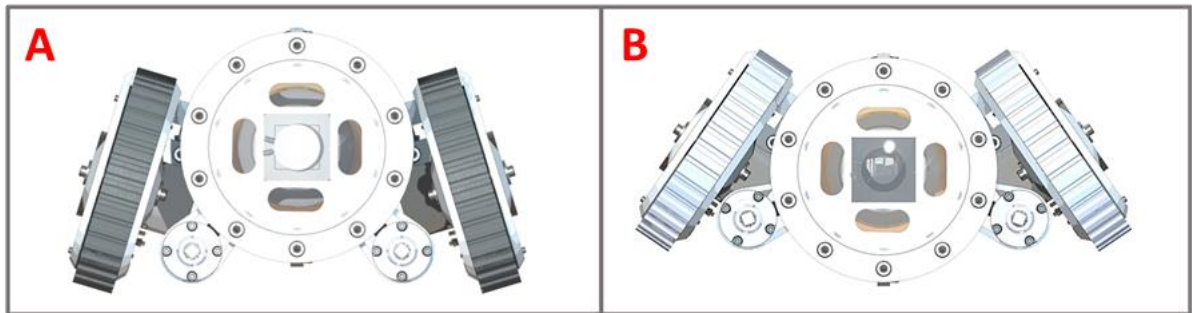


Figura 25: Diferentes configurações para o Módulo de Esteiras.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Em termos de estabilidade, devido a distribuição dos componentes, o Módulo de Esteiras possui o centro de gravidade ligeiramente abaixo do centro de gravidade do Módulo de Rodas. Desta forma, aplicando a Equação 3, se tem um ângulo de tombamento conforme Tabela 6.

Tabela 6: Ângulos de tombamento.

Ângulo de tombamento	Módulo de Esteiras	Módulo de Rodas
Lateral	59°	48°
Longitudinal	67°	60°

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

O ângulo de tombamento da Tabela 6 leva em consideração os valores de centro de gravidade e dimensões gerais das Figuras 13, 14 e 15. É possível observar que, tanto para o plano lateral quanto para o longitudinal, o ângulo de tombamento é maior para a versão por esteiras, implicando uma maior capacidade da sobreposição de obstáculos conforme (PAVAN, 2015).

Em termos de força de tração, a partir da Equação 9, foi elaborado o gráfico da Figura 27 com a força de atrito máxima em função do ângulo de inclinação conforme informações das

figuras 13 e 14, e tabelas 1 e 6. Para o coeficiente de tração utilizou o solo úmido como referência, levando em consideração que na inspeção de tubulações da mineradora é possível encontrar resquícios de minério nas tubulações.

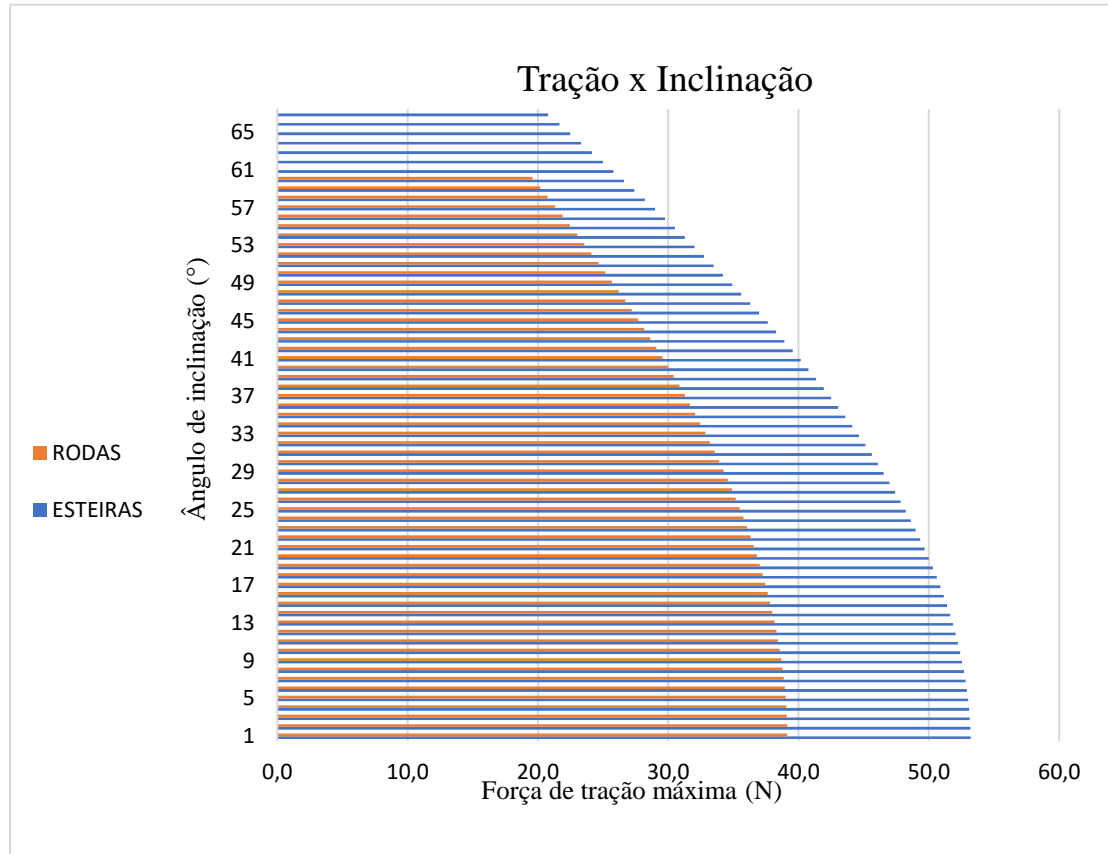


Figura 26: Tração máxima por inclinação dos módulos de rodas e esteiras
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Da Figura 27 pode-se afirmar que o robô de esteiras é capaz de desenvolver uma força de tração maior que o robô de rodas para uma mesma situação (solo úmido). Isto se dá principalmente pela diferença de peso dos dois protótipos, sendo que o de esteiras, por possuir uma massa maior, consegue uma força de atrito maior para resistir ao escorregamento (CAÑAVATE, 1965). Porém, em situação de inclinação, a força de atrito máxima do robô de esteiras decresce de forma mais brusca – enquanto a diferença para inclinação de 0° é de 14N, para o ângulo de 60° é de 7N.

Análogo ao cálculo de força de tração máxima, está o cálculo de resistência de rolamento. Aplicando a Equação 8 também em função do ângulo de inclinação, considerando coeficiente de resistência ao rolamento (Tabela 2) para a situação crítica de barro, se tem o gráfico da Figura 28.

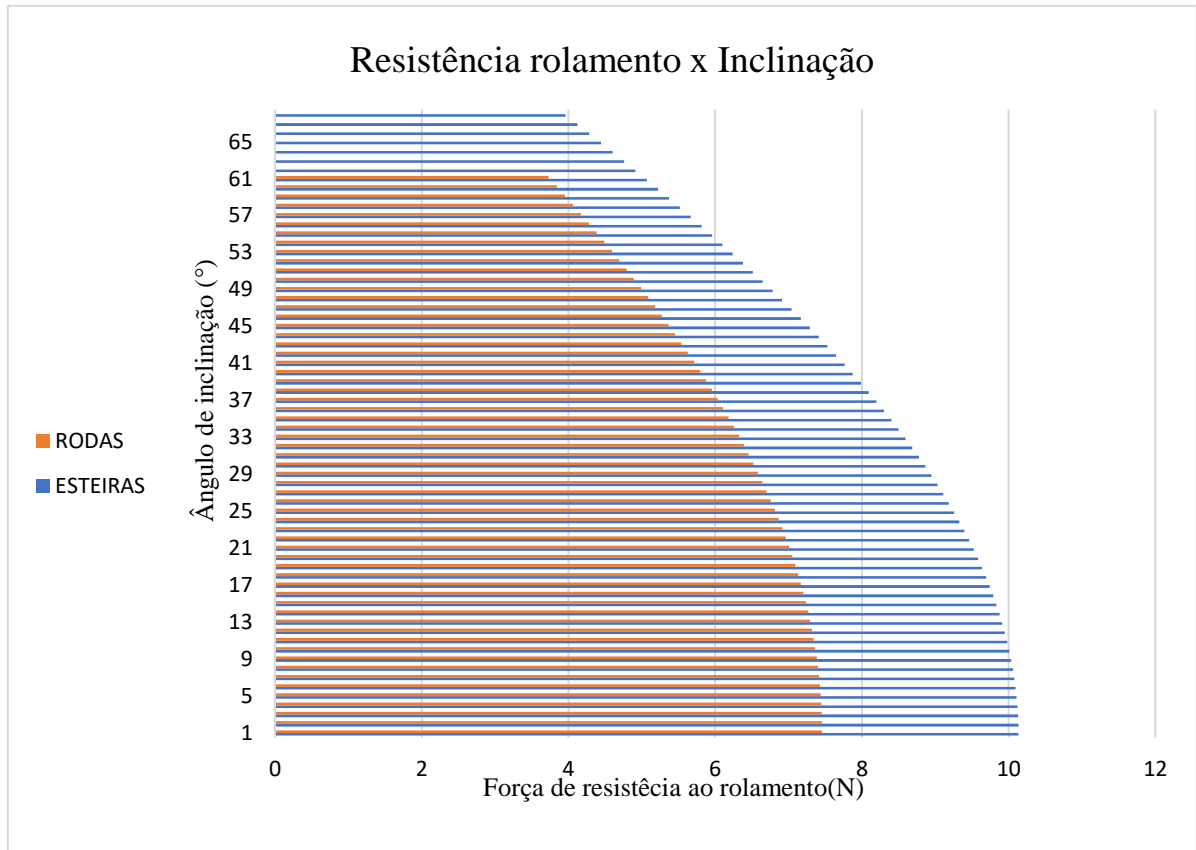


Figura 278: Tração máxima por inclinação dos módulos de rodas e esteiras.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Como pode ser observado na Figura 28, a resistência de rolamento é menor que a força de tração máxima para todos os casos, assim, de acordo com Eger (2007), tal situação garante a transmissão de potência até mesmo em terrenos de barro.

Já em termos de aderência, conforme já discutido, ambos possuem sulcos para favorecer a aderência mecânica. Porém, de acordo com Sandin (2003), as esteiras possuem maior superfície de contato com o solo, conseguindo desenvolver uma resistência por aderência melhor que as rodas.

Em termos de transmissão, ambos utilizam transmissão por estrias para transmissão do torque do motor para as rodas/polias, com diferença que o robô de esteiras ainda faz a transmissão das polias para a correia sincronizadora. Desta forma, conforme a Tabela 3, a perda por transmissão das rodas é de 0,96 e das esteiras é 0,93.

Em termos de dirigibilidade, ambos os robôs possuem sistema diferencial, de acordo com Matthew e Hiremath (2016), conseguem fazer curvas no próprio eixo. Ao aplicar a Equação 10 para a situação de velocidade angular de 1rpm na roda esquerda e 63rpm na roda (velocidade máxima produzida no motor), se tem um raio de 146mm para o robô de esteiras e

128mm para o robô de rodas. Portanto, o robô de rodas por ser menor, consegue efetuar curvas mais fechadas.

Os esforços atuantes no robô são advindos somente de seu peso e possíveis transferências de carga ao se ultrapassar obstáculos. Para o ângulo de inclinação máximo para cada um dos módulos encontrados, é aplicado a Equação 1 e 2, de forma que as transferências de carga longitudinal e lateral são estipuladas na Figura 29.

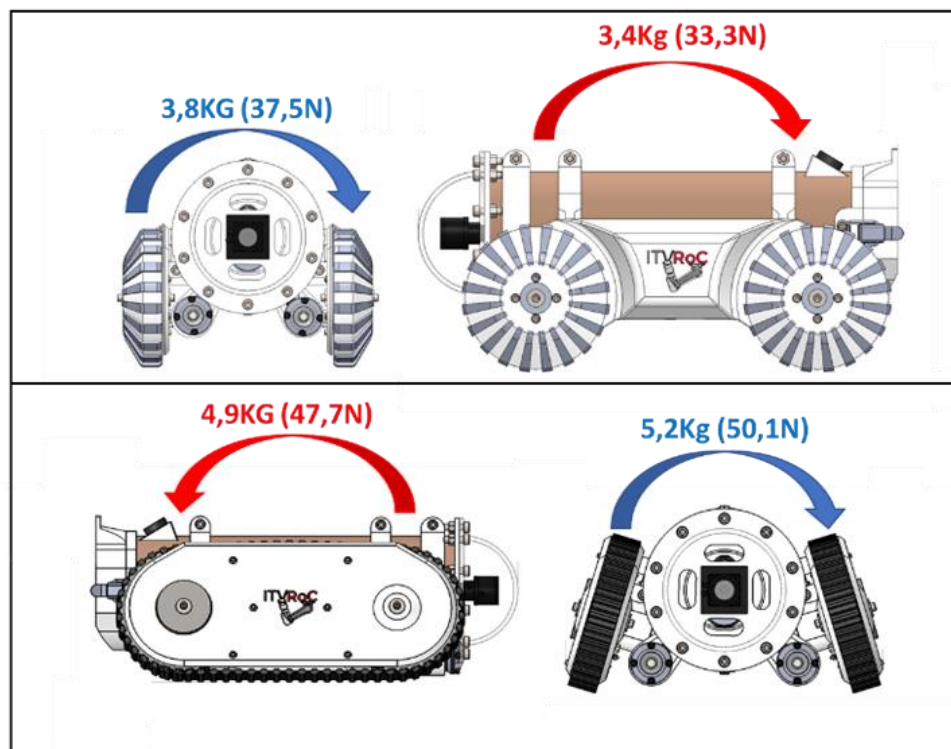


Figura 28: Diagrama de transferência de carga.
Fonte: Pesquisa Direta (2021) .

Conforme Figura 29, para situação de inclinação máxima da Tabela 6, se tem em vermelho as transferências de carga longitudinais, e em azul as transferências laterais. Tais valores exercem esforços de torção e flexão na estrutura do corpo e suportes. Ainda, cabe ressaltar que tais valores dependem do peso do robô, portanto, seu aumento ou diminuição interfere também aumentando/diminuindo os valores de transferência de carga de forma proporcional.

Assim, para aferir a rigidez do corpo do robô, foi utilizado o método de elementos finitos com as cargas máximas descritas na Figura 29 (uma vez que o Módulo do Corpo é comum para os dois sistemas de locomoção), aferindo valores de deformação máxima para diferentes tipos de material de construção para o corpo. Tais valores são descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Valores de deformação, tensão de Von Misses e peso para diferentes materiais de construção do corpo.

Material	PVC	Liga alumínio (6061)	Aço SAE 1020
Peso (g)	831	1727	5055
Deformação Máxima (mm)	0,188	0,0071	0,0092
Tensão Von Misses (MPa)	1,743	1,908	2,483
Limite de escoamento (MPa)	50	255	180

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

A Tabela 2 apresenta valores de peso, deformação e limite de escoamento para a estrutura do corpo do robô para três tipos de materiais (PVC, liga alumínio 6061-T6 e aço SAE1020). Pelo método de Von Misses, a maior tensão é muito inferior a todos os limites de escoamento, portanto, o material foi escolhido pela razão entre peso, rigidez e custo. Nesse sentido, foi escolhido o PVC por apresentar uma boa rigidez e ser cerca de dez vezes mais leve que o aço, além de tender a apresentar um custo muito inferior em relação ao alumínio.

Já para o caso dos suportes, foi considerado uma força de 50N, conforme Figura 27, nos pontos de apoio do módulo de rodas com o intuito de se verificar a integridade estrutural dos componentes. O resultado é observado nos diagramas das Figuras 30, 31, 32 e 33.

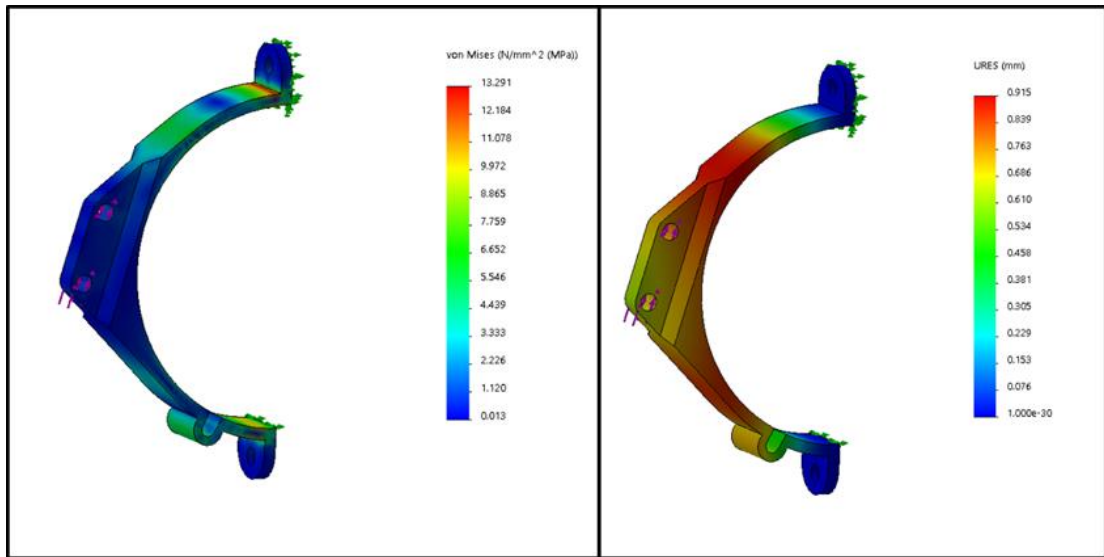


Figura 29: Tensão de Von Misses e deformação do suporte dianteiro do Módulo de Esteiras.

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

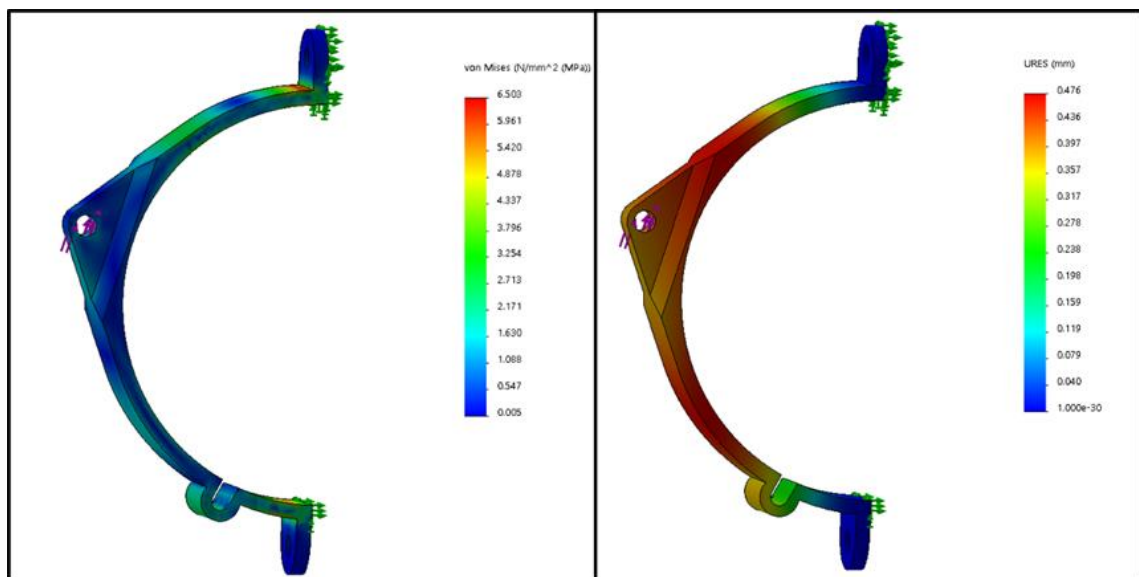


Figura 30: Tensão de Von Misses e deformação do suporte traseiro do Módulo de Esteiras.

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

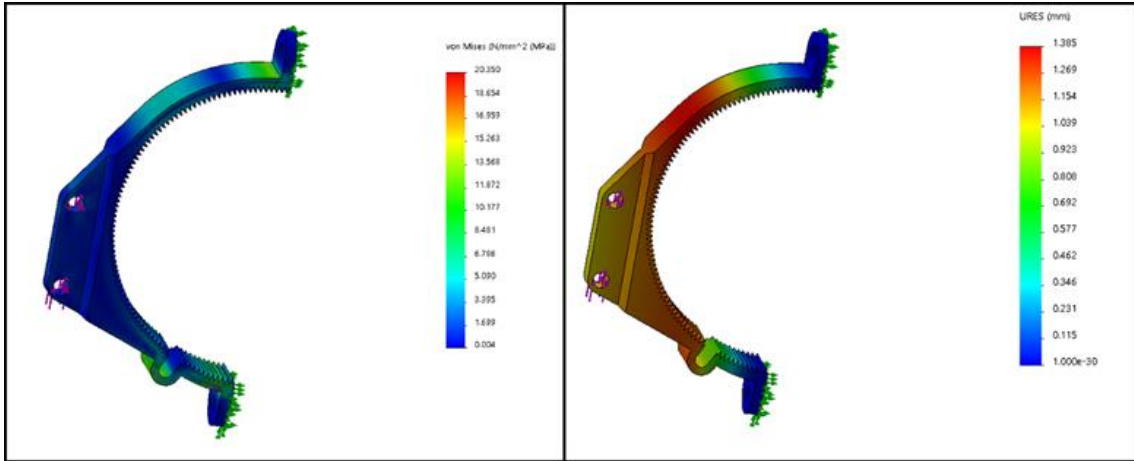


Figura 31: Tensão de Von Misses e deformação do suporte dianteiro do Módulo de Rodas.

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

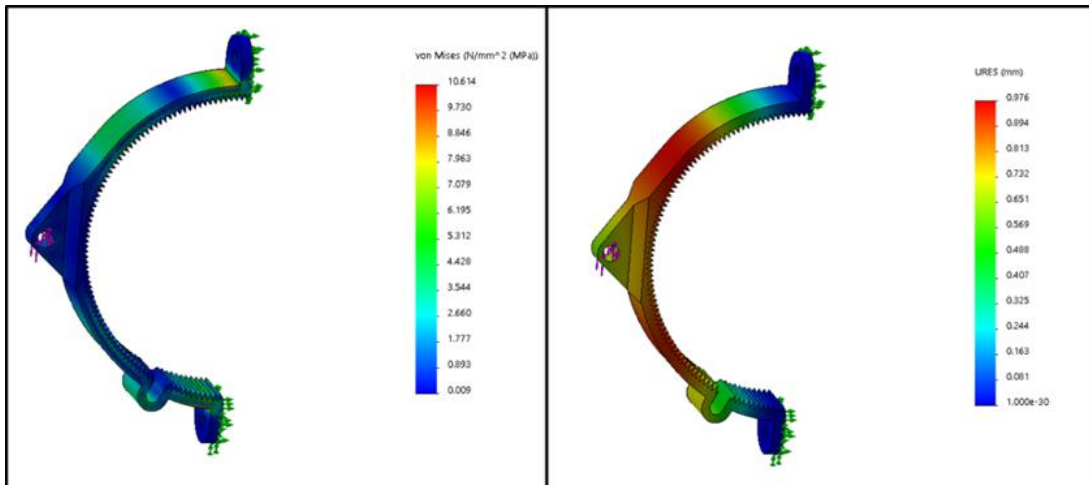


Figura 32: Tensão de Von Misses e deformação do suporte traseiro do Módulo de Rodas.

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Como pode ser observado nas Figuras 30, 31, 32 e 33, a Tensão de Von Misses está abaixo do limite de escoamento do ABS fornecido pelo programa (30MPa). As deformações, apesar de apresentar valores consideráveis (acima de 1mm para o caso do suporte dianteiro do módulo de rodas), atendem as condições de montagem.

4.2 Resultados gerais

De acordo com os parâmetros apresentados, os resultados foram tabulados em estabilidade, construção, tração, robustez, transmissão e dirigibilidade. Os resultados foram normalizados e dispostos conforme a Figura 34.

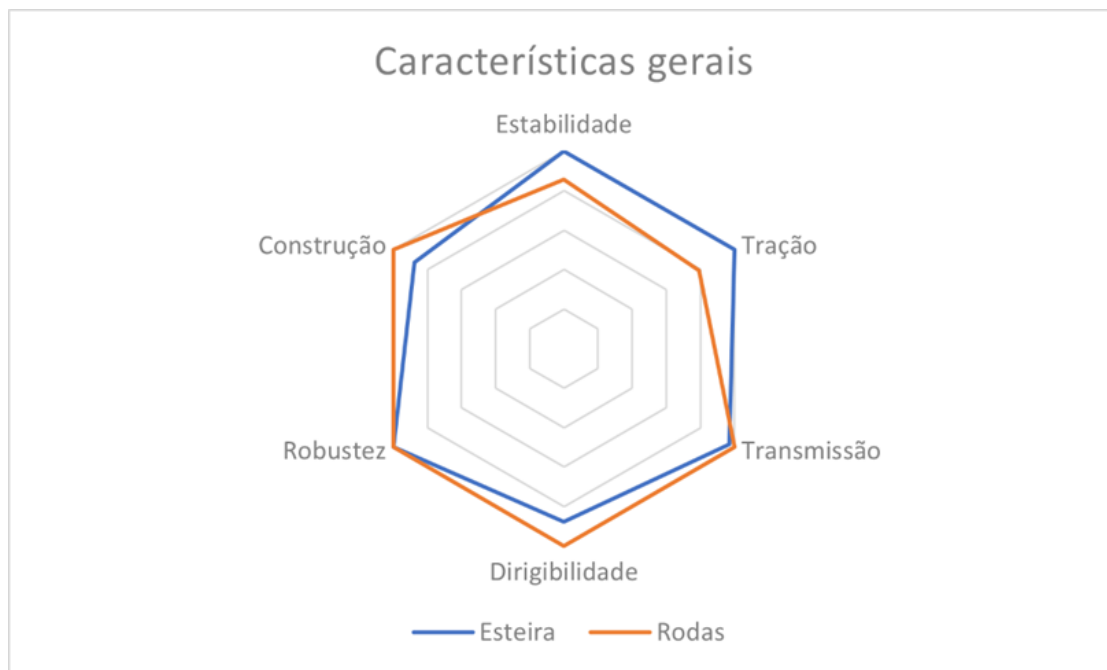


Figura 33: Comparação geral rodas e esteiras.
Fonte: Pesquisa Direta (2021).

A estabilidade é medida pelo ângulo médio de tombamento (nos planos longitudinal e lateral) de cada módulo, a construção leva em consideração o número de componentes bem como as dimensões finais, a tração é a subtração da força de tração máxima pela resistência de rolamento (acrescido de 10% para a versão com melhor adesão), a transmissão considera a quantidade de torque que é efetivamente transmitido e, por fim, a dirigibilidade esta correlacionada ao menor raio de curvatura do dispositivo.

Conforme apresentado na Figura 34, a versão de esteiras apresenta uma construção mais robusta, capaz de desenvolver mais força de tração e sobrepor maiores obstáculos (maior estabilidade). Isso em função de uma perda de dirigibilidade e uma ligeira perda de transmissibilidade. Nos quais o módulo de rodas se destaca, por possuir uma mecânica mais simples, tem construção mais compacta o que o permite ser mais dinâmico, conseguindo inspecionar tubulações de menores diâmetros (a partir de 10”) – validando (SAUDABAYEV *et al.* 2015).

Assim, o módulo de rodas é mais indicado para tubulações a partir de 10” (254mm), se adequando melhor devido sua geometria compacta, sendo capaz de desenvolver uma melhor superfície de contato e efetuando as curvas de forma mais efetiva. Por outro lado, tubulações acima de 14” (355,6mm) já se indica o módulo de esteiras, por ser possível através dos ajustes

dos módulos de suporte melhor adequação aos diâmetros, contornando obstáculos de forma mais efetiva.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de um dispositivo robótico para inspeção de tubulações industriais se pautando na necessidade operacional de uma empresa de mineração. Foi realizado um estudo teórico da aplicação de robôs em inspeção industrial com foco nos meios de locomoção mais utilizados: rodas e esteiras. Para ambos, foi feito uma contextualização histórica e apresentação de parâmetros comumente levados em conta em seus projetos mecânicos. Balizado pelos conceitos de Engenharia de Projeto apresentados, foi criado um fluxo de desenvolvimento do protótipo, dividindo o robô em Módulos de Movimentação e Módulo do Corpo.

O Módulo de Movimentação se deu por um sistema intercambiável de movimentação entre rodas e esteiras com o intuito de se obter melhor dos dois sistemas. Assim, pela análise dos parâmetros de projeto, foi evidenciado um melhor desempenho do Módulo de Esteiras em condições que requerem mais estabilidade e capacidade de tração, enquanto o Módulo de Rodas funciona melhor em tubulações de menores diâmetros que se necessita de melhor mobilidade e, portanto, dirigibilidade.

O desenvolvimento do Módulo do Motor e Módulo dos Suportes permitiram a intercambialidade entre as aplicações de forma simples e rápida, atendendo o requisito de projeto. O primeiro, em especial, também foi responsável por proporcionar ao motor disponível no laboratório a proteção contra poeira e água – certificação IP67.

O Módulo do Corpo foi desenvolvido também pensando na certificação IP67 para componentes eletrônicos embarcados, mas também funciona como base estrutural no dispositivo. Foi evidenciado pelo estudo de elementos finitos que sua estrutura é suficiente para suportar os esforços de torção e flexão do dispositivo, atendendo a aplicação.

Por fim, foi apresentado a possibilidade de fácil modificação nos ângulos de ancoragem dos módulos de Esteira e Rodas como forma de se adaptar melhor nos mais variados diâmetros de tubulação, se movendo de forma mais efetiva possível para diferentes diâmetros de tubulação.

5.1 Recomendações

Após o desenvolvimento do presente projeto é recomendável que a parte de execução seja realizada, fazendo a aquisição dos componentes comerciais, fabricação dos componentes que necessitam de impressão 3D e usinagem e, posteriormente, montagem.

Com o dispositivo robótico montado, é recomendável que se façam testes de campo para a inspeção das tubulações em área operacional, ajustando a inclinação do conjunto de suporte de forma a obter maior contato possível de acordo com o tamanho da tubulação.

Para continuação do trabalho é possível utilizar os seguintes títulos sugeridos:

- Identificação de falhas em tubulações industriais utilizando dispositivo robótico de sistema de locomoção intercambiável.
- Desenvolvimento de plano de manutenção para dispositivo robótico de inspeção de tubulações industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO (ABRACO). **Corrosão: Uma abordagem geral**. Revista Corrosão & Proteção, Rio de Janeiro, ISSN 0100-1485.

AMUCHASTEGUI, José Guilherme Baggio. **Análise de Tensões**. ENSUS: Advanced Engineering. Disponível em < <https://ensus.com.br/analise-de-tensoes/>>: Acesso: 01/11/2021.

ANDREOTI, Saulo Egberto; MENEZES, Thainan Augustinho; BORDON, Mário Eduardo. **Controle de trajetória de um robô móvel com tração diferencial usando logica nebulosa**. XVIII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2016.

ÀVILA, Sérgio Luciano. **Cálculo numérico aplicado a engenharia elétrica com MATLAB**. 1º e.d. Publicação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Florianópolis 2019.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Métodos dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. 1ª ed. Porto, Portugal. 2003

AZPURUA, Hector; ROCHA, Filipe; GARCIA, Gabriel; SANTOS, Alexandre Souza. COTA, Eduardo; BARROS, Luiz G; THIAGO, Alexandre S; PESSIN, Gustavo; FREITAS, Gustavo Medeiros. **EspeleoRobô – a robotic device to inspect confined environments**. Piscataway, In, IEEE Xplore, 19º International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2020. <https://doi.org/10.1109/ICAR46387.2019.8981627>.

BARBOSA, Josinai de Moraes; SILVEIRA, Frederico Augusto Fernandes. **Automação industrial – uma visão geral**, [s.l], [s.e], 2011. Disponível em: <https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho1/trabalho1_17.pdf>

BARTON, Neal Andrew; Farewell, Timothy Stephen; Hallet, Stephen Henry. **Using generalized additive models to investigate the environmental effects on pipe failure clean water networks**. Londres, Nature, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0077-3>

BELVEDERESI, Chiara; THOMPSON, Megan S; KOMERS, Petr E. **Statistical analysis of environmental consequences of hazardous liquid pipeline accidents** Amsterdam, Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00901>

BEN-ARI, Mordechai; MONDADA, Francesco. **Robots and their applications**, In, Elements of Robotics. 1.ed. Suíça, Springer, 2018. ISBN: 978-3-319-62532-4. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1>

BIZZO, Waldir Alves. **Geradores de vapor**. Campinas: Universidade Federal de Campinas, 2018.

BLYTH, William Alexandre. **Robotic Pipe Inspection: System Design, Locomotion and Control**. 234f. Tese (Doutorado em Engenharia de Avaliação não Destrutiva) - Colégio Imperial de Londres, Londres. 2017.

BONDÁR, Mária. **Prehistoric Innovations: Wheels and wheeled vehicles**. Budapeste. Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae. 2018. DOI: 10.1556/072.2018.69.2.3

BRÄUNL, Thomas. **Embedded Robotics: Mobile robot design and applications with embedded systems**. 2. Ed, Alemanha, Springer, 2006.

BRESCIANI Filho, Ettore (coord.); ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY Fernando Antônio da Costa. **Conformação Plástica dos Metais**. Campinas: Editora da Unicamp, 2011. 5.e.d, 383p. ISBN 978-85-86686-64-1

BRUNATTO, Silvio Francisco. **Introdução ao estudo dos aços**. [s.e], [s.l], 2016.

CAMPILHO, R.D.S.G., 2012. **Método de Elementos Finitos: Ferramenta para Análise Estrutura Publi indústria**, Porto, p. 205. ISBN 978-989-723-028-8

CAÑAVATE, J. O; HERNANZ, J. L. **Técnica de la mecanizacion agraria**. 3. ed. Madrid: Mundi Prensa, 1989. 643p.

CICCOZZI, Federico; DI RUSCIO, Davide, MALAVOLTA, Ivano; PELLICCIONE, Patrizio. **Engineering the software of robotic system**. In, 39^o Conference in Software Engineering Companion (ICSE-C), [s.l], 2017.

CIRIBELLI, Marilda Corrêa. **Como elaborar uma dissertação de Mestrado através da pesquisa científica**, Rio de Janeiro, 7 Letras, 2003.

CIRINO, Claudia; LINO, Domingos; TEIXEIRA, Marilane. **A indústria de transformados plásticos**. 1.e.d, São Paulo, Sindicato dos Químicos de São Paulo, 2017. ISBN 978-85-67407-03-6.

CHASE, Otavio Andre. **Projeto e construção de um robô móvel AGV/ROV não-holonômico com habilidade para navegação autônoma do tipo Wall-Following**. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Belém. 2009.

DIAS, Delabar Penteado; THAUMATURGO, Clelio. **Avaliação da aderência entre barras lisas de aço e concreto geopoliméricos**. Departamento de Engenharia mecânica e de matérias-Instituto Militar de Engenharia (IME) – Rio de Janeiro, 2001.

DAVIES, E. R. **Computer & machine vision: Theory, algorithms, and practicalities**, 4.e.d. Cambridge, Academic Press, 2012.

EGER, André. **Simulação e análise do desempenho longitudinal veicular sob condições dinâmicas trativas**. 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

EKUASE, Austin; ADULOJU, Cristopher Sunday; OGENEKARO, Peter; EBHOTA, Williams Saturday; DANIA, David E. **Determination of center of gravity and dynamic stability evaluation of a cargo-type tricycle**. Newark, Science and Education, 2015. DOI:10.12691/ajme-3-1-5.

FEREZINI, Jacob Junior. **Estudo do comportamento veicular em manobras de saídas de acives através de um programa computacional em MATLAB-SIMULINK**. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FERNANDES, Carlos M. C. G; MARQUES, Pedro M.T; MARTINS, Ramiro C; SEABRA, Jorge H.O. **Gearbox power loss. PART II: Friction losses in gears.** Amsterdã, Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.004>

FINAMORE, Dilhermando José. **Avaliação da corrosão uniforme e puntiforme em meio aquoso aerado utilizando a técnica de cupons de perda de massa.** 120f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, Campos dos Goytacazes, 2016.

FISHER, Michael; CARDOSO, Rafael C; COLLINS, Emily C; DADSWELL, Christopher; DENNIS, Louise A. DIXON, Claire; FARREL, Marie; FERRANDO, Angelo; HUANG, Xiaowei; JUMP, Mike; KOURTIS, Georgios; LISITSA, Alexei; LUCKCUCK, Matt; LOU, Shan; PAGE, Vicent; PAPACCHINI, Fabio; WEBSTER, Matt. **An overview of verification and validation challenges for inspection robots.** Basel, Robotics. 2021. <https://doi.org/10.3390/robotics10020067>

FRANCESCHI, Alessandro; ANTONELLO, Miguel Guilherme. **Elementos de Máquinas.** Santa Maria, RS : Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria : Rede e-Tec Brasil, 2014. 152 p. : il. ISBN 978-85-63573-61-2

FOLQUENIM, Sênita. **Afinal o que é atrito?.** Programa de pós-graduação em ensino de ciências humanas, sociais e da natureza (PPGEN). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Londrina, 2016.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo, Atlas, 2002. ISBN8522431698

GEORGANTZIA, Evangelia; GKANTOU, Michaela; KAMARIS, George S. **Aluminium alloys as structural material: A review of research.** Amsterdã, Elsevier, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>

HENAUTH, Rosangela Cristine da Silva; VASCONCELOS, Robson de Souza. **Tubulações industriais.** [s.e], Campinas, 2013. Disponível em: <<https://www.webartigos.com/artigos/tubulacoes-industriais/109829>>. Acesso em: 25 de junho de 2021

INSTITUO NEWTON C. BRAGA. [s.d]. **Estabilização dinâmica de veículos de duas rodas (MEC 131).** Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica/5464-mec13>:. Acesso em: 31/10/2021

ISMAIL, Isznir Nazmi; ANUAR, Adzly; SAHARI, Khairul Mohamed; BAHARUDDIN, Mohd Zafri; FAIRUZ, Muhammad, JALAL, Abd, SAAD, Juniza MD. **Development of In-pipe inspection robot: a Review.** Malásia, In, Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology, 2012. DOI: 10.1109/STUDENT.2012.640842

JAHANIAN, Omid; KARAMI, Ghasem. **Locomotion System in Robotic Application.** Kunming, In, International Conference on Robotics and Biometrics. 2006. DOI: 10.1109/ROBIO.2006.340290

JEFERSON, Preti; SILVEIRA, Cristiano Bertulucci; GONÇALVES, Flávio Alessandro Serrão. **Desenvolvimento de manipulador robótico cartesiano de baixo custo para movimentação de produtos em linhas de produção industriais.** São Paulo, In, 18º Seminário

de Automação e TI, 2014. Disponível em: <<https://revistamineros.com.br/novos-materiais-prolongam-a-vida-util-de-tubulacoes/>>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

JING, Chuang; DONG, Biqin; RAZA, Aikifa; ZHANG, Tiejun; ZHANG, Yuzin. **Corrosion inhibition of layered double hydroxides for metal-based systems**. Amsterdã, Elsevier, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2020.12.001>.

KELSO, MATT. Pipeline incidents continue to impact residents. **Revista Fractracker Alliance**. 2018. Disponível em: < <https://www.fractracker.org/2018/12/pipeline-incidents-impact-residents/>>

KNECHTEL, Maria do Rosário. **Metodologia da pesquisa em educação: uma abordagem teórico-prática dialogada**. Curitiba: Intersaberes, 2014.

KUMAR, MK Prunith; LAXMEESHA, Prajwal M; RAY, Santanu; SRIVASTAVA, Chandan. **Enhancement in the corrosion resistance of nanocrystalline aluminium coatings by incorporation of graphene oxide**. Amsterdã, Elsevier, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147512>

KUTZ, Myer. **Applied plastics engineering handbook: Processing, materials, and applications**. 2. ed. Amsterdã, Elsevier, 2017. ISBN: 978-0-323-39040-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04118-4>.

LANDI, Francisco Romeu. **A evolução histórica das instalações hidráulicas**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993 ?.

LEFEBER, Dirk; SAHLI, Hichem. **Autonomous mobile robot mechanical design**. Universidade de Bruxelas, [s.e]. 2005?

LEMOS, Ana Cláudia R; MENDONÇA, Kennya R. **Plataforma robótica móvel para estudos de localização, mapeamento, navegação e percepção 3D baseados em um sensor RGB-D**. Campinas, Sociedade Brasileira de Automática, 2019.

LIMA, Gabriela Vieira. **Planejamento de trajetórias para quadricópteros em tarefas de perseguição**. 115f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2536>

LIMA JUNIOR, Francisco Nonato de; SILVA, Valdemilson Ribeiro da. **Estudo comparativo entre motor CC e motor CA para economia de energia elétrica em processo industrial**. In, 16º Congresso Nacional de Iniciação Científica - Centro Universitário ENIAC, Guarulhos, 2017.

MACHADO, Guilherme Antônio Assis. **Eficiência de uma transmissão automotiva e do comportamento tribológico em regimes de lubrificação á engrenagens automotivas**. 116f. Tese (Doutorado em Ciências- Engenharia mecânica de projetos e fabricações) – Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2018.

MAGELA, Geraldo; COSTA, João Victor; NASCIMENTO, Leonardo Simões; LEMOS, Lucas de Souza; LARA, Matheus Arcanjo. **Estudo e modelagem de um sistema de redução por engrenagens cilíndricas de dentes retos**. Relatório (Graduação de Engenharia mecânica)- Instituto Federal de Minas Geais - IFMG, ARCOS, 2017.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5.ed. São Paulo, Atlas, 2003. ISBN 8522433976.

MARQUES, Carlos; CRISTÓVÃO, João; ALVITO, Paulo; LIMA, Pedro; FRAZÃO, João; RIBEIRO, Isabel; VENTURA, Rodrigo. **A search and rescue robot with tele-operated tether docking system**. Bingley, Emerald Insight, 2016. <http://dx.doi.org/10.1108/01439910710749663>.

MÀSCIA, Roberto. **Desenvolvimento e caracterização tribológica de matérias resistentes ao desgaste abrasivo para indústria mineradora de cassiterita**. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

MATHEW, Robins; HIRENATH, Somashekhar S. **Trajectory tracking and control of differential drive robot for predefined regular geometrical path**. Amsterdã, Elsevier, 2016. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.221

MAULANA, Eka; MUSLIM, M Aziz; ZAINURI, Akhmad. **Inverse kinematics of a two-wheeled differential drive an autonomous mobile robot**. Seminário sobre Energia Elétrica, Eletrônica, Comunicações, Controles e Informática, 2014

MELHADO, Silvio B. **Qualidade do projeto na construção de edifícios: aplicação ao caso das empresas de incorporação e construção**. 294f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

MESTER, Gyula. **Introduction to control of mobile robots**. Marka Oreskovica, [s.e], 2006.

MILLIKEN, William F; MILLIKEN, Douglas F. **Race car vehicle dynamics**. Warrendale, Society of Automotives Engineers, 1995.

MORAVEC, Hans P; ELFES, Alberto. **High resolution maps from wide angle sonar**. Pittsburgh, Carnegie-Mellon University, 1984. Disponível em: <<https://frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/robot.papers/1985/al2.html>>

MÜLLER, Cláudio José. **Modelo de gestão integrando planejamento estratégico, sistemas de avaliação de desempenho e gerenciamento de processos (MEIO- Modelo de Estratégia, Indicadores e Operação)**. 292f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003

NASCIMENTO, Filipe Miguel Ferreira. **Processamento por fricção linear: Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-o e AA7022-T6**. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)- Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa , Lisboa , 2007.

NEPOMUCENO, Erivelton Geraldo. **Métodos dos elementos finitos**. UNIVERSIDADE DE JOÃO DEL-REI, São João del Rei, 2016. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/nepomuceno/mn/22MN_EDO5.pdf. Acesso em: 30/10/2021.

NICOLAZZI, Lauro Cesar; ROSA, Edison; LEAL, Longuinho da Costa Machado. **Uma introdução a modelagem quase-estática de veículos automotores de rodas**. Publicação interna do GRANTE- Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, Florianópolis, 2001.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4.ed, Porto Alegre, Bookman, 2013. ISBN: 9780136123705

OLIVEIRA, Liliane de Azevedo; LOTI, Vinícius da Silva; QUEIROZ, Thiago Alves de. **Estabilidade horizontal de carga no problema de carregamento de um único contêiner**. p. 31-44. In: *Tecnologias em pesquisa: engenharias*. São Paulo: Blucher, 2017. ISBN: 9788580392234, DOI 10.5151/9788580392234-02

OLIVEIRA, Walter Edgley. **Estudo experimental da influência do cobrimento na interação aço-concreto em elementos sujeitos á compressão**. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ORTIZ-ACOSTA, Denisse; MOORE, Tanya. **Functional 3D printed polymeric materials (Cap 1, pp. 1-15), In, Functional Materials**. Londres, IntechOpen, [s.e], 2018. ISBN: 978-1-78984-058-2. DOI: 10.5772/interchopen.80686.

OSTROWSKI, James P. **Robotic Locomotion Systems, Unconventional**. Pennsylvania, In, *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 3ed, [s.e.], pp. 263-273. 2002.

PATTON, Ken; COPIOLI, Paul. **Robot Drive System Fundamentals**. FRC Conferência, Atlanta, 2007.

PAVAN, Leandro. **Otimização do comportamento dinâmico lateral e vertical de um ônibus modelado como sistema multicorpo**. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/141136>>

PAULA, Adriano Rodrigues. **Controle tolerante a falhas aplicado ao modelo de um robô móvel com restrições não holonômicas**. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/27096/1/2017_dis_arpaula.pdf>

PEREIRA, Cláudia Azevedo; SOARES, Jorge Barbosa; PONTES, Ivaldo Dário da Silva filho; BRANCO, Verônica Teixeira Castelo. **Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes**. [s.l.], ANPET, Transporte, 2012. <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i2.525>

PRÄSS, Alberto Ricardo. **Plano Inclinado**. Física.net: O canal da física na internet, [s.d]. Disponível em: <https://www.fisica.net/mecanicaclassica/>. Acesso em 31/10/2021

QUARTUCCIO, Jonathan T. **Gravitação universal clássica e as forças de maré**. Accelerating the world's research. Departamento de pesquisa aeroespacial (DPA) – Campinas, 2017.

RASHID, Mohd Zamzuri Ab; YAKUB, Mohd Fitri Mohd; SALIM, Sheikh Ahmad Zaki bin Shaikh; MAMAT, Normaisharah; PUTRA Sharifah Munawwarah Syed Mohd; ROSLAN, Shairatul Akma. **Modeling of the in-pipe inspection robot: A comprehensive review**. Amsterdã, Elsevier, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107206>.

REDZONE. **RedZone homepage**. 2021. Disponível em: <<https://redzone.com/i>>.

REFATTI, Fernando. **Determinação das forças atuantes na suspensão dianteira de um veículo baja SAE**. 49f. Trabalho Final de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, Belo Horizonte, 2015.

ROCHA, Filipe; AZPÚRUA, Héctor; GARCIA, Gabriel; COTA, Eduardo; COSTA, Ramon R; FREITAS, Gustavo. **Análise em comparação de mobilidade de um robô com locomoção reconfigurável**. In, Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, v. 1, 2019, Disponível em: <<https://proceedings.science/sbai-2019/papers/analise-e-comparacao-de-mobilidade-de-um-robo-com-locomocao-reconfiguravel>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

ROCHA, Vinícius Resende. **Análise de uma suspensão para um veículo de fórmula SAE**. 46f. Monografia (Bacharel em Engenharia Automotiva)- Universidade de Brasília, Brasília, 2015. **ROBOTIS e-Manual**. Disponível em <<https://emmanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-64/>>. 2021. Acesso em: 15 nov. 2021.

RODRIGUES-LOSADA, Diego; MATIA, Fernando, GALAN, Ramon; JIMENEZ, Agustin. **Blacky, an interactive mobile robot at a trade fair**. Washington, In, International Conference on Robotics & Automation, 2002. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1014341

ROSA, Edison. **Análise de resistência mecânica: Mecânica da fratura e fadiga**. Grante, [s.e], Grupo de análise e projeto mecânico, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2002

ROSLIN, Nur Shahida; ANUAR, Adzly; JALAL, Muhammad Fairuz Abdul; SAHARI, Khairul Selleh Mohamed. **A review: Hybrid locomotion of In-pipe inspection robot**. Amsterdã, Elsevier, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.335>

RUBIO, Francisco; VALERO, Francisco; LLOPIS-ALBERT, Carlos. **A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications**. California, SAGE Journals, 2019. DOI: 10.1177/1729881419839596

SAUDABAYEV, Artur; KUNGOZHIN, Farabi; NURSEITOV, Damir; VAROL, Huseyin Atakan. **Locomotion strategy selection for a hybrid mobile robot using time of flight depth sensor**. Londres, Hindawi, 2015. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/425732>

SANDIN, Paul E. **Robot Mechanism and mechanical devices**. 1.ed, [s.l], 2003. DOI: 10.1036/007142928X.

SHIGLEY, Joseph E; MISCHKE, Charles R; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7.ed, Porto Alegre, Bookman, 2005. ISBN 9788536305622.

SILVA, Adriano; SILVA, Leonardo Rocha; ALMEIDA, Paulo Lucas de Oliveira; VIDAL, Leonardo Carvalho. **Robótica na Indústria Atual**. Associação Educacional Dom Bosco, Rio Janeiro, 2015.

SILVA, Cláudio Roberto Àvila Júnior. **Análise de confiabilidade estrutural adaptativa de componentes mecânicos utilizando análise de sensibilidade**. 136f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. SILVA, Gabriel Berton Pereira. **Desenvolvimento do projeto mecânico de uma máquina alimentadora de barras para centros de torneamento**. 229f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto 2017.

SILVA, Renato Pacheco. **Avaliação do desgaste erosivo água-areia e água-ar-areia em tubulações de 4” através de técnicas de CFD e de experimentos laboratoriais.** 61f. Dissertação (Mestrando em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SOUZA, Paulo Furtado de. **Estudo experimental sobre o comportamento de dutos metálicos com geometria em ziguezague.** 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SOUSA, Carlos Alberto. **Desenvolvimento de algoritmo de controle de tração para regeneração de energia metroviária- ACTREM: Melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária.** 176f. Tese (Doutorado em Ciências- Engenharia de Automação Elétrica)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

STARK, Henry; WOODS, John W. -**Probability, random processes, and estimation theory for engineers.** Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1986.

STOJANOVIC, Blaza; BUKVIC, Milan; EPLER, Igor. **Application of aluminum and aluminum alloys in engineering.** [s.l], SpringerOpen, 2018. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2018.3.2.2>.

SHARING ROBOTIS FOR EDUCATION, 2021. **Atrito, Aderência e Resistência ao rolamento.** Disponível em: <https://www.share-robotics.com/mcm-3-atrito-%C3%A0der%C3%A0ncia-resist%C3%A0ncia>:. Acesso em: 31/10/2021.

TÂTAR, Mihai Olimpiu; HAIUC, Florin; MÂNDRU, Dan. **Desing of a synchro-drive omnidirectional mini-robot.** Suíça, Trans tech publications, 2015. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.220-221.161

TELLES, Pedro C Silva. **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem.** 10.ed, Rio de Janeiro, LTC, 2005.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Estimativa da capacidade de tração de tratores agrícolas.** Departamento de Engenharia, área de máquinas e energia na agricultura. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. [s.d]

XENOS, Harilaus Georgius d’Philippos. **Gerenciando a manutenção produtiva: Melhores práticas para eliminar falhas nos equipamentos e maximizar a produtividade.** 2.ed, Belo Horizonte, Falconi, 2014.

WERLANG, Rafael Brum; SILVEIRA, Fernando Lang. **A física dos pneumáticos.** Caderno Brasileiro de Ensino em Física – Periódicos Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. DOI: 10.5007/2175-7941.2013v30n3p614

WOLF, Denis Fernando; Simões Eduardo do Valle; OSÓRIO, Fernando S; TRINDADE JUNIOR, Onofre. **Robótica Móvel Inteligente: da simulação às aplicações no mundo real.** In XXIX Congresso da Sociedade Brasileira de computação, Bento Gonçalves, 2009.

YAMASHIDA, Rodrigo Yassuda. **Modelagem e controle de estabilidade aplicada a veículos de tração integral.** 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/332763>>

YOUNG, Hugh D; FREEDMAN, Roger A. **Física mecânica I**. 14° ed. [s.l], Pearson Universidades, 2015. ISBN: 9798543005683

ZAPAROLLI, Domingos. O avanço da impressão 3D. **Pesquisa FAPESP**. 2019. Disponível em: < <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-avanco-da-impressao-3d/>>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

ZHANG, Xu; LI, Mingyang; LIM, Jian Hui; WENG, Yiwei; TAY, Yi Wei Daniel; PHAM, Hung; PHAM, Quang-Cuong. **Large-Scale 3D printing by team of mobile robots**. Amsterdã, Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.004>

ZHAO, Jing-Shan; LIU, Xiang; FENG, ZHI-JING; DAI, Jian S. **Design of an Ackermann-type steering mechanism**. California, SAGE Journals, 2015. DOI: 10.1177/0954406213475980

ZOLIN, Ivan. **Materiais de construção Mecânica**. 65f. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2008.

ZONFRILLI, Fabio; WOLLHERR, Dirk; NAKAMURA, Yoshihiko. **Walking controlo of the humanoid UT-Theta**. [s.l], In, 12th International Conference on Advances Robotics. 2005. DOI: 10.1109/ICAR.2005.1507485.