



**INSTITUTO
TECNOLÓGICO
VALE**

**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**DESENVOLVIMENTOS E APLICAÇÕES DE DISPOSITIVOS ROBÓTICOS EM
AMBIENTES DE MINERAÇÃO: PROPOSTA DE SISTEMA DE VEDAÇÃO PARA O
ESPELEOROBÔ II E FERRAMENTA DE REMOÇÃO DE COBERTURA DE
BORRACHA PARA EMENDA DE CORREIAS**

Luiz Guilherme Dias de Barros

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2021**

Luiz Guilherme Dias de Barros

**DESENVOLVIMENTOS E APLICAÇÕES DE DISPOSITIVOS ROBÓTICOS EM
AMBIENTES DE MINERAÇÃO: PROPOSTA DE SISTEMA DE VEDAÇÃO PARA O
ESPELEOROBÔ II E FERRAMENTA DE REMOÇÃO DE COBERTURA DE
BORRACHA PARA EMENDA DE CORREIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Gustavo Medeiros Freitas,
D.Sc.

Coorientador: Philip von Pritzelwitz, D.Sc.

Ouro Preto
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B277d Barros, Luiz Guilherme Dias de.

Desenvolvimentos e aplicações de dispositivos robóticos em ambientes de mineração [manuscrito]: proposta de sistema de vedação para o EspeleoRobô II e ferramenta de remoção de cobertura de borracha para emenda de correias. / Luiz Guilherme Dias de Barros. - 2021.

80 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas.

Coorientador: Dr. Philip von Pritzelwitz.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Robótica. 2. Minas e mineração. 3. Robôs - Sistemas de controle. 4. Automação de processos. I. Freitas, Gustavo Medeiros. II. Pritzelwitz, Philip von. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.
PROCESSOS DE MIN.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luiz Guilherme Dias de Barros

Desenvolvimentos e Aplicações de Dispositivos Robóticos em Ambientes de Mineração: Proposta de Sistema de Vedação para o EspeleoRobô II e Ferramenta de Remoção de Cobertura de Borracha para Emenda de Correias

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Aprovada em 09 de Setembro de 2021

Membros da banca

Doutor - Gustavo Medeiros Freitas - Orientador - Universidade Federal de Minas Gerais
Doutor - Philip von Pritzelwitz - Instituto Tecnológico Vale
Doutor - Gustavo Pessin - Instituto Tecnológico Vale
Doutor - Marcelo Becker - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

Gustavo Medeiros Freitas, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 05/11/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRAD EM INSTRUMENTAÇÃO CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 25/11/2021, às 22:16, 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 **0250009** e o código CRC **96C17377**.

*A Deus, Meus Pais, e Todos que de
alguma forma contribuíram para a
chegada até aqui.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por me abençoar a cada dia e me fazer capaz de ouvir e aprender um pouco com cada pessoa que cruzou o meu caminho.

A meus pais Tereza e Eduardo, por me proporcionarem um lar saudável e cheio de amor que me permitiu alçar voos longos e correr atrás dos meus sonhos e objetivos sem medo de arriscar uma nova oportunidade. A minha irmã Sâmela por todo apoio nos momentos difíceis no decorrer do processo.

Ao Gustavo por acreditar na minha capacidade, me dar a primeira oportunidade como bolsista de graduação e todas as outras, o que me fez ter amor pela robótica e pela pesquisa, e escolhê-las como carreira. Sei que não fui um orientando fácil ‘rsrs’, mas sua cobrança diária me fez ser mais crítico com minhas entregas e sempre pensar que há uma forma de melhorar os resultados apresentados.

Ao Philip, por ser mentor, me incentivar cada dia a ser um engenheiro melhor, me desafiar diariamente a sair da zona de conforto e buscar por soluções simples, inovadoras e funcionais. Sem sua orientação eu não conseguiria chegar ao fim deste trabalho. Por último, mas não menos importante, obrigado pelas conversas diárias (quando o trabalho presencial ainda era realidade), que faziam os momentos de estresse se tornarem mais leves.

Entre erros e acertos, brincadeiras e desentendimentos, sei que fiz dois grandes amigos que espero levar para o resto da vida.

A todos do laboratório de robótica e ITV que de algum modo contribuíram para o meu crescimento e desenvolvimento diário, além das brincadeiras e ‘*happy hours*’. Sem o ambiente agradável e amigoso que o ITV proporciona, certamente seria mais difícil enfrentar os desafios propostos. Não vou citar nomes para não correr o risco de esquecer alguém ‘rsrs’.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), do Instituto Tecnológico Vale (ITV), da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e da Vale S.A..

*“A verdadeira viagem de descobrimento não
consiste em procurar novas paisagens, mas em
ter novos olhos.”
(Marcel Proust).*

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESENVOLVIMENTOS E APLICAÇÕES DE DISPOSITIVOS ROBÓTICOS EM AMBIENTES DE MINERAÇÃO: PROPOSTA DE SISTEMA DE VEDAÇÃO PARA O ESPELEOROBÔ II E FERRAMENTA DE REMOÇÃO DE COBERTURA DE BORRACHA PARA EMENDA DE CORREIAS

Luiz Guilherme Dias de Barros

Setembro/2021

Orientadores: Gustavo Medeiros Freitas

Philip von Pritzelwitz

Com o aumento da demanda por segurança nas operações e com a ascensão da robótica imposta pela terceira revolução industrial, os dispositivos robóticos passaram a ser mais comumente empregados para tarefas com risco expressivos ao trabalhador ou em locais onde a precisão do processo é uma exigência. Na mineração especificamente, dispositivos robóticos móveis tem sido utilizados cada vez com uma maior frequência para inspeção de ativos e locais de difícil acesso e/ou espaços confinados. Em outra frente, a Vale também emprega robôs manipuladores fixos em tarefas como lavagem de caminhões fora de estrada, movimentação de amostras em laboratório, solda de vagões, dentre outros. Estas tarefas contém particularidades de processo ou esforço elevado para serem realizadas por humanos. Esta dissertação trabalha com as duas frentes citadas, e em uma delas apresenta o desenvolvimento do projeto de vedação de um dispositivo robótico móvel, denominado EspeleoRobô II, a partir da versão I desse mesmo robô, para implementação de um sistema de vedação que permitisse inspeções em locais parcialmente alagados e/ou com lama. Foram realizados testes de campo, que validam a metodologia de vedação proposta e infere ao robô um grau de proteção IP-67. A outra frente apresenta um estudo inicial para implementação de um sistema automatizado para preparação de emenda de correias, especificamente na etapa de remoção da cobertura de borracha da correia, onde uma ferramenta rotativa acoplada a um braço manipulador e posicionada ao lado do transportador realiza a tarefa de corte. Atualmente este processo é manual e expõe o trabalhador a diversos riscos como utilização de materiais cortantes e condições ergonômicas adversas. Para validar a proposta, foi desenvolvida uma bancada de testes instrumentada que simula a tarefa de corte

para estimativa dos esforços envolvidos no processo de corte automático. Os resultados apresentados até o momento validam a ferramenta como possível solução aplicável no processo.

Palavras-chave: Robótica, Mineração, Robôs de Inspeção, Robôs manipuladores, Automação de Processos.

Macrotema: Logística; **Linha de Pesquisa:** Robótica Aplicada à Mineração; **Tema:** Saúde e Segurança.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF ROBOTIC DEVICES FOR INSPECTION AND AUTOMATION IN MINERAL PRODUCTION AREAS

Luiz Guilherme Dias de Barros

September/2021

Advisors: Gustavo Medeiros Freitas

Philip von Pritzelwitz

With the increasing demand for safety in operations and the rise of robotics imposed by the third industrial revolution, robotic devices are now more commonly used for tasks with significant risk to the worker or in places where process precision is required. In mining specifically, mobile robotic devices are increasingly used to inspect assets and hard-to-reach locations and/or confined spaces. With this, it is possible to safely inspect places where human access is restricted and with high risks to their health and safety. Vale also employs fixed manipulator robots in tasks such as washing off-road trucks, moving samples in the laboratory, welding wagons, among others. These tasks contain particularities of process or high effort to be performed by humans. This dissertation works with the two fronts mentioned. One of them presents the development of the sealing project of a mobile robotic device from a previous version of EspeleoRobô, called EspeleoRobô II, to implement a sealing system that allowed inspections in partially flooded and/or muddy places. Field tests were carried out to validate the proposed sealing methodology and infer an IP-67 degree of protection to the robot. The other application presents an initial study for implementing an automated system to prepare belt splicing, specifically in removing the belt's rubber cover step, where a rotary tool coupled to a manipulator's arm and positioned beside the conveyor performs the cutting task. Currently, this process is manual and exposes the worker to several risks when performing it, such as the use of cutting materials and adverse ergonomic conditions. We developed an instrumented test bench to validate the proposal, which simulates the cutting task to estimate the efforts involved in the automatic cutting process. The results presented so far validate the tool as a possible solution applicable in the process.

Keywords: Robotics, Mining, Inspection's Robot, Manipulators Robots, Process Automation.

Macrotheme: Logistics; **Research Line:** Robotics Applied to Mining; **Theme:** Health and Safety.

Lista de Figuras

1.1 Diagrama do sistema autônomo de caminhões.	18
1.2 Dispositivos robóticos em inspeções industriais.	19
1.3 Dispositivos robóticos de inspeção em áreas Vale.	19
1.4 Aplicações de manipuladores robóticos em atividade na Vale.	20
1.5 Construção básica de uma correia de cabo de aço.	23
1.6 Algumas tarefas da preparação da emenda sendo realizadas.	23
2.1 Algumas das possíveis configurações do sistema de locomoção do EspeleoRobô.	28
2.2 Evolução do EspeleoRobô no decorrer dos anos.	29
2.3 Comparativo entre as versões I e II do EspeleoRobô.	30
2.4 Diagrama de uma arquitetura proposta e componentes eletrônicos.	31
2.5 Posicionamento da junta de vedação e caixa pronta para teste de imersão.	35
2.6 Aplicação de junta líquida para teste de imersão.	35
2.7 Resultados dos testes de vedação com diferentes propostas.	36
2.8 Vista explodida das tampas superior e inferior do EspeleoRobô versão I e II.	37
2.9 Aplicação de alguns dos métodos de vedação propostos ao dispositivo.	37
2.10 Passo 1 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.	38
2.11 Passo 2 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.	39
2.12 Passo 3 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.	39
2.13 Passo 4 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.	40
2.14 Passo 5 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.	41
2.15 Passo 6 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.	42
2.16 Teste de validação da vedação na empresa fabricante dos componentes.	43
2.17 Deformação na tampa superior causada pela cortiça emborrachada.	43
2.18 Robô submerso no teste de vedação e cronômetro indicando o tempo de permanência debaixo d'água.	44
2.19 Robô sendo aberto após teste de vedação para comprovar a não entrada de água.	45
2.20 Possíveis pontos de atenção observados pela câmera durante a inspeção.	45
2.21 Inspeção realizada em ambiente ferroviário.	46
2.22 Água no interior do moinho de bolas antes da inspeção.	47
2.23 Solução robótica proposta para inspeção de moinhos de bola.	47
2.24 Inspeção do extravasor de barragem.	48

2.25	Visão das câmeras do robô evidenciando o nível de água no extravasor.	48
2.26	EspeleoRobô posicionado na entrada do túnel em Capanema.	49
2.27	Visão das câmeras do robô durante a inspeção do túnel em Capanema.	49
3.1	Proposta de um sistema automático para emenda de correias de cabo de aço.	51
3.2	Etapas iniciais do procedimento de preparação da emenda de correias.	52
3.3	Filetamento dos cabos na preparação da emenda de correias de cabo de aço.	53
3.4	Etapas do processo de montagem da emenda manual.	53
3.5	Últimos passos da montagem do conjunto da emenda.	54
3.6	Etapas de inspeção propostas para o ROSI.	55
3.7	Dispositivos robóticos para substituição de rolos em transportadores.	56
3.8	Equipamento para remoção de borracha durante a recapagem de pneus.	57
3.9	Principais componentes da bancada de ensaios projetada.	57
3.10	Curva de calibração das células de carga.	59
3.11	Diagrama de instrumentação da bancada de ensaios.	59
3.12	Diagrama de forças na ferramenta de corte do procedimento automático.	60
3.13	Forças atuantes na bancada de ensaios.	62
3.14	Corrente e rotação dos motores no teste de validação.	63
3.15	Medição das células de carga no teste de validação.	64
3.16	Rotação do motor de corte nos ensaios de corte.	66
3.17	Rotação do motor de avanço nos ensaios de corte.	66
3.18	Corrente do motor de corte nos ensaios de corte.	67
3.19	Corrente do motor de avanço nos ensaios de corte.	68

Lista de Tabelas

1.1	Transportadores de correias nos portos operados pela Vale no Brasil.	22
2.1	Condições de contorno utilizadas no ensaio de validação dos métodos de vedação.	34
3.1	Dados técnicos dos motores utilizados na bancada de ensaios.	58
3.2	Estimativa da potência consumida pelos motores no teste de validação.	63
3.3	Cálculo dos principais esforços atuantes no processo de corte automático para seleção de um manipulador adequado.	64
3.4	Parâmetros predefinidos para os ensaios com a bancada de testes.	65
3.5	Resultados de potência consumida pelo motor de corte nos ensaios de bancada.	68
3.6	Resultados de potência consumida pelo motor de avanço nos ensaios de corte.	69

3.7 Torque médio do motor de corte nos ensaios de bancada.	70
3.8 Torque médio do motor de avanço nos ensaios de corte.	70
3.9 Resultados da força horizontal de corte.	70

Lista de Siglas e Abreviaturas

EFC	Estrada de Ferro Carajás
ES	Espírito Santo
GDL	Graus de Liberdade
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês <i>Global Positioning System</i>)
IMU	Unidade de Medição Inercial (do inglês <i>Inertial Measurement Unit</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (do inglês <i>International Organization for Standardization</i>)
ITV	Instituto Tecnológico Vale
MA	Maranhão
MG	Minas Gerais
PA	Pará
R.I.A.	Instituto de Robótica da América (do inglês <i>Robot Institute of America</i>)
RIC	Trocador de Rolos Robótico (do inglês <i>Robotic Idler Changer</i>)
TC	Transportadores de Correia
TCLD	Transportador de Correia de Longa Distância
UAV	Veículo Aéreo não Tripulado (do inglês <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)
Vale	Vale S.A.

Lista de Símbolos

A	Ampère
Hz	Hertz
g	gramas
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-força
Km	Quilômetros
Kw	Kilowatt
m	metros
mm	milímetros
mV	milivolt
N	Newtons
N.m	Newtons-metro
rad/s	Radianos por segundo
RPM	Rotações por minuto
s	segundos
V	Volts
Vcc	Volts de Corrente Contínua

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Motivação	20
1.1.1 Projeto de Vedação e Aplicações Industriais do Dispositivo Robótico para Inspeções Industriais e de Ambientes Confinados	21
1.1.2 Procedimento Automático para Emenda de Correias de Cabo de Aço	22
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivos Gerais	24
1.2.2 Objetivos Específicos	24
1.3 Contribuições da Dissertação	25
1.4 Organização do Texto	27
2 PROJETO DE VEDAÇÃO E APLICAÇÕES DO DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA INSPEÇÕES INDUSTRIAIS E DE AMBIENTES CONFINADOS - ESPELEOROBÔ II	28
2.1 O EspeleRobô	29
2.1.1 Equipamentos Embarcados	31
2.2 Técnicas Básicas de Vedação	32
2.2.1 Cordão de Borracha (<i>O-ring</i>)	32
2.2.2 Junta Líquida (Loctite 518)	32
2.2.3 Papelão Hidráulico (Guarnital)	33
2.2.4 Cortiça Emborrachada	33
2.2.5 Silicone Neutro	33
2.2.6 Retentores	33
2.3 Teste de Conceito de Algumas Técnicas de Vedação	34
2.3.1 Metodologia de Ensaio	34
2.3.2 Resultados	35
2.4 Projeto de Vedação	36
2.4.1 Montagem do Sistema de Vedação	37
2.5 Testes de Validação do Sistema de Vedação	42
2.5.1 Validação da Vedação Aplicada no Robô	42
2.5.1.1 Ajustes Pós Teste Inicial e Montagem da Nova Vedação Proposta	43

2.5.1.2	Validação da Nova Vedação Proposta	44
2.6	Avaliação do Robô em Ambientes Industriais	45
2.7	Considerações Finais	50
3	PROCEDIMENTO AUTOMÁTICO PARA EMENDA DE CORREIAS DE CABO	
	DE AÇO	51
3.1	Procedimento de Emenda Manual	52
3.2	Soluções existentes para inspeção e manutenção de transportadores	54
3.3	Projeto da bancada de testes instrumentada para	
	remoção de borracha da correia	56
3.3.1	Projeto Mecânico	56
3.3.2	Projeto Elétrico e de Instrumentação	58
3.3.3	Calculando os esforços envolvidos no processo automático	60
3.4	Resultados e Discussão	62
3.4.1	Validação Experimental da bancada de ensaios	62
3.4.2	Influência dos parâmetros de corte nos esforços obtidos	65
3.4.2.1	Aquisição dos Dados Experimentais	65
3.4.2.2	Estimando o Torque dos Motores e as Forças Atuantes no Sis-	
	tema	68
3.5	Considerações Finais	71
4	CONCLUSÕES	72
4.1	Trabalhos futuros	73
	Referências Bibliográficas	74

1 INTRODUÇÃO

No decorrer dos séculos, inúmeras tecnologias vem sendo estudadas para tornar as indústrias e países mais competitivos no mercado mundial. Segundo Pasquini (2014), a terceira revolução industrial é baseada na evolução e aplicações de soluções tecnológicas (*high-tech*) e inicia na década de 1970. Essa revolução trata da introdução da robótica, microeletrônica, automação e outras na indústria, proporcionando o seu desenvolvimento a passos largos (Prieb, 2019).

O alto custo operacional, a necessidade de maiores produtividades e o aumento no nível de saúde e segurança são impulsionadores poderosos na aplicação da robótica na mineração (Corke *et al.*, 2008). Os autores também afirmam que a indústria está perto de um ponto crítico em que a robótica e a automação fornecerão a próxima mudança em produtividade e segurança.

Robôs móveis são definidos segundo Tzafestas (2013) como dispositivos capazes de se movimentar de um local a outro de forma autônoma, ou seja, sem interferência de operadores humanos externos. No entanto, muitos são os dispositivos que funcionam de forma semi-autônoma ou tele-operados. Do ponto de vista mecânico, um robô móvel consiste em um ou mais corpos rígidos equipados com uma sistema de locomoção, como rodas, pernas, esteiras, entre outros (Sanz, 2009).

Já os robôs manipuladores são definidos pela norma 8373 da Organização Internacional de Normalização (do inglês *International Organization for Standardization*, ISO) como um manipulador multifunção de três ou mais eixos automaticamente controlado e reprogramável, enquanto o Instituto de Robótica da América (do inglês *Robot Institute of America*, R.I.A.) define como sendo um manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados por meio de vários movimentos programados para o desempenho de uma variedade de tarefas (Kurfess, 2018).

Corke (2017) salienta que diferente dos robôs móveis, os robôs manipuladores não podem se mover pelo mundo. Eles tem uma base estática e assim operam com um espaço de trabalho limitado. Corke (2017) afirma ainda que o ambiente de trabalho de um robô manipulador pode ser construído de forma muito ordenada, o que permite que este seja rápido, preciso e capaz de assumir a localização dos objetos com que está trabalhando. Outra vantagem é a simplificação do problema relacionado à segurança, pois uma vez que o robô tem espaço de trabalho limitado, é mais fácil simplesmente excluir pessoas desse local com barreiras de segurança ou gaiolas.

Na Vale S.A. (Vale) existem os dois tipos em operação. É possível encontrar por exemplo, minas operando totalmente com caminhões autônomos¹, como a Mina de Brucutu em Minas Gerais, que é a primeira no Brasil operando desse modo. Os caminhões são controlados por sistemas de computador, Sistema de Posicionamento Global (do inglês *Global Positioning Sys-*

¹<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx>

tem, GPS), radares e inteligência artificial, se movimentando de forma eficiente entre a frente de lavra e área de descarga. Com a utilização dos equipamentos autônomos além do grande ganho em segurança, foi observada uma diminuição de até 10% nas emissões de CO₂ e uma economia de até 25% no consumo de combustíveis e pneus. Também existem iniciativas para operação autônoma de perfuratrizes, pás carregadeiras e outros equipamentos. A implantação desse sistema é apresentada por [Guieiro et al. \(2019\)](#) e o diagrama que representa a forma de funcionamento do sistema autônomo de transporte por caminhões pode ser observado na Figura 1.1.

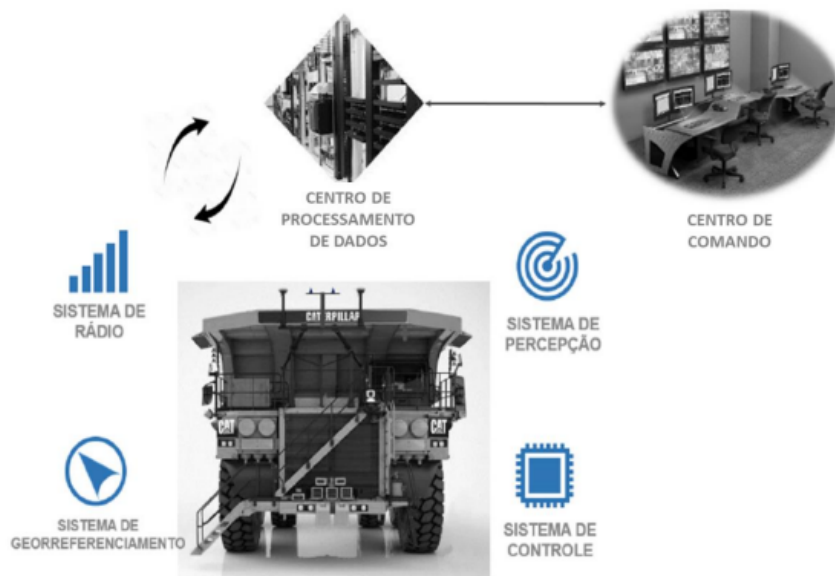


Figura 1.1: Diagrama do sistema autônomo de caminhões.

Fonte: [Guieiro et al. \(2019\)](#).

Outras aplicações de robôs móveis incluem os dispositivos de inspeção, que vem sendo muito utilizados pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) para diminuir a exposição do homem ao risco de acidente e aumentar a disponibilidade física dos equipamentos nas operações Vale. Os robôs terrestres comumente utilizados são o EspeleoRobô e a ROSI. Entre elas é possível citar inspeções do grau de enchimento e o estado do revestimento de moinhos de bola (Figura 1.2a), transportadores de correia (Figura 1.2b) e galerias de barragens (Figura 1.2c).

Já na Figura 1.3a é apresentado o EspeleoRobô na entrada de uma tubulação de rejeitos na Usina de Salobo preparado para a inspeção, se deslocando em cima de uma correia transportadora para acesso por baixo a britadores de mandíbulas (Figura 1.3b) e também num ambiente de caverna subterrânea para mapeamento e reconstrução 3D (Figura 1.3c).

Os manipuladores robóticos também são aplicados em diferentes atividades nas operações Vale atualmente, como no lavador de caminhões em Carajás - Pará (PA) (Figura 1.4a), em recomposição de chapas de vagões que circulam na Estrada de Ferro Carajás (EFC) (Figura 1.4b), e na oficina mecânica de pelotização em Vitória - Espírito Santo (ES) para montagem de carros de barras em carros de grelha ([COTA et al., 2017](#)). Outra aplicação apresentada por [Torre](#)



(a) Inspeção de moinhos de bola com o EspeleoRobô.

(b) Inspeção de transportadores de correia com a ROSI.

(c) EspeleoRobô inspecionando galeria de barragem.

Figura 1.2: Dispositivos robóticos em inspeções industriais.

Fonte: Acervo ITV.



(a) Inspeção de Tubulação de Rejeitos.

(b) Inspeção de Britador.

(c) Mapeamento de Cavernas.

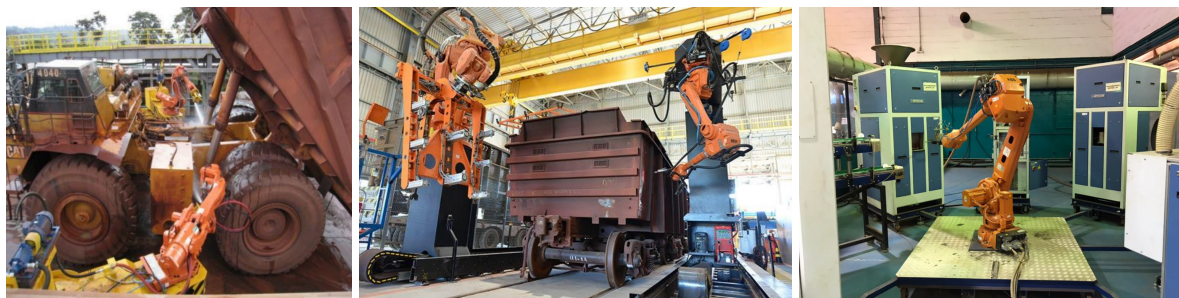
Figura 1.3: Dispositivos robóticos de inspeção em áreas Vale.

Fonte: Acervo ITV.

(2019) é a utilização de um manipulador integrado a uma célula robótica para manipulação de amostras do laboratório físico na unidade de Vargem Grande (Figura 1.4c). Além das aplicações citadas também existem manipuladores em operação nos laboratórios em Carajás - PA, Vitória - ES e Itabira - Minas Gerais (MG), e no manipulador de rolamento de vagões em São Luiz - Maranhão (MA).

Com base nas utilizações apresentadas, esta dissertação aborda os dois tipos de dispositivos robóticos apresentados: robôs móveis e braços manipuladores.

O EspeleoRobô é um dispositivo robótico móvel desenvolvido numa parceria ITV e Vale para inspeção de cavernas. Com o aumento da demanda, este robô passou a ser aplicado para outras tarefas não previstas inicialmente. Devido as condições dos ambientes onde há a necessidade de inspeção, como correntes de água, regiões alagadas, lama, entre outras, foi proposto o desenvolvimento de um projeto de vedação, realizando alterações minimalistas de modo a atingir o grau de proteção desejado, permitindo assim que o robô acesse ambientes que anteriormente não eram possíveis. Sendo assim, a frente relativa aos robôs móveis aborda o projeto de vedação do Dispositivo Robótico para Inspeção de Ambientes Restritos e Confinados - EspeleoRobô II, necessário para garantir um grau de proteção IP-67 e permitir inspeção de



(a) Lavador de Caminhões Fora de Estrada. (b) Recuperador de Chapas Laterais de Vagões. (c) Célula Robótica de Vargem Grande.

Figura 1.4: Aplicações de manipuladores robóticos em atividade na Vale.

Fonte: [Cota et al. \(2017\)](#); [Torre \(2019\)](#).

locais parcialmente alagados, com lama, poeira, entre outras condições.

A emenda de correias corresponde a outra operação crítica dentro das operações, pois uma falha na correia que deixa o transportador parado pode gerar custos elevados para a empresa. Outros pontos críticos são a qualidade final do processo que atualmente é completamente manual e depende da experiência da equipe de manutenção, além de expor o trabalhador a riscos ergonômicos e utilização de objetos cortantes como estiletes industriais (faca Olfa). Por isso, automatizar o processo de emenda, e principalmente o de preparação se faz necessário para atingir uma padronização do processo, aumento de qualidade e diminuição de riscos aos operadores. Assim, ao se referir a manipuladores robóticos, esta dissertação apresenta uma proposta de automação da etapa de remoção da cobertura de borracha na preparação do processo de emenda de correias de cabo de aço, bem como os testes iniciais para identificação de esforços que o manipulador deve suportar ao realizar esta durante o processo automático. Os testes são realizados em uma bancada de ensaios instrumentada desenvolvida no ITV com uma proposta de ferramenta rotativa que pode ser acoplada no efetuador do braço robótico.

1.1. Motivação

Esta seção apresenta a motivação para cada frente de trabalho apresentada nessa dissertação. Ao se referir a dispositivos robóticos de inspeção, a dissertação tem como foco o projeto de vedação do EspeleRobô II, o que permite com que este acesse locais parcialmente alagados e com gotejamento de água. Relativo à aplicação de manipuladores robóticos para serviço é apresentada uma proposta inicial para automatizar uma das etapas da preparação da emenda de correias de cabo de aço, aumentando assim a segurança operacional e qualidade da emenda, bem como reduzindo o tempo e o número de trabalhadores envolvidos na atividade.

1.1.1. Projeto de Vedação e Aplicações Industriais do Dispositivo Robótico para Inspeções Industriais e de Ambientes Confinados

Segundo [MONTEIRO \(2011\)](#), a espeleologia é uma ciência multidisciplinar que visa o estudo e a exploração de cavidades. Muitas minas da Vale estão localizadas em regiões que possuem cavidades naturais e em 2004, num levantamento feito pela Fundação Casa da Cultura de Marabá, foram descobertas centenas de cavernas, grutas e abrigos com presença de minério de ferro e canga em Carajás, local onde se encontram os maiores projetos de expansão das atividades da Vale ([CUNHA JR et al., 2007](#)).

Para obter licenças ambientais a fim de explorar tais regiões, a Vale deve atender a Legislação de Proteção ao Patrimônio Cultural Nacional e Ambiental determinada pelo decreto nº 99.556 de 01/10/1990; portaria IBAMA nº 887/90 de 15/06/1990 e resoluções do CONAMA ([FIGUEIREDO et al., 2010](#)). Este decreto exige um estudo dos impactos ambientais causados pelas atividades de mineração, nas cavidades naturais subterrâneas que se encontram nos platôs, e para atender este decreto, a equipe de espeleologia da Vale deve realizar um mapeamento de todas as cavidades, bem como coletar informações que servirão de base para os estudos ambientais exigidos.

Com os diversos riscos que podem ser encontrados no acesso de tais cavidades, como deslizamentos, animais selvagens e peçonhentos, dentre outros, a Equipe de Espeleologia e Tecnologia da Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos da Vale deu início ao Projeto “Dispositivo de Inspeção e monitoramento remoto de cavidades – EspeleoRobô”, possibilitando inspecionar esses ambientes e assim viabilizar a exploração, sem que o operador estivesse em uma condição de risco iminente.

No decorrer dos anos com a crescente demanda por segurança, surgiram diversas oportunidades de inspeções robóticas em ambientes e equipamentos industriais para eliminar o risco a que o operador está exposto ao acessar ambientes restritos e confinados.

A NBR 14.787 define espaço confinado como qualquer área não projetada para ocupação contínua, a qual tem meios limitados de entrada e saída e na qual a ventilação existente é insuficiente para remover contaminantes perigosos e/ou deficiência/enriquecimento de oxigênio que possam existir ou se desenvolver ([ABNT, 2001](#)).

Apesar de existirem normas que regulamentam o acesso e trabalho em ambientes confinados, acidentes nesses locais ainda ocorrem ([BOTTI et al., 2015](#)). Lesões por choque elétrico e mortes são conseqüências frequentes de eletrocussão em espaços confinados. Os riscos mecânicos incluem o risco de aprisionamento, asfixia e engolfamento devido ao afogamento ou queda de objetos ([MACCARRON, 2006](#)). Estatísticas sobre mortes em espaços confinados mostram que a condição atmosférica é a principal causa de acidentes, principalmente em operações de soldagem ([HARRIS et al., 2005](#); [YE, 2011](#)).

O EspeleoRobô foi inicialmente uma plataforma desenvolvida pela equipe do ITV e da

Espeleologia baseado em uma plataforma comercial adquirida pela Vale, o RHEX² da *Boston Dynamics*. Esta versão era aplicada quase que exclusivamente para mapeamento de cavernas e não continha níveis de proteção contra água e poeira que permitissem inspeções seguras nestes tipos de ambientes sem a provável ocorrência de danos aos componentes eletrônicos embarcados. Após uma inspeção em tubulação no ano de 2018, o robô passou por uma poça d'água ocasionando a queima dos 3 motores. Assim, foi proposto a adaptação do EspeleoRobô I para atender a crescente demanda de inspeções e realizá-las de forma segura. As alterações deveriam manter as principais características e componentes, e realizando apenas alterações para vedação completa do corpo, garantindo assim um grau de proteção IP-67. Após todas as alterações propostas serem implementadas, o robô passou a ser conhecido como EspeleoRobô versão II, ou simplesmente EspeleoRobô II.

1.1.2. Procedimento Automático para Emenda de Correias de Cabo de Aço

A indústria mineral enfrenta desafios diariamente relacionados a melhoria de processos. Um sistema crítico dentro das operações são os Transportadores de Correia (TC), responsáveis por quase toda a movimentação de material desde a extração até o carregamento de navios. Os TC's são amplamente utilizados na mineração devido a sua versatilidade, confiabilidade e baixo custo por material transportado quando comparado com outros sistemas e uma ampla capacidade de transporte (CEMA, 2007; MCGUIRE, 2010).

A Tabela 1.1 apresenta os números de transportadores existente apenas nos portos operados pela Vale no Brasil, sendo mais de 500 TC e quase 270 Quilômetros (Km) de correias, o que exemplifica a importância destes para a cadeia de mineração.

Tabela 1.1: Transportadores de correias nos portos operados pela Vale no Brasil.

Transportadores nos Portos da Vale no Brasil				
Porto	TC (Qtd)	Correias (m)	Lona	Cabo de Aço
Carvão e Grãos	117	55.381	55.381	0
Sepetiba	19	11.889	642	11.247
Ilha Guaíba	46	17.050	4.023	13.027
São Luís	190	122.468	21.746	100.722
Tubarão	162	59.652	51.474	8.178
Total	534	266.440	132.266	133.174

Fonte: Vale (2019).

As correias de cabo de aço são mais utilizadas que os outros modelos em transporte de longas distâncias devido a sua alta resistência. A construção convencional dessa correia (Figura 1.5) consiste em cabos de aço internos envolvidos com borracha de adesão (ou ligação),

²<https://robots.ieee.org/robots/rhex/>

coberto com uma camada superior e inferior de borracha, escolhida de acordo com a aplicação da correia (MERCÚRIO, 2015).

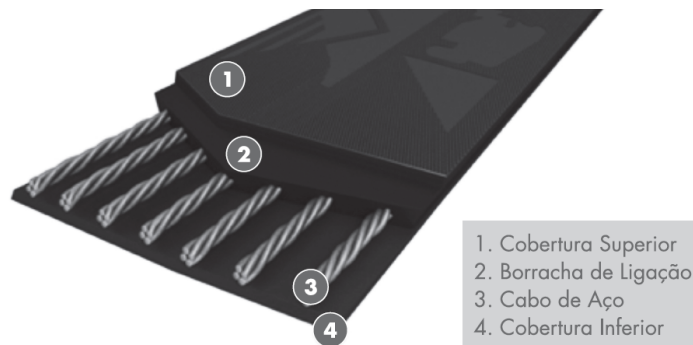


Figura 1.5: Construção básica de uma correia de cabo de aço.

Fonte: Mercúrio (2015).

É comum que ocorram danos nas correias devido a alta utilização, abrasão com rolos defeituosos, desalinhamentos da correia, descarga dos chutes fora do centro da correia, entre outros fatores. O time de manutenção monitora frequentemente os transportadores fazendo procedimentos de reparos e emenda de correias para evitar paradas não programadas, falhas e/ou acidentes.

Atualmente a emenda de correias é um procedimento realizado de forma manual, que envolve uma grande equipe, leva aproximadamente 48 horas para ser finalizado e a qualidade do processo está diretamente relacionada com a experiência da equipe da manutenção. Além dos problemas citados anteriormente, as condições ergonômicas desfavoráveis ao trabalhador no processo é um fator importante a ser considerado, bem como os riscos a que os operadores estão expostos ao realizar este procedimento, incluindo a utilização de materiais cortantes e tarefas simultâneas sendo realizadas, exigindo uma atenção redobrada (Figura 1.6).



Figura 1.6: Algumas tarefas da preparação da emenda sendo realizadas.

Fonte: Instituto Tecnológico Vale (2018).

Pensando nos problemas e condições descritas anteriormente, o ITV em parceria com o time de Excelência Portuária da Vale iniciou um projeto para automatizar a emenda de correias

de cabo de aço. Dada a complexidade do processo total, a operação foi subdividida em tarefas específicas e pontuais.

Para isso foi desenvolvida uma bancada de teste instrumentada para validação experimental e testes de conceito. A bancada corresponde a um protótipo de ferramenta de corte desenvolvida para avaliar os esforços envolvidos no processo de remoção automático da cobertura de borracha da correia durante a preparação para emenda.

1.2. Objetivos

Os objetivos desta dissertação se dividem em gerais e específicos, onde cada frente de trabalho apresenta os seus próprios objetivos.

1.2.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral da frente que estuda dispositivos robóticos móveis de inspeção é desenvolver um projeto de vedação que garanta um grau de proteção IP-67 ao EspeleoRobô, adaptando o projeto do EspeleoRobô I. Também é esperado desenvolver um procedimento de montagem e vedação, e validar o resultado com inspeções de ambientes restritos e confinados com presença de água, lama e outras condições em que a vedação seja necessária.

Já a frente que estuda aplicação de manipuladores robóticos para automação da emenda de correias de cabo de aço é focada em realizar um estudo conceitual de uma ferramenta de corte rotativa para remoção da cobertura de borracha em correias transportadoras, a fim de fornecer parâmetros que possam justificar sua utilização em uma possível solução automatizada de emenda de correias, visando a diminuição de custos, tempo de procedimento e do nível de risco de acidentes a que o trabalhador é exposto ao realizar a emenda, além de um aumento na qualidade do procedimento.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral proposto para o projeto de vedação de um dispositivo robótico de inspeção de ambientes restritos e confinados, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Propor sistemas de vedação de modo que o dispositivo seja considerado com grau de proteção IP-67;
- Realizar alterações no projeto existente do EspeleoRobô I para melhorar alguns aspectos observados, porém mantendo as características de construção principais;
- Criar passo a passo de montagem e vedação do dispositivo;
- Preparar o robô para inspeções em locais parcialmente alagados, com gotejamentos ou lama;

- Realizar testes de vedação em laboratório com caixas preparadas para abranger os materiais das interfaces do robô e com o corpo do dispositivo real após usinagem e antes da montagem eletrônica para validar o método de vedação proposto;
- Validar a eficácia do sistema de vedação com testes de campo em ambientes cuja vedação é necessária.

Já para a frente que propões um procedimento automático para emenda de correias de cabo de aço, os objetivos específicos são:

- Construir uma bancada de testes instrumentada que represente de forma expressiva o processo automático real para testes de conceito;
- Mapear os esforços presentes no processo automatizado de remoção da borracha da correia, através de ensaios de corte em laboratório variando a frequência de acionamento dos motores e a profundidade de borracha removida;
- Calcular os esforços necessários para dimensionamento de um manipulador robótico que seja capaz de realizar a tarefa por meio de equações disponíveis em literatura;
- Avaliar a proposta de processo automatizado para validar o conceito e construções propostas, bem como a viabilidade de implantação.

1.3. Contribuições da Dissertação

As contribuições dessa dissertação são divididas em duas frentes: desenvolvimento de um projeto de vedação de dispositivo robótico de inspeção e a utilização de manipuladores para automatizar a emenda de correias de cabo de aço.

O desenvolvimento do projeto de vedação do EspeleoRobô II permitiu a inspeção de diversos locais considerados críticos dentro das operações Vale, que não seriam passíveis de realização sem as adaptações propostas nesta dissertação. Foram inspecionadas galerias de barragens, tubulações de rejeitos, drenos em ramais ferroviários, ambos com condição de lâmina d'água que poderiam danificar os componentes eletrônicos do dispositivo.

Também foram inspecionados equipamentos, que em teoria não estariam molhados, mas devido a procedimentos de limpeza para inspeção apresentavam certo nível de água e/ou lama. As filmagens entregues pelo ITV à equipe Vale permitiram avaliar estruturas e liberar equipamentos durante auditorias, possibilitando assim a operação de importantes plantas da Vale, além de reduzir a exposição do homem ao risco de espaço confinado.

Foram publicados 2 relatórios técnicos referente ao sistema de vedação e seus testes de validação, além de 1 manual de montagem e vedação do dispositivo.

Outras contribuições são as publicações de dois artigos como co-autor: um artigo em congresso internacional e um artigo em revista apresentando direcionamentos de atividades com

o dispositivo em ambientes restritos e confinados, cavernas, tubulações e outros, que podem ser realizados devido ao grau de proteção IP-67 entregue com o projeto do dispositivo.

BARROS, Luiz G. Dias de; FERRAZ, Amauri; MOREIRA, Tales; DOMINGUES, Jacó; ROCHA, Filipe; AZPÚRUA, Héctor; FREITAS, Gustavo M.; PRITZELWITZ, Philip V.; PESSIN, Gustavo. **Experimentos controlados de vedação – Espeleorobô 2**. Repositório do ITV Mineração, maio de 2019. DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2019.2.Barros

BARROS, Luiz G. Dias de; AZPÚRUA, Héctor; PESSIN, Gustavo; FREITAS, Gustavo; PRITZELWITZ, Philip Von. **Relatório Técnico sobre mecânica e sistema de vedação do EspeleoRobô II**. Repositório do ITV Mineração, março de 2020. DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2020.5.Barros

BARROS, Luiz Guilherme Dias de; THIAGO NETO, Nilton Costa; DELUNARDO, Mário César; AZPÚRUA, Héctor ; FREITAS, Gustavo Medeiros; PRITZELWITZ, Philip Von; PESSIN, Gustavo. **Manual de Montagem do e vedação do dispositivo robótico para inspeção de ambientes restritos e confinados – EspeleoRobô II**. Repositório do ITV Mineração, maio de 2020. DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2020.9.Barros

AZPURUA, Hector; ROCHA, Filipe; GARCIA, Gabriel; SANTOS, Alexandre Souza; COTA, Eduardo; BARROS, Luiz Guilherme; THIAGO, Alexandre S, PESSIN, Gustavo; FREITAS, Gustavo Medeiros. **EspeleoRobô-a robotic device to inspect confined environments**. In: 2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, 2019. p. 17-23.

AZPURUA, Hector; REZENDE; Adriano; POTJE, Guilherme; CRUZ JÚNIOR, Gilmar Pereira da; FERNANDES, Rafael; MIRANDA, Victor; RESENDE FILHO, Levi Wellington de; DOMINGUES, Jacó; ROCHA, Filipe; SOUZA, Frederico Luiz Martins de; DE BARROS, Luiz Guilherme Dias; NASCIMENTO, Erickson R.; MACHARET, Douglas G.; PESSIN, Gustavo; FREITAS, Gustavo Medeiros. **Towards Semi-autonomous Robotic Inspection and Mapping in Confined Spaces with the EspeleoRobo**. Journal of Intelligent & Robotic Systems, v. 101, n. 4, p. 1-27, 2021. DOI: 10.1007/s10846-021-01321-5

Com a frente relativa a manipuladores robóticos, a dissertação entrega o primeiro estudo disponível que estima as forças mínimas necessárias para automação do procedimento de emenda de correias de cabo de aço, o que quando concluído aumentará a segurança da equipe de manutenção ao realizar o procedimento e a qualidade final da emenda, e diminuirá o tempo e o custo do procedimento. Dois artigos foram publicados no Congresso Brasileiro de Automática, um como autor e outro co-autor, apresentando o projeto da máquina e as validações iniciais, e outro com a proposta em ambiente simulado. São estes:

DE BARROS, Luiz Guilherme Dias; SANTOS, Luan Fernandes; PRITZELWITZ, Philip von; FREITAS, Gustavo Medeiros. **Projeto de uma Bancada Instrumentada para Avaliação de Ferramenta de Corte Rotativa para Preparação de Emenda de Correias**. Anais da Sociedade Brasileira de Automática, v. 2, n. 1, 2020. DOI: 10.48011/asba.v2i1.1750

SANTOS, Luan Fernandes; DE BARROS, Luiz Guilherme Dias; RODRIGUES, Guilherme Brito; BRANDÃO, Paulo; PRITZELWITZ, Philip von; FREITAS, Gustavo Medeiros. **Investigação e Simulação de Sistema Robótico para Automatização da Emenda de Correias Transportadoras**. Anais da Sociedade Brasileira de Automática, v. 2, n. 1, 2020. DOI: 10.48011/asba.v2i1.1681

Além disso, um outro trabalho foi aceito para publicação no *Journal of Control, Automation and Electrical Systems - JCAE*, intitulado “**Automatic Procedure for Steel Cord Belt Splicing Preparation**”, que apresenta a proposta de automação da preparação da emenda.

1.4. Organização do Texto

Esta dissertação é organizada em quatro capítulos.

O Capítulo 2 apresenta a proposta de um sistema de vedação para o EspeleoRobô II, bem como validações destes em laboratório em objeto representativo e corpo do dispositivo real. Também são apresentados testes de campo realizados pelo robô, que foram possíveis devido ao sistema de vedação instalado.

O Capítulo 3 apresenta uma proposta de procedimento automático para emenda de correias de cabo aço, passando pelo projeto de uma bancada de ensaios instrumentada para validação de conceitos e mapeamento de esforços, e calculando os esforços atuantes no efetuador do manipulador para seleção de um dispositivo capaz de realizar todas as tarefas propostas.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões das duas propostas apresentadas e os trabalhos futuros sugeridos.

2 PROJETO DE VEDAÇÃO E APLICAÇÕES DO DISPOSITIVO ROBÓTICO PARA INSPEÇÕES INDUSTRIAIS E DE AMBIENTES CONFINADOS - ESPELEOROBÔ II

A exploração de espaços confinados e áreas de risco são tarefas perigosas inclusive para pessoas especializadas. As equipes de manutenção industrial e geotecnia necessitam inspecionar rotineiramente estruturas como tubulações, galerias de barragem, equipamentos industriais, dentre outras apesar dos riscos inerentes nas atividades (AZPÚRUA *et al.*, 2021).

A inspeção de cavernas em mineração é uma demanda legal para determinar a exploração ou preservação do estrutura (FIGUEIREDO *et al.*, 2010), enquanto em equipamentos os materiais gerados auxiliam na determinação de necessidade de manutenção e no acompanhamento da integridade estrutural. Em barragens as video-filmagens auxiliam a equipe geotécnica a gerar laudos de integridade e garantir o correto funcionamento destas estruturas com um nível de segurança elevado.

Dadas tais condições, a inspeção remota com dispositivos robóticos teleoperados tem se tornado comum nas operações devido à qualidade do material videográfico entregue e à eliminação do risco de espaço confinado que o trabalhador é exposto para realização de tais atividades.

Buscando aumentar as capacidades de inspeção e melhorar as funcionalidades existentes do EspeleoRobô, o ITV foi acionado e iniciou em 2016 um projeto de pesquisa para melhorar as capacidades de sensoriamento e locomoção do robô, além de uma reestruturação mecânica e eletrônica deste. As primeiras modificações mecânicas propostas foram no sistema

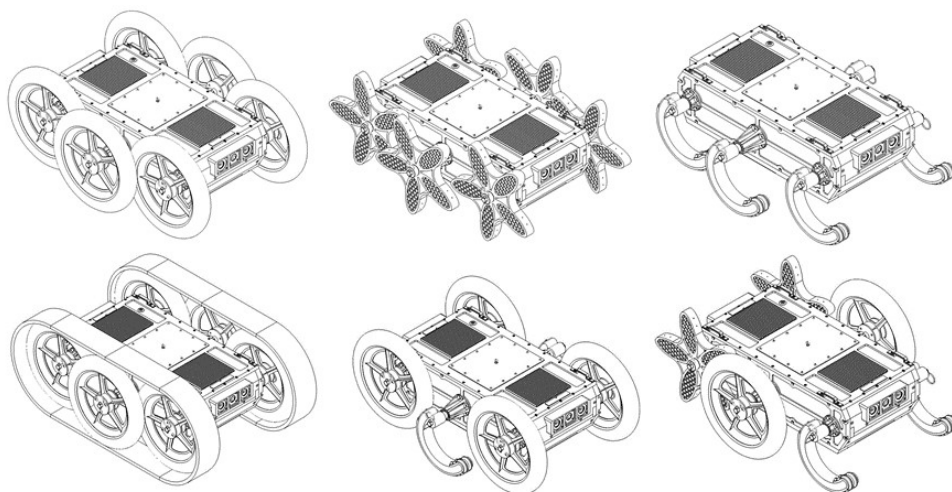


Figura 2.1: Algumas das possíveis configurações do sistema de locomoção do EspeleoRobô.

Fonte: O autor.

de locomoção, que deixou de ser exclusivamente por pernas para um sistema intercambiável com troca rápida, que permite utilização de rodas, rodas tipo estrela, pernas, esteiras ou uma configuração híbrida entre elas. Tais configurações podem ser observadas na Figura 2.1. Tam-

bém foram modificados os posicionamentos das baterias para abaixar o centro de gravidade e deixá-las de forma simétrica no interior do robô. O material de fabricação de algumas peças foi alterado para reduzir o peso e garantir a resistência estrutural do dispositivo, além de diversas modificações nas formas de controle, antenas e componentes eletrônicos que foram realizados.

Com o passar dos anos, as demandas de inspeção em diferentes ambientes foram surgindo, e assim passou a ser crítico a necessidade de um dispositivo que fosse capaz de inspecionar ambientes parcialmente alagados e mais agressivos que sua versão anterior não era capaz de inspecionar. Assim, foi proposto o projeto de vedação do dispositivo com modificações mínimas necessárias para vedação, e mantendo os mesmos componentes eletrônicos. A evolução do dispositivo pode ser observada na Figura 2.2.

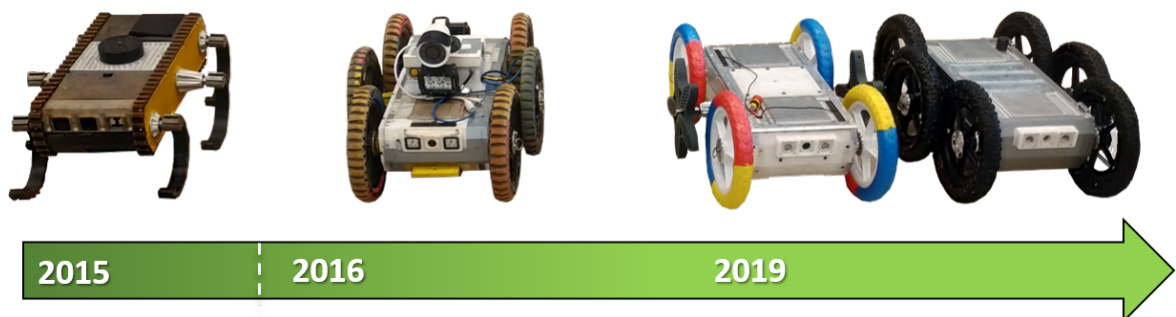


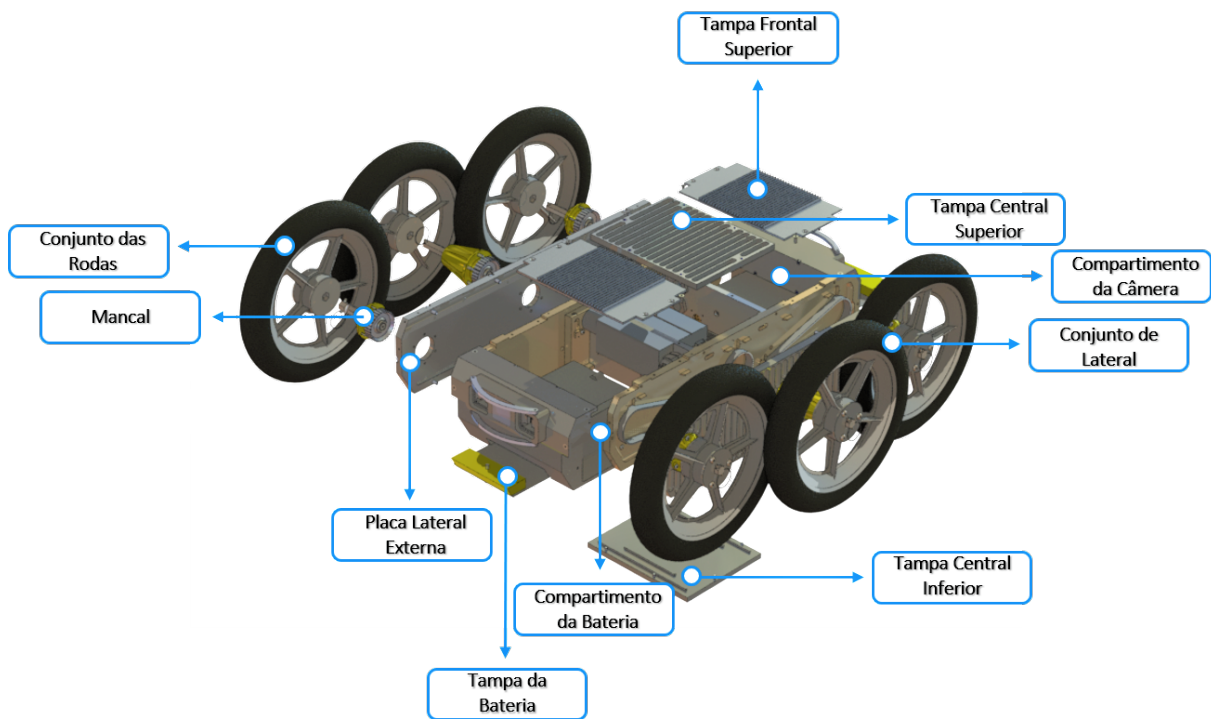
Figura 2.2: Evolução do EspeleoRobô no decorrer dos anos.
Fonte: ITV.

2.1. O EspeleoRobô

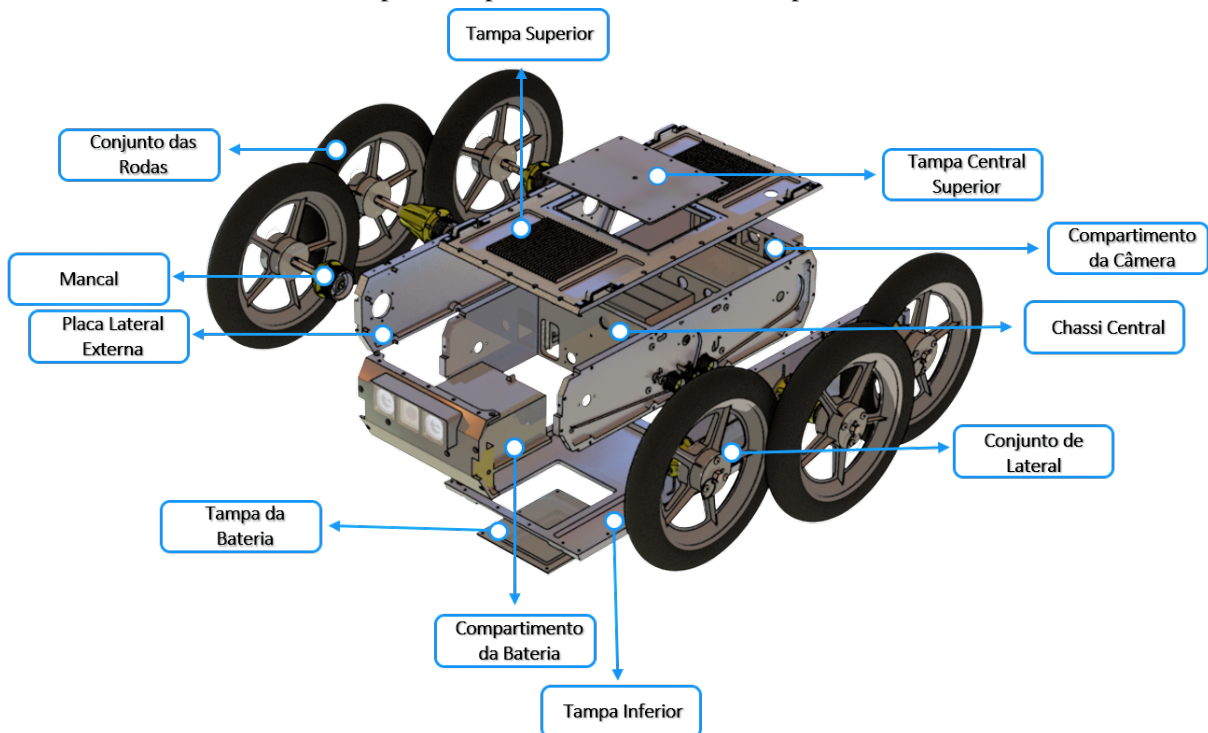
A cada versão proposta para o EspeleoRobô, foram realizadas apenas as modificações necessárias para atingir uma determinada funcionalidade. As maiores alterações do robô adquirido pela Vale para a versão I (ITV) por exemplo, estão relacionadas aos modos de locomoção, componentes eletrônicos e sensoriamento.

As principais modificações mecânicas são a substituição de um sistema exclusivamente de pernas para um sistema intercambiável com mecanismo de troca rápida. Também foi alterado o posicionamento das baterias para manter o centro de gravidade do robô mais próximo ao solo, diminuindo o risco de capotamento. Relacionado a vedação, a versão I do EspeleoRobô apresentava apenas retentores nos mancais. A Figura 2.3a apresenta os principais componentes mecânicos do EspeleoRobô I em uma vista explodida.

Para a versão II do EspeleoRobô, desenvolvida a partir da versão I, foram alteradas as superfícies de contato entre peças do robô a fim de garantir superfícies paralelas que facilitassem a instalação de sistemas de vedação. Houve também a substituição do material das placas externas laterais, de poliacetal na versão I para alumínio 6061 na versão II. Essa alteração foi realizada devido às deformações observadas nas placas do Espeleo I com o decorrer do



(a) Principais componentes mecânicos do EspeleoRobô I.



(b) Principais componentes mecânicos e subconjuntos do EspeleoRobô II.

Figura 2.3: Comparativo entre as versões I e II do EspeleoRobô.

Fonte: O autor.

tempo, o que aumentava o espaço entre componentes e se tornava uma possível entrada de água e poeira. Com as placas de alumínio, devido ao aumento de rigidez, é esperado que esse problema não ocorra na versão II. A Figura 2.3b apresenta os principais componentes mecânico e subconjuntos do EspeleoRobô II após todas as alterações realizadas.

2.1.1. Equipamentos Embarcados

O robô é equipado atualmente com 6 conjuntos MCD EPOS (Motor, redução e controladora) Maxon motors, 2 (duas) baterias militares de alta densidade energética Bren-Tronics, um mini computador Intel NUC, LEDs de alta densidade nas partes frontal e traseira, um Arduíno Nano, um Switch Ethernet, além de um par de câmeras AXIS-P12. A Figura 2.4 apresenta um visão dos componentes eletrônicos dentro do robô, além de uma proposta de torre de instrumentação. Devido a sua arquitetura modular, a configuração do robô pode ser facil-

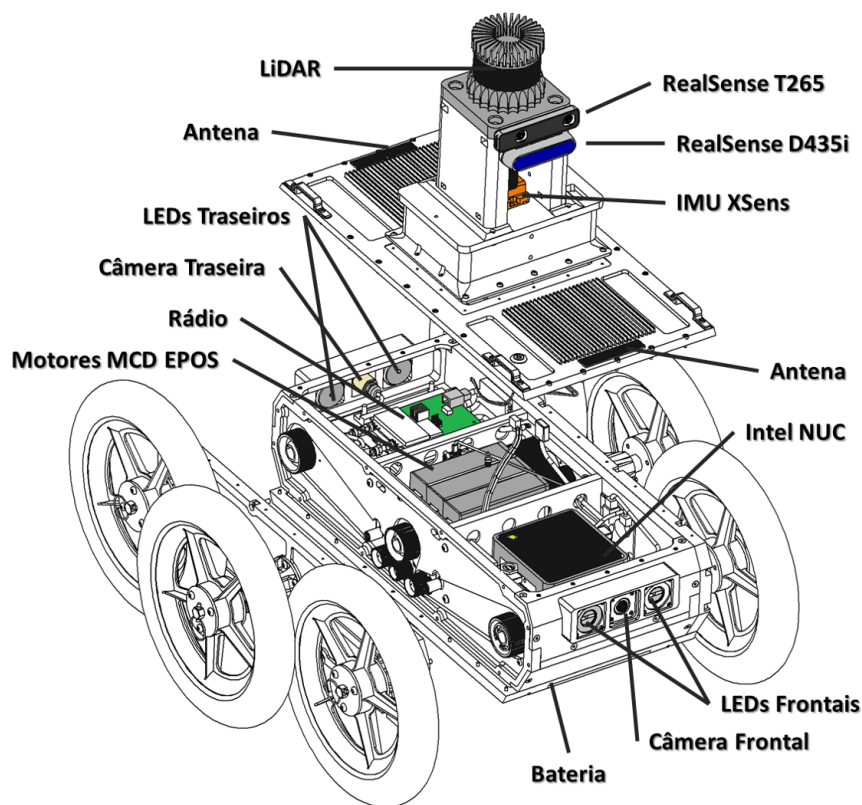


Figura 2.4: Diagrama de uma arquitetura proposta e componentes eletrônicos.

Fonte: O autor.

mente adaptada para adição de novos sensores apenas substituindo a tampa superior por uma torre de instrumentada. Os novos equipamentos podem ser conectados ao Switch, Arduíno, ou ao próprio computador embarcado Intel NUC. Um configuração típica utilizada contém um LiDAR Ouster OS 1, câmeras RealSense T265 e D435i, além de uma Unidade de Medição Inercial (do inglês *Inertial Measurement Unit*, IMU) Xsens MTI-G-710.

A comunicação com o robô é crucial quando este está operando em ambientes confinados e não-estruturados, visto que uma falta de comunicação em missões teleoperadas podem aumentar os riscos de acidente com o robô. Para comunicações Wireless são utilizados rádios Ubiquiti Rocket M900, um interno ao robô e outro na base de controle, além de um par de antenas omnidirecionais ASA-900CI. Outra forma de comunicação com o robô utilizada é a cabeada, preferencialmente para ambientes de tubulação ou galerias de barragens, onde não são comuns ocorrências de obstáculos e não é possível garantir visada direta da base com o robô, o que ocasiona perda de sinal. Para isso são utilizados um conjunto de placas Fathom X-Tether, que com um par trançado de fios permitem comunicação de até 300 metros.

2.2. Técnicas Básicas de Vedação

Existem diversos métodos de vedação que podem ser aplicados para atingir o grau de proteção desejado e necessário a cada projeto. Cada método deve ser escolhido de acordo com as particularidades impostas pela geometria, componentes e locais de aplicação do dispositivo a ser vedado. Os métodos mais comumente utilizados são descritos abaixo:

2.2.1. Cordão de Borracha (*O-ring*)

O Cordão de borracha ou anel O-ring é um anel com seção transversal circular, empregados em sua maioria para vedação de peças de máquinas sem movimento, ou estáticas. Eles garantem vantagens diante de outros sistemas por serem fáceis de fabricar, confiáveis, fáceis de montar, além de um baixo custo quando comparado com outros métodos (VEDAMASTER, 2021).

Os O-rings podem ser fabricados em diferentes materiais, entre eles borracha nitrílica (NBR), borracha etileno-propileno-dieno (EPDM), neoprene, silicone, borracha fluorcarbono (FKM), entre outros. Cada material possui uma característica específica, e a escolha do elemento deve ser baseada nas condições de operação do componente vedado, como temperatura de trabalho, dureza necessária, e contatos com outros elementos químicos.

2.2.2. Junta Líquida (Loctite 518)

Loctite 518 é um formador de juntas de alta resistência térmica. Indicado para flanges metálicos rígidos, a junta líquida tem capacidade de enchimento de folgas de até 0,25 mm, e aumenta a estruturalidade da montagem. Pela sua consistência de gel, o formador de juntas líquido é ideal para aplicações verticais acima da cabeça, e tem uma vedação instantânea a baixa pressão. Além disso, o Loctite 518 é recomendado para a vedação de flanges rígidos em caixas de transmissões e motores, assim como em flanges rígidos de ferro, aço e alumínio (HENKEL, 2021).

2.2.3. Papelão Hidráulico (Guarnital)

O papelão hidráulico, ou guarnital, é um material formado pela mistura de fibras de celulose banhadas com resinas especiais. Esta junta é indicada para vedação de diferentes interfaces, entre elas tampas de válvulas, caixas de engrenagens, flanges de tubulações, dentre outros. Geralmente é feito com material resistente a diversos produtos orgânicos, como álcool, óleos diversos, além de água, vapor, gás e petróleo. Por isso, o guarnital tem sido aplicado em diversos segmentos da indústria. Sua elasticidades e poder de vedação, também permitem que os produtos vedados por guarnital não contenham vazamentos, além de resistir a temperaturas entre -30°C a 120°C sem perder suas propriedades (ANELK, 2021).

2.2.4. Cortiça Emborrachada

A cortiça é um produto natural de constituição celular leve e de grande compressibilidade. Suas células são preenchidas com gás, cerca de 60% em peso, o que explica a leveza desse material e a alta compressibilidade criadas por essas "almofadas" de ar. O gás contido na cortiça não pode sair, sendo o fundamento de sua elasticidade e baixo poder de condução térmica, e graças a impermeabilidade que a suberina concede às paredes das células da cortiça, é um material hermético (ROLAUTO, 2021).

2.2.5. Silicone Neutro

O silicone neutro é um adesivo selante tixotrópico monocomponente, médio módulo (até $\pm 50\%$ de capacidade de movimentação), anti-fungo e de cura neutra, utilizado para vedação de substratos porosos, não porosos e metais corrosíveis, como concreto, alvenaria, madeira, metais, vidros variados e alguns tipos de plástico. Sua cura ocorre em temperatura ambiente e na exposição ao ar, deve ser aplicado em superfícies limpas e livres de óleo e/ou poeiras (TEK-BOND, 2021).

2.2.6. Retentores

Os retentores são vedadores dinâmicos para eixos, que proporcionam uma vedação geral de óleos, graxas e água, com ou sem pressão. Eles são utilizados principalmente na construção de máquinas e aparelhos, podendo ser vedadores de produtos líquidos, pastosos ou em forma de gás, e protegendo para que o líquido permaneça no interior do compartimento ou não entre nele (VEDABRÁS, 2021). Na robótica, os retentores são muito utilizados para vedação de eixos de dispositivos que precisam acessar locais agressivos com água e/ou poeira, e são selecionados de acordo com a aplicação, podendo conter ou não compartimento guarda-pó, ter anel metálico no posicionamento ou não, dentre outras características específicas de cada modelo.

2.3. Teste de Conceito de Algumas Técnicas de Vedação

Antes que o projeto de vedação do robô fosse desenvolvido e os materiais indicados, foram realizados testes com alguns dos métodos de vedação em caixas para representar as superfícies do robô, e garantir que os métodos seriam eficientes, mesmo quando não indicados a aplicação pelo fabricante. Um caso é a aplicação de junta líquida, indicada apenas para superfícies metálicas, e utilizada entre superfícies de alumínio-poliacetil e poliacetil-poliacetil no projeto.

No teste de conceito foram utilizadas caixas de dimensão $120 \times 120 \times 60$ mm e interfaces de contato alumínio-alumínio, poliacetil-poliacetil e alumínio-poliacetil, que são os tipos de interfaces presentes no projeto do EspeleoRobô II. Todos os métodos propostos foram testados para as três interfaces possíveis. As condições de ensaio são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Condições de contorno utilizadas no ensaio de validação dos métodos de vedação.

Condições de Contorno dos Ensaio de Validação	
Profundidade de Imersão	68 cm
Tempo de Imersão	30 min
Interfaces	Alumínio – Alumínio
	Poliacetil – Poliacetil
	Alumínio – Poliacetil

Fonte: O autor.

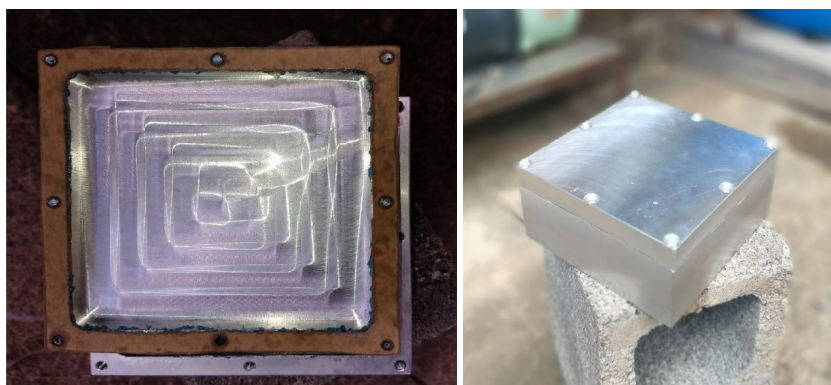
2.3.1. Metodologia de Ensaio

Os ensaios para validação das juntas de vedação como possíveis soluções aplicáveis ao corpo do robô, foram realizados seguindo a metodologia descrita a seguir.

A princípio, o papel guarnital foi cortado no formato da caixa, fabricada especificamente para o teste. Em seguida, uma fina camada da graxa do tipo NLGI-2 foi aplicada nos dois lados do papel de modo a fechar seus poros. Feito isso, foi posicionado na caixa, que foi fechada com oito parafusos M4 espaçados entre eles em 55 mm. Após verificar o correto fechamento da caixa, a mesma foi colocada sob uma coluna d'água de 68 cm e deixada em repouso estático por 30 minutos. Após o tempo determinado, a caixa foi retirada da água, sua parte externa foi seca para a verificação da estanqueidade interior da estrutura. O mesmo procedimento foi realizado para a cortiça emborrachada.

A vedação foi verificada com elementos sensíveis à presença de água inseridos na caixa (papéis picotados), que caso molhados ao final do ensaio, indicariam que vazamentos ocorreram na estrutura superficial. A Figura 2.5a apresenta o posicionamento do guarnital na superfície de contato entre a tampa e base da caixa e a Figura 2.5b mostra a caixa fechada para imersão.

Para a junta líquida Loctite 518, uma fina camada do produto foi aplicada em todo o perímetro da caixa de forma que a linha de junta estivesse mais interna que a linha de furação



(a) Guarnital posicionado na tampa da interface alumínio-alumínio. (b) Caixa fechada para teste de imersão.

Figura 2.5: Posicionamento da junta de vedação e caixa pronta para teste de imersão.

Fonte: O autor.

da caixa, evitando assim que caso ocorresse a entrada de água pelos parafusos, esta atingisse o interior da caixa (Figura 2.6). Em seguida, a tampa foi posicionada e fechada por 8 parafusos M4. A partir daqui a profundidade e tempo de imersão foram os mesmos das condições anteriores.



Figura 2.6: Aplicação de junta líquida para teste de imersão.

Fonte: O autor.

2.3.2. Resultados

A Figura 2.7a apresenta o resultado para vedação com junta líquida. Já na Figura 2.7b é apresentado o resultado para vedação com cortiça emborrachada, enquanto a Figura 2.7c ilustra o resultado para vedação com papelão hidráulico (guarnital). Todos os métodos avaliados foram testados para as três interfaces possíveis, sendo elas alumínio-alumínio, poliacetal-poliacetal e alumínio-poliacetal.

É possível perceber nestas Figuras, que em ambos os ensaios, o papel colocado no interior das caixas estava seco após a submersão por 30 minutos, o que valida como eficaz os métodos propostos para vedação de diferentes materiais e aplicação no corpo do Espeleo-Robô II.



(a) Vedação com junta líquida na interface alumínio-poliacetel.

(b) Vedação com cortiça emborrachada na interface poliacetel-poliacetel.

(c) Vedação com papel guarnital na interface alumínio-alumínio.

Figura 2.7: Resultados dos testes de vedação com diferentes propostas.

Fonte: O autor.

2.4. Projeto de Vedação

Tendo validado os métodos sugeridos com as caixas feitas para os testes, foi iniciado o desenvolvimento do projeto de vedação do corpo do robô, observando as geometrias das interfaces e os materiais de construção destas.

O projeto de vedação foi construído buscando reduzir ao máximo as tampas de fechamento do robô, bem como o modo de encaixe destas no corpo principal, para garantir superfícies paralelas de contato onde os métodos de vedação possam ser aplicados. A vedação proposta utiliza papelão hidráulico (guarnital), O-ring, junta líquida (Loctite 518), silicone neutro e retentores.

Na versão I, o robô possuía três tampas na parte superior, tampa das baterias deslizante e uma tampa central inferior, o que não permitia instalar um sistema de vedação. Para a versão II, foi proposta a substituição para uma única tampa superior, que cobre toda a parte superior do robô, com uma abertura central pensada para vedação com anel de borracha tipo O-ring; o mesmo foi feito na parte inferior do dispositivo. Tais características podem ser observadas nas Figuras [2.8a](#) e [2.8b](#). A mudança visa prover superfícies paralelas para instalação de juntas de vedação. Tais superfícies permitem a efetividade do sistema.

As tampas superior e inferior são vedadas com papelão hidráulico (guarnital), enquanto a tampa central e a tampa das baterias são vedadas por O-ring. O papelão foi aplicado devido a construção da superfície de encaixe, composta por 6 partes: placas laterais internas e externas e compartimento da câmara. Esse modelo não permite que exista um canal contínuo de O-ring, o que impossibilita tal aplicação. O guarnital também foi aplicado entre as placas laterais e entre mancais e placa lateral externa por não haver espaço suficiente na superfície para o canal do anel O-ring. Já nas tampas das baterias e central superior, que são constantemente abertas e possuem apenas uma superfície plana, a aplicação do O-ring é indicada.

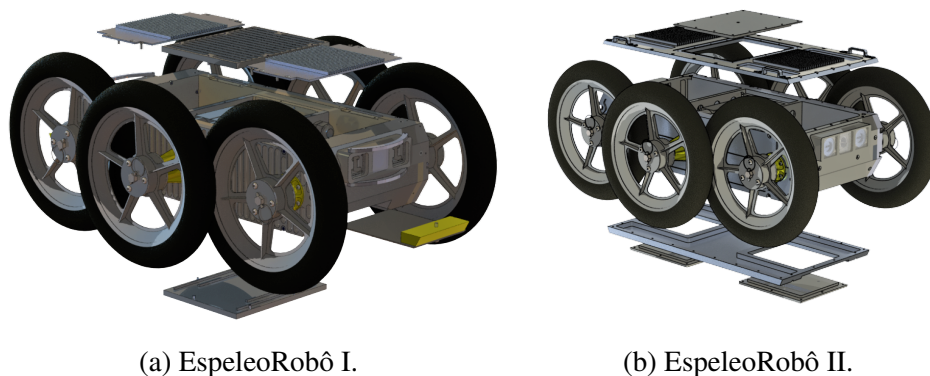


Figura 2.8: Vista explodida das tampas superior e inferior do EspeleoRobô versão I e II.
Fonte: O autor.

Em locais onde não há superfícies paralelas e não é possível garantir o aperto necessário, a vedação proposta é feita com junta líquida, que após a secagem funciona como uma cola que cria uma película sólida entre as partes preenchendo os espaços vazios. Este material preenche folgas de até 0,25 mm.

A Figura 2.9 apresenta o local de aplicação de algumas juntas propostas. Na Figura 2.9a é possível observar o papel guarnital entre as placas laterais. O local de aplicação da junta líquida é representado por placas vermelhas nas Figura 2.9b e o posicionamento dos O-rings no corpo do robô é apresentado na Figura 2.9c.

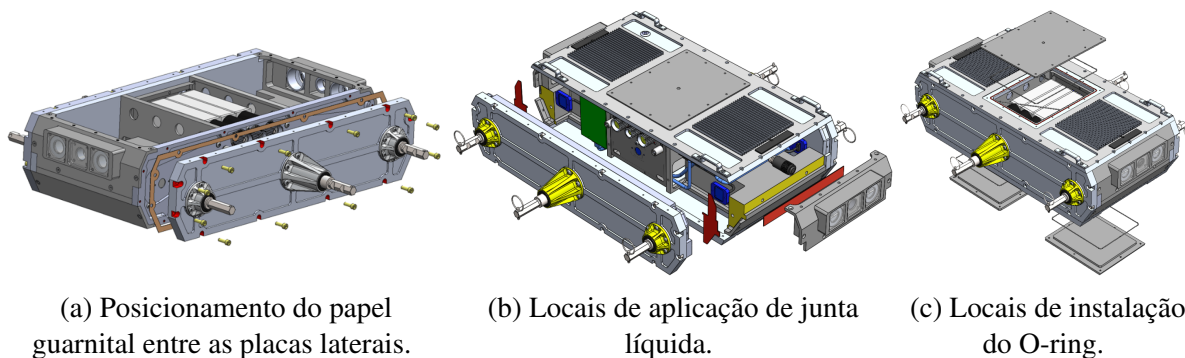


Figura 2.9: Aplicação de alguns dos métodos de vedação propostos ao dispositivo.
Fonte: O autor.

A vedação nos eixos do Espeleo II é feita com retentores, similar ao que já existia no Espeleo I, porém foi feita uma adequação no mancal uma para melhor acomodação deste. Por último, o compartimento da câmera e LEDs é fechado com placas de policarbonato coladas com silicone neutro.

2.4.1. Montagem do Sistema de Vedação

A montagem correta do sistema de vedação é crucial para seu correto funcionamento, por isso foi proposto um passo a passo de montagem, apresentado no Manual de Montagem

e Vedação, umas das contribuições dessa dissertação. O passo a passo proposto de montagem para vedação é descrito abaixo:

- **Passo 1: Montagem do compartimento da câmera e bateria:**

Nesse passo a junta líquida Loctite 518 é aplicada no componente de modo a barrar a entrada de água pelos parafusos e frestas, como apresentado na Figura [2.10a](#). O compartimento montado fica conforme apresentado na Figura [2.10b](#).



(a) Modo de aplicação da junta líquida no componente.

(b) Compartimento da câmera e bateria montado.

Figura 2.10: Passo 1 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.

Fonte: O autor.

É possível observar no compartimento da bateria, que insertos metálicos foram utilizados para evitar o rompimento da rosca na peça de poliacetal, garantindo assim o aperto correto. No compartimento da câmera, as tampas transparentes que protegem a entrada de água pelos LEDs e pela câmera, foram previamente coladas com silicone neutro transparente.

- **Passo 2: Montagem do chassi central:**

Neste passo é realizada a montagem do chassi central do robô. O método de vedação utilizado foi também junta líquida Loctite 518 devido a geometria da superfície não permitir outro método que seja eficiente. A junta foi aplicada tanto na lateral do componente montado no Passo 1, tanto nas superfícies de contato das placas laterais internas. O modo de aplicação é exemplificado na Figura [2.11a](#) e Figura [2.11b](#). Já o chassi após a realização da montagem é apresentado na Figura [2.11c](#).

- **Passo 3: Montagem dos Mancais:**

Durante a montagem dos mancais, os rolamentos são posicionados no eixo com auxílio de uma prensa hidráulica. A Figura [2.12a](#) apresenta o rolamento sendo posicionado no eixo na prensa, enquanto a Figura [2.12b](#) é o conjunto após a montagem dos espaçadores e rolamentos. Em seguida, o conjunto é posicionado na base do mancal também com a prensa hidráulica. Feito isso, o conjunto é preso com um anel elástico na parte interna, enquanto na parte externa o retentor completa o conjunto para garantir a vedação.



(a) Aplicação da junta líquida na lateral do compartimento central.

(b) Aplicação da junta líquida (veda flanges) na placa lateral interna.

(c) Chassi central montado.

Figura 2.11: Passo 2 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.

Fonte: O autor.

Terminando a montagem do mancal, é iniciado o posicionamento deste nas placas laterais externas. Nessa parte a vedação é realizada com papelão hidráulico (guarnital). A junta é cortada no formato da face de apoio, umedecida com uma pequena camada de graxa para rolamentos (NLGI-2) em ambos os lados, posicionada na placa lateral e parafusada. O procedimento de posicionamento do mancal na placa é exemplificado na Figura [2.12c](#).



(a) Montagem dos rolamentos no eixo com auxílio da prensa hidráulica.

(b) Eixo do mancal montado com os rolamentos e espaçadores entre eles.



(c) Montagem da junta e do mancal na placa lateral externa.

Figura 2.12: Passo 3 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.

Fonte: O autor.

• **Passo 4: Montagem das Laterais:**

Após o posicionamento dos mancais nas placas laterais externas, estas são montadas no chassi central do robô, sendo parafusadas nas placas laterais internas. Nessa interface a vedação é realizada também por papelão hidráulico umedecido com graxa para rolamentos, da mesma forma que a interface dos mancais com a placa externa. Na Figura 2.13a é possível observar as juntas sendo confeccionadas, enquanto a Figura 2.13b apresenta o corpo do robô após a montagem.



(a) Confeção das juntas em papelão hidráulico das placas laterais externas.

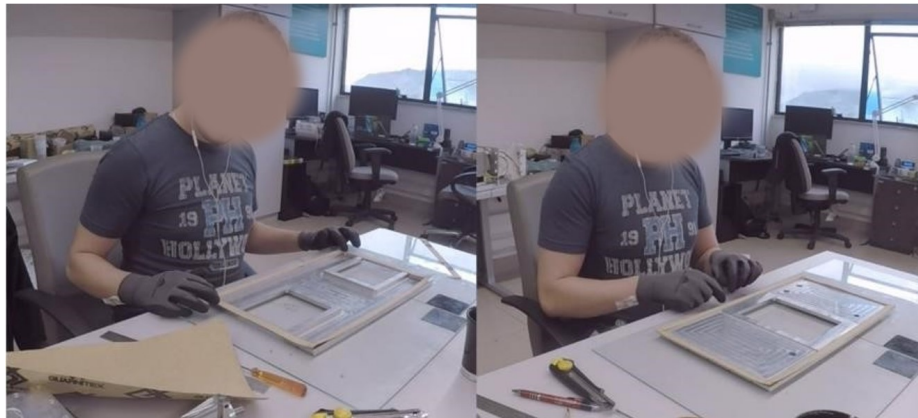
(b) Placas laterais externas montadas no chassi central do robô.

Figura 2.13: Passo 4 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.

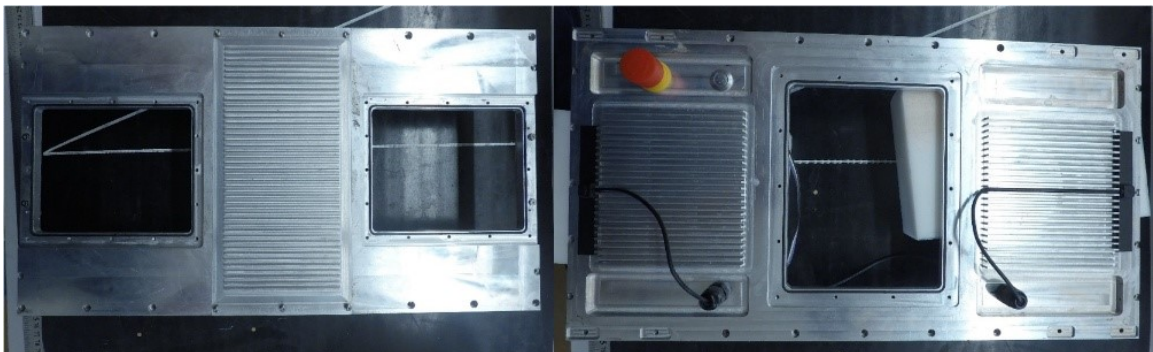
Fonte: O autor.

- **Passo 5: Montagem das tampas superior e inferior:**

Na montagem das tampas superior e inferior, as juntas utilizadas são, como nos mancais e nas laterais externas, também confeccionadas em papelão hidráulico umedecidas com graxa para rolamentos. A confecção das juntas é observada na Figura 2.14a. Já nas tampas central superior e das baterias, foi escolhido O-ring como método de vedação devido a alta frequência de abertura destas. Os botões de emergência e de ligar o robô vem de fábrica com certificação IP-67, e a saída de cabos de antena é vedada com prensa cabos. Tal vedação pode ser observada na Figura 2.14b.



(a) Confecção das juntas de vedação da tampa superior e inferior.



(b) Aplicação dos cordões de borracha de vedação (O-ring) na tampa central superior e tampas das baterias.

Figura 2.14: Passo 5 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.

Fonte: O autor.

- **Passo 6: Adesivagem:**

Este passo não estava previsto no projeto de vedação original, porém, como nos testes durante a montagem alguns pontos de entrada de água foram encontrados, e não foi possível resolver de imediato devido as pequenas variações na montagem ($\approx 0,7\text{ mm}$) entre as superfícies de contato da tampa superior com o chassi central, foi necessário realizar a adesivagem do robô, tampando todas as juntas com fita silver tape, diminuindo assim a pressão da água sobre as juntas internas e conseqüentemente vedando o robô. O robô adesivado é apresentado na Figura 2.15.

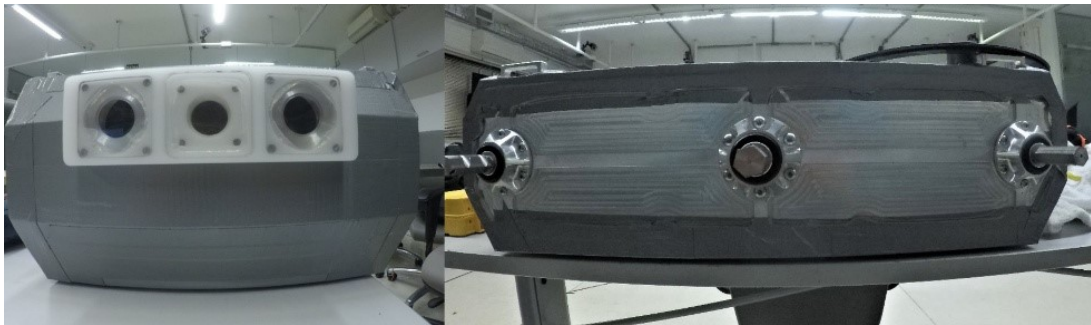


Figura 2.15: Passo 6 da montagem do sistema de vedação do EspeleoRobô II.

Fonte: O autor.

2.5. Testes de Validação do Sistema de Vedação

Após os testes de conceito mostrarem os sistemas sugeridos de vedação como eficientes para as interfaces testadas nas caixas, a proposta de vedação do corpo foi desenvolvida. Em seguida, após a fabricação das peças, as juntas e métodos de vedação foram instaladas no corpo do robô que foi submerso para verificação do correto funcionamento destas. Esta Seção é baseada nos ensaios e resultados publicados e apresentados nos relatórios técnicos por de Barros *et al.* (2019) e de Barros *et al.* (2020).

2.5.1. Validação da Vedação Aplicada no Robô

A fabricação do Robô foi realizada em uma empresa conveniada ao ITV e acompanhada de perto pelos responsáveis do projeto. Após as peças estarem prontas foi realizada a montagem do dispositivo no galpão da empresa para corrigir possíveis problemas de usinagem e também para que fosse feito um teste dos métodos de vedação propostos na etapa anterior do projeto.

Neste teste, foi possível verificar que os métodos propostos teoricamente na fase anterior não se mostraram completamente eficazes. Na Figura 2.16a é possível observar o robô completamente montado e submerso e um cronômetro que marcava o tempo que o mesmo permaneceu debaixo d'água. Já na Figura 2.16b é possível observar uma lâmina de água no fundo do robô após o teste.

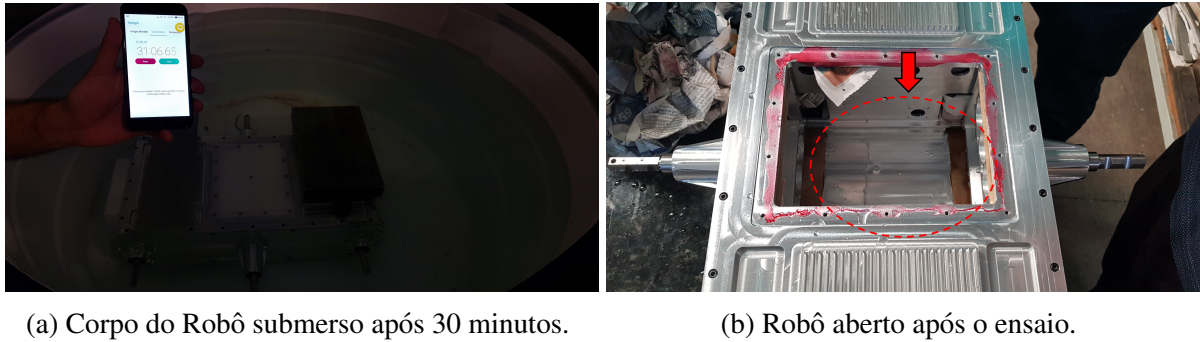


Figura 2.16: Teste de validação da vedação na empresa fabricante dos componentes.
 Fonte: O autor.

Os métodos de vedação propostos não foram eficazes possivelmente devido a deformações nas tampas de poliacetal que não tiveram força suficiente para comprimir as juntas, e também por desvios de montagem causados pela usinagem nas junções das placas lateral interna e externa com as tampas superior e inferior, o que deixou sulcos maiores que a junta de papelão hidráulico fosse capaz de preencher ($> 0,4$ mm), sendo aí um ponto de entrada de água.

2.5.1.1. Ajustes Pós Teste Inicial e Montagem da Nova Vedação Proposta

Após os testes iniciais realizados no galpão da empresa que fabricou as peças, foi possível perceber que alguns dos métodos propostos não foram eficientes em certas partes do robô, por isso foi realizado um estudo e alguns desses métodos foram alterados para garantir o grau de proteção proposto.

Inicialmente a tampa da abertura central superior foi fabricada em poliacetal e a vedação proposta em papelão hidráulico (guarnital), e como este método não foi eficiente nos testes anteriores foi testado também junta líquida Loctite 518 (veda flanges) e cortiça emborrachada. No entanto, nenhum dos métodos foi eficaz. No caso da cortiça emborrachada, ainda foi gerada uma deformação na tampa que agravou a entrada de água. Tal efeito pode ser observado na Figura 2.17.



Figura 2.17: Deformação na tampa superior causada pela cortiça emborrachada.
 Fonte: O autor.

Após as tentativas mal sucedidas, a tampa foi novamente fabricada em alumínio 6061, o que levou a um aumento de 325 gramas (g) (equivalente a 92%), em relação ao componente de poliacetal. O método de vedação utilizado foi cordão de borracha (O-ring), que nos testes se mostrou eficaz. O mesmo ocorrido com a tampa central superior ocorreu com as tampas das baterias, e a mesma solução da parte superior foi aplicada.

Na proposta inicial teórica, entre a face interna da placa lateral interna e a lateral do compartimento da câmara, cortiça emborrachada seria utilizada como meio de vedação, que também não se mostrou eficaz e junta líquida Loctite 518 foi utilizada no lugar.

2.5.1.2. Validação da Nova Vedação Proposta

Após todo o procedimento de montagem ser realizado, o robô foi mergulhado em uma caixa d'água com 50 cm de profundidade e permaneceu submerso durante 30 minutos, e após a retirada e abertura o robô foi constatado a não entrada de água, definindo assim o método de vedação final. O teste foi repetido duas vezes em dias diferentes e as mesmas condições foram encontradas. Na Figura 2.18 é possível observar o robô submerso, bem como o cronômetro indicando o tempo que este permaneceu debaixo d'água. Já a Figura 2.19 apresenta a abertura do robô já no laboratório de Robótica e Controle do ITV.

É possível perceber que ao abrir a tampa central superior, o robô ainda estava molhado na parte externa, mas os papéis na parte interna estavam completamente secos. Na imagem da direita da Figura 2.19, também é possível ver o fundo do robô completamente seco, validando assim os métodos de vedação aplicados.



Figura 2.18: Robô submerso no teste de vedação e cronômetro indicando o tempo de permanência debaixo d'água.

Fonte: O autor.

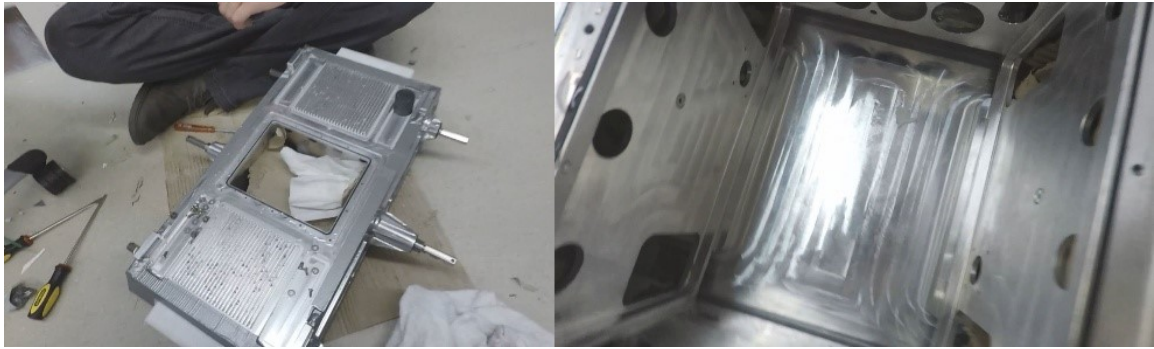


Figura 2.19: Robô sendo aberto após teste de vedação para comprovar a não entrada de água.
Fonte: O autor.

2.6. Avaliação do Robô em Ambientes Industriais

O projeto de vedação do EspeleoRobô tornou possível o acesso do robô a locais que não podiam ser inspecionados com a versão anterior, como galerias de barragens e dutos e tubulações. Estes locais por sua natureza contém presença de água, lama e entre outras coisas que poderiam danificar os componentes eletrônicos presentes no robô. Algumas utilizações do dispositivo em condições reais de operação são apresentadas a seguir:

1. Tubulação de Rejeitos:

Numa primeira tentativa, realizada em abril de 2018, quando o robô ainda não tinha proteção IP-67, a passagem por uma poça d'água no interior da tubulação ocasionou a queima de três motores do robô. Após a adaptação do projeto para segurança do dispositivo, foi feita uma nova tentativa em setembro de 2019, e o robô conseguiu realizar a inspeção sem que qualquer dano ao equipamento fosse observado [Magno et al. \(2019\)](#).

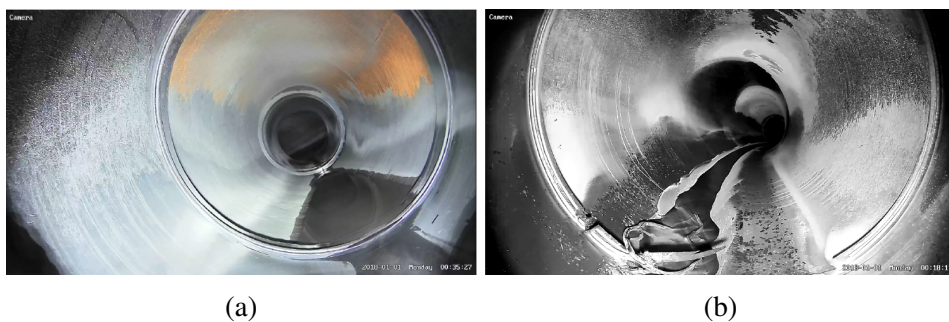


Figura 2.20: Possíveis pontos de atenção observados pela câmera durante a inspeção.
Fonte: [Magno et al. \(2019\)](#).

A inspeção foi realizada em um trecho que contém aproximadamente 400 m de extensão e é o ponto mais crítico da tubulação. Este trecho tem uma inclinação maior que as outras partes da tubulação, o que faz que o fluido se deslocar com maior velocidade, e consequentemente maiores taxas de desgaste podem ser observadas. Foram observados alguns

pontos de atenção na junção das tubulações que poderiam contribuir para o desgaste da tubulação. Alguns exemplos podem ser observados na Figura 2.20.

2. Tubulação em Ambiente Ferroviário

Foi realizada uma inspeção em tubulações presentes em ambientes ferroviários. O teste em questão foi realizado no ramal de Fábrica da Vale para inspeção de bueiros em outubro de 2020. Foi realizada uma inspeção visual do interior da tubulação que foi repassada para os responsáveis da ferrovia.

Nas Figuras 2.21a e 2.21b é possível observar o interior da tubulação inspecionada. Já nas Figuras 2.21c, 2.21d e 2.21e é possível observar a saída do robô de dentro da tubulação pós inspeção.

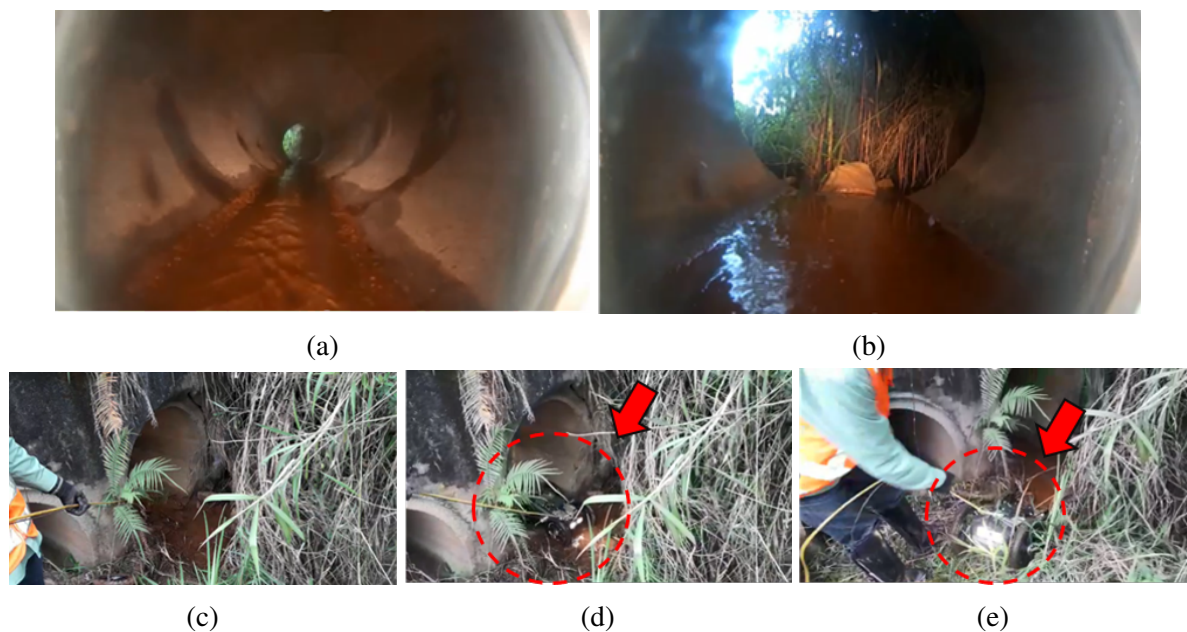


Figura 2.21: Inspeção realizada em ambiente ferroviário.

Fonte: Acervo ITV.

3. Moinhos de Bola

Os moinhos de bolas são equipamentos amplamente utilizados nas plantas de mineração onde o processo de moagem exige rígido controle de granulação do material para garantia da qualidade de seus produtos (WEG, 2021). Com o uso, o revestimento do moinho sofre desgaste e o nível de corpos moedores diminui com o atrito constante com o material. Para controle, são realizadas inspeções para determinar a espessura do revestimento e o grau de enchimento (nível de corpos moedores), que quando atingem um valor mínimo determinado pela equipe de manutenção, devem ser substituídos (revestimento) ou adicionados (corpos moedores) até o valor ideal de funcionamento. As operações são realizadas uma vez ao mês em cada moinho da planta. Esta atividade é uma atividade de espaço confinado e expõe o operador a vários riscos de acidente.



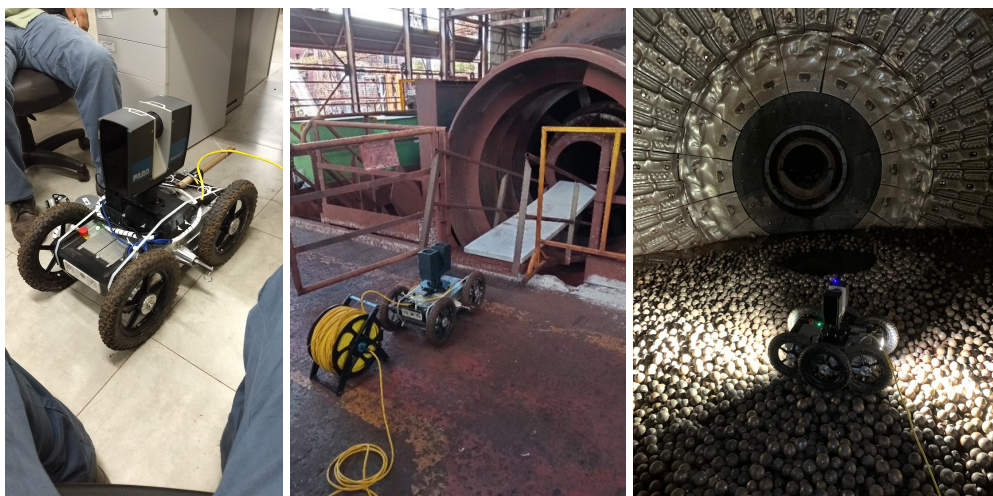
(a)

(b)

Figura 2.22: Água no interior do moinho de bolas antes da inspeção.

Fonte: Acervo ITV.

Pensando nisso, foi proposto a utilização do EspeleoRobô para adentrar ao moinho com o laser que fornece dados para a reconstrução 3D do interior do moinho e torna possível monitorar a espessura da parede de revestimento e o grau de enchimento deste. Antes de toda inspeção, o moinho deve ser lavado, e se o grau de enchimento estiver muito baixo, podem ocorrer acúmulos de água no interior do moinho que poderiam danificar os componentes eletrônicos do robô, caso este não tivesse a proteção IP-67. A Figura [2.22](#) apresenta o interior de um moinho de bolas cheio de água após a lavagem e antes da inspeção. A proposta de inspeção robótica consiste em acoplar o laser no EspeleoRobô, e este acessa o moinho através de uma rampa para escaneamento do moinho. A Figura [2.23a](#) apresenta o laser acoplado ao EspeleoRobô. Já a Figura [2.23b](#) mostra a rampa de acesso posicionada no cone de retenção do moinho para a entrada do robô, enquanto a Figura [2.23c](#) exibe o robô já dentro do moinho com o laser para inspeção.



(a)

(b)

(c)

Figura 2.23: Solução robótica proposta para inspeção de moinhos de bola.

Fonte: Acervo ITV.

4. Extravador de Barragem

Também foram realizados trabalhos de inspeção de rotina em um extravasor de barragem para acompanhamento da estrutura deste. Na Figura 2.24a é possível observar o robô na entrada do extravasor e na Figura 2.24b uma visão da câmera do robô no interior da galeria.



(a) Robô na entrada do extravasor.

(b) Visão da câmera de topo do robô no interior da galeria.

Figura 2.24: Inspeção do extravasor de barragem.

Fonte: Acervo ITV.

O nível de água no interior da galeria estava em $\approx 5\text{ cm}$, e no final da galeria se encontra a cascata de drenagem da barragem. Na Figura 2.25a é possível observar uma visão da câmera de topo do robô apresentando o final da galeria e a queda d'água. Já na Figura 2.25b é possível ter uma visão da câmera traseira do robô mostrando o início da galeria em encontro com o lago na saída da barragem.



(a) Foto do robô apresentando a cascata do extravasor.

(b) Visão da câmera traseira do robô no início da galeria.

Figura 2.25: Visão das câmeras do robô evidenciando o nível de água no extravasor.

Fonte: Acervo ITV.

5. Túneis em Ambientes de Mineração

É comum utilizar de inspeções visuais para liberação de estruturas na mineração pela equipe civil e geotécnica. Nesse contexto foi realizada uma inspeção em um túnel na mina de Capanema - MG para verificação do estado da estrutura e dos riscos que poderiam

haver no interior deste antes do acesso do homem. Este túnel está na rota de construção do Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD) que ligará a mina de Capanema a Timbopeba. Essa inspeção é crucial para início das obras de construção, que não podem ocorrer sem garantir a completa segurança de quem acessará o interior do túnel. Na Figura 2.26 é possível observar o robô adaptado com uma câmera de topo e dois LEDs submarinos no início de um dos túneis inspecionados.

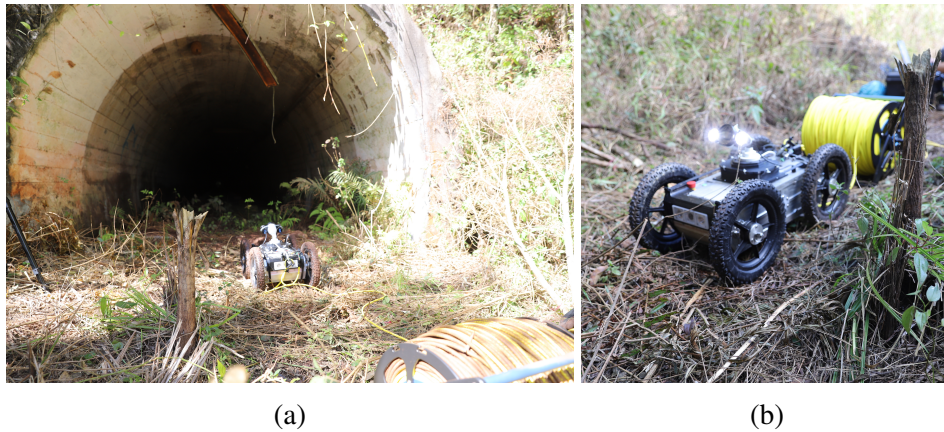


Figura 2.26: EspeleoRobô posicionado na entrada do túnel em Capanema.
Fonte: Acervo ITV.

Nessa operação é crucial a proteção IP-67 do robô, pois não se tinha ideia da condição que seria encontrada dentro do túnel, desativado desde a paralisação da mina em 2003. Na Figura 2.27a é possível observar o chão alagado a frente do robô durante a inspeção no túnel. Esse terreno é extremamente perigoso para operação pois não é possível determinar pelas câmeras se há valetas ou não, e uma queda de um robô sem proteção IP-67 dentro destas, pode danificar os componentes eletrônicos.

Na Figura 2.27b é possível observar uma foto do teto do túnel, com dois círculos vermelhos destacando pontos de infiltração de água do terreno. A água estava gotejando fortemente e a vedação foi necessária para transpor esse trecho.



(a) Visão da câmera frontal do robô.

(b) Visão da câmera de topo do robô.

Figura 2.27: Visão das câmeras do robô durante a inspeção do túnel em Capanema.
Fonte: Acervo ITV.

2.7. Considerações Finais

O projeto de vedação do EspeleoRobô foi motivado por um incidente durante uma inspeção, onde o robô caiu em uma poça d'água ocasionando a queima de três dos seus motores. A ideia é que fossem realizadas as mínimas alterações necessárias para vedação do corpo, mantendo assim o *form-factor* utilizado em simulações e no controle do robô.

Foram utilizadas várias técnicas de vedação no projeto, sendo estas anel de borracha O'ring, papel guarnital, junta líquida, retentores, além de uma camada de fita adesiva sobre as juntas para uma maior proteção. Feito isso, foi possível verificar a vedação do corpo conforme apresentado na Seção 2.5. Com a vedação do corpo garantida, o robô passou a ser utilizado para diversas atividades de inspeção em espaços confinados, consideradas críticas dentro das operações Vale. O robô já foi utilizado para inspeções em mais de 20 estruturas em diferentes unidades desde a sua construção em 2018, sendo algumas delas apresentadas nessa dissertação.

Sendo assim, é possível considerar o projeto de vedação do EspeleoRobô como um marco inicial do dispositivo nas atividades de inspeção industrial e espaços confinados, deixando de ser apenas um objeto de pesquisa, para um produto que possa ser escalado e utilizado em diferentes ambientes em toda a cadeia de mineração.

3 PROCEDIMENTO AUTOMÁTICO PARA EMENDA DE CORREIAS DE CABO DE AÇO

Pensando nos riscos a que o operador é exposto ao realizar o procedimento manual de emenda, o ITV e a Vale iniciaram um projeto para realizar a emenda de correias de forma automatizada. Como o procedimento é complexo e realizado em diversas etapas, o projeto foi dividido em sub-tarefas para atacar cada etapa separadamente.

Numa fase anterior do projeto, [Rodrigues *et al.* \(2019\)](#) apresentaram um estudo inicial para realizar a modelagem interna e externa da correia, obtendo a largura e altura da correia, além do posicionamento interno dos cabos de aço. Esses dados devem ser utilizados como referência no processo de remoção da cobertura de borracha da correia no processo automatizado. Posteriormente o processo de medição externa utilizando uma câmera RGB e luz estruturada foi descartado devido a condições hostis do ambiente industrial.

Na etapa atual, [Santos *et al.* \(2020\)](#) apresentam o sistema completo proposto em ambiente simulado e ilustrado pela Figura 3.1, que é composto por um gerador de energia, dois braços manipuladores que se movem sobre trilhos posicionados ao lado do transportador, os controladores dos dois braços robóticos, e a prensa de vulcanização entre duas plataformas de emenda, este último, semelhante ao processo manual.

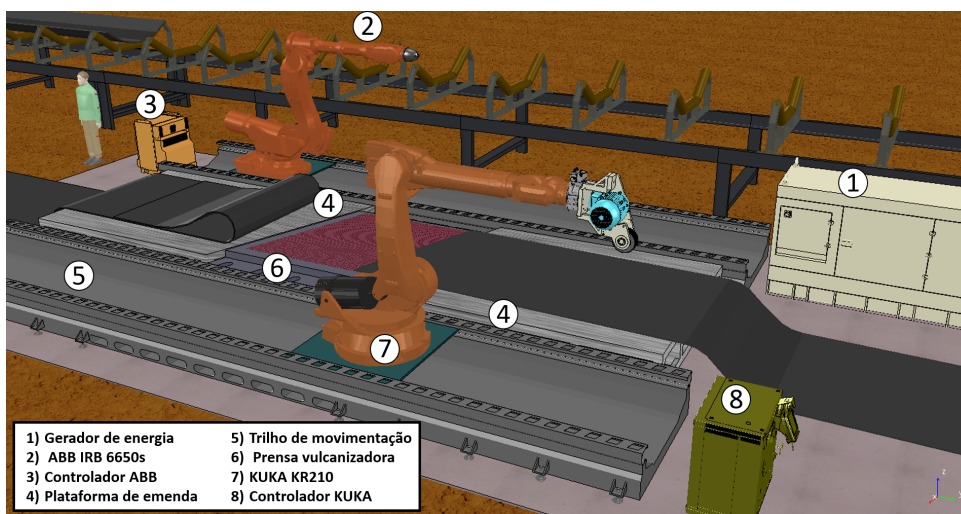


Figura 3.1: Proposta de um sistema automático para emenda de correias de cabo de aço.

Fonte: [Santos *et al.* \(2020\)](#).

Os sensores e ferramentas são acoplados aos efetadores dos braços robóticos que fazem movimentos pré determinados para realização das atividades. [Santos *et al.* \(2020\)](#) também apresentam bancadas de teste de sensores em menor escala para avaliar o funcionamento das trajetórias programadas e o correto funcionamento dos sensores.

Esta dissertação propõe e avalia uma ferramenta de corte rotativa que no procedimento real irá acoplada a um braço manipulador para remoção da camada de borracha da correia na preparação da emenda; parte considerada mais crítica do processo e onde os operadores

estão mais expostos aos riscos de acidentes. Os testes são realizados em uma bancada de corte instrumentada que simula a ferramenta real e também apresentada nessa dissertação. Após os ensaios, os dados são inseridos em equações de literatura para estimar os esforços a que o manipulador robótico estará submetido ao realizar o procedimento automático.

3.1. Procedimento de Emenda Manual

O procedimento de emenda manual pode ser dividido em três partes principais: preparação, montagem e vulcanização. A parte de preparação inicia com a marcação do viés (Figura 3.2a) e termina com o filetamento dos cabos (Figuras 3.3a e 3.3b). Após a preparação, o operador executa a montagem do conjunto posicionando os cabos de aço e as coberturas de borracha sobre o platô da prensa de vulcanização. A última parte do procedimento é a vulcanização da emenda. O procedimento descrito abaixo foi adaptado do manual técnico de emenda de correias de cabo de aço da VALER (s.d.).

A área não removível da emenda e que determina o ângulo de escalonamento, também conhecida como viés, é marcada em relação a linha base (Figura 3.2a), com inclinação de 20° , e em seguida cortada com a faca olfa inclinada em 60° , tal como apresentado na Figura 3.2b.

Com o viés marcado e cortado, uma pequena aba deve ser cortada (Figura 3.2c) e levantada com auxílio de uma ferramenta (torquês), puxada com um guincho manual de catraca (tirfor) acoplado a uma garra enquanto é cortada com a faca olfa. Isso deve ser feito até a completa remoção da camada da borracha.



(a) Marcação do viés.

(b) Corte do viés.

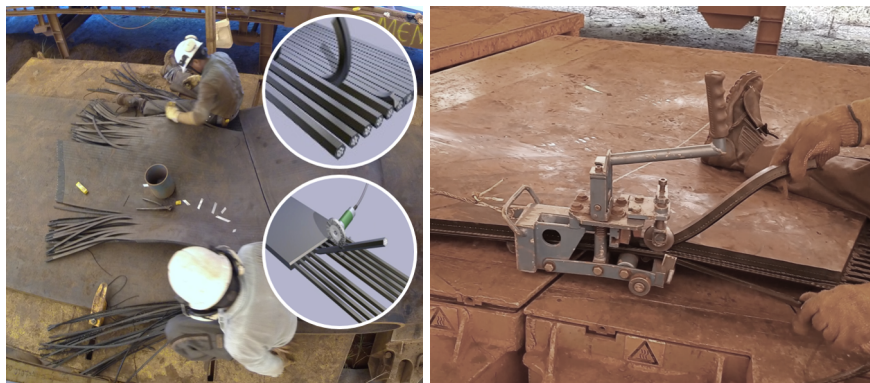
(c) Remoção da cobertura de borracha.

Figura 3.2: Etapas iniciais do procedimento de preparação da emenda de correias.

Fonte: Adaptado do Acervo ITV (2018).

A etapa de separação dos cabos é chamada filetamento e este procedimento pode ser realizado tanto cortando a borracha entre eles com o estilete industrial (Figura 3.3a) e dando acabamento com uma lixadeira, ou com o auxílio de um filetador (Figura 3.3b). Este procedimento é diferente para os sites operacionais. O operador deve estar atento que, em ambos os métodos, a borracha na superfície cabos de aço não pode ser completamente removida, sendo

necessário deixar uma camada da borracha original, que auxiliará na melhor adesão dos cabos com a nova manta de borracha na etapa de vulcanização.



(a) Filetamento com estilete industrial (Olfa).

(b) Filetamento com equipamento específico.

Figura 3.3: Filetamento dos cabos na preparação da emenda de correias de cabo de aço.

Fonte: Adaptado do Acervo ITV (2018).

Finalizando a etapa de preparação, é iniciada a montagem da emenda para vulcanização, sendo apresentado na Figura 3.4a. A prensa de vulcanização que está posicionada entre as duas partes da plataforma de realização da emenda é forrada com TNT ou tergal, e a camada inferior de borracha (manta inferior) da correia é posicionada sobre esta. Em seguida uma camada de uma borracha com um menor *shore* (borracha de ligação) é colocada sobre a manta inferior para que os cabos de aço sejam posicionados.



(a) Início da montagem da emenda.

(b) Alinhamento da correia e posicionamento dos cabos.

Figura 3.4: Etapas do processo de montagem da emenda manual.

Fonte: Adaptado do Acervo ITV (2018).

Feito isso, os dois lados da correia são colocados sobre o conjunto montado acima da prensa, de forma que os centros e laterais dos dois lados estejam alinhados (Figura 3.4b). Em seguida os cabos são dispostos de forma intercalada; uma camada de cola é aplicada e os espaços vazios entre eles preenchido com borracha de ligação (comumente chamado de macarrão), conforme ilustrado na Figura 3.5a.



(a) Preenchimento de vazios com "macarrão".

(b) Posicionamento da cobertura da correia.

Figura 3.5: Últimos passos da montagem do conjunto da emenda.

Fonte: Adaptado do Acervo ITV (2018).

Após preencher todos os espaços com macarrão, é colocada uma camada de borracha de ligação e a cobertura superior da correia (Figura 3.5b), finalizando a etapa de montagem. O último passo é a vulcanização, que usualmente é realizada à temperatura de 145°C , pressão mínima de $10\text{Kg}/\text{cm}^2$ e máxima de $14\text{Kg}/\text{cm}^2$, e tempo de 3 minutos a cada 1 mm de espessura da correia.

Ao final do processo de vulcanização, a prensa é mantida à pressão de $12\text{Kg}/\text{cm}^2$ até que a temperatura seja menor que 100°C , e só após isso a pressão deve ser aliviada gradativamente e a prensa aberta.

3.2. Soluções existentes para inspeção e manutenção de transportadores

Existem algumas alternativas já disponíveis para inspeção e monitoramento de TC's. É possível utilizar, por exemplo, um sistema de diagnóstico baseado em medidas de campo magnético e redes neurais desenvolvidas para gerar relatórios de status de correias transportadoras (BLAZEJ *et al.*, 2017) ou métodos para prever a resistência à fadiga em emendas (BLAZEJ *et al.*, 2013).

Santos *et al.* (2019) propõe automatizar a inspeção de transportadores de correia utilizando técnicas de inteligência artificial, treinando um classificador de padrões por meio de Redes Neurais Convolucionais a partir de imagens RGB para identificar a aglomeração de sujeira nas estruturas. Os resultados obtidos demonstram uma acurácia de classificação variando entre 81,8% e 95,45% durante os testes realizados.

Também buscando facilitar inspeções nos transportadores, Netto (2019) apresentou um estudo para tentar resolver o problema de monitoramento, propondo um método de visão computacional baseado em luz estruturada para detectar defeitos em correias transportadoras.

Carvalho *et al.* (2020) utiliza um Veículo Aéreo não Tripulado (do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) com uma câmera térmica instalada que sobrevoa as estruturas dos TC's e mapeia divergências em relação às condições normais. Já Garcia *et al.* (2019) propõe a

utilização de uma plataforma robótica móvel articulada com braço manipulador (denominada ROSI) para a inspeção de correias transportadoras através de imagens coloridas e térmicas, informações de áudio e vibrações medidas no transportador. A Figura 3.6 apresenta as etapas propostas de inspeção a serem realizadas pela ROSI.

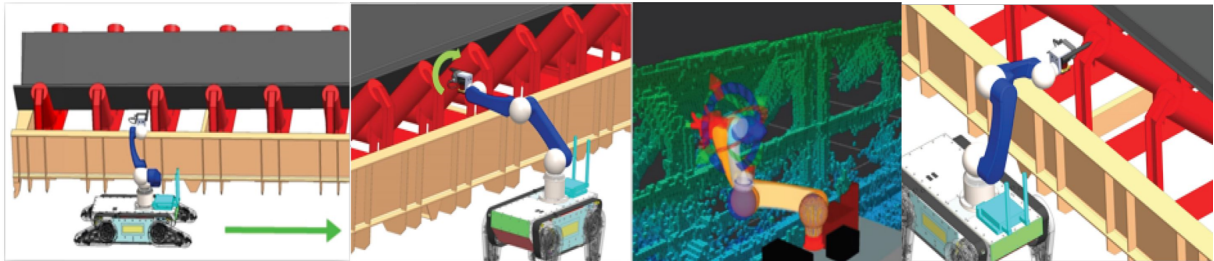


Figura 3.6: Etapas de inspeção propostas para o ROSI.

Fonte: Garcia *et al.* (2019).

Ao analisar a substituição de componentes nos transportadores, um dos principais dispositivos disponíveis no mercado é o Trocador de Rolos Robótico (do inglês *Robotic Idler Changer*, RIC), desenvolvido pela Scott da Nova Zelândia para a substituição de roletes. O equipamento, composto por um braço manipulador robótico e ferramentas auxiliares, é montado em um caminhão e emprega sensores para varrer a estrutura intermediária, longarina e correia do transportador, utilizando essas informações para posicionar uma unidade de elevação sob a correia, e em seguida realizar a troca do rolete (SCOTT, 2020). Esse dispositivo pode ser observado na Figura 3.7a.

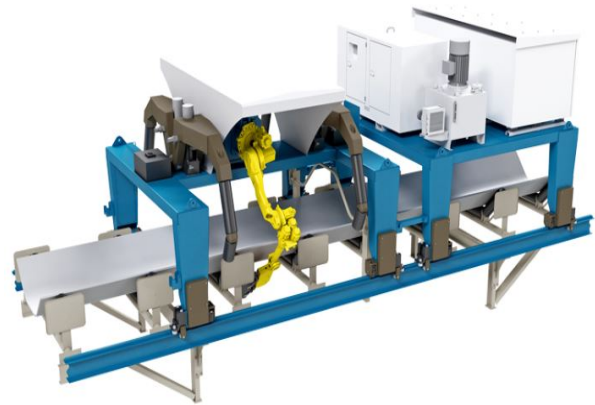
Outro equipamento com a mesma finalidade é o *Splider*, da empresa australiana Sandpit Innovation. Para substituir o rolete, esse dispositivo utiliza um conjunto de braços de elevação capazes de levantar uma correia carregada, um robô industrial instalado numa base giratória, e unidades de potência hidráulica e elétrica embarcadas num veículo que se locomove em trilhos (LIU *et al.*, 2014; SANDPIT, 2020). Na Figura 3.7b é possível observar esse dispositivo.

As emendas são geralmente o ponto mais fraco da correia (KÜSEL, 2009), e apesar de representarem um custo anual considerável na composição dos custos totais de manutenção (JURDZIAK *et al.*, 2019), quase não se encontram soluções sugerindo automatizar o processo.

Um solução inovadora propõe a utilização de tecnologias de jato d' água para remover a camada de borracha da correia (ZAREMBA *et al.*, 2017). No entanto, o procedimento de emenda requer uma camada mínima (≈ 1 mm) de cobertura de borracha nos cabos de aço para a vulcanização e o jato d' água remove toda a cobertura dos cabos. Assim, para utilização dessa tecnologia, seria preciso realizar adaptações para atender os requisitos de processo.



(a) Robotic Idler Changer



(b) Spidler

Figura 3.7: Dispositivos robóticos para substituição de rolos em transportadores.

Fonte: Sandpit (2020); Scott (2020).

3.3. Projeto da bancada de testes instrumentada para remoção de borracha da correia

Para selecionar um manipulador robótico que seja capaz de realizar o procedimento de preparação de emenda, é preciso conhecer os esforços que esse equipamento deve suportar. Pensando nisso, uma bancada instrumentada foi projetada para medir e estimar as forças e momentos fletores envolvidos na tarefa de remoção de borracha. O projeto da máquina segue normas de projetos de equipamentos industriais, e pode ser considerado como um robô cartesiano de três Graus de Liberdade (GDL) com uma ferramenta acoplada. Dois GDL são ajustados manualmente e o terceiro é acionando por comando de um motor.

3.3.1. Projeto Mecânico

O projeto da bancada de ensaios para remoção de borracha foi desenvolvido baseado nos conceitos de uma máquina raspadora¹ utilizada na recapagem de pneus (Figura 3.8). Tal equipamento é composto por dois motores: um para giro do pneu e outro para rotacionar a ferramenta raspadora.

De forma similar, a bancada de ensaios também possui dois motores, onde um realiza o movimento linear da mesa móvel e outro gira a ferramenta de corte. Porém, na máquina de recapagem, o operador pressiona a ferramenta de corte sobre a cobertura de borracha do pneu para realizar a raspagem e na bancada de ensaios a ferramenta fica fixa e a mesa móvel se movimenta em direção a esta.

A Figura 3.9 ilustra os principais equipamentos da bancada de testes, incluindo a faca rotativa, dois motores assíncronos e o movimento realizado pela mesa móvel.

¹<http://www.elgirubber.com/Portuguese/assets/3-raspadora—bf-6-series.pdf>

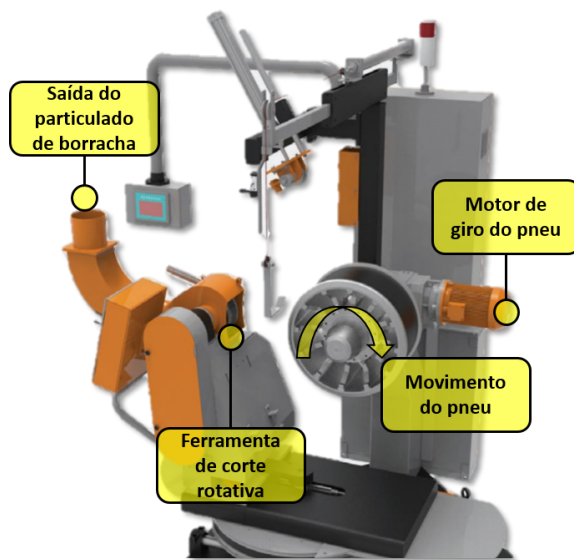


Figura 3.8: Equipamento para remoção de borracha durante a recapagem de pneus.
 Fonte: Adaptado de Elgirubber.

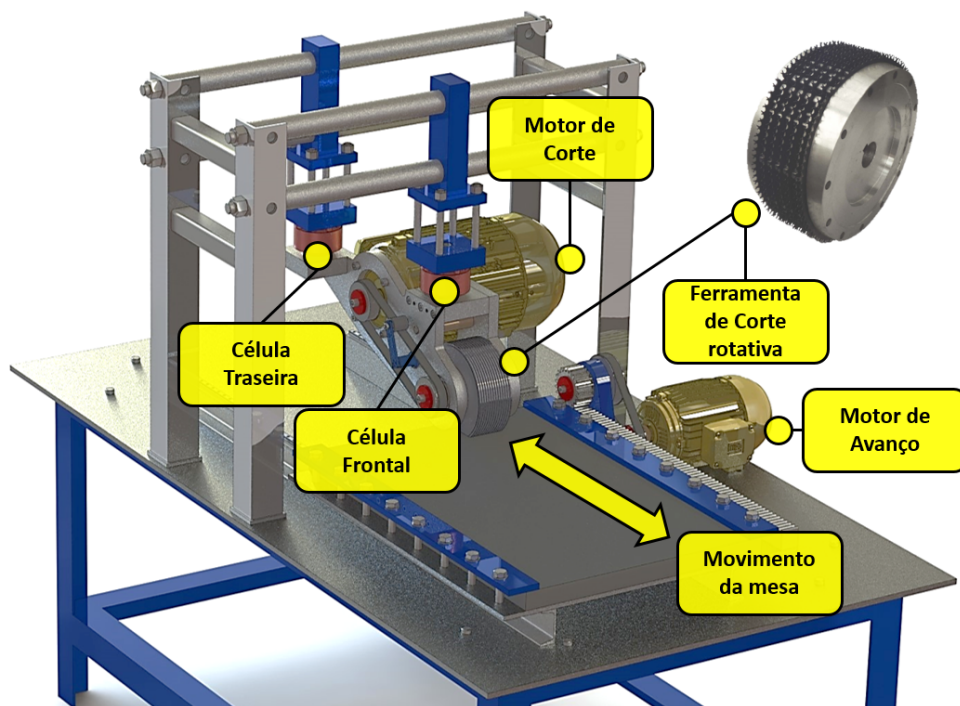


Figura 3.9: Principais componentes da bancada de ensaios projetada.
 Fonte: O autor.

Para remover a cobertura de borracha da correia, a ferramenta de corte selecionada é um conjunto raspador de 9”, com pinos de 5/16”, espaçadores de 3/8” e 28 serras modelo *Rasp Tyre II*. Esse kit foi escolhido pela ampla empregabilidade na indústria de recapagem com uma boa eficiência.

O motor que gira a ferramenta tem 11 Kilowatt (Kw) de potência. O movimento é transmitido por polias e correias sincronizadoras do tipo 8M-HTD, produzidas pelas Gates. Outro motor realiza o movimento da mesa móvel através de um conjunto pinhão-cremalheira. Existe também um sistema de polias e correias sincronizadoras que reduzem a velocidade do motor e aumenta o torque. Os dados técnicos principais desses motores são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados técnicos dos motores utilizados na bancada de ensaios.

Dados Técnicos dos Motores		
	Corte	Avanço
Modelo	WEG W22	WEG W22
Potência	11 Kw	0,75 Kw
N° de Polos	2	6
Rotação Nominal	3600 rpm	1200 rpm
Alimentação Elétrica	220 V	220 V

Fonte: Catálogos WEG.

A bancada de ensaios irá ajudar na avaliação da influência dos parâmetros de corte na forças envolvidas na tarefa de remoção de borracha. Para isso, são controladas a velocidades dos motores de corte e avanço, e a profundidade de corte ajustada manualmente. Também é possível regular a posição lateral da ferramenta de corte manualmente.

3.3.2. Projeto Elétrico e de Instrumentação

Os principais componentes responsáveis pela instrumentação e aquisição de dados do equipamento são inversores de frequências, células de carga, conversores de sinal e uma placa de aquisição de dados.

Foram selecionados dois inversores de frequência WEG CFW500: um para comandar o motor de 0,75 (Kw) e outro para o motor de 11 (Kw). Esses inversores permitem controlar a velocidade e torque dos motores com compensação de escorregamento que ocorrem devido a altas cargas no eixo do motor.

As células de carga N-400 da Transtec são responsáveis por medir as forças verticais. Tais células são de tração-compressão, com capacidade de 1 (ton), e sensibilidade de 2 milivolt (mV)/Volts (V). A calibração inicial feita em laboratório considerou apenas esforços de compressão. Foram adquiridos sinais das células sem carga aplicada; em seguida foram realizadas medições com incrementos de 100 Quilograma-força (Kgf) observados no marcador da prensa

manual, até atingir o valor de 900 (Kgf) para as duas células de carga. Os gráficos gerados com esses dados para ambas as células são apresentados na Figura 3.10.

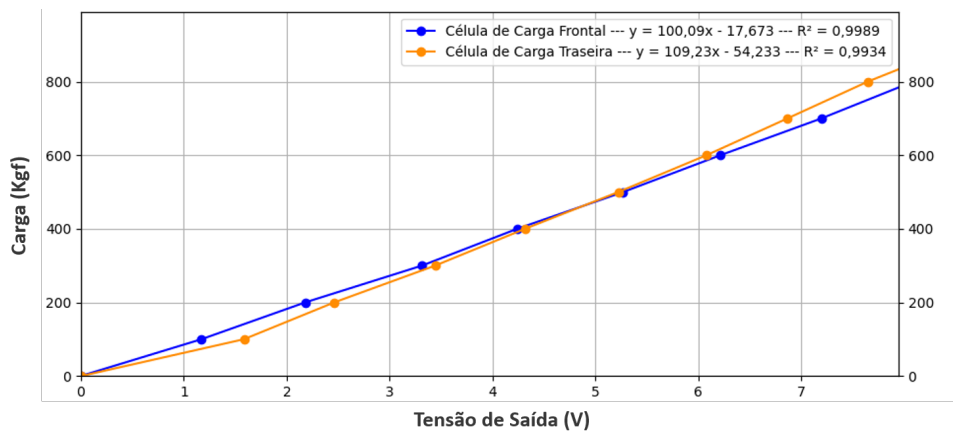


Figura 3.10: Curva de calibração das células de carga.

Fonte: O autor.

De acordo com o diagrama de instrumentação apresentado na Figura 3.11, cada célula de carga é conectada aos conversores de sinal LC-4200, com entrada de 0 a 20 (mV), saída de 0 a 10 (V) e alimentados com tensão de 24 Volts de Corrente Contínua (Vcc).

Os conversores de sinal por sua vez são conectados a placa de aquisição de dados modelo USB-009 da National Instruments para capturar os dados das células. Os inversores de frequência também são conectados a placa de aquisição, permitindo assim medir a corrente e a tensão dos motores durante o ensaio.

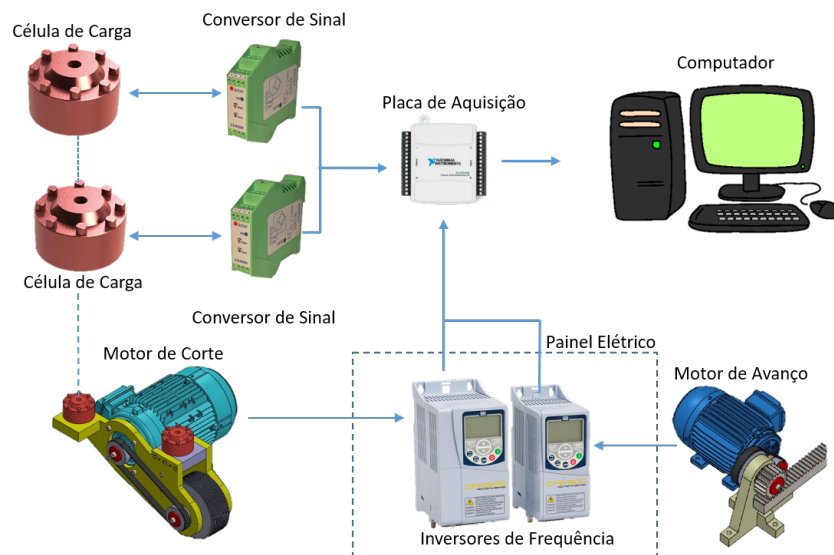


Figura 3.11: Diagrama de instrumentação da bancada de ensaios.

Fonte: O autor.

Para garantir segurança durante os ensaios, os inversores estão dentro de um painel elétrico com botão de emergência e lógica que não permite operação do equipamento com a porta aberta.

3.3.3. Calculando os esforços envolvidos no processo automático

Para que seja possível selecionar um braço manipulador apropriado para realizar a remoção da borracha da correia, é necessário estimar os esforços envolvidos no procedimento automático de remoção. Esses esforços são calculados a partir dos dados obtidos nos ensaios com a bancada de testes instrumentada.

Na Figura 3.12 é possível perceber as principais forças causadas pela interação da ferramenta de corte e a correia transportadora, e as forças e momentos resultantes no efetuador do braço manipulador. Na imagem, F_{Vc} representa a força vertical e F_{Hc} a força horizontal de corte, enquanto F_{Wt} se refere a força gerada pelo peso da ferramenta. Já os esforços resultantes que agem no efetuador do braço manipulador são simbolizados pelas forças F_{Xe} e F_{Ze} e momento M_{Ye} . O sistema de coordenadas adota a convenção de robótica com o eixo Z direcionado para fora no eixo normal do efetuador.

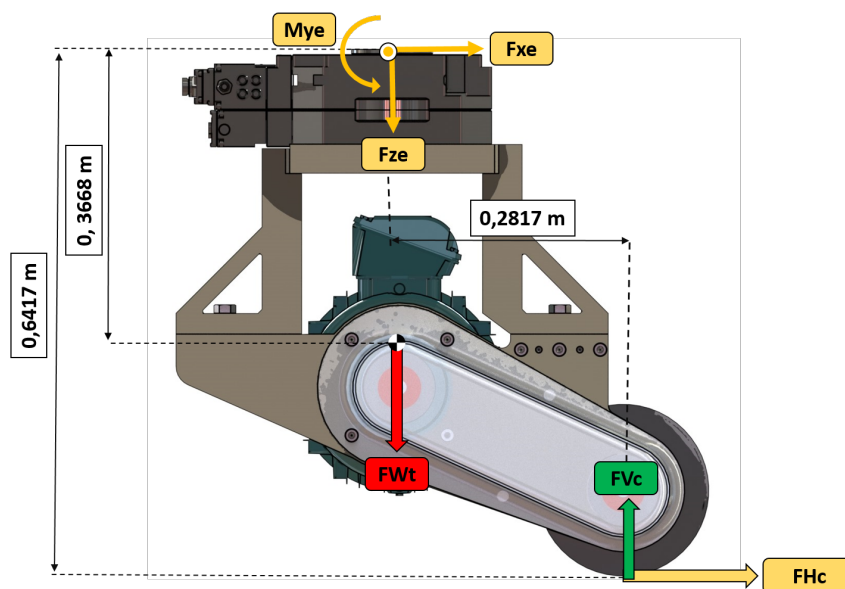


Figura 3.12: Diagrama de forças na ferramenta de corte do procedimento automático.

Fonte: O autor.

Para calcular os esforços resultantes no manipulador, foi adotado o método de análise estática onde o somatório de forças e momentos é igual a zero. A Equação (3.1) descreve o somatório de forças na direção do eixo X, utilizado para calcular F_{Xe} em Newtons (N):

$$F_{Xe} + F_{Hc} = 0. \quad (3.1)$$

É possível definir F_{Ze} em (N) fazendo o somatório das forças na direção do eixo Z, como apresentado na Equação (3.2):

$$F_{Ze} - F_{Vc} + F_{Wt} = 0. \quad (3.2)$$

Finalmente, os momentos em relação ao eixo Y são calculado através da Equação (3.3)

para obter M_{Y_e} em Newtons-metro (N.m), considerando as distâncias apresentadas na Figura 3.12:

$$M_{Y_e} + 0,6417 F_{H_c} + 0,2817 F_{V_c} = 0. \quad (3.3)$$

As Equações (3.1), (3.2) e (3.3) dependem das forças de corte F_{H_c} e F_{V_c} , que são calculadas pelos dados medidos com a bancada de testes instrumentada. Como apresentado por Budynas e Nisbett (2011), primeiro devem ser calculadas as forças tangentes de corte e avanço dos motores utilizando a Equação (3.4):

$$F_i = i_t \times \eta_t \times \left(\frac{\tau_i}{r_i} \right), \quad (3.4)$$

onde F_i é a força tangente do motor em (N), i_t é a taxa de redução e η_t é a eficiência de transmissão de potência. τ_i é o torque do motor em (N.m) e r_i é o raio primitivo do pinhão do motor de avanço ou da ferramenta de corte em metros (m).

A Equação (3.5) descreve o torque do motor:

$$\tau_i = \frac{P_i \times 1000}{\omega_i}, \quad (3.5)$$

considerando a potência consumida pelo motor nos ensaios P_i em (Kw) e a velocidade angular ω_i em Radianos por segundo (rad/s). A velocidade angular ω_i é calculada em função da rotação síncrona do motor em Rotações por minuto (RPM), como apresentado na Equação (3.6):

$$\omega_i = \frac{2\pi \times RPM_i}{60}. \quad (3.6)$$

Substituindo a Equação (3.6) na Equação (3.5), o torque do motor em função da potência consumida e da rotação síncrona pode ser estimado pela Equação (3.7) :

$$\tau_i = \frac{60000 \times P_i}{2\pi \times RPM_i}. \quad (3.7)$$

A potência de motores trifásicos pode ser calculada pela Equação (3.8) conforme apresentado por Umans *et al.* (2013) e Fernandes e Quirino (2017):

$$P_i = \frac{\sqrt{3} \times V_{F-F_i} \times I_i \times \cos(\phi_i) \times \eta_i}{1000}, \quad (3.8)$$

utilizando os valores medidos V_{F-F_i} em (V) e corrente I_i em Ampère (A), e os valores constantes de fator de potência $\cos(\phi_i)$ e eficiência η_i fornecidos pelo fabricante.

É possível calcular a força horizontal de corte F_{H_c} através das Equações (3.4), (3.7) e (3.8), utilizando o raio do pinhão do conjunto pinhão-cremalheira r , a rotação RPM do motor de avanço e os valores de corrente I medidos diretamente da bancada durante os ensaios.

Finalmente para calcular a força vertical F_{V_c} , é considerado o diagrama de forças apre-

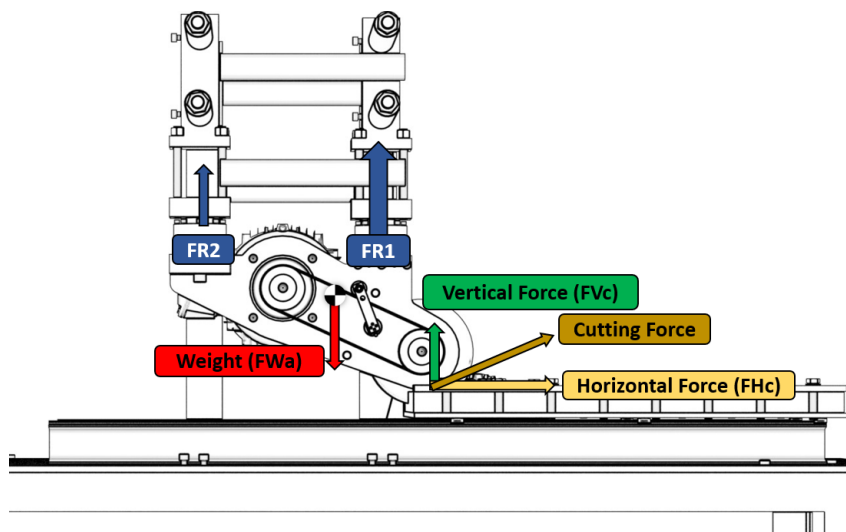


Figura 3.13: Forças atuantes na bancada de ensaios.

Fonte: O autor.

sentado na Figura 3.13, onde F_{R_1} e F_{R_2} são as forças de reação obtidas através das células de carga, e F_{W_a} é o peso do conjunto.

Utilizando novamente o princípio de análise estática, onde o somatório das forças na direção do eixo Y é igual a zero, a Equação (3.9) define F_{V_c} em função de F_{R_1} e F_{R_2} :

$$F_{W_a} - F_{V_c} - F_{R_1} - F_{R_2} = 0 \quad (3.9)$$

3.4. Resultados e Discussão

Testes preliminares com a bancada de testes instrumentada para remoção de borracha fornecem dados para calcular a potência consumida pelos motores durante o ensaio e o torque necessário para estimar forças e momentos envolvidos no processo. Um vídeo online² ilustra o funcionamento do equipamento.

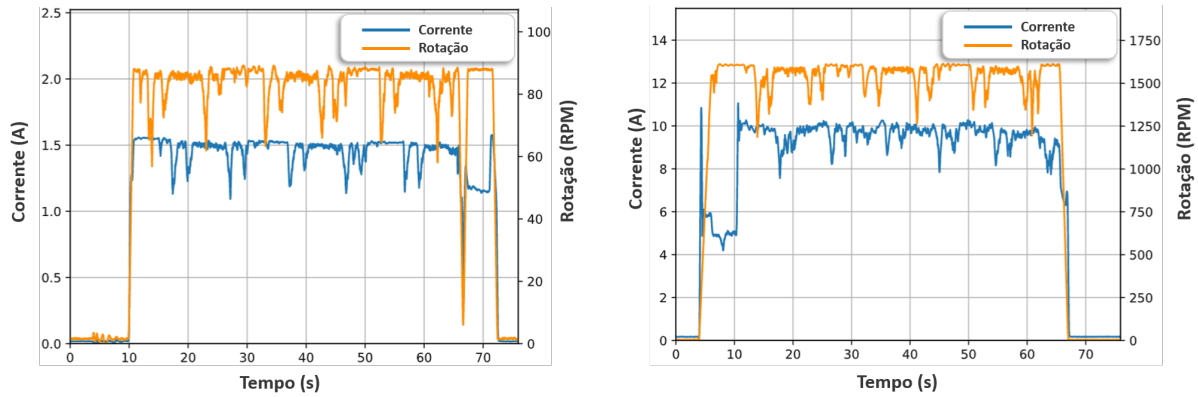
3.4.1. Validação Experimental da bancada de ensaios

Para validar a metodologia experimental, foi realizado um teste preliminar para calcular os esforços resultantes ao performar o corte de borracha na correia. As condições de operação adotadas aos motores foram: acionamento a 5 Hertz (Hz) para o motor de avanço e 30 (Hz) para o motor de corte. A profundidade de corte definida foi de 3 milímetros (mm).

A remoção da borracha ocorre entre 10 e 70 segundos (s), com o motor de avanço girando a 85 (RPM) e consumindo 1,48 (A), e o motor de corte operando com 1600 (RPM) e consumindo 9,7 (A). Tais dados são apresentados na Figura 3.14.

Para estimar os esforços atuantes no manipulador, o primeiro passo é calcular a potência consumida pelos motores durante o ensaio utilizando a Equação (3.8) com os dados apresenta-

²<https://youtu.be/M7YhXufdan4>



(a) Motor de avanço.

(b) Motor de corte.

Figura 3.14: Corrente e rotação dos motores no teste de validação.

Fonte: O autor.

dos na Tabela 3.2. Em seguida, com a Equação (3.7) foi calculado o torque do motor de avanço $\tau_F = 40,5$ (N.m) e o torque do motor de corte $\tau_C = 18,62$ (N.m).

Tabela 3.2: Estimativa da potência consumida pelos motores no teste de validação.

Estimativa da Potência dos Motores		
	Motor de Corte	Motor de Avanço
RPM	1600	85
V_{F-F} (V)	228	228
I (A)	9,7	1,48
$\cos(\phi_i)$	0,89	0,7
η	0,915	0,89
Potência Consumida (Kw)	3,12	0,36

Fonte: O autor.

As forças tangentes dos motores são calculadas para o motor de avanço com o raio primitivo do pinhão $r_F = 0,042$ (m) do conjunto pinhão-cremalheira, e para o motor de corte com o raio primitivo da ferramenta rotativa $r_C = 0,2114$ (m). Um conjunto de polias e correia sincronizadora conecta o motor ao conjunto pinhão-cremalheira para movimentar a mesa linear. A taxa de redução é $i_t = 2$ e a eficiência de transmissão considerada $\eta_t = 98\%$. Com esses dados é possível calcular através da Equação (3.4) a força horizontal de corte $F_{H_c} = 1887,4$ (N).

Com a medição das células de carga (Figura 3.15) é possível determinar a força vertical de corte. Durante o ensaio a célula frontal apresentou o valor $F_{R_1} = 1405$ (N), enquanto a célula traseira mediu $F_{R_2} = 435$ (N). Considerando que o peso do conjunto de corte é $F_{W_a} = 1491,1$ (N) (152 Quilograma (Kg)), o resultado da força vertical calculado a partir da Equação (3.9) é $F_{V_c} = 348,9$ (N).

Após ter calculado F_{H_c} e F_{V_c} , e possível determinar os esforços atuantes no manipulador

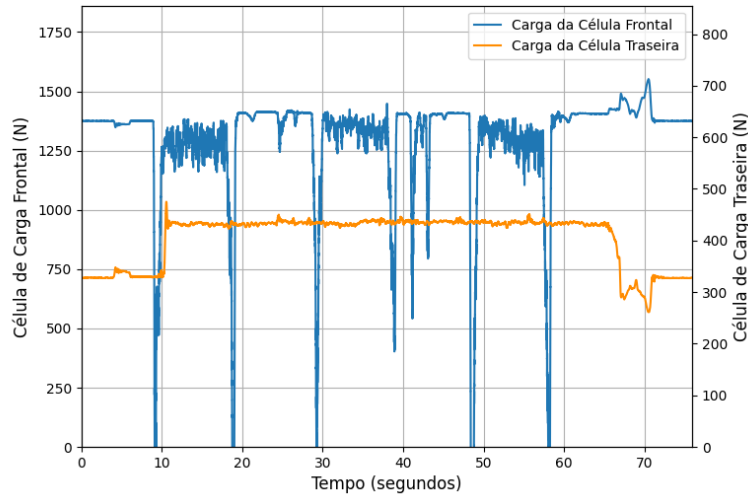


Figura 3.15: Medição das células de carga no teste de validação.

Fonte: O autor.

durante o corte de borracha através das Equações (3.1), (3.2), e (3.3). Dado o peso da ferramenta de corte $F_{W_t} = 1932,6$ (N) (197 Kg), é possível obter as forças resultantes $F_{X_e} = -1887,4$ (N) e $F_{Z_e} = -2281,5$ (N), e o momento $M_{Y_e} = -1112,9$ (N.m). A Tabela 3.3 resume estes resultados.

Tabela 3.3: Cálculo dos principais esforços atuantes no processo de corte automático para seleção de um manipulador adequado.

Forças no Processo Automático		
Forças Medidas	Esforços Principais (XYZ)	
F_{W_a}	1491,1 N	-
F_{W_t}	1932,6 N	-
F_{R_1}	1405 N	-
F_{R_2}	435 N	-
F_{H_c}	1887,4 N	-
F_{V_c}	348,9 N	-
F_{X_e}	-	- 1887,4 N
F_{Z_e}	-	- 2281,5 N
M_{Y_e}	-	- 1112,9 N.m

Fonte: O autor.

Estes números correspondem a primeira tentativa de calcular os esforços resultantes no corte, que irão auxiliar na seleção de um braço manipulador adequado para realização da atividade de remoção de borracha da correia. Os resultados indicam forças verticais e horizontais parecidas e ambas menores que o peso da ferramenta. É possível utilizar essa informação para definir a classe de trabalho do robô com aproximadamente 200 (Kg) de payload, como os manipuladores ABB 6650s e o Kuka KR-210, ambos já disponíveis no ambiente de simulação.

3.4.2. Influência dos parâmetros de corte nos esforços obtidos

Os resultados apresentados na Tabela 3.3 demonstram os esforços aplicados no atuador do braço manipulador durante a remoção da cobertura de borracha da correia, que foram estimados utilizando a rotação dos motores, corrente durante o ensaio e medição das células de carga. O objetivo agora é analisar a influência dos parâmetros de corte nas forças resultantes. Para isso, foram executadas duas baterias de testes variando a velocidade do motor de avanço alterando a frequência de acionamento no inversor e a profundidade de corte.

Durante o experimento, a frequência de acionamento do motor de corte foi fixada em 30 (Hz), enquanto a frequência do motor de avanço foi variada entre os ensaios com valores de 5, 10 e 15 (Hz). A profundidade de corte foi variada de 2,4 para 3,5 (mm) entre a primeira e segunda bateria de testes. O resumo dessas condições é apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros predefinidos para os ensaios com a bancada de testes.

Parâmetros dos Experimentos				
	Teste	Frequência do Motor de Corte (Hz)	Frequência do Motor de Avanço (Hz)	Profundidade de Corte(mm)
1^a bateria	1	30	5	2,4
	2	30	10	2,4
	3	30	15	2,4
2^a bateria	1	30	5	3,5
	2	30	10	3,5
	3	30	15	3,5

Fonte: O autor.

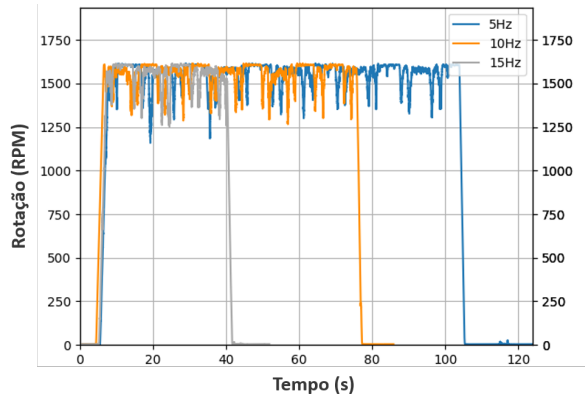
Durante os ensaios foi monitorado o comportamento da velocidade de rotação dos motores, dados estes, que permitem calcular a potência consumida e o torque no eixo durante os experimentos.

3.4.2.1. Aquisição dos Dados Experimentais

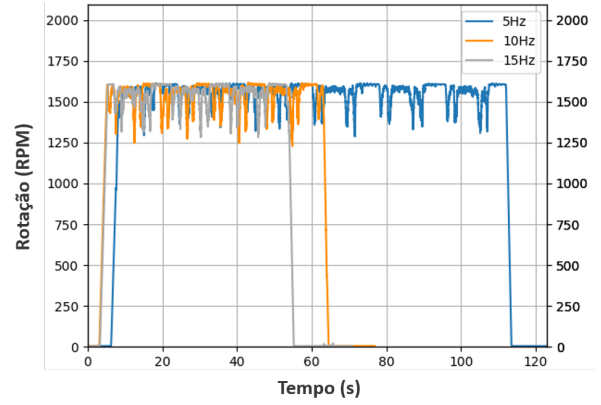
Em ambas as baterias, a rotação do motor de corte foi similar, apresentando um valor médio de 1600 (RPM) conforme ilustrado na Figura 3.16.

Ao olhar para os dados do motor de avanço, é possível perceber que a rotação aumenta a medida que ocorre um incremento na frequência de acionamento, o que é esperado. Apesar da profundidade de corte diferente entre as baterias de ensaios, a rotação apresentada pelos motores é de 85 e 88 (RPM) para acionamento a 5 (Hz), 170 e 173 (RPM) para 10 (Hz), e 220 (RPM) para 15 (Hz). Esses valores são apresentados nas Figuras 3.17a e 3.17b.

Quando a rotação do motor é revertida para que a mesa linear retorne a sua posição inicial, é possível observar uma queda súbita no gráfico de rotação; isso ocorre próximo de 100 (s) para 5 (Hz), 80 (s) para 10 (Hz) e 40 (s) para 15 (Hz).



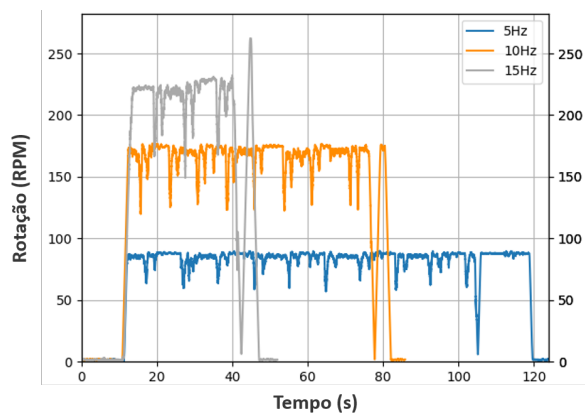
(a) Primeira bateria de ensaios.



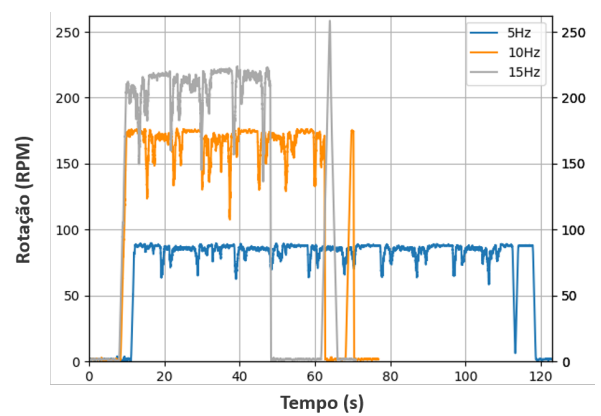
(b) Segunda bateria de ensaios.

Figura 3.16: Rotação do motor de corte nos ensaios de corte.

Fonte: O autor.



(a) Primeira bateria de ensaios.



(b) Segunda bateria de ensaios.

Figura 3.17: Rotação do motor de avanço nos ensaios de corte.

Fonte: O autor.

É importante salientar que durante os ensaios com o motor acionado a 15 (Hz) em ambas as baterias, o valor real apresentado no painel do inversor era de 12,8 (Hz). Isto indica que o motor de avanço não apresenta a potência necessária para vencer o esforço gerado pelo motor de corte nesta condição de ensaio.

Ao analisar o consumo de corrente, é possível perceber que a medida que há um incremento na frequência de acionamento do motor de avanço, o esforço do motor aumenta, resultando em maiores valores de corrente. Na primeira bateria, os valores de corrente para o motor de corte foram 8,5 (A) para acionamento do motor de corte a 5 (Hz), 12,5 (A) para 10 (Hz) e 13,3 (A) para 15 (Hz) (Figura 3.18a). Os valores apresentados na segunda bateria são 9,5, 11,7, e 13,6 (A) (Figura 3.18b), indicando a influência da profundidade de corte no consumo de corrente pelo motor.

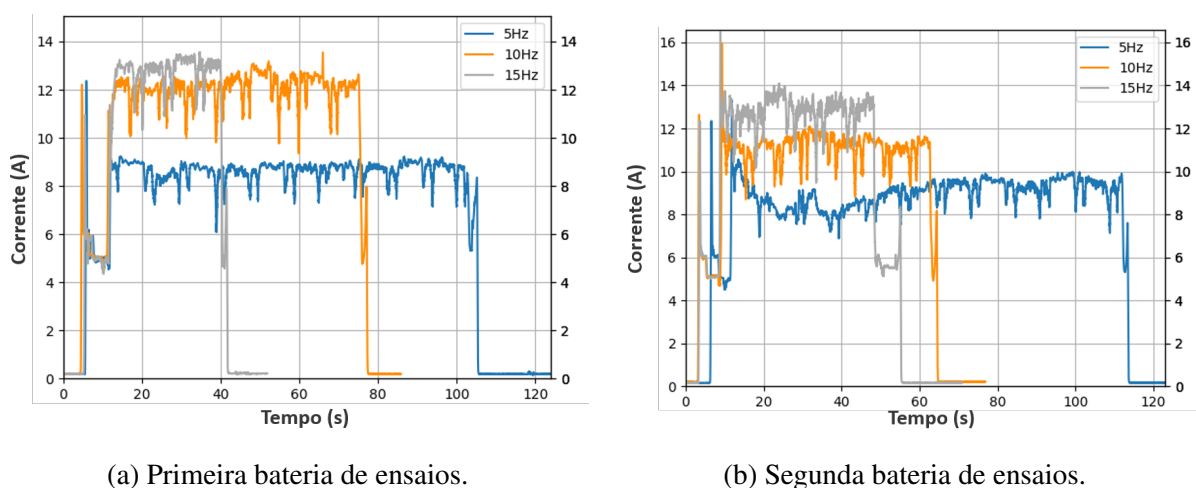


Figura 3.18: Corrente do motor de corte nos ensaios de corte.

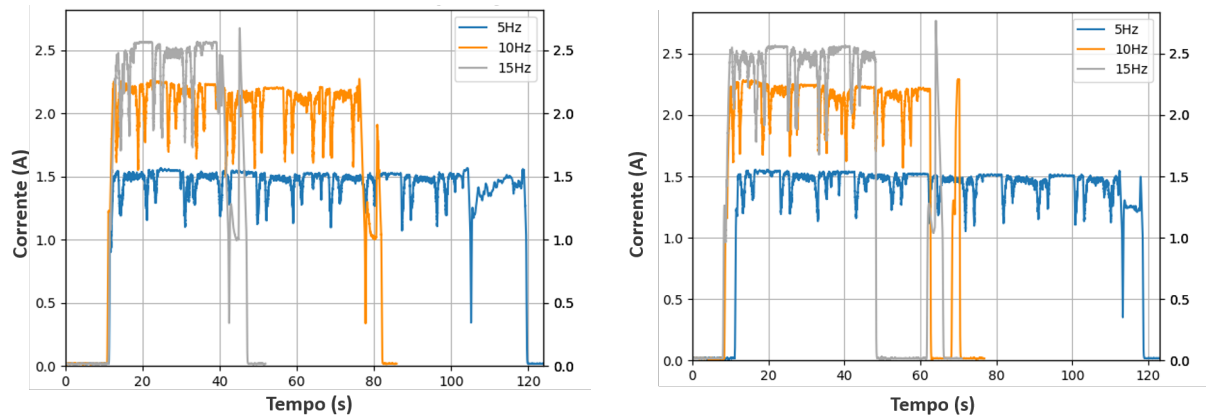
Fonte: O autor.

O gráfico de corrente na Figura 3.19b também indica problemas com o motor de avanço, que desligou em ≈ 50 (s) devido a sobrecarga no eixo enquanto executava o corte acionado com 15 (Hz) de frequência. Nesse instante, a corrente do motor de corte cai para ≈ 6 (A), o que corresponde a corrente de operação deste sem carga.

Os valores médios de corrente para o motor de avanço na primeira e segunda bateria de ensaios respectivamente foram 1,49 e 1,52 (A) para acionamento a 5 (Hz), 2,22 e 2,25 (A) para 10 (Hz), e 2,58 e 2,56 (A) para 15 (Hz). É possível observar na Figura 3.19a os valores medidos para a primeira bateria de ensaios e na Figura 3.19b os resultados da segunda bateria.

Os valores de corrente no motor de avanço para a primeira e segunda bateria são basicamente os mesmos, indicando uma pequena influência da profundidade de corte. Uma possível explicação é a baixa resistência ao corte apresentada pela borracha, o que não interfere significativamente com alterações de profundidade pequenas.

Durante a execução da aquisição de dados experimentais, um problema com a calibração das células de carga foi percebido. O ajuste manual da profundidade de corte pode ter ocasionado altas forças internas o cabeçote da bancada, o que descalibrou as medidas das células.



(a) Primeira bateria de ensaios.

(b) Segunda bateria de ensaios.

Figura 3.19: Corrente do motor de avanço nos ensaios de corte.

Fonte: O autor.

Para medir as forças de reação F_{R1} e F_{R2} , é preciso recalibrar as células de carga e modificar o procedimento de ajuste manual de profundidade de corte no ensaio.

3.4.2.2. Estimando o Torque dos Motores e as Forças Atuantes no Sistema

A partir dos dados experimentais obtidos, é possível calcular a potência consumida pelos motores nos ensaios com a Equação (3.8), o torque via Equação (3.7), e com esses resultados as forças tangentes podem ser obtidas pela Equação (3.4).

Os resultados dos cálculos para o motor de corte são apresentados na Tabela 3.5, enquanto a Tabela 3.6 expõe os valores encontrados para o motor de avanço.

Tabela 3.5: Resultados de potência consumida pelo motor de corte nos ensaios de bancada.

Resultados do Motor de Corte				
	Frequência de acionamento (Hz)	I (A)	V_{F-F} (V)	Potência consumida (Kw)
1 ^a bateria	30	8,5	228	2,73
	30	12,5	228	4,02
	30	13,3	228	4,28
2 ^a bateria	30	9,5	228	3,06
	30	11,7	228	3,76
	30	13,6	228	4,37
$\cos \phi_C = 0.89$			$\eta_C = 0.915$	

Fonte: O autor.

O consumo de potência do motor de corte varia entre 2,73 e 4,37 (Kw). O valor médio é de 3,71 (Kw), que consiste a 33,7% da sua potência nominal. Os resultados preliminares indicam que o motor de corte é totalmente capaz de suprir as necessidades da atividade de

remoção da borracha da correia, com uma margem para aumentar a profundidade de corte ou a largura da ferramenta de remoção.

Tabela 3.6: Resultados de potência consumida pelo motor de avanço nos ensaios de corte.

Resultados do Motor de Avanço				
	Frequência de acionamento (Hz)	I (A)	V_{F-F} (V)	Potência consumida (Kw)
1ª bateria	5	1,49	228	0,34
	10	2,22	228	0,51
	15	2,58	228	0,59
2ª bateria	5	1,58	228	0,36
	10	2,25	228	0,51
	15	2,56	228	0,58
$\cos \phi_F = 0.70$			$\eta_F = 0.89$	

Fonte: O autor.

O mesmo não acontece com o motor de avanço, que trabalha em um valor médio próximo de 70% da sua capacidade nominal. Durante os experimentos, esse valor chegou até a 80%, o que resultou no desligamento do motor por sobrecarga. Sendo assim, para realização de mais experimentos com maiores velocidades que as apresentadas neste documento, será necessário um motor com maior potência.

Após obter a potência consumida nos ensaios, é possível calcular o torque nos eixos dos motores através da Equação (3.7). Esses resultados são apresentados na Tabela 3.7 para o motor de corte e na Tabela 3.8 para o motor de avanço.

Em ambas as baterias de ensaios os motores de avanço e corte alcançaram valores de torque semelhantes quando acionados a 15 (Hz). Isso explica a sobrecarga do motor de avanço. Quando os torques são equivalentes, a mesa linear permanece estática. Como o motor de corte é mais potente do que o motor de avanço, o inversor de frequência interrompe a operação do de menor potência para evitar a sobrecarga.

Finalmente, é possível calcular a força tangencial através da Equação 3.4 utilizando os dados de torque e potência calculados. Os dados da força horizontal F_{H_c} calculados são apresentados na Tabela 3.9.

É possível perceber que a frequência de acionamento do motor de avanço tem uma grande influência nas forças de corte, alcançando um valor mínimo de 1206,7 (N) quando acionado a 15 (Hz) e máximo de 1861,9 (N) quando acionado a 5 (Hz); a diferença entre os valores excede 50 % da força de corte horizontal mínima. Também deve ser observado que o valor máximo de F_{H_c} é inferior ao peso da ferramenta de corte $F_{W_i} = 1932$ (N). Mais uma vez, os resultados obtidos durante a primeira e a segunda bateria de testes têm valores semelhantes, atestando a pouca influência da profundidade de corte da borracha nos esforços resultantes.

Tabela 3.7: Torque médio do motor de corte nos ensaios de bancada.

Torque Médio do Motor de Corte			
	Potência Consumida (Kw)	RPM	Torque Médio (N.m)
1^a bateria	2,73	1600	16,31
	4,02	1600	23,99
	4,28	1600	25,53
2^a bateria	3,06	1600	18,23
	3,76	1600	22,46
	4,37	1600	26,10

Fonte: O autor.

Tabela 3.8: Torque médio do motor de avanço nos ensaios de corte.

Torque Médio do Motor de Avanço			
	Potência Consumida (Kw)	RPM	Torque Médio (N.m)
1^a bateria	0,34	85	38,18
	0,51	170	28,44
	0,59	220	25,54
2^a bateria	0,36	88	39,10
	0,51	173	28,32
	0,58	220	25,34

Fonte: O autor.

Tabela 3.9: Resultados da força horizontal de corte.

Força Horizontal de Corte			
	Torque do Motor (N.m)	Raio – r_F (m)	Força Horizontal de Corte – F_{H_c} (N)
1^a	38,18	0,042	1818,1
	28,44	0,042	1354,3
	25,54	0,042	1216,2
	39,10	0,042	1861,9
2^a	28,32	0,042	1348,6
	25,54	0,042	1206,7
	$i_t = 2$		$\eta_t = 0.98$

Fonte: O autor.

3.5. Considerações Finais

A emenda de correias é um procedimento crítico nas operações e complexo de ser realizado. Portanto para automatizar o procedimento completo é necessário que cada etapa seja estudada de forma separada. Assim, essa dissertação avalia a etapa de remoção da cobertura de borracha da correia. Foi construída uma bancada de ensaios para avaliação dos esforços com uma ferramenta de corte rotativa e com os primeiros dados obtidos nos ensaios já é possível ter uma estimativa inicial de alguns manipuladores que poderiam ser utilizados na tarefa automatizada.

Para garantir que o posicionamento do cabeçote da máquina estivesse na mesma posição para diferentes velocidades, garantindo assim uma padronização maior dos ensaios, após seu posicionamento, as amostras de correias eram substituídas a cada ensaio, ficando as variações dos testes restritas às alterações das condições de operação dos motores.

Para cálculo dos esforços apresentados nesta dissertação, que servem para dimensionamento do braço robótico capaz de realizar a tarefa, foram utilizados apenas análises estáticas, e para um melhor dimensionamento é preciso também considerar análises dinâmicas, que devem ser realizadas em uma próxima etapa do projeto.

Relacionado a emenda de correias, esta dissertação apresenta o primeiro estudo utilizando ferramentas de corte rotativa para remoção da cobertura de borracha. Os resultados encontrados são bastante promissores, e uma análise criteriosa deve ser feita após a avaliação do procedimento completo para garantir que o projeto seja completamente aplicável nos ambientes industriais.

4 CONCLUSÕES

Com a crescente demanda por segurança e por processos automatizados e mais eficazes, os dispositivos robóticos tem se tornado cada vez mais comuns dentro do ambiente industrial. Duas possibilidades de utilização de robôs no ambiente mineral são a aplicação de dispositivos móveis para inspeção e exploração por possuírem maior adaptabilidade a diferentes terrenos e condições, o que permite sua utilização em diferentes locais e atividades, ou dispositivos manipuladores, geralmente com maiores *payloads* mas com espaço de trabalho limitado e menos adaptáveis a realizar tarefas para as quais não foram desenvolvidos. Esta dissertação trabalha com as duas frentes citadas: dispositivos robóticos móveis e manipuladores.

Na frente de robótica móvel foi desenvolvido um projeto de vedação para o EspeleoRobô, para que este fosse capaz de inspecionar uma maior gama de ambientes com lâminas d'água, gotejamento, lama e outras condições adversas encontradas nos ambientes de mineração, sem que houvesse dano aos seus componentes eletrônicos e/ou sensores internos. Com as adaptações realizadas no projeto o dispositivo passou a ser conhecido como EspeleoRobô II possibilitando realizar diversas atividades de inspeção que não poderiam ser feitas com a versão I. Para validar os sistemas propostos foram realizados testes em objeto controlado e também com a vedação já aplicada no corpo do robô.

Alguns métodos propostos e validados em laboratório com caixas próprias para os ensaios, não foram eficazes quando aplicados no corpo do robô, fazendo necessário substituí-los no decorrer dos testes. E por último, para garantir que a região das juntas estava completamente fechada, foi aplicado fita adesiva (silver tape) em todas as juntas, para diminuir a pressão da água nestas, o que se mostrou eficaz nos ensaios.

Após todos os testes de validação, foi desenvolvido um manual de montagem e vedação do dispositivo, que descreve a forma correta de aplicação dos elementos vedantes para garantir a vedação verificada nos testes iniciais. Testes de campo demonstraram que a solução proposta foi efetiva, pois após mais de 2 anos de operação em ambientes agressivos com água e poeira, não ocorreu nenhum caso de entrada de água no robô ou dano a seus componentes eletrônicos embarcados.

Na aplicação de manipuladores robóticos em automação de processos, esta dissertação propõe um sistema inicial automatizado para preparação de emenda de correias de cabo de aço e avalia a aplicação de uma ferramenta rotativa como solução aplicável a etapa de remoção da cobertura de borracha da correia.

Foi construída uma bancada de testes instrumentada com uma ferramenta de corte acoplada que simula uma ferramenta real no procedimento automático de corte de borracha na preparação da emenda de correias de cabo de aço. Os ensaios com a ferramenta rotativa em bancada tem a finalidade de mapear e estimar os esforços a que um manipulador robótico estará submetido ao realizar o procedimento automático proposto.

Durante os ensaios foi possível observar que os resultados de potência apresentados

pelo motor de avanço faz com que este não seja suficientemente forte para atingir maiores velocidades de rotação no eixo, sendo necessário a sua substituição ou adaptação de um sistema de redução maior que permitirá trabalhar com maiores torques. Um erro nas células de carga não permitiu que para todos os ensaios fossem calculados os esforços envolvidos no procedimento automático, porém é possível observar que os maiores esforços envolvidos no processo estão associados com o peso da ferramenta, fazendo com que a variação de uma condição de corte para a outra seja mínima.

4.1. Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros referentes a frente relativa ao EspeleoRobô, mostram que apesar de o sistema de vedação ter sido eficaz em todos os trabalhos de inspeção realizados até o momento, o reprojeto de interfaces deve ser considerado, de modo que os sistemas de vedação sejam aplicados em duas superfícies paralelas e não em mais de uma como na tampa superior da versão atual.

Os trabalhos também devem ser voltados para facilitar a montagem do sistema de vedação e eliminar o uso da fita adesiva aplicada na versão II. Um novo sistema de transmissão deve ser projetado para reduzir o uso de peças móveis e que podem vir a falhar com mais facilidade como esticadores de correias. Para finalizar, a última proposta é que a montagem dos sistemas eletrônicos seja otimizado com uma nova proposta de organização interna, diminuindo a quantidade de fios e cabos internos, e facilitando a troca modular de qualquer componente interno, o que também não acontece na versão atual para os motores por exemplo.

Com o trabalho envolvendo manipuladores robóticos para automação de processos, mais especificamente a emenda de correias de cabo de aço, a sugestão é que as células de carga sejam recalibradas e os ensaios retomados para endossar o resultado aqui apresentado sem repetição. É interessante adaptar um novo sistema de redução no avanço da mesa, para que o motor possa ser acionado com frequências maiores de 15 Hz, e assim resultados com um range maior de acionamento possam ser validados. Por último, é recomendado que seja repensado o sistema de posicionamento da ferramenta nos eixos X e Z, garantindo assim maior precisão e um correto nivelamento da ferramenta, o que pode diminuir os esforços residuais eventualmente causados por algum desalinhamento no sistema.

Após todos os passos, é preciso pensar nas etapas posteriores da remoção de camada de borracha da correia aqui proposta, visto que o objetivo final do projeto é automatizar por completo o procedimento de emenda de correias de cabo de aço, desenvolvendo e validando uma solução operacionalizável para os ambientes de mineração.

Referências Bibliográficas

- ABNT. **NBR 14.787 - Espaço confinado - Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção**, dec 2001.
- ANELK. “Papelão Hidráulico (Guarnital)”. aug 2021. Disponível em: <<https://www.anelk.com.br/papel-guarnital>>.
- AZPÚRUA, H., REZENDE, A., POTJE, G., DA CRUZ JÚNIOR, G. P., FERNANDES, R., MIRANDA, V., DE RESENDE FILHO, L. W., DOMINGUES, J., ROCHA, F., DE SOUSA, F. L. M., DE BARROS, L. G. D., NASCIMENTO, E. R., MACHARET, D. G., PESSIN, G., FREITAS, G. M. “Towards Semi-autonomous Robotic Inspection and Mapping in Confined Spaces with the EspeleoRobô”, **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 101, n. 4, mar. 2021. doi: 10.1007/s10846-021-01321-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10846-021-01321-5>>.
- BLAZEJ, R., JURDZIAK, L., KIRJANOW, A., KOZLOWSKI, T. “A device for measuring conveyor belt thickness and for evaluating the changes in belt transverse and longitudinal profile”, **DIAGNOSTYKA**, v. 18, n. 4, pp. 97 – 102, 2017.
- BOTTI, L., DURACCIO, V., GNONI, M. G., MORA, C. “A framework for preventing and managing risks in confined spaces through IOT technologies”. Em: **Safety and Reliability of Complex Engineered Systems-Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL**, pp. 3209–3217, 2015.
- BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. **Shigley’s Mechanical Engineering Design**. ninth ed. New York City, USA, McGraw-Hill series in mechanical engineering, 2011. ISBN 978-0-07-352928-8.
- BŁAŻEJ, R., HARDYGÓRA, M., KOMANDER, H., JURDZIAK, L. “Method of predicting the fatigue strength in multiplies splices of belt conveyors”, **Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability**, v. 14, pp. 171–175, 08 2013.
- CARVALHO, R., NASCIMENTO, R., D’ANGELO, T., DELABRIDA, S., BIANCHI, A. G. C., OLIVEIRA, R. A. R., AZPÚRUA, H., GARCIA, L. G. U. “A UAV-Based Framework for Semi-Automated Thermographic Inspection of Belt Conveyors in the

- Mining Industry”, **Sensors**, v. 20, n. 8, pp. 2243, abr. 2020. doi: 10.3390/s20082243. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s20082243>>.
- CEMA, C. E. M. A. **Belt Conveyor for Bulk Materials**. N. 6. Naples, Florida, Engineering Conference, 2007. ISBN: 13:978-1-891171-59-8.
- CORKE, P. **Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB® second, completely revised**, v. 118. New York City, USA, Springer, 2017.
- CORKE, P., ROBERTS, J., CUNNINGHAM, J., HAINSWORTH, D. “Mining Robotics”. Em: **Springer Handbook of Robotics**, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1127–1150, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5_50. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_50>.
- COTA, E., TORRE, M. P., FERREIRA, J., FIDÊNCIO, A. X., RODRIGUES, G. B., ROCHA, F. A. S., AZPÚRUA, H., FREITAS, G. M., MIOLA, W. “Robótica na Mineração”, **Anais da ABM Week**, 2017.
- CUNHA JR, W. R., ATZINGEN, N., CRESCENCIO, G. “Estudos espeleológicos na serra dos Carajás, município de Parauapebas-PA”. Em: **Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Espeleologia [Ouro Preto]**, v. 1, pp. 97–103, 2007.
- DE BARROS, L. G. D., FERRAZ, A., MOREIRA, T., DOMINGUES, J., ROCHA, F., AZPURUA, H., FREITAS, G. M., VON PRITZELWITZ, P., PESSIN, G. **Experimentos controlados de vedação – Espeleorobô 2**. Relatório técnico, 2019. doi: 10.29223/prod.tec.itv.mi.2019.2.barros. Disponível em: <<https://doi.org/10.29223/prod.tec.itv.mi.2019.2.barros>>.
- DE BARROS, L. G. D., AZPURUA, H., PESSIN, G., FREITAS, G., VON PRITZELWITZ, P. **Relatório Técnico sobre mecânica e sistema de vedação do EspeleRobô II**. Relatório técnico, 2020. doi: 10.29223/prod.tec.itv.mi.2020.5.barros. Disponível em: <<https://doi.org/10.29223/prod.tec.itv.mi.2020.5.barros>>.
- FERNANDES, T. R., QUIRINO, S. F. **Eletrotécnica Geral**. São Paulo, Brasil, Editora e Distribuidora Educacional, 2017. ISBN: 978-85-522-0321-6.
- FIGUEIREDO, L. A. V. D., RASTEIRO, M. A., RODRIGUES, P. C. “Legislação para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro: mudanças, conflitos eo papel da sociedade civil”, **Espeleo-Tema**, v. 21, n. 1, pp. 49–65, 2010.
- GARCIA, G., ROCHA, F., TORRE, M., SERRANTOLA, W., LIZARRALDE, F., FRANCA, A., PESSIN, G., FREITAS, G. “ROSI: A Novel Robotic Method for Belt Conveyor Structures Inspection”. Em: **2019 19th International Conference on Advanced**

- Robotics (ICAR)**. IEEE, dez. 2019. doi: 10.1109/icar46387.2019.8981561. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icar46387.2019.8981561>>.
- GUIEIRO, G. A., LEITÃO, E. A., BALBINO, E. S., VAN MELIS, L. “IMPLANTAÇÃO DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA AUTÔNOMOS NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO”. Em: **ABM Proceedings**. Editora Blucher, out. 2019. doi: 10.5151/2594-357x-33680. Disponível em: <<https://doi.org/10.5151/2594-357x-33680>>.
- HARRIS, M. K., EWING, W. M., LONGO, W., DEPASQUALE, C., MOUNT, M. D., HATFIELD, R., STAPLETON, R. “Manganese exposures during shielded metal arc welding (SMAW) in an enclosed space”, **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 2, n. 8, pp. 375–382, 2005.
- HENKEL. “Junta Líquida Loctite 518”. aug 2021. Disponível em: <https://www.henkel-adhesives.com/br/pt/produto/flexible-sealants/loctite_518.html>.
- JURDZIAK, L., BAJDA, M., BLAZEJ, R. “Estimation of Purchase and Replacement Costs of Conveyor Belts and their Splices in an Underground Mine Based on their Durability”, **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 221, pp. 012099, mar. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/221/1/012099. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012099>>.
- KURFESS, T. R. **Robotics and automation handbook**. USA, CRC press, 2018.
- KÜSEL, B. “Steel-Cord Conveyor Belt Splices - More than Tough Enough”, **Engineering and Mining Journal**, v. 210, n. 8, pp. 84–85, 2009.
- LIU, X., LODEWIJKS, G., PANG, Y. “Intelligente Maintenance of Large-scale Belt Conveyor Idler Rolls: State-of-the-art and Opportunities”. Em: **Symposium on Automated Systems and Technologies**, pp. 95–104, 2014.
- MACCARRON, C. **Confined space fatalities**. Tese de Doutorado, Edith Cowan University, nov 2006.
- MAGNO, A., DE S. THIAGO, N. C., CID, A. M., SATLHER, M. S., RESENDE, L., NAZÁRIO, M., TORRES, M. C. D., AZPURUA, H., PESSIN, G. **Inspeção da Tubulação de Rejeitos das Usinas de Salobo Set/2019**. Relatório técnico, 2019. doi: 10.29223/prod.tec.itv.mi.2019.50.magno. Disponível em: <<https://doi.org/10.29223/prod.tec.itv.mi.2019.50.magno>>.
- MCGUIRE, P. M. **Conveyors - Application, Selection, and Integration**. Industrial Innovation Series. New York, CRC Press, 2010. ISBN: 978-1-4398-0388-2.

- MERCÚRIO. **Manual Técnico de Correias Transportadoras**, 3ª ed. Correias Mercúrio S/A Indústria e Comércio, Itú, São Paulo, 2015.
- MONTEIRO, F. A. D. “Projeto de implantação de conhecimentos, práticas e legislação pertinentes à espeleologia na Superintendência Estadual do Meio Ambiente–SEMACE”. Em: **Congresso Brasileiro de Espeleologia-CBE**, v. 31, pp. 263–267, 2011.
- NETTO, G. G. **Método de Visão Computacional Baseado em Laser para Monitoramento de defeitos em correias transportadoras**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto / Instituto Tecnológico Vale, apr 2019.
- PASQUINI, N. C. “AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS: UMA ABORDAGEM CONCEITUAL”, **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, v. 08, n. 01, pp. 29–44, mar. 2014. doi: 10.47283/244670492020080129. Disponível em: <<https://doi.org/10.47283/244670492020080129>>.
- PRIEB, S. “A Classe Trabalhadora diante da Terceira Revolução Industrial. 2016”. 2019.
- RODRIGUES, G., DOMINGUES, J., SILVA, P., FERRAZ, A., GAIGHER NETTO, G., ANDRADE, J., V. PRITZELWITZ, P., FREITAS, G. “Estudo e Testes Conceituais de um Sistema Automatizado para Emenda de Correias Transportadoras”. Em: **2019 14th Simpósio Brasileiro de Automação inteligente (SBAI)**, set. 2019. doi: 10.17648/sbai-2019-111485. Disponível em: <<https://doi.org/10.17648/sbai-2019-111485>>.
- ROLAUTO, R. “Cortiça Emborrachada”. aug 2021. Disponível em: <<https://rolautorolamentos.com.br/SubCategoria-Cortica-Emborrachada-133.aspx>>.
- SANDPIT, S. I. “Spidler”. apr 2020. Disponível em: <<https://spidler.com.au/>>.
- SANTOS, A. A., ROCHA, F. A. S., AZPÚRUA, H., DA ROCHA REIS, A. J., GUIMARÃES, F. G. “Sistema automático para inspeção visual de transportadores de correias”. Em: **14th Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI**, 2019.
- SANTOS, L. F., DE BARROS, L. G. D., RODRIGUES, G. B., BRANDÃO, P., PRITZELWITZ, P. V., FREITAS, G. “Investigação e Simulação de Sistema Robótico para Automatização da Emenda de Correias Transportadoras”. Em: **Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2020**. sbabra, dez. 2020. doi: 10.48011/asba.v2i1.1681. Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1681>>.
- SANZ, P. “Robotics: Modeling, planning, and control (siciliano, b. et al; 2009)[on the shelf]”, **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 16, n. 4, pp. 101–101, 2009.

- SCOTT, S. A. “Robotic Idler Changer (RIC)”. apr 2020. Disponível em: <<https://www.scottautomation.com/>>.
- TEKBOND. “Silicone Neutro”. aug 2021. Disponível em: <<https://www.tekbond.com.br/pt-br/produtos/silicone-neutro-uso-geral/silicone-neutro-transparente>>.
- TORRE, M. P. **Desenvolvimento e Aplicação de Robôs Industriais e de Serviço em Processos de Mineração**. Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, 2019.
- TZAFESTAS, S. G. **Introduction to mobile robot control**. Amsterdam, Holanda, Elsevier, 2013.
- UMANS, S. D., FITZGERALD, A., KINGSLEY, C. **Fitzgerald & Kingsley’s Electric Machinery**. seventh ed. New York City, USA, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, jan 2013. ISBN-13 : 978-0073380469.
- VALER. **Emenda de Correias Cabo de Aço - Trilha Técnica: Mecânica — Porto**. EDUCAÇÃO VALE, Rio de Janeiro, Brasil, s.d.
- VEDABRÁS. “Retentores”. aug 2021. Disponível em: <<https://www.vedabras.com.br/apoiophp.php?pag=sub-produtos&secao=Retentores>>.
- VEDAMASTER. “Anel de Vedação (O-ring)”. aug 2021. Disponível em: <<https://www.vedamaster.com.br/produto/orings/>>.
- WEG. “Moinho de Bolas”. jun 2021. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/industrial-applications/ball-mill>>.
- YE, H. “Atmosphere identifying and testing in confined space”. Em: **2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control**, pp. 767–771. IEEE, 2011.
- ZAREMBA, D., HEITZMANN, P., OVERMEYER, L., HILLERNS, L., HASSEL, T. “Automatable Splicing Method for Steel Cord Conveyor Belts - Evaluation of Water Jetting as a Preparation Process”, **Journal of Mechanical Engineering**, , n. 63, pp. 590–596, 2017.