



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

**ANÁLISE DE FERRAMENTAS PARA CORTE DE BORRACHA NO PROCESSO DE
FILETAMENTO DE CABO DE AÇO EM EMENDA DE CORREIA
TRANSPORTADORA**

Pablo César da Silva

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2020**

Pablo César da Silva

**ANÁLISE DE FERRAMENTAS PARA CORTE DE BORRACHA NO PROCESSO DE
FILETAMENTO DE CABO DE AÇO EM EMENDA DE CORREIA
TRANSPORTADORA**

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. Paulo Henrique Vieira Magalhães, D.Sc.

Coorientador: Prof. Ana Letícia Pilz de Castro, D.Sc.

Ouro Preto
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D111a da Silva, Pablo César.

Análise de ferramentas para corte de borracha no processo de filetagem de cabo de aço em emenda de correia transportadora. [manuscrito] / Pablo César da Silva. - 2020.

69 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Vieira Magalhães.

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Letícia Pilz de Castro.

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. Correias transportadoras - Consertos. 2. Correias transportadoras - Correia de Cabo de Aço. 3. Automação. 4. Minas e recursos mineraiis . I. Magalhães, Paulo Henrique Vieira. II. Castro, Ana Letícia Pilz de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pablo César da Silva

Análise de Ferramentas para Corte de Borracha no Processo de Filetamento de Cabo de Aço em Emenda de Correia Transportadora

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação - Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração - PROFICAM, da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto em parceria com Instituto Tecnológico Vale - ITV, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE.

Aprovada em 25 de novembro de 2020.

Membros da banca

Doutor - Paulo Henrique Vieira Magalhães - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
Doutora - Ana Letícia Pilz de Castro - Coorientadora Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Alan Kardek Rêgo Segundo - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutora - Edna Maria de Faria Viana - Universidade Federal de Minas Gerais

Paulo Henrique Vieira Magalhães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 24/03/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Vieira Magalhaes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2021, às 17:10, 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 **0151182** e o código CRC **705E9CC1**.

*Dedico este trabalho
primeiramente a Deus, por ser
essencial em minha vida, autor do
meu destino, meu guia, socorro
presente na hora da angústia, aos
meus pais, a minha irmã, a minha
namorada, e aos meu amigos.*

*“A tarefa não é tanto ver aquilo
que ninguém viu, mas pensar o que
ninguém ainda pensou sobre
aquilo o que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)*

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.)

ANÁLISE DE FERRAMENTAS PARA CORTE DE BORRACHA NO PROCESSO DE FILETAMENTO DE CABO DE AÇO EM EMENDA DE CORREIA TRANSPORTADORA

Pablo César da Silva

Novembro/2020

Orientadores: Paulo Henrique Vieira Magalhães

Ana Letícia Pilz de Castro

Os transportadores de correia têm prevalecido no deslocamento de materiais a granel por vantagens econômicas, confiabilidade e versatilidade, segurança e capacidade. Na mineração têm papel fundamental, estão presentes em todas as etapas do processo. A substituição ou a instalação de uma nova correia de cabo de aço pode levar em média 42 horas para ser concluída. Atualmente, todo o processo é executado manualmente. O desenvolvimento de novas soluções automatizadas podem reduzir: o tempo de execução da emenda, a exposição humana aos riscos da atividade e os custos do processo. Este trabalho propõe o estudo de uma solução para remoção de borracha das correias, com a finalidade de aumentar a automatização do processo de emenda de correias. Muito tempo é despendido na remoção da borracha sobre os cabos de aço da estrutura da correia. Testes preliminares foram feitos usando uma lâmina padrão para identificar as forças envolvidas no processo convencional. Uma lâmina aquecida em formato do perfil dos cabos de aço da correia foi avaliada dentro dos limites de temperatura da correia. Uma ferramenta de corte por ultrassom também foi testada em diferentes frequências de operação. As ferramentas estudadas apresentaram menores esforços e menor tempo de execução dos cortes quando comparadas à ferramenta convencional, além de grande potencial de serem utilizadas em processos automatizados.

Palavras-chave: Transportador, Emenda, Correia de Cabo de Aço, Automação, Mineração.

Macrotema: Mina; **Linha de Pesquisa:** Robótica Aplicada à Mineração; **Tema:** Transportadores de Correia;

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.)

ANALYSIS OF TOOLS FOR REMOVING RUBBER FROM STEEL CORD CONVEYOR BELT IN SPLICING PROCEDURE.

Pablo César da Silva

November/2020

Advisors: Paulo Henrique Vieira Magalhães

Ana Letícia Pilz de Castro

Belt conveyors have prevailed in the displacement of bulk materials by economic advantages, reliability, versatility, safety, and capacity. It has a fundamental role in mining, being present in all stages of the process. Replacing or installing a new steel cord conveyor belt can take an average of 42 hours to be done. Currently, the entire process is performed manually. The development of new automated solutions can reduce: the time of execution of the amendment, the human exposure to the risks of the activity and the costs of the process. This work proposes the study of a solution for removing rubber from the belts, with an increase in automation of the belt splicing process. Much time is spent removing rubber on the steel cables of the belt structure. Long time is spent removing the rubber on the steel cord of the belt structure. Improvements were identified at this stage of the amendment process. Preliminary tests were made using a standard blade to identify the forces involved in the conventional process. A heated blade in the shape of the steel cord profile was evaluated within the temperature limits of the belt. An ultrasonic cutting tool has also been tested at different operating frequencies. The studied tools have less effort and less execution time when compared to the conventional tool, with great potential beyond that used in automated processes.

Keywords: Belt Conveyor , Steel Cord Conveyor Belt Splices, Automation, Mining.

Macrotheme: Mine; **Research Line:** Robotics Applied to Mining; **Theme:** Belt Conveyors;

Lista de Figuras

Figura 1.1	Transportador de correias na mineração.	14
Figura 1.2	Trabalhadores executando cortes com lâmina na correia.	15
Figura 2.1	Estrutura correia de cabos de aço.	17
Figura 2.2	Construção dos cabos de aço.	18
Figura 2.3	Marcações delimitando a área da emenda.	19
Figura 2.4	Cortes em chanfro para retirada da cobertura superior.	20
Figura 2.5	Remoção da cobertura superior e limpeza dos cabos.	20
Figura 2.6	Alinhamento e organização dos cabos.	21
Figura 2.7	Diagrama dos estágios de emenda.	22
Figura 2.8	Curva tensão versus deformação obtidas de ensaio de tração.	24
Figura 2.9	Resistência x Temperatura de um termorrígido.	24
Figura 2.10	Resistência x Temperatura de um elastômero.	25
Figura 2.11	Resistência x Temperatura de um termoplástico amorfo.	25
Figura 2.12	Temperatura de serviço de alguns elastômeros.	26
Figura 2.13	Resultados de testes preliminares de usinagem com fresa.	27
Figura 2.14	Usinagem com diferentes configuração de fresa.	28
Figura 2.15	(a) Ferramenta aquecida por indução, e (b) Elastômero resfriado criogenicamente.	28
Figura 2.16	Imagem óptica da superfície usinada.	29
Figura 2.17	Correia transportadora usinada com fresa.	30
Figura 2.18	Componentes USM.	31
Figura 2.19	Sistema de usinagem a jato de água.	32
Figura 2.20	Usinagem de elastômero por UJM.	33
Figura 2.21	Comparação da superfície dos cabos usando diferentes processos.	34
Figura 2.22	Cartesiano.	36
Figura 2.23	Cilíndrico.	37
Figura 2.24	Esférico.	38
Figura 2.25	SCARA.	38
Figura 2.26	Antropomórfico.	39
Figura 3.1	Fluxograma da metodologia proposta.	42

Figura 4.1	Faca utilizada no procedimento convencional.	44
Figura 4.2	Gabaritos com lâminas de corte em diferentes inclinações.	45
Figura 4.3	Aparato para cortes com lâmina.	45
Figura 4.4	Lâmina W.	46
Figura 4.5	Aparato para cortes com lâmina aquecida e câmera termográfica.	47
Figura 4.6	(1) Correia, (2) Camada Superior, (3) Camada Inferior e (4) Cabos de aço.	48
Figura 4.7	(5) Lâmina W aquecida, (6) Chanfro 45°, e (7) Viés 22°.	48
Figura 4.8	Representação do primeiro passe sobre a correia.	49
Figura 4.9	Representação de múltiplos passes sobre a correia, (8) camada residual sobre os cabos.	49
Figura 4.10	Representação da (9) Aresta de corte.	50
Figura 4.11	Transformador.	51
Figura 4.12	Sistema ultrassônico.	52
Figura 4.13	Usinagem da correia por ultrassom.	52
Figura 4.14	Estação de trabalho.	54
Figura 4.15	Fixação da correia.	54
Figura 4.16	Remoção da camada superior da correia.	55
Figura 4.17	Robô ABB6650	56
Figura 4.18	URDF do robô ABB6650	57
Figura 4.19	Ambiente de simulação.	57
Figura 4.20	Representação: (5) Efetuador, (9) Lâmina W aquecida, (11) Roldana guia.	58
Figura 4.21	Posição inicial do efetuador.	59
Figura 4.22	Representação do movimento do efetuador.	59
Figura 5.1	Força obtidas no processo de corte com lâmina convencional.	60
Figura 5.2	Força obtidas no processo de corte com lâmina aquecida.	61
Figura 5.3	Temperatura de corte com lâmina aquecida.	61
Figura 5.4	Decomposição da correia no processo de corte com lâmina aquecida.	62
Figura 5.5	Cortes com lâmina W.	63
Figura 5.6	Usinagem da correia por ultrassom.	63
Figura 5.7	Resultados.	64

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Comprimento mínimo da emenda	19
Tabela 2.2	Comparação de propriedades de elastômeros e outros materiais	23
Tabela 2.3	Classificação dos processos não convencionais	31

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivo Geral	16
1.3	Objetivo Específicos	16
2	Referencial Teórico e Fundamentação Científica	17
2.1	Correia transportadora	17
2.2	Procedimento para emenda correia de cabos de aço	18
2.3	Usinagem de elastômeros	23
2.3.1	Processos convencionais	26
2.3.2	Processos não convencionais	30
2.4	Usinagem com robôs	34
2.5	Manipuladores robóticos	36
2.5.1	Cartesiano	36
2.5.2	Cilíndrico	36
2.5.3	Esférico	37
2.5.4	SCARA	38
2.5.5	Antropomórfico	39
2.6	Simulação	39
3	Materiais e Métodos	41
4	Desenvolvimento	43
4.1	Etapa 1 - Identificação de melhorias no procedimento de emenda	43
4.2	Etapa 2 – Teste para obtenção de parâmetros de cortes em correias	44
4.2.1	Lâmina Padrão	44
4.3	Etapa 3 – Verificação de outras ferramentas de corte disponíveis no mercado	46
4.3.1	Lâmina W Aquecida	46
4.3.2	Ultrassom	51
4.4	Etapa 4 – Avaliação de possíveis sistemas robóticos	53
4.4.1	Dimensões do Espaço de trabalho	53

4.4.2	Etapas e Procedimentos	54
4.4.3	Sistemas Robóticos	56
5	Resultados e Discussão	60
6	Conclusões	65
	Referências Bibliográficas	67

1. Introdução

O desenvolvimento de transportadores de correias (TCs), capazes de mover centenas de toneladas por hora em fluxo contínuo e uniforme, foi uma grande inovação para indústria. A primeira aplicação de TCs para transporte de material foi por volta de 1830, na indústria madeireira. Em 1850, a indústria de grãos introduziu polias aos TCs com o objetivo reduzir a fricção da borracha com o metal. (CEMA, 1997).

No início do século XX, os TCs foram aplicados no transporte de materiais pesados, até aquele momento considerados transportáveis apenas por equipamentos móveis ou por gravidade. Naquele período, Thomas Edison propôs o uso de uma lona de algodão como elemento transportador. Thomas Robins adicionou à lona de algodão de Edison uma cobertura de borracha, devido aos problemas apresentados com materiais pesados e abrasivos. Uma segunda contribuição dada por Robins e Edison, foi o uso de três polias cilíndricas dispostas de maneira a formar uma calha. Estas duas inovações tornaram a fundação da construção dos transportadores de correias modernos (CEMA, 1997).

Os TCs têm prevalecido no deslocamento de materiais a granel por vantagens econômicas, maior confiabilidade e versatilidade, além da segurança de operação e capacidade. Os transportadores de correia são amplamente utilizados na condução de materiais finos, pó químico, minérios granulados, pedra e carvão. Também podem ser empregados no transporte de materiais pequenos e quebradiços.

Os TCs desempenham papel fundamental na mineração (Figura 1.1), estando presentes em todas as etapas do processo. Eles são usados desde a extração do minério nas minas, passando pelos processos de beneficiamento nas usinas, transporte entre pátios de estocagem e portos e, por fim, no carregamento dos navios.



Figura 1.1: Transportador de correias na mineração.

Um transportador de correia compreende um conjunto de componentes relevantes para o funcionamento adequado do equipamento incluindo: correias, tambores, acessórios, guias, roletes, freios, chute, estrutura e acionamento.

1.1. Motivação

A instalação de uma nova correia envolve realização de pelo menos uma emenda, para que ela forme um sistema fechado e contínuo. As correias também podem ser substituídas em caso de desgaste, rompimento, rasgo ou fim da vida útil. A emenda de correia de cabos de aço é realizada à quente (vulcanização). Atualmente, este processo é realizado em sua maior parte manualmente, apresentando riscos operacionais e também expondo os trabalhadores à riscos ergonômicos (Figura 1.2). Além de um tempo expressivo dedicado para a realização completa da tarefa.



Figura 1.2: Trabalhadores executando cortes com lâmina na correia.

1.2. Objetivo Geral

O objetivo deste projeto consiste em realizar um estudo sobre o emprego de ferramentas e procedimentos, para aumentar o grau de automatização do processo de emenda de correias transportadoras de cabo de aço, e reduzir o emprego de atividades manuais.

1.3. Objetivo Específicos

Os objetivos específicos do projeto são:

- Realizar estudo dos materiais constituintes das correias transportadoras de cabo de aço, e seus elementos estruturais;
- Estudar o procedimento de emenda de correia de cabos de aço e identificar melhorias no processo;
- Realizar testes preliminares com uma lâmina usualmente empregada para corte de correia;
- Testar 2 ferramentas diferentes;
- Simular o uso das ferramentas como efetadores robóticos acopladas em manipulador robótico.

2. Referencial Teórico e Fundamentação Científica

2.1. Correia transportadora

O sistema de transporte de materiais é constituído por partes mecânicas, elétricas e estruturais. Estes componentes são fundamentais para o funcionamento adequado do conjunto. A correia é um dos componentes mais importantes economicamente, representa uma parte considerável dos custos iniciais de projeto. Portanto, a seleção da correia deve ser criteriosa (CEMA, 1997).

De modo geral, as correias são constituídas por quatro elementos: cobertura superior, borracha de ligação, armação ou carcaça e cobertura inferior (Figura 2.1). As coberturas, superior e inferior, têm como função principal proteger a carcaça contra danos e deterioração que podem estar presentes no ambiente operacional. A carcaça transmite toda força pra iniciar e mover o carregamento da correia, absorve impacto no carregamento do material, e fornece estabilidade para o alinhamento correto sobre os cilindros em qualquer condição de trabalho.

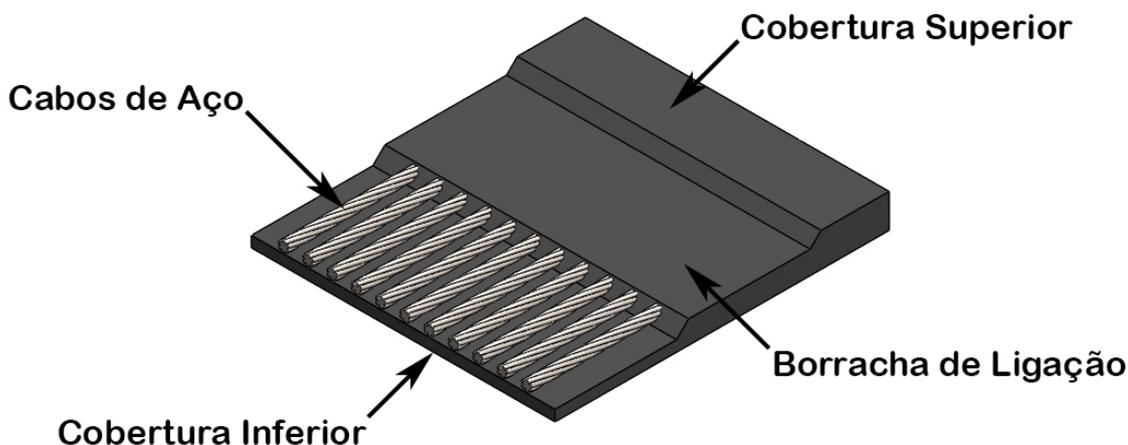


Figura 2.1: Estrutura correia de cabos de aço.

As correias atualmente estão disponíveis em uma variedade de tipos e formas construtivas. A carcaça pode ser construída por fibras têxteis (correias de lona), ou podem ser compostas por cabos de aço. Em correias transportadoras de cabo de aço, a construção mais frequente dos cabos é a 7x7. Os cabos estão dispostos em 7 fios com 7 filamentos cada. Para evitar desalinhamento e desbalanceamento, os cabos podem apresentar dois tipos de torção, S e Z (Figura 2.2). A diversidade das correias esta relacionada com o ajuste ao material transportado, a condição de operação e ao desenho de projeto.

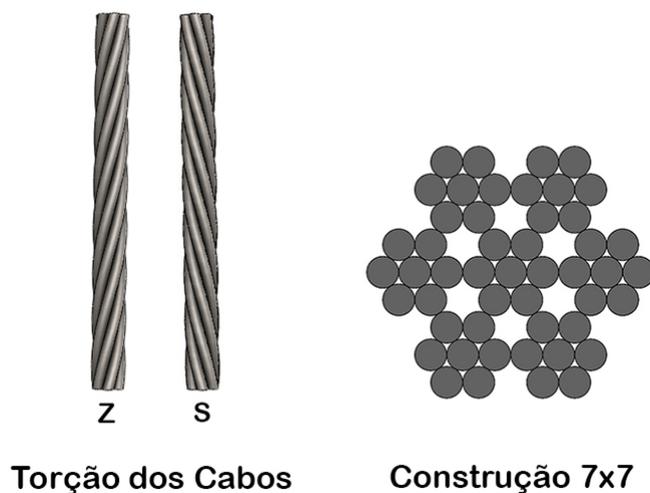


Figura 2.2: Construção dos cabos de aço.

O desenvolvimento das borrachas sintéticas, elastômeros, polímeros e fibras nas últimas décadas, contribuiu para o aumento da vida útil das correias. As coberturas da correia são construídas de compostos de NR, SBR combinada com borrachas naturais e sintéticas, IR, EPDM, policloropreno (neoprene), cloreto polivinil (PVC), uteranos e outros polímeros (CEMA, 1997). Cada elastômero apresenta características úteis para obtenção de propriedades específicas, e no emprego em condições de trabalho particulares.

2.2. Procedimento para emenda correia de cabos de aço

Nos transportadores de grande deslocamento, geralmente são usadas correias de cabo de aço. Ao longo da correia existe um ou mais pontos de emenda. Na região da emenda os cabos não podem ser unidos diretamente. Nesta área a correia está sujeita a tração, e cisalhamento entre a borracha e os cabos. A estrutura da correia, o alongamento dos cabos, e o carregamento nos TCs são alguns fatores que podem influenciar no modo de falha da emenda (WEIGANG *et al.*, 2009).

O procedimento para emenda a quente de correia de cabos de aço para elevação e carregamento segue a norma DIN22131-4 (1988). O comprimento da emenda (L_v) e o número de estágios são determinados de acordo com a largura da correia (Tabela 2.1). Os estágios compreendem às subdivisões onde os cabos serão cortados. O número de estágios pode variar de 1 a 3 passos de corte de acordo com as especificações da correia. A linha de base é o traço transversal à correia em ângulo reto em relação às suas bordas, esta linha é utilizada como referência para limitar o comprimento da emenda. O comprimento do viés é outro parâmetro importante no processo de emenda, definido pelo cateto oposto do ângulo de 22° em relação a linha de base (Figura 2.3). A marcação do viés delimita a área não removível da emenda.

Tabela 2.1: Comprimento mínimo da emenda

Tipo de correia	Nº de estágios	Comprimento mínimo (L_v/m)
ST630	1	0,55
ST800	1	0,60
ST1000	1	0,60
ST1250	1	0,65
ST1600	2	1,05
ST2000	2	1,15
ST2500	2	1,35
ST3150	2	1,65
ST3500	3	2,35
ST4000	3	2,65
ST4500	3	2,80
ST5000	4	4,05
ST5400	4	4,45

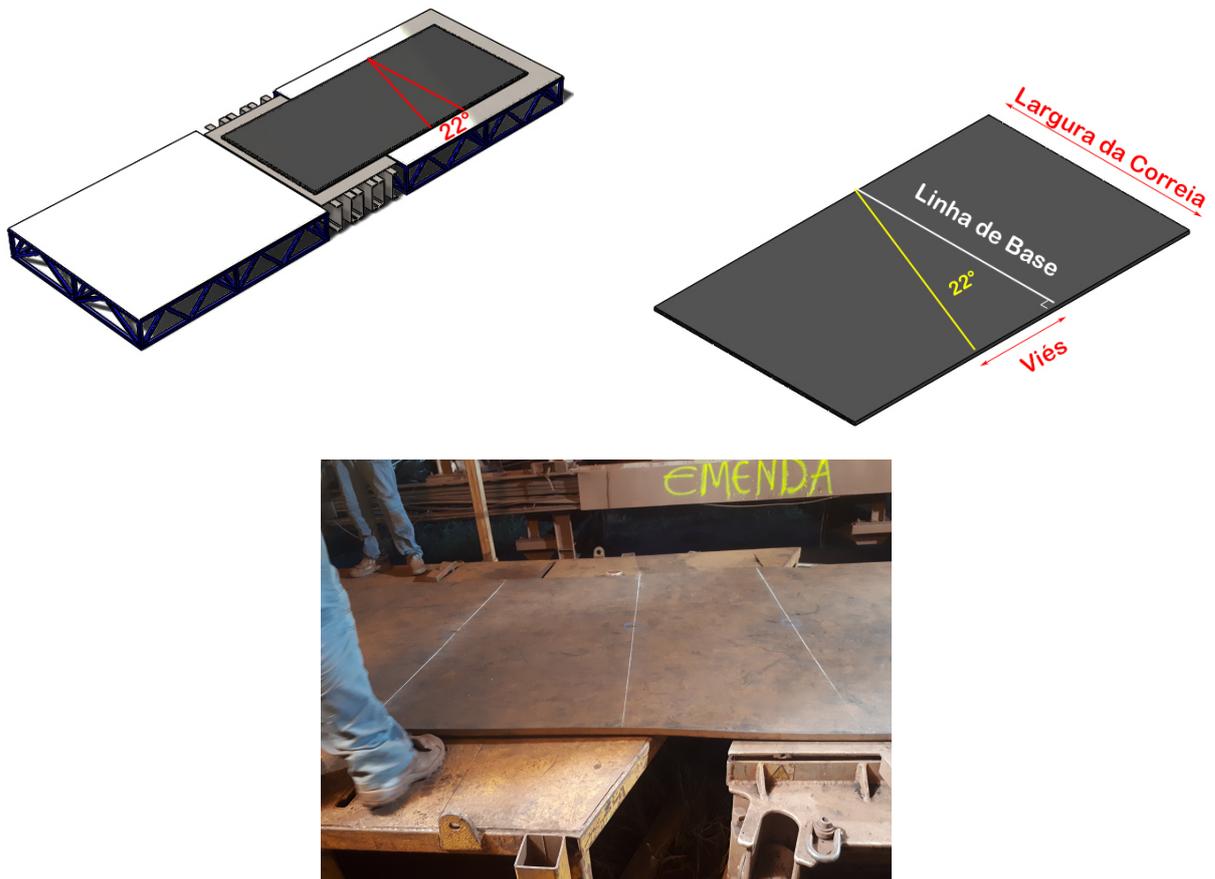


Figura 2.3: Marcações delimitando a área da emenda.

Para execução da emenda são necessárias ferramentas específicas para cada etapa do procedimento: giz, barbante, lona de ligação, esquadro, trena, faca, pincel, tifor, sargentos, torques, tesourão, escova, lixadeira, esmerilhadeira, filetador e outras ferramentas. Todas as fases são realizadas sobre uma estação de trabalho, que pode ser montada junto à estrutura do transportador ou adaptada paralelamente ao transportador, e nivelada com o platô da prensa.

O procedimento inicia com a marcação da linha de base e o viés, delimitando o comprimento da emenda. Com a faca é realizado o chanfro de 45° sobre a linha de viés na camada superior até a profundidade dos cabos (Figura 2.4-a). Na parte inferior, o chanfro é feito deslocado do chanfro superior. O material excedente ao comprimento de emenda estabelecido deve ser removido com o auxílio da lixadeira.

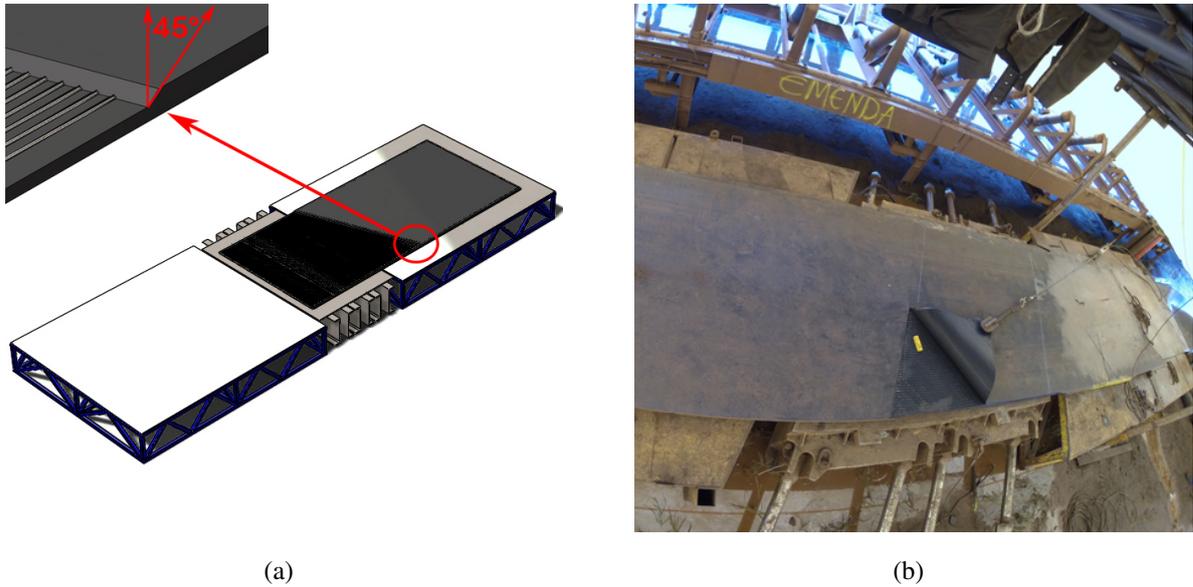


Figura 2.4: Cortes em chanfro para retirada da cobertura superior.

A partir da linha de viés uma garra é fixada na extremidade da borracha, e posteriormente conectada ao tifor para remoção longitudinal da cobertura superior (Figura 2.4-b). Uma força gradual é aplicada sobre o tifor para evitar o rasgamento da parte removível da correia. Com os cabos expostos, o excesso de borracha entre eles é removido individualmente por um filetador ou faca. Uma camada fina residual de borracha na superfície dos cabos é desejada, para uma vulcanização adequada na emenda, e garantir a integridade dos cabos (Figura 2.5).

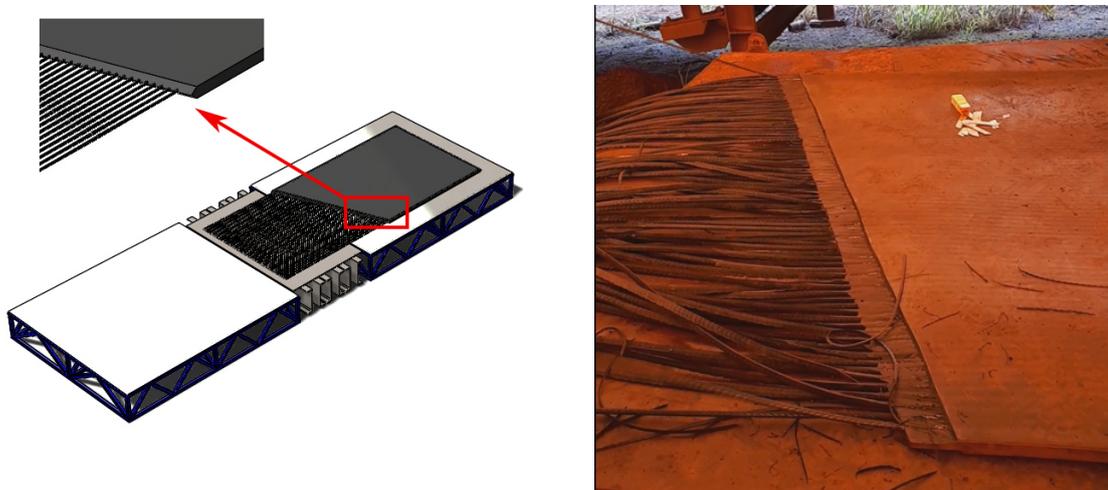


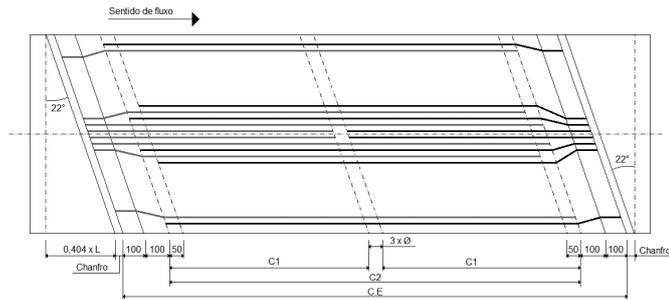
Figura 2.5: Remoção da cobertura superior e limpeza dos cabos.

O desbaste da superfície com uma esmerilhadeira é imprescindível na região dos chanfros ou zonas de ancoragem. Posteriormente, as duas pontas da correia devem ser fixadas e alinhadas sobre a mesa de trabalho (Figura 2.6). O adesivo cimento deve ser aplicado na região dos chanfros. O platô da prensa deve ser isolado da borracha para evitar bolhas e agarramento da borracha, para isso é usado um filme de poliéster entre a borracha e o platô. A cobertura de ligação é aplicada sobre a parte inferior da emenda.

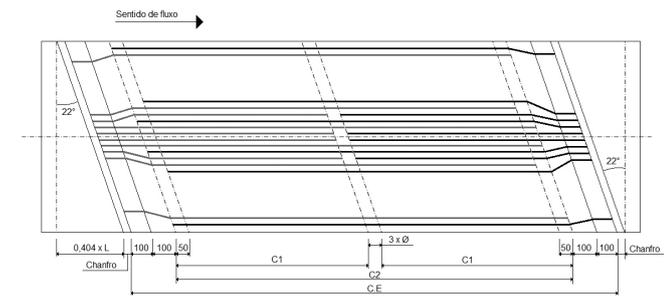


Figura 2.6: Alinhamento e organização dos cabos.

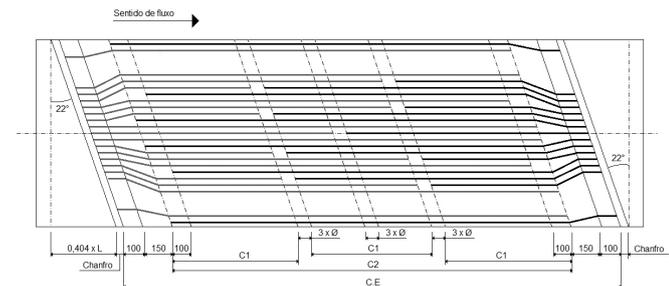
Os cabos de aço devem ser organizados seguindo o diagrama (Figura 2.7) para cada tipo de estágio definido em norma (Tabela 2.1). Os cabos são reposicionados sobre a manta inferior, com cabos maiores na borda com pontas voltadas no sentido contrário da rotação do transportador. No caso de uma emenda de dois estágios, a cada dois cabos maiores, cabos menores e médios são dispostos colinearmente. Os cabos com comprimento excedente podem ser cortados por um tesourão. Tiras de borracha de ligação são colocadas para preencher os espaçamentos entre os cabos. Toda superfície da emenda deve ser preenchida.



(a) 1 estágio



(b) 2 estágios



(c) 3 estágios

Figura 2.7: Diagrama dos estágios de emenda.

Fonte: Mercúrio (2015)

A cobertura superior é inserida logo após a inserção da borracha de ligação. Retirado o excesso de material nas bordas, a emenda já pode ser vulcanizada. A unidade de vulcanização é travada sobre a região de emenda. Réguas são posicionadas nas extremidades laterais da emenda, com a finalidade de evitar a fuga de material com a pressão e garantir o bom acabamento. Os platôs são aquecidos, e todo o processo é monitorado. Tempo, temperatura e pressão de vulcanização são geralmente estimados pelos fabricantes das correias. Por fim, as bordas não vulcanizadas são aparadas e alinhadas com a borda da correia.

O processo de manutenção para instalação ou a troca de trechos desgastados das correias transportadoras demanda uma equipe dedicada à realização da atividade. A execução desta atividade é por meio de equipamentos e ferramentas na sua maioria manuais. A realização da emenda é um processo praticamente manual. Um tempo expressivo é despendido para a realização do procedimento, além de apresentar riscos operacionais e exposição dos trabalhadores a

situações ergonomicamente desfavoráveis.

A duração destas atividades duram em média 42 horas de serviço, desde a montagem do espaço de trabalho até vulcanização da emenda, utilizando como referência a correia modelo ST 2.500, com 1.800 mm de largura e 117 cabos de aço internos.

2.3. Usinagem de elastômeros

Elastômero é o principal polímero usado na fabricação das correias. São polímeros que na temperatura ambiente podem deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retornando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço (CANEVAROLO JR, 2002). Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas uma às outras, com baixa densidade de ligações cruzadas.

Os elastômeros são polímeros naturais ou sintéticos. Este tipo de polímero aceita grande deformação, conserva boa resistência mecânica e módulo de elasticidade quando deformado. Recupera rapidamente a deformação após retirada do esforço e apresenta recuperação total da deformação (ASKELAND e PHULÉ, 2003).

Os elastômeros também podem ser definidos como borrachas. A definição de borracha engloba compostos macromoleculares que podem ser reticuláveis e criar estruturas tridimensionais. Suas propriedades resultam necessariamente do elastômero, dos compostos, da técnica de processamento e da forma final do produto. Este tipo de polímero é inevitável no emprego à engenharia moderna (HOFFMAN, 1989). A seleção das substâncias e da quantidade utilizada de cada uma delas em um composto podem influenciar nas propriedades do produto final, no entanto, a característica principal é determinada pelo elastômero inserido no composto.

Tabela 2.2: Comparação de propriedades de elastômeros e outros materiais

Material	Módulo elástico (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão máxima (MPa)	% de deformação até ruptura	Condutividade térmica (W/m K)
Elastômeros	0,0007- 0,004	0,47 - 0,5	7 - 20	100 - 800	0,13 - 0,16
Ligas de alumínio	70 - 79	0,33	100 - 550	1 - 45	177 - 237
Aços	190 - 210	0,27 - 0,3	550 - 1200	5 - 25	35 - 60
Ligas de titânio	100 - 120	0,33	900 - 1200	10	7 - 7,5
Plástico, Nylon	2,1 - 3,4	0,4	40 - 80	20 - 100	0,3
Plástico, Polietileno	0,7 - 1,4	0,4	7 - 28	15 - 300	0,4

Fonte:Luo (2005)

As propriedades mecânicas dos materiais poliméricos são especificadas com alguns parâmetros que são usados para os metais (Tabela 2.2). Módulo de elasticidade e resistência a tração por exemplo. Um simples teste de tensão deformação pode ser empregado para caracterização de alguns destes parâmetros mecânicos. As características mecânicas para polímeros, em grande parte são sensíveis à taxa de deformação, temperatura, e a natureza química do ambiente. Algumas modificações nas técnicas de teste e nas configurações da amostra são necessárias para testes em polímeros, principalmente para os elastômeros.

A curva A na figura 2.8, representa o comportamento de uma resina termorrígida, típica de polímeros frágeis. A curva B é característica de materiais termoplásticos que apresentam fase cristalina, similar ao encontrado na maioria dos materiais metálicos. Em C, a deformação é totalmente elástica, particularidade dos polímeros elastômeros.

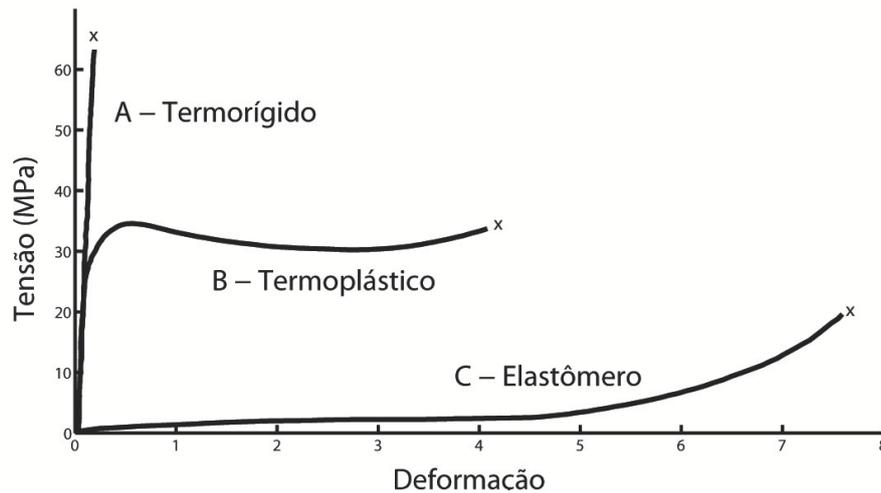


Figura 2.8: Curva tensão versus deformação obtidas de ensaio de tração.

Fonte: Callister e Rethwisch (2000)

As características mecânicas dos polímeros termoplásticos são sensíveis a mudança de temperatura. A taxa de deformação no comportamento mecânico tem a mesma influência que a temperatura na característica tensão-deformação. Com o aumento da temperatura ou da taxa de deformação o material se torna flexível e ductil (CALLISTER e RETHWISCH, 2000).

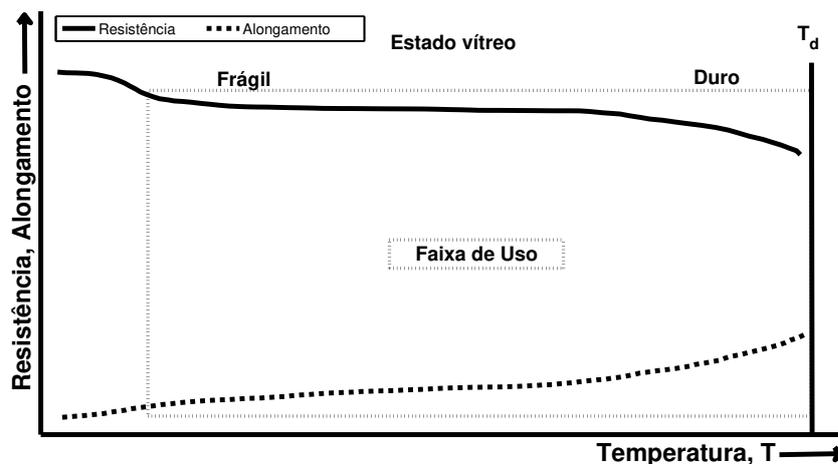


Figura 2.9: Resistência x Temperatura de um termorrígido.

Fonte: Padilha (1997)

Nos polímeros termorrígidos o aumento de temperatura tem efeito mínimo no compor-

tamento mecânico. A faixa de uso, representada na Figura 2.9, é limitada pela temperatura de decomposição (T_d). Em elastômeros, a temperatura tem grande ação nas propriedades mecânicas. A Figura 2.10 apresenta a faixa de uso deste tipo de material e os limites da temperatura de transição vítrea (T_g). Em temperaturas inferiores à T_g , o elastômero é duro e frágil. A temperatura de transição vítrea é inferior a temperatura ambiente em elastômeros.

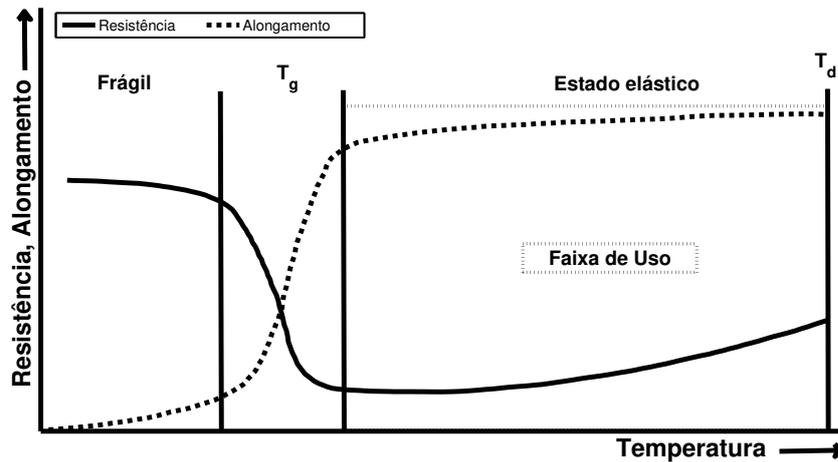


Figura 2.10: Resistência x Temperatura de um elastômero.

Fonte: Padilha (1997)

A maioria dos polímeros termoplásticos amorfos são elastômeros, mas alguns podem ser termoplásticos. A temperatura de transição vítrea, T_g , é a temperatura limite que define as propriedades de um polímero (Figura 2.11). Quando acima da T_g , um polímero se torna dúctil e mole, e abaixo de T_g frágil e duro. Assim um polímero amorfo com T_g inferior a temperatura ambiente é um elastômero, e quando superior será um termoplástico.

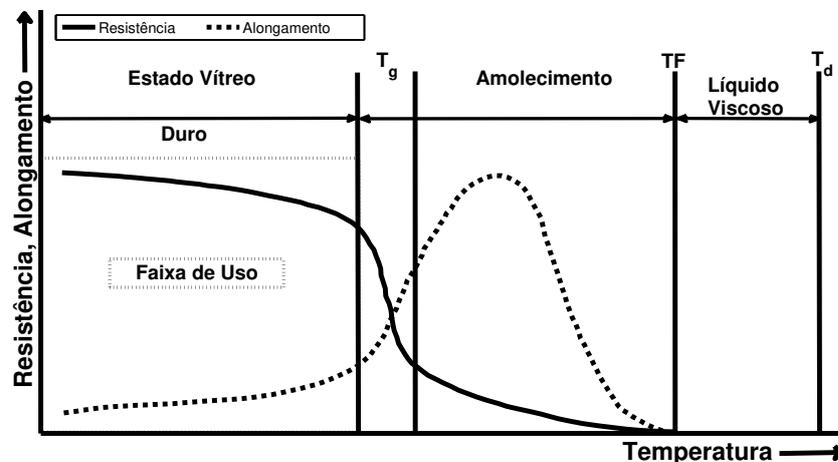


Figura 2.11: Resistência x Temperatura de um termoplástico amorfo.

Fonte: Padilha (1997)

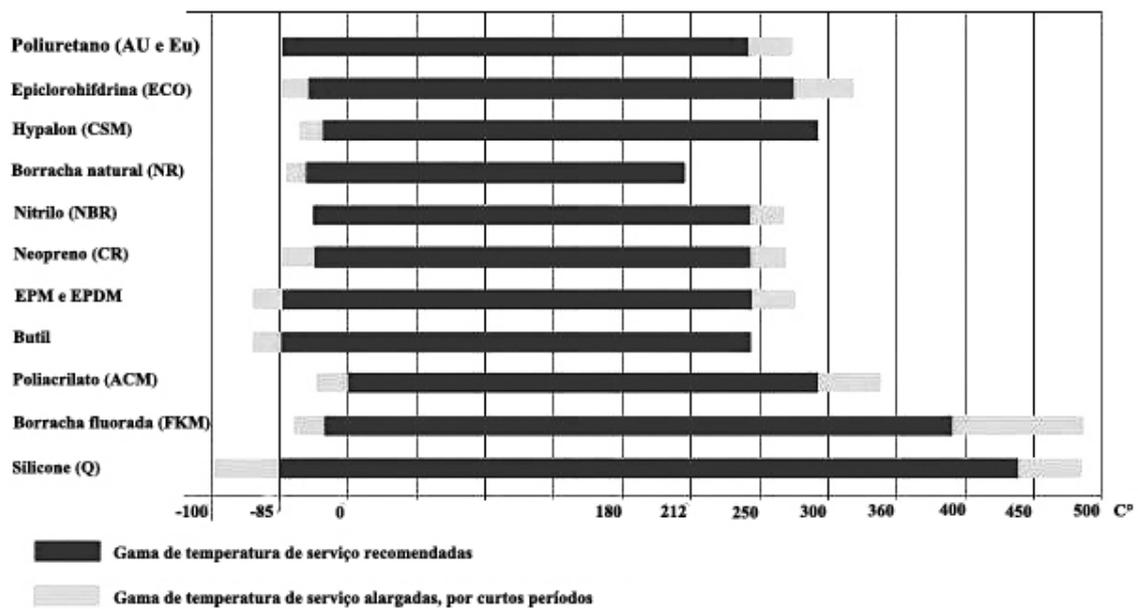


Figura 2.12: Temperatura de serviço de alguns elastômeros.

Elastômeros apresentam baixa condutividade térmica, além de apresentarem limites temperatura de serviço (Figura 2.12). Quando submetido sob carregamento cíclicos, os elastômeros exibem histerese significativa, o que contribui para sua capacidade de absorção de energia. Este tipo de material também apresenta modulo elástico muito baixo e alta porcentagem de alongamento antes da ruptura, o que torna a usinagem de elastômero um desafio (LUO, 2005).

2.3.1. Processos convencionais

A norma DIN8580 (2009) define usinagem como processo de fabricação no qual envolve a remoção de material na forma de cavaco. Este tipo de processo atribui à peça: forma, dimensão e acabamento superficial. O cavaco é a porção de material removida pela ferramenta. O princípio implica na interferência entre a ferramenta de material duro e resistente com a peça de material de propriedades inferiores.

A usinagem compreende o estudo da mecânica, termodinâmica e das propriedades dos materiais. A mecânica envolve tópicos relacionados à cinemática, tribologia e à deformação dos materiais. Na termodinâmica o interesse é pela área de geração e propagação entre a ferramenta e a peça. Os processos de usinagem podem ser classificados como usinagem com ferramenta de geometria definida ou com ferramenta de geometria não definida (STOETERAU, 2003).

Os processos de usinagem que envolve ferramenta de geometria definida são operações de torneiar, fresar, furar, rosquear, alargar, brochar, serrar, cortar, plainar e outros. Retificar, lapidar, lixar, polir e brunir são processos feitos por meio de ferramentas de geometria não definida (STOETERAU, 2003). A maioria dos processos de usinagem são aplicados aos metais, porém alguns podem ser utilizados em materiais poliméricos.

A usinabilidade é definida pela facilidade com que um material possa ser usinado por diferentes processo de usinagem. A usinabilidade dos polímeros é distinta dos metais. Os polímeros são maus condutores de calor, apresentam dilatação térmica elevada e sensibilidade ao entalhe, além de menor rigidez quando comparados aos metais. Na literatura encontra-se diversos trabalhos associados a usinagem de polímeros dos tipos termoplástico e termorrígido, entretanto existem poucos trabalhos associados a usinagem de elastômeros.

Luo (2005) propôs o uso de três novos métodos para usinagem de elastômeros. O primeiro usa uma fresa para usinar elastômero em uma sala com temperatura ambiente. O segundo esfria criogenicamente o elastômero com dióxido de carbono sólido (gelo seco) a $-78,6^{\circ}\text{C}$ antes de usinar utilizando a fresa. O último método aquece a ferramenta por indução para a usinagem.

Nas Figuras 2.13-a e 2.13-b, esta representado a superfície de um elastômero usinado com fresas de 4,76 mm de diâmetro com três diferentes ângulos de hélice à 3600 rpm, e profundidade de corte de 6,35 mm (Figura 2.13-c). Este processo foi realizado em temperatura ambiente. O resultado deste processo é uma superfície usinada rugosa com muitas rebarbas.

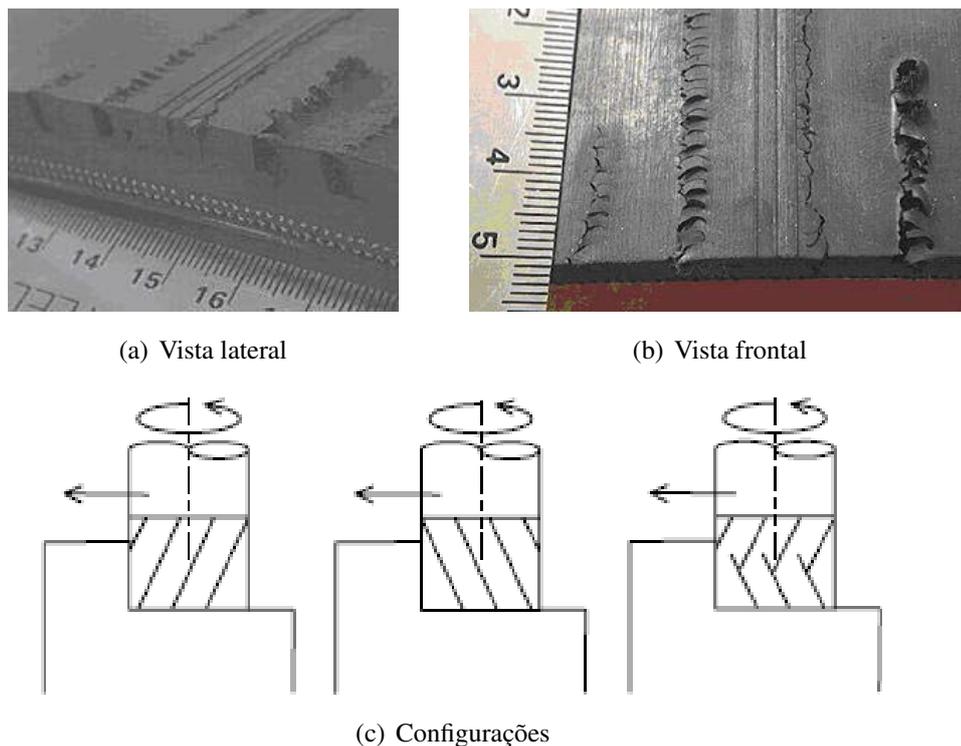


Figura 2.13: Resultados de testes preliminares de usinagem com fresa.

Fonte:Luo (2005)

Shih *et al.* (2004) realizaram testes usando outras 13 configurações diferentes de fresas, variando ângulo da aresta, ângulo de hélice, diâmetro, rotação, profundidade e temperatura do elastômero. Alguns resultados são apresentados na Figura 2.14. Segundo os autores o ângulo da aresta de corte da ferramenta, a rotação e a temperatura do elastômeros são os parâmetros mais importantes para uma usinagem limpa sem rebarbas.

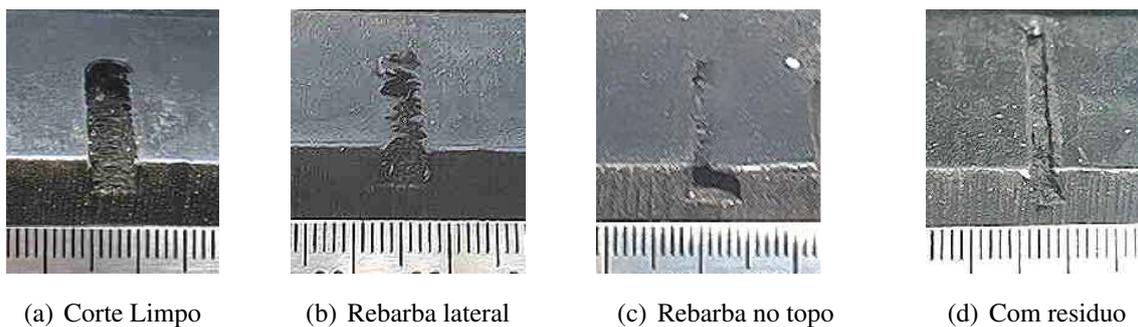


Figura 2.14: Usinagem com diferentes configuração de fresa.

Fonte:Shih *et al.* (2004)

Os elastômeros por apresentarem baixo modulos elástico e grande alongamento até a ruptura tornaram sua usinagem difícil. Porém em temperaturas baixas, abaixo da fase vítrea, os elastômeros tem comportamento frágil. Nesta fase os elastômeros podem ser usinados com mais eficiência. Um método usando resfriamento criogênico foi proposto por Luo (2005) para a usinagem de elastômero em baixas temperaturas. A configuração deste método é apresentado na Figura 2.15-b.

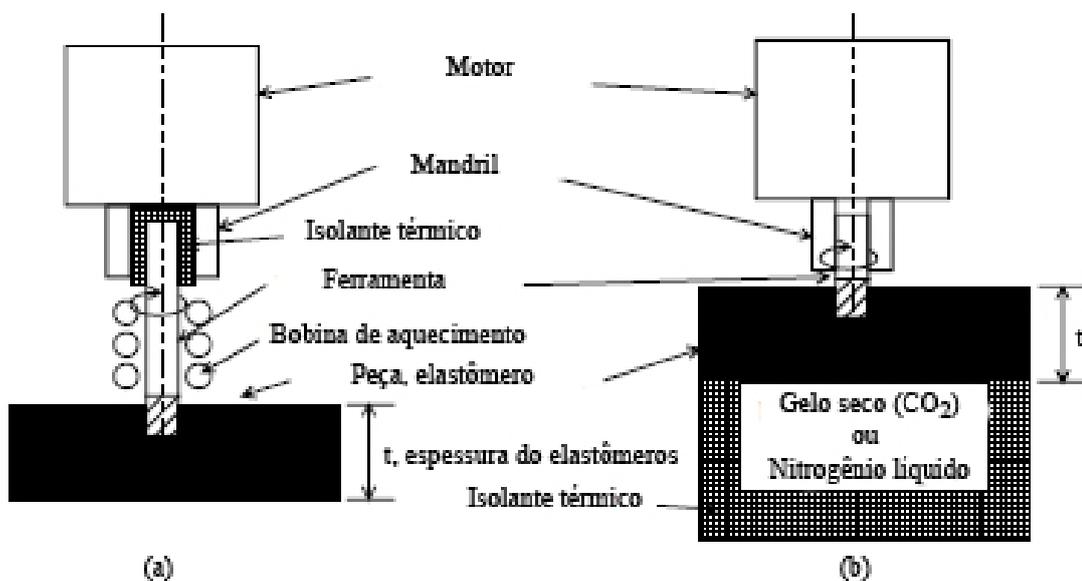


Figura 2.15: (a) Ferramenta aquecida por indução, e (b) Elastômero resfriado criogenicamente.

Fonte: Luo (2005)

Um outro método também aplicado por Luo (2005), consiste no aquecimento da ferramenta por indução. Esta ferramenta de usinagem é posicionada dentro de uma bobina e entra em contato com seu campo magnético, este esquema é apresentado na figura 2.15-a. O calor da ferramenta amolece o elastômero facilitando que a ferramenta penetre eficientemente no material.

A Figura 2.16 apresenta os resultados da aplicação deste dois últimos métodos na usi-

nagem de elastômero. Os efeitos da rotação, do aquecimento da ferramenta e do resfriamento do elastômero foram relacionados. Segundo Luo (2005), rotações altas demonstraram ser um parâmetro crítico, geram muita fumaça, tornando o ambiente insalubre. Baixas velocidades influencia na qualidade do acabamento superficial da peça. A ferramenta aquecida em baixa velocidade apresentou boa precisão e bom acabamento superficial. A rigidez do elastômero tem papel fundamental no acabamento superficial da amostra, o resfriamento contribui para uma superfície menos rugosa.

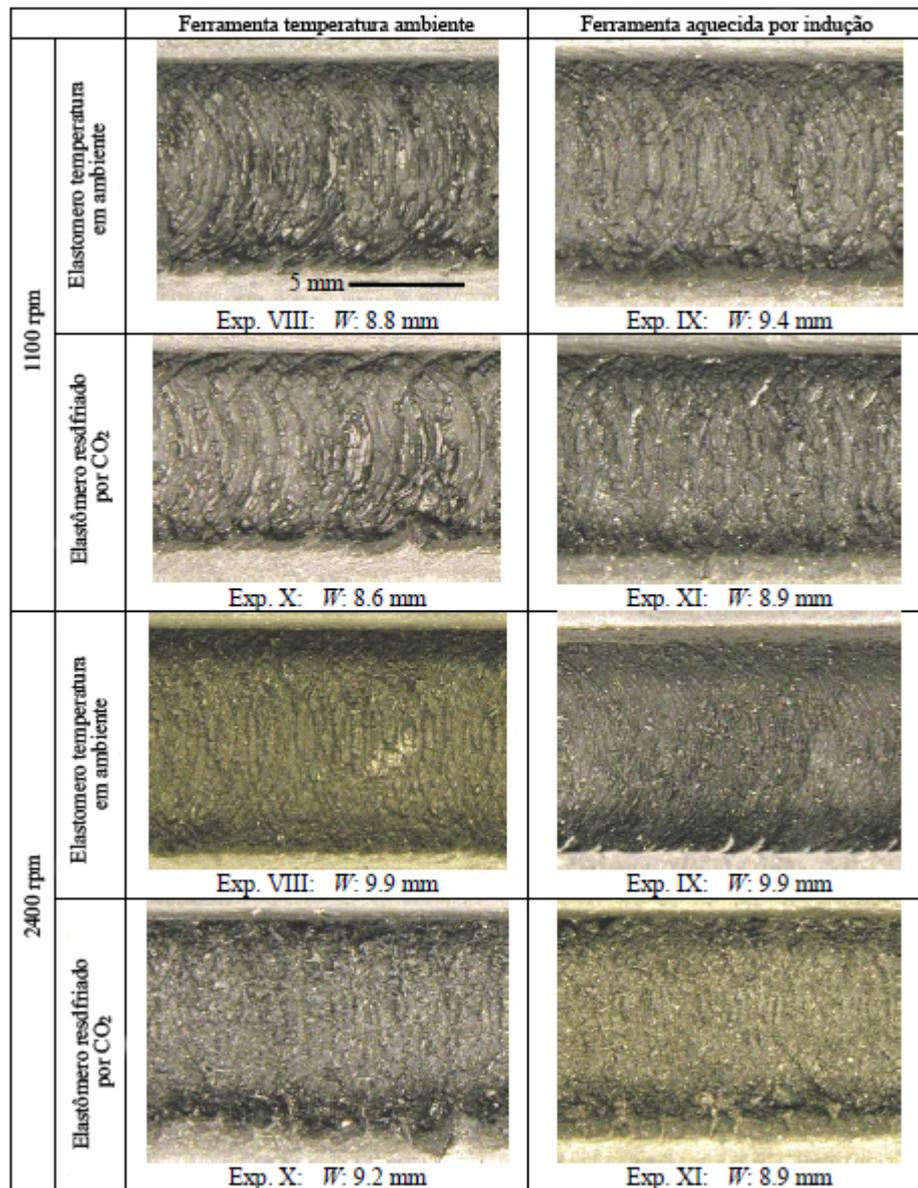


Figura 2.16: Imagem óptica da superfície usinada.

Fonte: Luo (2005)

A usinagem de elastômeros têm atraído empresas de ferramentas e desenvolvedoras de soluções industriais. As ferramentas existentes no mercado para usinagem de metais são utilizadas de forma experimental na usinagem de elastômeros. A Robotics (2020) utilizou uma

fresa como ferramenta para usinagem de correia transportadoras do tipo de lona. Os testes foram feitos utilizando uma fresadora CNC e amostras de correias com diferentes espessuras. Segundo o autor a ferramenta manteve-se estável e precisa. O resultado é apresentado na Figura 2.17.



Figura 2.17: Correia transportadora usinada com fresa.

Fonte:Robotics (2020)

2.3.2. Processos não convencionais

O surgimento de novos materiais e ligas com propriedades específicas dificulta, do ponto de vista técnico e econômico, o emprego de processos convencionais de usinagem. Os novos materiais de engenharia apresentam propriedades mecânicas, químicas e térmicas distintas dos materiais normalmente transformados por usinagem. Estrutura não-homogênea, baixas propriedades térmicas, alta dureza e fragilidade são algumas características encontradas nestes materiais.

Os processos de usinagem também podem ser classificados em convencionais e não convencionais. Os processos convencionais usam o cisalhamento como método de retirada de material, baseados no uso de ferramentas mais duras que o material a ser usinado. Os processos não convencionais são caracterizados pelo emprego de energia de forma direta, ferramentas com arestas cortantes e rotativas não são premissas fundamentais neste tipo de usinagem (PANDEY e SHAN, 1980).

Apesar de não existir um consenso sobre a classificação dos processos não convencionais de usinagem, alguns autores os classificam de acordo com a forma de energia empregada para a retirada do material, podendo ser de origem mecânica, elétrica, térmica ou química (MACHADO *et al.*, 2015). Na Tabela 2.3 é apresentado os processos de usinagem classificados de acordo com sua forma de energia, mecanismo de remoção, meio de transferência e sua fonte.

Tabela 2.3: Classificação dos processos não convencionais

Forma de Energia:	Mecânica	Elétrica	Térmica	Química
Processo	Jato Abrasivo		Eletroerosão	
	Jato de água		Feixe eletróns	Química
	Jato de água com abrasivos	Eletroquímica e derivados	Feixe íons	Fotoquímica
	Fluxo abrasivo		Feixe laser	
Mecanismo de remoção:	Ultrassom		Arco plasma	
	Erosão	Deslocamento de íons	Fusão e vaporização	Ablação
Meio de transferência	Partícula a alta velocidade	Eletrólito	Gás aquecido	
			Elétrons	Ambiente reativo
			Radiação	
Fonte de energia	Pressão pneumática ou hidráulica	Corrente elétrica	Corrente de íons	
			Materia ionizado, alta tensão, luz amplificada	Agente corrosivo

Fonte: Pandey e Shan (1980)

Nos processos mecânicos, usinagem por ultrassom e a jato de água por exemplo, o material é usinado através da ação abrasiva. Geralmente, estes são empregados em materiais compósitos, cerâmicos e poliméricos. A maior vantagem da utilização deste método é que o material não necessita ser condutor elétrico (MOREIRA, 2020).

O método de usinagem por ultrassom (Ultrasonic machining - USM) é composto por uma ferramenta capaz de vibrar em frequências ultrassônicas de 20 kHz a 100kHz. Esta ferramenta oscila em uma lama composta por água e partículas abrasivas, existem também aplicações que não exige a utilização deste composto de água e partículas. Na USM com emprego de substâncias abrasivas, as partículas são forçadas contra a superfície da peça devido ao movimento oscilante da ferramenta. Em consequência do atrito das partículas com a peça, acontece a erosão do material com o formato inverso da ferramenta (Figura 2.18-a).

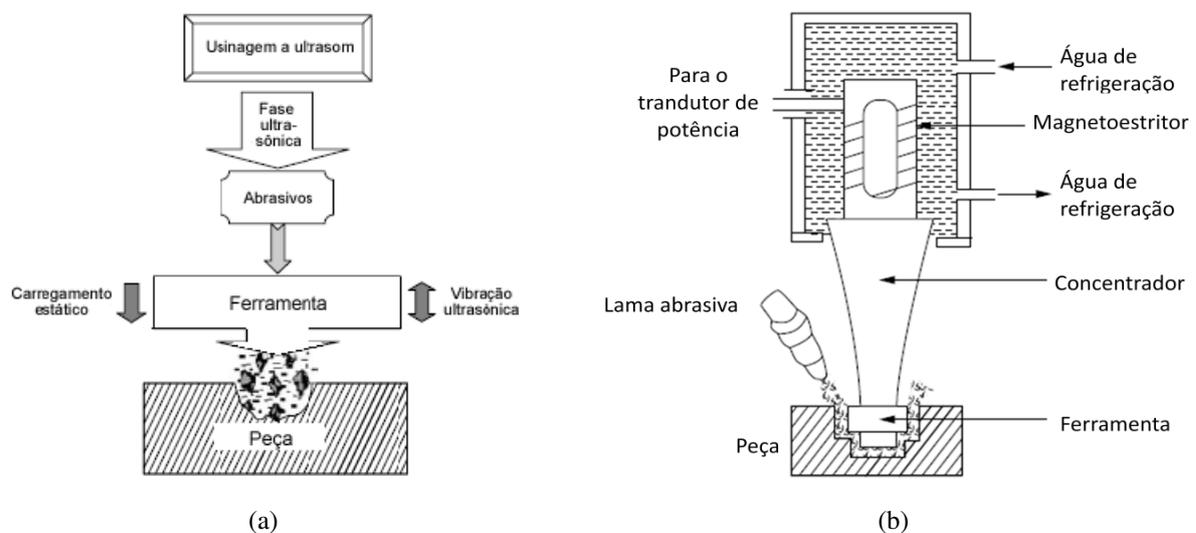


Figura 2.18: Componentes USM.

Fonte: El-Hofy (2005)

O equipamento utilizado para usinagem por ultrassom é composto por: gerador, transdutor, amplificador e ferramenta. O gerador de corrente de baixa frequência alimenta o sistema, onde um transdutor eletroacústico transforma as oscilações elétricas em ondas ultrassônicas. O amplificador construído em titânio aumenta a vibração do transdutor em que esta conectado. Este amplificador também é conhecido como sonotrodo, na qual a ferramenta é conectada (Fig.2.18-b).

A usinagem a jato de água (Water Jet Machining - WJM) é um método na qual a água é direcionada em alta velocidade contra a peça. Este processo pode ser feito usando apenas água, ou água com abrasivos. No processo puro, sem partículas abrasivas, o fluxo de água pode atingir 900 m/s, removendo o material da superfície da peça através da força erosiva da água. A WJM é um processo aplicado em diversos tipos de materiais, como por exemplo em metais, polímeros e cerâmicos. Além de ser um processo que elimina tensões térmicas decorrentes da usinagem convencional Moreira (2020).

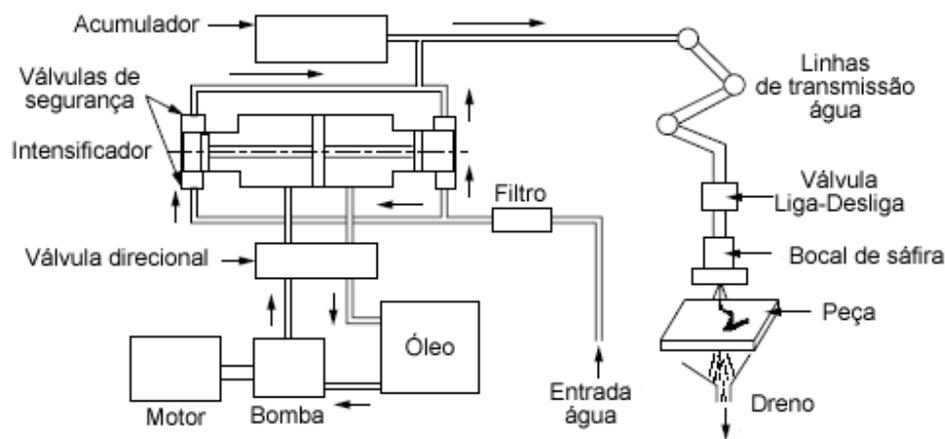


Figura 2.19: Sistema de usinagem a jato de água.

Fonte:El-Hofy (2005)

O sistema de WJM é composto por bomba hidráulica, intensificador, acumulador, linha de transmissão, bocal e dreno. A bomba hidráulica acoplada a um motor elétrico eleva a pressão do fluido, que podem atingir 12 MPa. No intensificador, o óleo em pressão elevada aumenta a pressão da água de 0,4 a 380 MPa. O acumulador é responsável por manter o fluxo contínuo e constante nas linhas de transmissão do sistema. O bocal direciona o jato de água para o material a ser usinado. Um dreno, no final da cadeia do sistema, é usado para reduzir ruído e filtrar partículas provenientes do processo.

Zaremba *et al.* (2017) propõem um método de preparação para emenda de de correia de cabos de aço baseado no processo de usinagem a jato de água puro. O objetivo era investigar se a remoção da borracha era eficiente, homogênea e seletiva, sem danificar o revestimento de zinco dos cabos de aço. Neste trabalho, o autor utilizou uma correia nova de 30 mm de espessura com cabos de 8 mm de diâmetros.

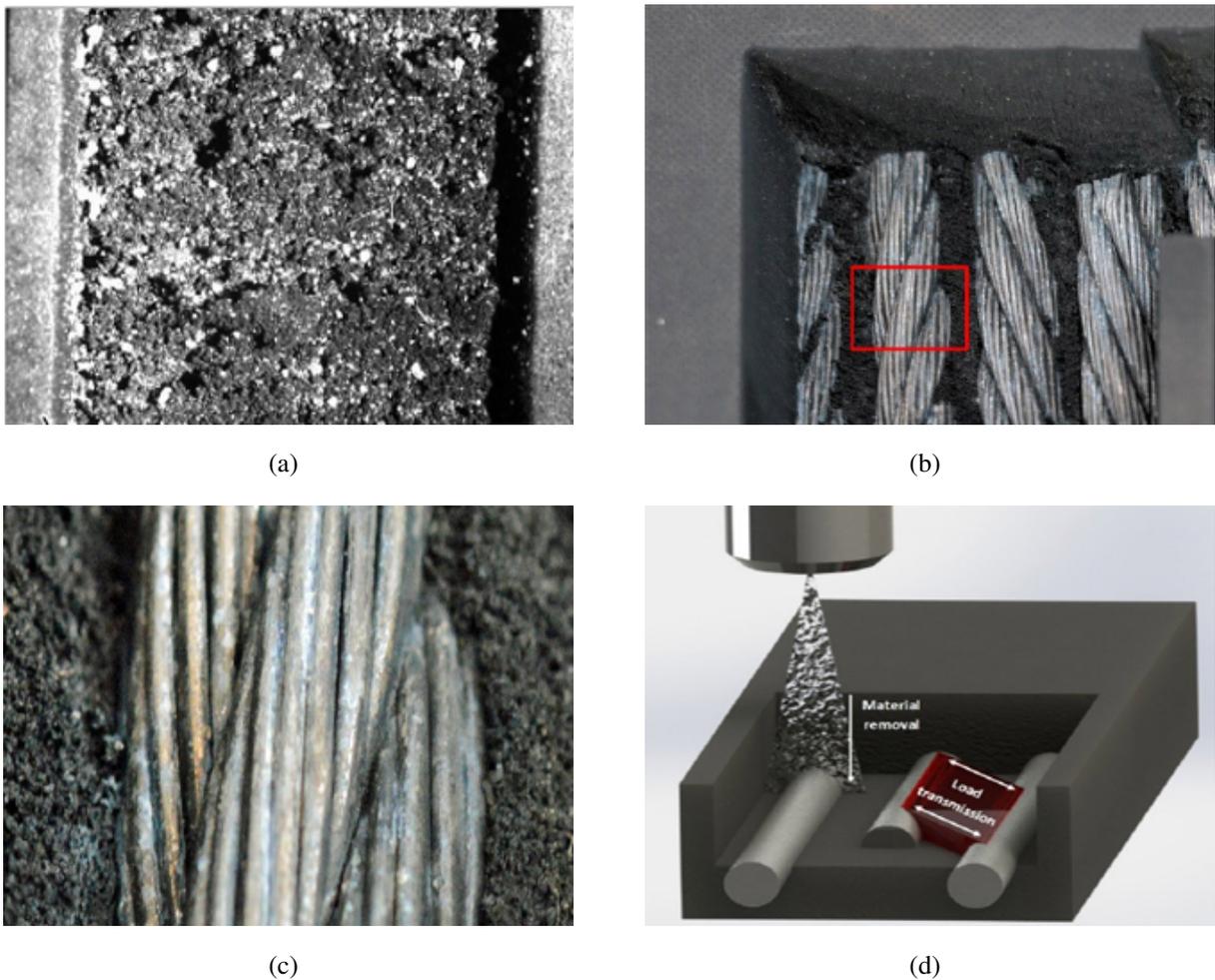


Figura 2.20: Usinagem de elastômero por UJM.

Fonte: Zaremba *et al.* (2017)

Na Figura 2.20-a, está representado a usinagem da correia, utilizando um bocal plano de 10° e pressão de 100 MPA, e na Figura 2.20-b depois de quatro passos ao longo da área usinada. O revestimento de zinco dos cabos não sofreram danos visíveis (Figura 2.20-c). A taxa de remoção e a rugosidade superficial aumentam de acordo com o aumento da pressão.

Heitzmann *et al.* (2017) comparam dois métodos de usinagem para preparação de emenda de correia transportadora de cabos de aço. A análise considera os danos causados no revestimento dos cabos de aço após os processo a laser, e a jato de água. A usinagem a jato de água não danifica a superfície dos cabos e mantém um pouco de borracha residual sobre os cabos, enquanto durante usinagem a laser o elastômero entra em combustão (Figura 2.21-a). Em termos de tempo, o método a jato de água demonstrou ser mais eficiente. Na Figura 2.21-a, é apresentado uma comparação entre o método convencional, a laser, e usando jato de água.

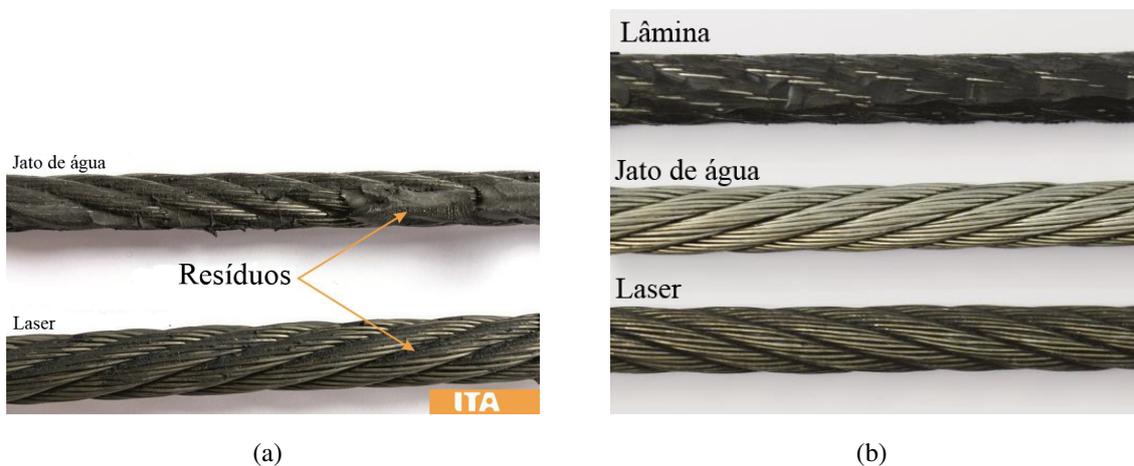


Figura 2.21: Comparação da superfície dos cabos usando diferentes processos.

Fonte:Heitzmann *et al.* (2017)

2.4. Usinagem com robôs

Os métodos de fabricação modernos são caracterizados por sua alta flexibilidade. A usinagem é um dos processos mais importantes para transformação de matéria prima em produto acabado. As máquinas CNC's estão presentes na maioria das operações de usinagem convencional e não convencional por serem precisas e estáveis, apesar de apresentarem alto custo e baixa customização (ALTINTAS e BER, 2001). Os robôs industriais podem ser uma solução para aumentar a versatilidade do processo de usinagem e reduzir os custos operacionais.

Robôs industriais foram originalmente desenhados para atividades de pick and place na indústria automotiva. Desde então novas tecnologias foram desenvolvidas para generalizar o uso de robôs em diferentes aplicações (FURTADO *et al.*, 2017). Hoje, os robôs estão presentes em atividades de pintura, solda, empacotamento, paletização, e inspeção de produtos etc.

Aplicações em movimentação de material e soldagem representam a maior parte do uso robôs na indústria. Operações de corte e remoção de material representa apenas 5 % do total. A utilização de robôs para usinagem tem crescido em muitas indústrias, principalmente em aplicações que envolvem metais, pedras, tecidos, plásticos e alimentos, e também são empregados em procedimentos cirúrgicos (BOGUE, 2008).

As técnicas aplicadas em processos de corte com robôs são similares aos usados em equipamentos não robóticos, como por exemplo corte por jato de água, laser, ultrassom, plasma, oxi-gás, facas e lâminas. O uso de cada método depende do material, espessura, precisão, velocidade e qualidade de corte. Appleton e Williams (1987) sugeriram a substituição de operadores por robôs para retificar, rebarbar e perfurar peças.

A taxa de remoção de material (MRR, *Material Removal Rate*) é maior limitação no uso de robôs em operações de usinagem. Operações com MRR pequena é uma grande desvantagem, devido à necessidade de programação em massa dos robôs para substituição de operadores. O

aumento da MRR também influi na qualidade do produto, em consequência dos robôs apresentarem menor rigidez em sua cadeia cinemática quando comparado às máquinas convencionais. Para resolver esse problema, pesquisas na qual envolvem dinâmica, configuração cinemática, otimização de trajetória de manipuladores e outros aspectos têm sido feito ao longo de três décadas (JI e WANG, 2019).

Os maiores desafios na usinagem com robôs consistem na baixa rigidez e precisão e na programação complexa dos manipuladores. Robôs já são empregados em operações de acabamento como chanfragem e rebarbação, porém em operação de desbaste de materiais duros não apresentam boa precisão dentro dos limites de tolerância. A baixa rigidez resultante da cadeia cinemática conectada em série causa oscilação em decorrência das forças periódicas do processo de usinagem. O resultado deste processo é uma superfície de baixa qualidade. A programação de manipuladores para usinagem pode ser complicada, devido não ter uma função dedicada para essa tarefa (KARIM e VERL, 2013).

A precisão e a eficiência são tópicos importantes no emprego de manipuladores robóticos para usinagem. Normalmente, os processo com robôs apresentam mais vantagens quando comparados às máquinas CNC's. Entretanto, devido as limitações de rigidez e payload, velocidade de corte, profundidade de corte e diâmetro devem ser valores pequenos (CHEN e DONG, 2013).

No processo de usinagem usando máquina CNC o nível de rigidez dos eixos é alterado durante sua movimentação. Assim como nas máquinas CNC's, a rigidez do manipulador apresenta instabilidade durante o seguimento de uma trajetória. Portanto, o planejamento de trajetória é um assunto importante em operações de usinagem com robôs, pois a rigidez é alterada durante a trajetória. A otimização da trajetória também está relacionada com a velocidade de corte, orientação da ferramenta e condição de corte (OWEN *et al.*, 2009).

Os manipuladores podem ser classificados obedecendo vários critérios, conforme o tipo de acionamento das juntas, a geometria, a área de aplicação e o método de controle (SPONG *et al.*, 2006). De acordo com o tipo de acionamento, os manipuladores podem ser do tipo elétrico, hidráulico ou pneumático. A área de aplicação classifica-os em robôs de montagem ou robôs que não executam atividades de montagem, como por exemplo soldagem e pintura. O método de controle classifica os manipuladores em dois grupos, os que usam servomotores e os que não usam. Os robôs manipuladores normalmente são descrito segundo sua geometria.

2.5. Manipuladores robóticos

Os manipuladores são usualmente classificados cinematicamente com base em suas três primeiras juntas do braço; o punho é descrito separadamente. O tipo e a sequência dos graus de liberdade (*DOF - degree-of-freedom*) do manipulador inicia na junta da base. A maioria deste manipuladores são divididos em cinco tipos de geometria: cartesiano (PPP), cilíndrico (RPP), esféricos (RRP), SCARA (RRP), ou antropomórfico (RRR).

2.5.1. Cartesiano

O manipulador cartesiano apresenta uma configuração mais simples. As três primeiras juntas são do tipo prismática, e são mutuamente ortogonais e coincidem com as direções cartesianas. Este tipo de configuração permite que o efetuador apenas realize movimentos lineares, possuindo 3 graus de liberdade. A estrutura cartesiana apresenta boa rigidez mecânica, o que garante exatidão nos movimentos dentro do espaço de trabalho. Apesar de apresentar precisão em seus movimentos, os manipuladores cartesianos tem baixa destreza devido suas juntas serem prismáticas (SICILIANO *et al.*, 2010). Manipuladores cartesianos apresentam espaço de trabalho delimitado por um prisma de base retangular (Figura 2.22).

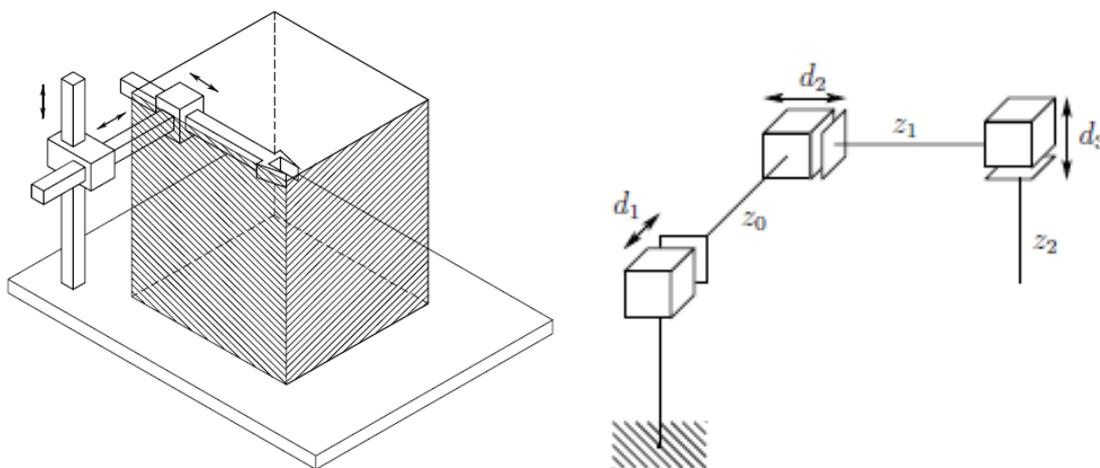


Figura 2.22: Cartesiano.

Fonte: Adaptado de Siciliano *et al.* (2010) e Spong *et al.* (2006)

2.5.2. Cilíndrico

A configuração cilíndrica difere da cartesiana por apresentar em sua base uma junta de revolução. A junta da base é de revolução e as outras duas são prismáticas. Neste tipo de manipulador a trajetória pode ser descrita em coordenadas cilíndricas, onde cada grau de liberdade corresponde uma variável no espaço cartesiano. O manipulador cilíndrico confere resistência

mecânica, porém sua exatidão no posicionamento do punho é inversamente proporcional ao estiramento horizontal do braço (SICILIANO *et al.*, 2010). Este tipo de robô é muito usado em tarefas de movimentação de objeto, e seu espaço de trabalho é caracterizado por um semicilindro oco (Figura 2.23).

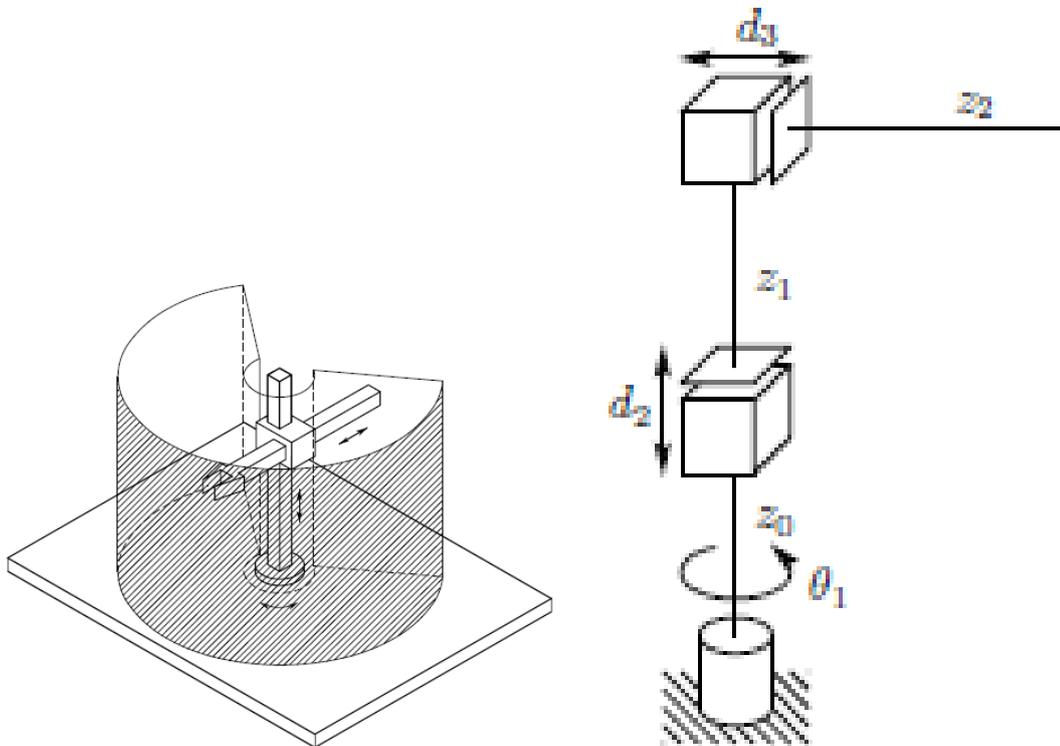


Figura 2.23: Cilíndrico.

Fonte: Adaptado de Siciliano *et al.* (2010) e Spong *et al.* (2006)

2.5.3. Esférico

O manipulador esférico apresenta em sua geometria duas juntas de revolução e uma prismática. A estrutura deste manipulador é bem semelhante à estrutura do manipulador cilíndrico, porém a segunda junta é substituída por uma de revolução. Cada grau de liberdade corresponde a uma variável no espaço cartesiano, desde que a trajetória seja descrita em coordenadas esféricas. Neste tipo de braço a rigidez mecânica é baixa, devido sua construção ser mais complexa. A exatidão dos movimentos também é reduzida com o aumento da distância radial. Manipuladores esféricos conferem movimentos rápidos e apresentam trajetórias mais simples quando comparado a outros manipuladores.(Figura 2.24).

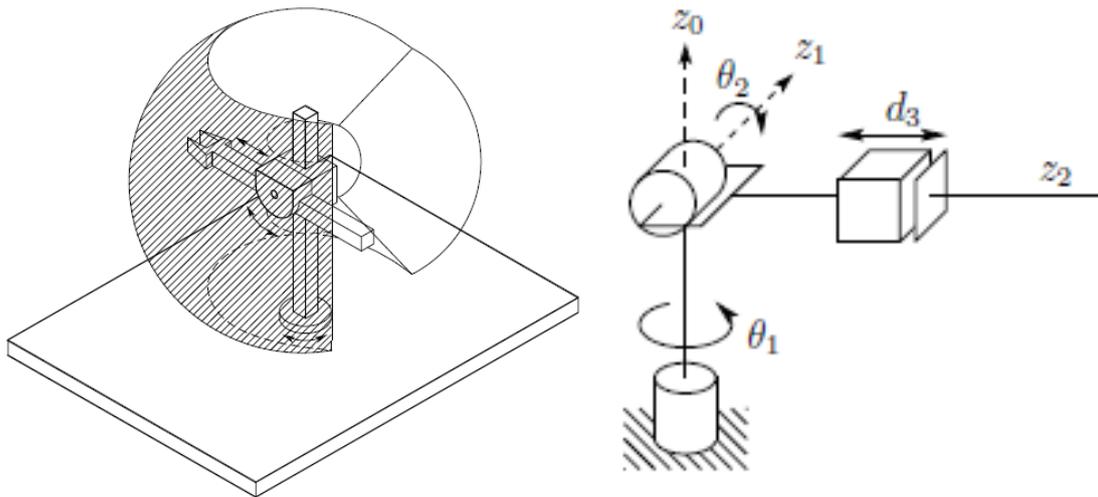


Figura 2.24: Esférico.

Fonte: Adaptado de Siciliano *et al.* (2010) e Spong *et al.* (2006)

2.5.4. SCARA

O manipulador *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA) apresenta uma geometria especial. Este tipo de braço possui os mesmos tipos de juntas do manipulador esférico, contudo os eixos de cada junta são dispostos paralelamente. Este tipo de configuração fornece alta resistência mecânica em carregamentos verticais, e boa conformidade horizontal. A precisão dos movimentos diminui com o aumento da distância em relação ao primeiro eixo articulado (SICILIANO *et al.*, 2010). Manipuladores SCARAs são rápidos e compactos, e são largamente empregados em atividades de *pick and place* e em pequenas montagens. O espaço de trabalho do manipulador SCARA é ilustrado pela Figura 2.25.

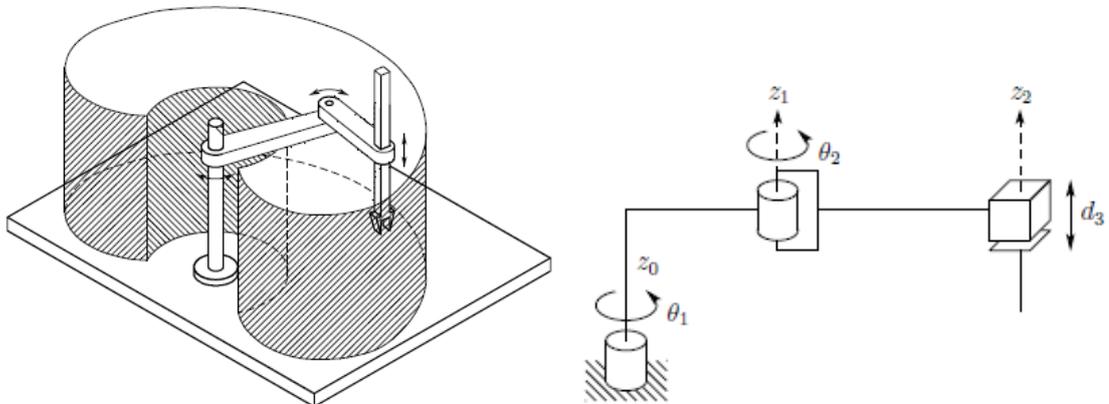


Figura 2.25: SCARA.

Fonte: Adaptado de Siciliano *et al.* (2010) e Spong *et al.* (2006)

2.5.5. Antropomórfico

O manipulador antropomórfico é similar ao braço humano, também conhecido como manipulador articulado. A configuração antropomórfica é composta por três juntas de revolução. A junta de revolução da base é ortogonal ao eixo de revolução das demais. Este tipo de manipulador são mais dinâmicos, devido suas juntas serem de revolução. Porém, a correspondência entre os graus de liberdade e as variáveis do espaço cartesiano é perdida, e a precisão no posicionamento do efetuador varia dentro do espaço de trabalho (SICILIANO *et al.*, 2010). O espaço de trabalho deste tipo de braço esta representado na Figura 2.26.

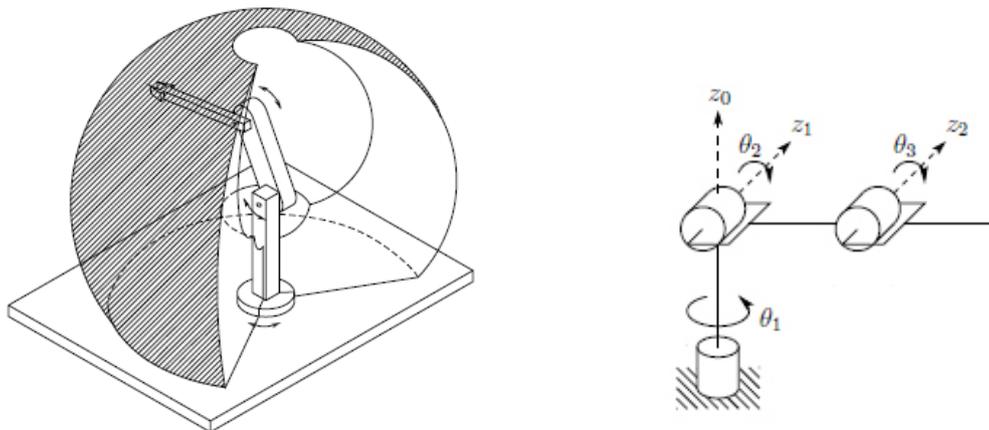


Figura 2.26: Antropomórfico.

Fonte: Adaptado de Siciliano *et al.* (2010) e Spong *et al.* (2006)

2.6. Simulação

O Método de controle e a arquitetura do sistema são elementos fundamentais em simuladores de robôs. Quando comparado com os manipuladores robóticos de gerações passadas, os robôs atuais estão utilizando métodos de controle bastante complexos e exigindo computadores com maior capacidade de processamento. Uma boa simulação exige uma boa arquitetura para cálculos precisos e bom desempenho.

O simulador de robô CoppeliaSim apresenta um ambiente de simulação integrado, baseado em uma arquitetura de controle distribuída. Sua arquitetura permite o controle independente de cada objeto em cena, por meio de script embutidos, plugins, ROS, API ou uma solução customizada. O CoppeliaSim é o nome dado para a nova versão do simulador V-REP (*Virtual Robot Experimentation Platform*), uma excelente ferramenta para desenvolvimento rápido de algoritmos, simulações, prototipagem e verificação, monitoramento remoto e muito mais. Além de uma boa ferramenta para o aprendizado e treinamento de tópicos relacionados à robótica (ROHMER *et al.*, 2013).

Em simulações complexas, normalmente se utiliza uma a estrutura de controle distribuída. Este tipo de estrutura simplifica a tarefa, particionando as entidades de controle, distri-

buindo a carga da CPU entre os núcleos ou máquinas, e controla o modelo pela execução de código nativo. Flexibilidade, portabilidade e escalabilidade são aspectos também importantes na escolha de um modelo de simulação.

A execução de um modelo de simulação ou código de controle pode ser feita usando três técnicas mais comuns. A primeira consiste na execução do código em outra máquina ou robô conectado à máquina simuladora por meio de uma rede específica. O código de controle também pode ser executado na mesma máquina porém utiliza tópicos (executáveis externos, plug-ins) paralelos ao loop de simulação principal. Na última técnica o código é executado na mesma máquina e no mesmo loop de simulação.

As técnicas apresentadas anteriormente podem apresentar problemas de portabilidade e escala dos modelos simulados, como o caso do uso de executáveis externos onde o código não está anexado diretamente ao modelo. Os simuladores também podem apresentar problemas de compatibilidade entre as plataformas, e flexibilidade nas modificações do código.

O CoppeliaSim permite o usuário implementar várias técnicas de programação separadamente ou simultaneamente: scripts, add-ons, plug-ins, remote API clients e ROS. O script é principal característica deste simulador. A partir de um simples script programado em linguagem Lua, é possível criar o loop principal de simulação. Este script principal pode executar outros scripts filhos associados a outros objetos simulados da cena e também compilar scripts incorporados por outras técnicas de programação.

O ambiente de simulação do CoppeliaSim contém vários objetos de cena. Estes quando posicionados na cena de simulação, também são alocados em uma árvore hierárquica obedecendo as relações entre os objetos. Corpos rígidos, juntas, câmeras, luzes, dummies (pontos com posição e orientação), sensores de força, proximidade e visão, gráficos, remoção de material e trajetória são objetos de cenas suportados neste simulador.

Os objetos de cena dificilmente são usados de forma isolada em um ambiente de simulação, geralmente estão associados à outros objetos, por exemplo o uso de sensor para detecção de um corpo rígido. O CoppeliaSim oferece módulos de cálculo que operam diretamente um ou vários objetos de cena. Os principais módulos são: cinemático, dinâmico, detector de colisão, detector de distância de malha, planejador de trajetória e movimento.

3. Materiais e Métodos

O método proposto avaliou ferramentas de corte que podem ser usadas como efetuator robótico em robôs industriais para execução de cortes sobre a borracha durante processo de emenda de correia de cabos de aço. O desenvolvimento deste trabalho consistiu em algumas etapas que podem contribuir para a melhoria do procedimento de remoção da borracha que envolve os cabos de aço da correia.

A Figura 3.1 apresenta um fluxo da metodologia adotado onde pode-se perceber cinco etapas distintas:

- Etapa 1 – Definição das etapas do Procedimento de Emenda de Correia que poderiam sofrer alterações;
- Etapa 2 - Teste para obtenção de parâmetros de cortes em correias/borracha (força aplicada pelo operador da emenda);
- Etapa 3 – Verificação de outras ferramentas de corte disponíveis no mercado;
- Etapa 4 – Avaliação de um sistema robótico que poderia utilizar as ferramentas definidas na etapa 3;
- Etapa 5 – Definição metodológica e proposta de alteração dos procedimentos levantados na etapa 1 e passíveis de modificação no processo de emenda de correias.

Na primeira fase do trabalho foi realizado um estudo técnico para determinação de quais etapas do procedimento de emenda de correia poderia sofrer alteração em sua execução. A melhoria na execução de algumas etapas do procedimento de emenda pode impactar diretamente no tempo de conclusão da tarefa, na qualidade da emenda e na exposição do operador em condição de risco.

Testes foram feitos para obtenção de alguns parâmetros de corte em borracha usando uma lâmina padrão e uma amostra de correia. Esta lâmina é a mesma empregada no procedimento de emenda de correia manual. Os dados obtidos nessa fase contribuíram para determinar a força que operador emprega na execução do filetagem/decapagem dos cabos.

Uma ferramenta de corte aquecida foi adaptada e aplicada na remoção da borracha que envolve os cabos de aço. Esta ferramenta compreende uma lâmina metálica em formato de W acoplada a um transformador de corrente. A força durante o corte, e a qualidade da superfície após o corte foram analisadas para justificar o emprego desta ferramenta. A quantidade de calor produzida na lâmina foi ajustada variando a corrente transformada e a temperatura da lâmina foi monitorada. Estes parâmetros estão relacionados com o acabamento superficial da correia e com o desgaste prematuro da ferramenta.

A usinagem por ultrassom foi a terceira ferramenta avaliada para cortes sobre uma amostra de correia transportadora. Neste trabalho foi utilizado um equipamento ultrassônico manual

com frequências de 20 kHz e 40 kHz. A qualidade da superfície cortada foi comparada com as obtidas com a lâmina convencional e a lâmina W aquecida. Nesta etapa não foram mensuradas as forças para execução dos cortes, e a temperatura não foi monitorada durante o processo.

A penúltima etapa deste trabalho compreendeu a avaliação de sistemas robóticos para utilização das ferramentas estudadas.

A última etapa apresenta um conjunto de procedimento metodológicos possíveis e alternativos a serem adotados no processo de emenda de correias e uma comparação dos pontos de melhoria com o processo atualmente executado.

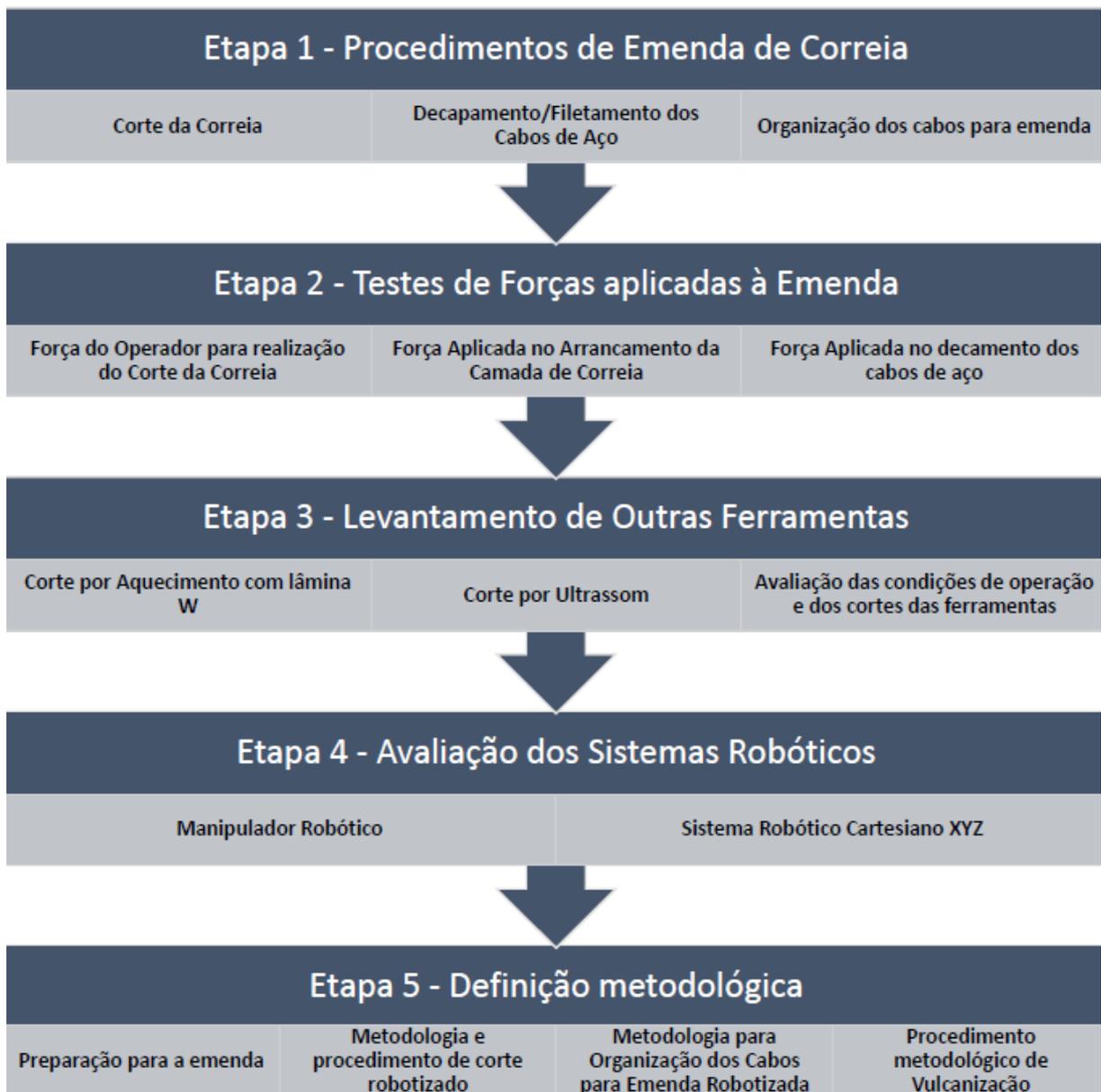


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia proposta.

4. Desenvolvimento

4.1. Etapa 1 - Identificação de melhorias no procedimento de emenda

O objeto de estudo compreende a etapa de remoção da borracha que circunda os cabos (filetamento ou decapagem). O método proposto neste trabalho pode ser feito seguindo o procedimento em norma, ou eliminando uma etapa deste processo. A exclusão ocorre devido a remoção direta da borracha sobre os cabos sem a extração prévia das camadas superior e inferior da correia. Obedecendo o procedimento em norma, o método aplicado compreende as etapas:

- (a) Preparar seção transversal das extremidades da correia, delimitando o passo da emenda a partir de um corte transversal e superficial em viés de aproximadamente 22°;
- (b) Remover as camadas superior e inferior no sentido longitudinal da correia com chanfro de entrada nas extremidades de 45°;
- (c) Posicionar a ferramenta de corte contra a seção transversal de um dos cabos de aço, preservando uma camada residual de borracha que envolve os cabos, tendo a referida ferramenta de corte um raio maior que o raio do cabo de aço e adaptada para corte circunferencial;
- (d) Remover a borracha ao longo do comprimento do cabo, mantendo a ferramenta de corte coaxial ao cabo, e exercendo uma força em direção a extremidade livre da correia;
- (e) Repetir a etapa (c) e (d) para cada um dos cabos de aço.

Na etapa (c) foi proposto a utilização de uma lâmina em formato de W aquecida por meio da condução de corrente elétrica e uma ferramenta ultrassônica. A substituição da lâmina padrão por essa tem como objetivo reduzir os esforços empregados nos cortes da borracha sobre os cabos. O aquecimento da lâmina e conseqüentemente a condução de calor na borracha implica na redução da resistência do elastômero na zona de corte da correia. Este processo pode facilitar a execução do corte.

4.2. Etapa 2 – Teste para obtenção de parâmetros de cortes em correias

4.2.1. Lâmina Padrão

A faca é a principal ferramenta empregada para fornecer cortes retilíneos sobre a correia. Sua construção é composta por uma lâmina metálica e um suporte com empunhadura com um sistema de travamento de segurança da lâmina (Figura 4.1). O operador é responsável por empregar força e direção durante o processo de corte. A faca está presente em algumas etapas do processo de emenda de correia, principalmente na fase de remoção da borracha sobre os cabos. Cortes múltiplos em diferentes ângulos de ataque são necessários para a limpeza de um único cabo de aço da correia.



Figura 4.1: Faca utilizada no procedimento convencional.

Gabaritos de testes foram construídos para aquisição de dados em função do ângulo de ataque da lâmina sobre uma amostra de correia de cabos de aço. Os gabaritos foram fabricados utilizando madeira, tirante roscado, porcas, parafusos e lâminas. Estas lâminas foram posicionadas em inclinações diferentes em cada gabarito. Os ângulos estão representados na Figura 4.2. As inclinações avaliadas foram 90°, 75°, 60° e 45° respectivamente. Força longitudinal, profundidade, comprimento de corte e tempo foram os parâmetros avaliados nos testes.

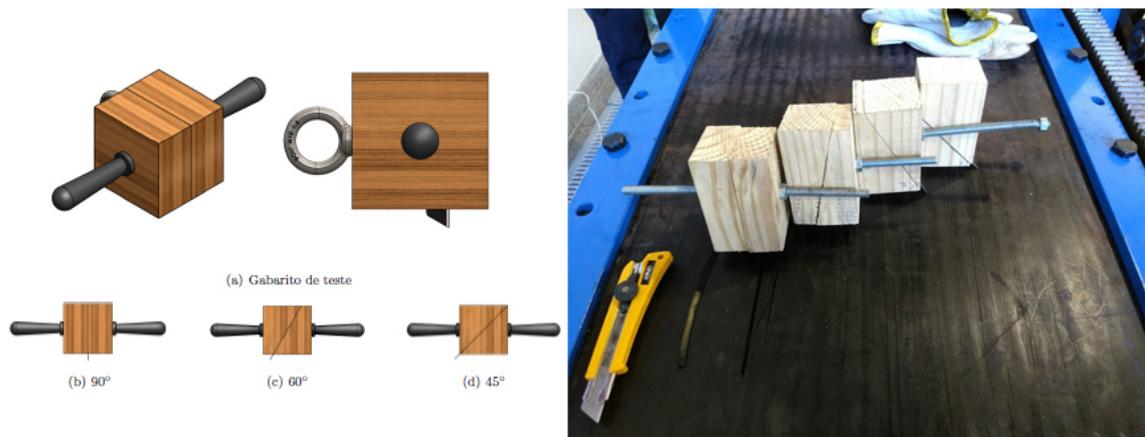


Figura 4.2: Gabaritos com lâminas de corte em diferentes inclinações.

O comprimento do corte na correia foi estabelecido em 500 mm para todas as inclinações da lâmina. Marcações correia foram feitas para determinar o ponto inicial e final do corte. A profundidade de penetração da lâmina foi ajustada em 15mm. A força de corte é obtida pela reação da mesa móvel sobre a célula de carga fixada no fim de curso da mesa, demonstrado na Figura 4.3. Um dinamômetro de 980N com interface serial RS-232 foi utilizado para medir a força longitudinal empregada em cada inclinação de corte em função do tempo. Paquímetro e régua para determinar profundidade e comprimento do corte.



Figura 4.3: Aparato para cortes com lâmina.

4.3. Etapa 3 – Verificação de outras ferramentas de corte disponíveis no mercado

4.3.1. Lâmina W Aquecida

No procedimento usual de emenda de correia, a remoção da borracha que envolve os cabos de aço são cuidadosamente cortadas usando a faca, método que exige destreza e força do operador. Os cabos devem ser preservados com uma pequena camada residual de borracha, esta camada é desejada para utilização como elemento de ligação durante a vulcanização. A utilização de uma lâmina com perfil circunferencial dos cabos (formato W) acoplada à um transformador de corrente fornece um método para preparação das extremidades da correia de cabo de aço para emenda, na qual a borracha que envolve os cabos de aço possa ser removida com precisão e uniformidade.



Figura 4.4: Lâmina W.

Testes foram realizado sobre uma amostra de correia de cabos de aço usando uma lâmina de corte em formato de W aquecida (Figura 4.4). Esta etapa permite medir a força dos cortes, monitorar a temperatura do processo e observar a qualidade da superfície da borracha remanescente sobre os cabos, e determinar as condições de operação desta ferramenta. Para realização destes foi utilizado dinamômetro 980N e câmera termográfica (Figura 4.5) .

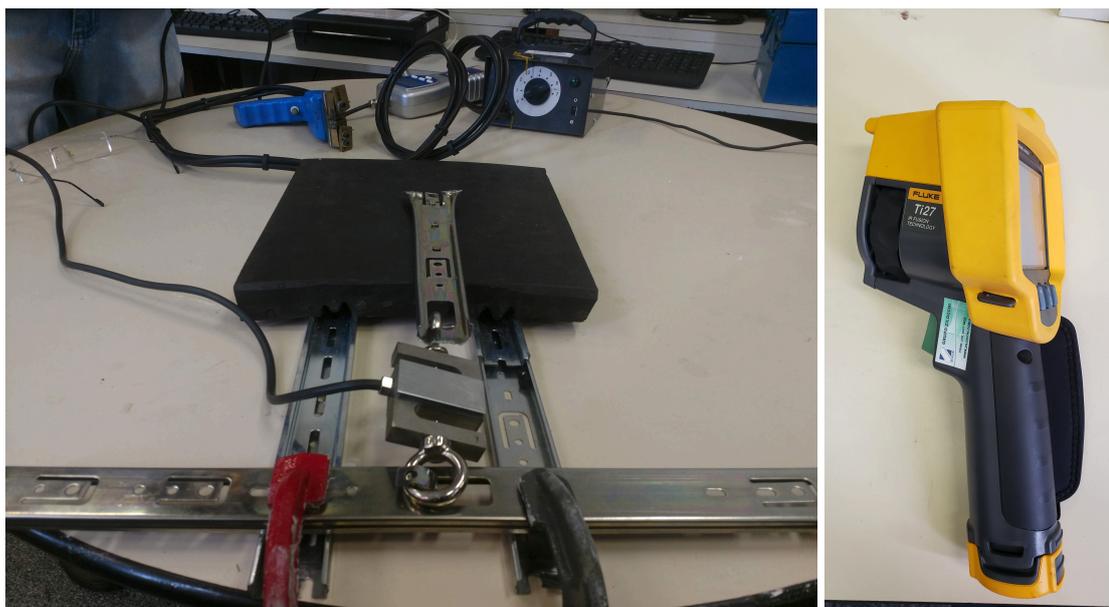


Figura 4.5: Aparato para cortes com lâmina aquecida e câmera termográfica.

A passagem de corrente elétrica através da lâmina metálica provoca o aumento de temperatura liberando calor. O aquecimento da lâmina acontece por meio de efeito Joule. O transformador com ajuste de corrente variável permite, a partir da mudança da relação de transformação, elevar ou reduzir a corrente e conseqüentemente alterar a quantidade de calor gerada na lâmina. A execução dos corte seguiu o procedimento proposto na etapa (c) da seção 3.1.

O procedimento de remoção de borracha sobre os cabos de aço da correia usando uma lâmina aquecida eletricamente, e em forma do perfil dos cabos de aço foi proposto para reduzir o tempo despendido com atividade, aumentar a qualidade da emenda, e amenizar os esforços e risco do operador na função. O dispositivo, lâmina e transformador elétrico, deve fornecer uma quantidade de calor suficiente para elevar a temperatura do elastômero. Em elastômeros, a temperatura tem grande ação nas propriedades mecânicas. O aumento de temperatura em elastômeros reduz a resistência ao rasgo, apesar dos elastômeros presentes na correia transportadora apresentarem boa resistência ao rasgo à quente. A faixa de operação de corte usando este aparato compreende a zona entre a temperatura de transição vítrea (T_g) e a temperatura de degradação (T_d) do elastômero da correia que pode ser encontrada nas revisões desse trabalho.

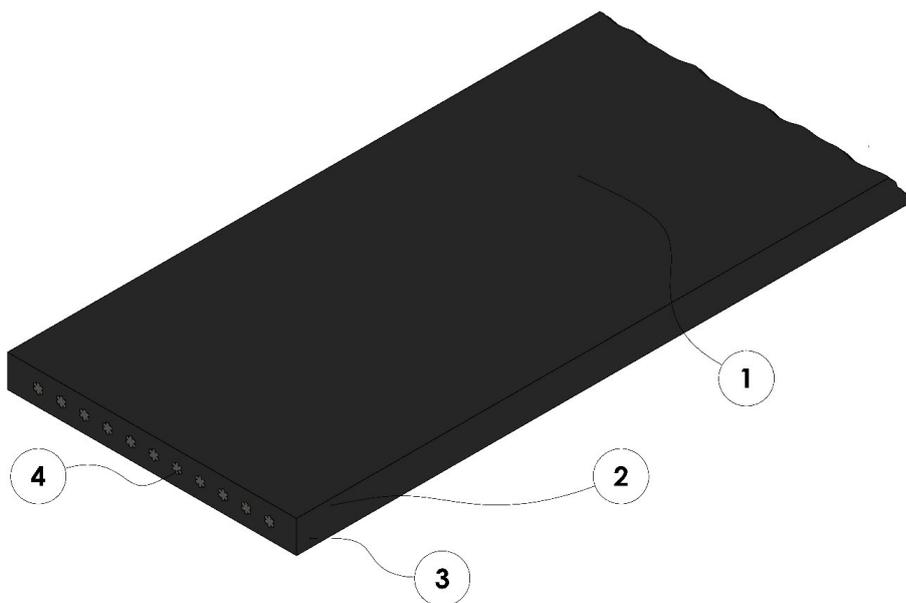


Figura 4.6: (1) Correia, (2) Camada Superior, (3) Camada Inferior e (4) Cabos de aço.

O método de separação da borracha dos cabos de aço da correia se inicia após a remoção das camadas superior e inferior da correia, Figura 4.6 e Figura 4.6 respectivamente, ou sem remoção prévia das camadas. A Figura 4.7 ilustra o procedimento a partir da remoção antecipada das camadas superior e inferior, seguindo a norma padrão de emenda de correia.

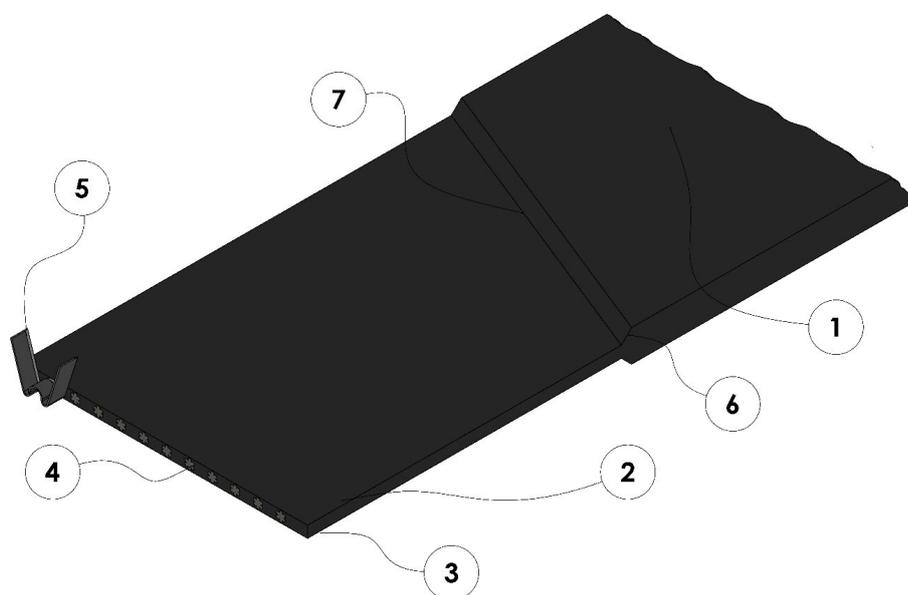


Figura 4.7: (5) Lâmina W aquecida, (6) Chanfro 45°, e (7) Viés 22°.

A Figura 4.7 representa a etapa inicial do procedimento de separação da borracha sobre os cabos, nesta operação a lâmina de corte aquecida (5) é posicionada sobre um dos cabos de aço (4) da estrutura da correia. O movimento do corte é direcionado para extremidade oposta da correia, o deslocamento longitudinal da lâmina sobre o cabo impõe uma força de separação

do material elastomérico do cabo de aço da correia (Figura 4.8). Esta etapa é repetida para cada cabo de aço presente na estrutura da correia transportadora de cabos de aço (Figura 4.9).

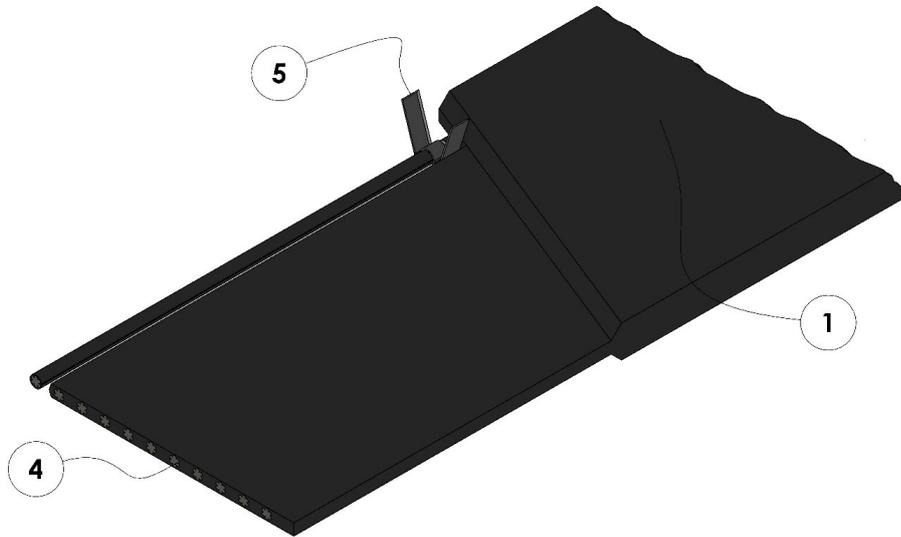


Figura 4.8: Representação do primeiro passe sobre a correia.

Uma camada residual de borracha é desejada sobre a superfície dos cabos de aço. Este material remanescente é necessário como elemento de ligação entre os cabos, as borrachas de preenchimento e as camadas superior e inferior. A ligação destes componentes acontece por meio do processo de reticulação de elastômeros, onde ligações cruzadas são formadas na presença de enxofre, processo conhecido como vulcanização.

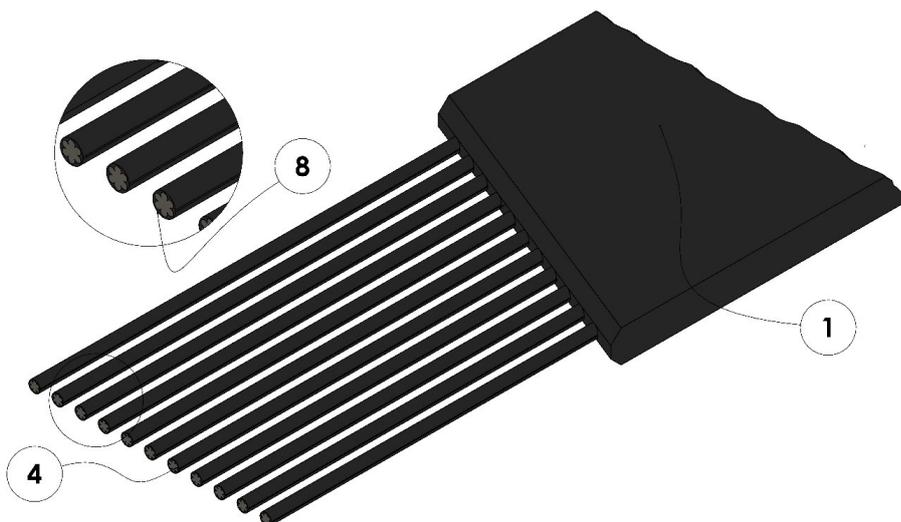


Figura 4.9: Representação de múltiplos passes sobre a correia, (8) camada residual sobre os cabos.

A lâmina em forma de W é biselada em uma de suas arestas (Figura 4.10). Esta lâmina é acoplada ao dispositivo transformador de tensão. A lâmina é construída em aço inoxidável, na

qual apresenta alta temperatura de trabalho e dureza. O aço inoxidável exibe boa condutividade térmica, e sua resistividade aumenta com o aumento da temperatura. A passagem de corrente elétrica através da lâmina metálica provoca o aumento de temperatura liberando calor.

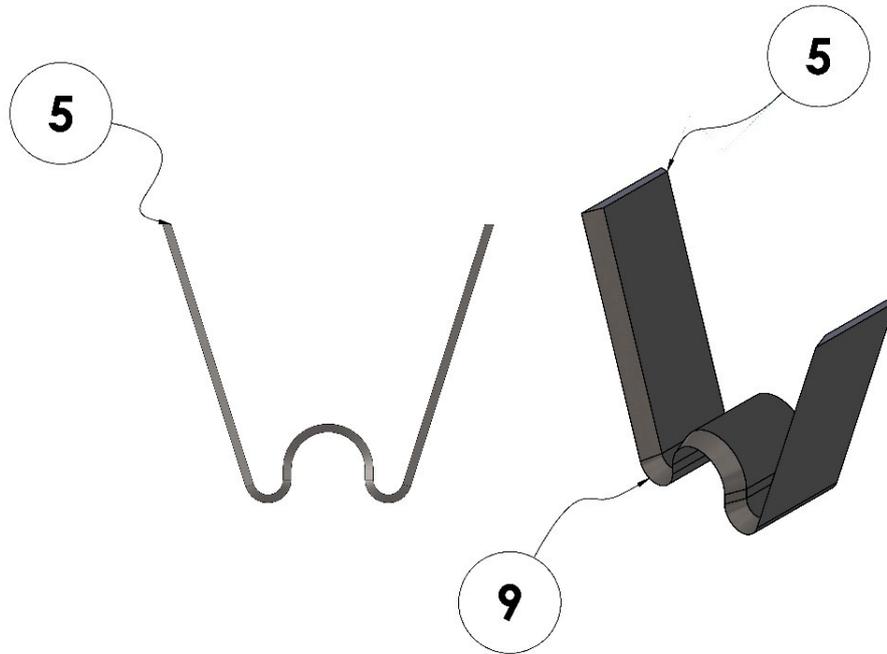


Figura 4.10: Representação da (9) Aresta de corte.

O transformador, com razão de transformação variável (Figura 4.11), permite elevar ou reduzir a corrente transformada. O aquecimento da referida lâmina por meio de efeito Joule propicia o corte da borracha. A temperatura da lâmina é ajustada, por meio de variação da corrente, para que a quantidade de calor fornecida à correia não exceda a temperatura de decomposição do elastômero.



Figura 4.11: Transformador.

4.3.2. Ultrassom

A usinagem por ultrassom também foi testada como método de preparação para emenda de correia de cabo de aço. O processo ultrassônico oferece como uma solução eficiente para usinagem de materiais polimérico, cerâmicos e compósitos.

O princípio deste método consiste na utilização da energia das ondas ultrassônicas para aquecer as partes do material a ser cortado. O corte por ultrassom não exige que a aresta da ferramenta seja afiada, e nem grandes forças na execução do processo. O processo ultrassônico oferece como uma solução eficiente para usinagem de materiais polimérico.

Para a preparação da correia, foi utilizado um sistema ultrassônico manual para realização de cortes sobre a amostra de correia (Figura 4.12).



(a)



(b)

Figura 4.12: Sistema ultrassônico.

O sistema é composto por uma pistola para corte e um gerador, Figuras 4.12-a e 4.12-b. Neste testes foram executados cortes com duas ferramentas, uma trabalhando com a frequência de 40 kHz e a outra com 20 kHz. Estas eram as frequências disponíveis no equipamento utilizado. As ferramentas estão representadas nas Figuras 4.12-a e 4.13 respectivamente.



Figura 4.13: Usinagem da correia por ultrassom.

4.4. Etapa 4 – Avaliação de possíveis sistemas robóticos

A avaliação dos sistemas robóticos viáveis para utilização no sistema de emenda de correias inicia pela definição dos seguintes parâmetros já levantados:

1. Dimensões do espaço de trabalho do sistema robótico necessários para emenda de qualquer tipo de correia;
2. Procedimentos do processo de emenda de correia:
 - a- Posicionamento da correia;
 - b- Corte da correia;
 - c- Retirada das camadas de borracha superiores e inferiores da correia;
 - d- Filetamento dos cabos de aço;
 - e- Corte dos cabos de aço;
 - f- Organização dos cabos de aço para emenda;
 - g- Posicionamento dos elastômeros de preenchimento;
 - h- Vulcanização da emenda.

4.4.1. Dimensões do Espaço de trabalho

O procedimento de emenda de correia convencional é realizado sobre uma estação de trabalho, normalmente montada paralelamente ao transportador. Essa estação de trabalho é composta por duas mesas niveladas com o platô da prensa de vulcanização. A preparação das pontas da correia a serem emendadas é feita em cada mesa individualmente e depois unidas na prensa localizada na região central da estação de trabalho.

As dimensões da estação devem ser superiores à largura da correia, à altura da prensa e ao comprimento da emenda. Para correia ST2500 de 1800mm de largura, o comprimento mínimo da emenda é 1350mm (Tabela 2.3). Neste caso, pode-se usar uma estação de trabalho com 7500mm de comprimento por 2500mm de largura.

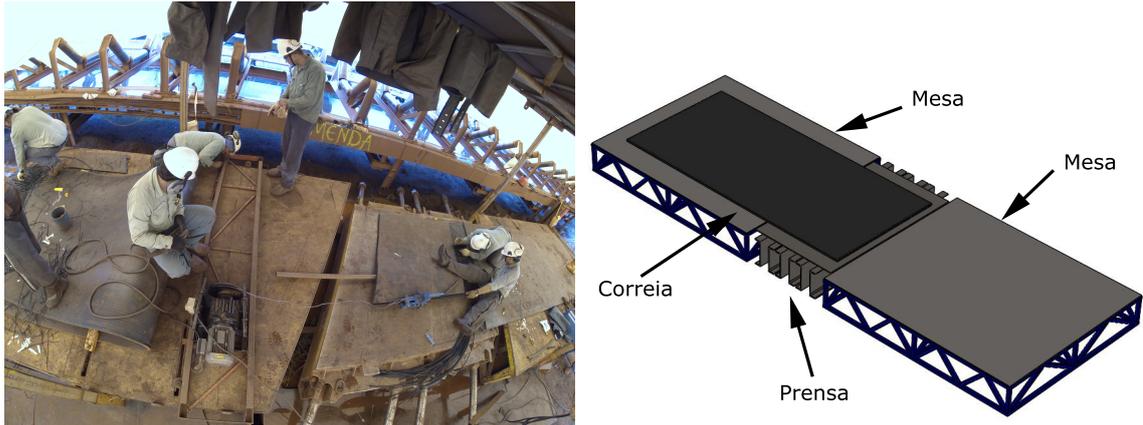


Figura 4.14: Estação de trabalho.

Para um sistema robótico de emenda de correia é essencial que o espaço de trabalho do manipulador envolva a região da emenda. O espaço de trabalho representa a porção do ambiente na qual o efetuador robótico pode ter acesso. A forma e o volume depende da estrutura do manipulador assim como as limitação mecânicas das juntas.

4.4.2. Etapas e Procedimentos

A fixação e o alinhamento da correia sobre a estação de trabalho é a primeira fase do procedimento de emenda correia. As duas extremidades da correia são alinhadas com o centro das mesas e do platô da prensa. O posicionamento da correia sobre a estação de trabalho é feito por guindaste e pelos operadores. Grampos são usados pra fixar a correia sobre a estação de trabalho (Figura 4.15).



Figura 4.15: Fixação da correia.

Para um sistema com robôs, a priori não seria necessário modificação dessa etapa. A

estação de trabalho precisaria ser adaptada em uma célula robotizada, onde todas operações dentro deste ambiente possam ser controladas.

Atualmente, a maioria dos processo de cortes e remoção de material da correia são realizados por ferramentas manuais, como faca, tesoura e lixadeira por exemplo. A remoção das camadas superior e inferior da correia utiliza de um sistema na qual a partir de uma pequena área removida da camada superior ou inferior, uma garra é fixada nesta área e posteriormente movimentada provocando o rasgo da camada de borracha sobre a área da emenda (Figura 4.16).



Figura 4.16: Remoção da camada superior da correia.

A usinagem por jato de água pode ser uma solução para remoção das camadas de borracha da correia. Este processo pode ser acoplado a um manipulador e implementado no procedimento de emenda robotizado.

A etapa de filetagem ou decapagem dos cabos de aço da estrutura da correia no processo convencional é feito de forma manual, e cada cabo é decapado individualmente. As ferramentas proposta neste trabalho, lâmina W aquecida e ultrassom, podem contribuir como efetadores em um sistema robotizado.

A organização do cabos e adição de borracha na região da emenda deve seguir a norma para emendas de correias de cabos de aço. A posição e o comprimento dos cabos segue o diagrama de estágio para cada tipo de correia (Tabela 2.1). Uma garra pode ser usada para execução desta etapa. Assim como para o processo de filetagem, seria necessário identificar previamente a posição de cada cabo na estrutura da correia.

O processo de vulcanização é a ultima etapa do procedimento. Após a organização dos cabos e o posicionamento das cobertura de ligação na correia, o platô superior da prensa é fixado sobre a área da emenda e alinhado com o platô inferior. Essa etapa seguiria o procedimento convencional.

4.4.3. Sistemas Robóticos

Um ambiente de simulação foi desenvolvido para demonstrar os aspectos operacionais de um sistema robótico para emenda de correia.

A primeira etapa consiste em criar um arquivo URDF (*Universal Robotic Description Format*), trata-se de um modelo unificado que contém todas as informações sobre os elementos de um robô. Dimensões dos elos, tipos de juntas, limites de posições, massa e outros parâmetros estão contidos neste arquivo. URDF é gerado a partir de um modelo CAD do manipulador ABB6650S. Um pacote de configuração no CoppeliaSIM é criado com o URDF. Este pacote é responsável por executar cálculos cinemáticos e planejar as trajetórias do manipulador.

O manipulador industrial IRB 6650S da ABB foi utilizado no desenvolvimento desta etapa (Figura 4.17). Este robô articulado tem alcance superior a 3000 mm, capacidade de carregamento de 200 kg, e 1264 Nm de torque máximo na junta do pulso. Para uma emenda de correia de cabos de aço ST2500 de 1800mm de largura, este manipulador apresenta os requisitos preliminares pra o desenvolvimento da atividade.

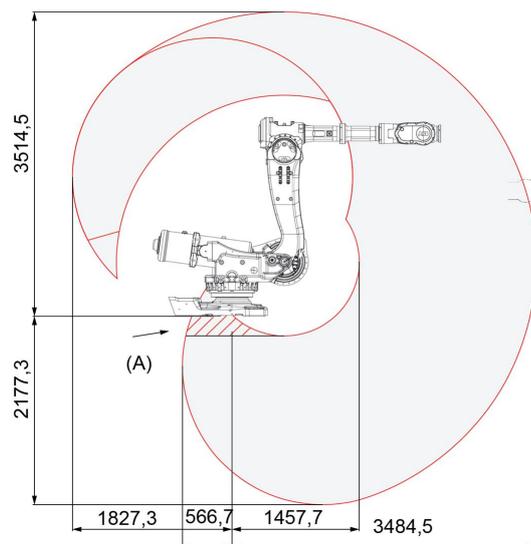


Figura 4.17: Robô ABB6650

Fonte:ABB (2020)

O URDF é um arquivo no formato XML que descreve a estrutura cinemática e a aparência visual do robô (CORKE, 2017). Neste arquivo está contido a dimensão de cada elo, a origem e o tipo de cada junta da cadeia cinemática do robô por exemplo. A parte gráfica é descrita por parâmetros que definem forma, dimensão, material, e a cor do robô.

A partir do modelo CAD (*Computer Aided Design*) das partes disponíveis no site do fabricante, e da montagem do manipulador feita no SolidWorks, é possível exportar para um arquivo URDF. *SolidWorks to URDF Exporter* é um *add-in* para SolidWorks que permite a exportação conveniente de peças e montagens de SolidWorks para um arquivo URDF (ROS, 2020).

Na exportação do arquivo URDF algumas configurações são necessárias. Juntas e elos necessitam ser nomeados, assim como a estrutura cinemática precisa ser definida (Figura 4.18). A base inicia a cadeia, a partir dela cada elo está associado a um *parent link* (elo antecedente), uma junta e um *child link* (elo subsequente).

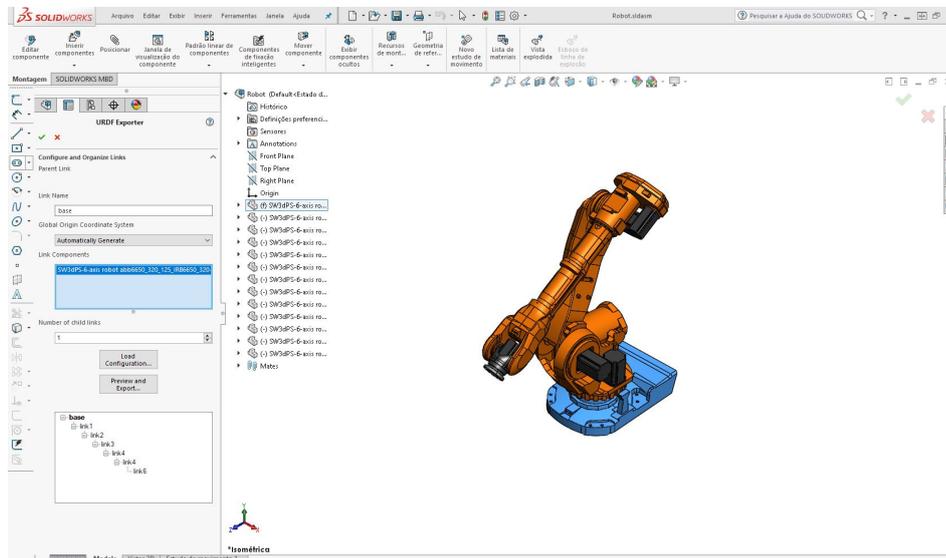


Figura 4.18: URDF do robô ABB6650

No ambiente de simulação, objetos foram inseridos de forma a compor um ambiente operacional de emenda de correia. Durante um processo de emenda convencional, a mesa de trabalho é normalmente montada paralelamente ao transportador de correia. Nesta simulação, o robô é posicionado na superfície da mesa de trabalho (Figura 4.19). A partir da identificação prévia da posição dos cabos no interior da estrutura da correia, é possível fazer o controle do manipulador por cinemática inversa utilizando o CoppeliaSim.

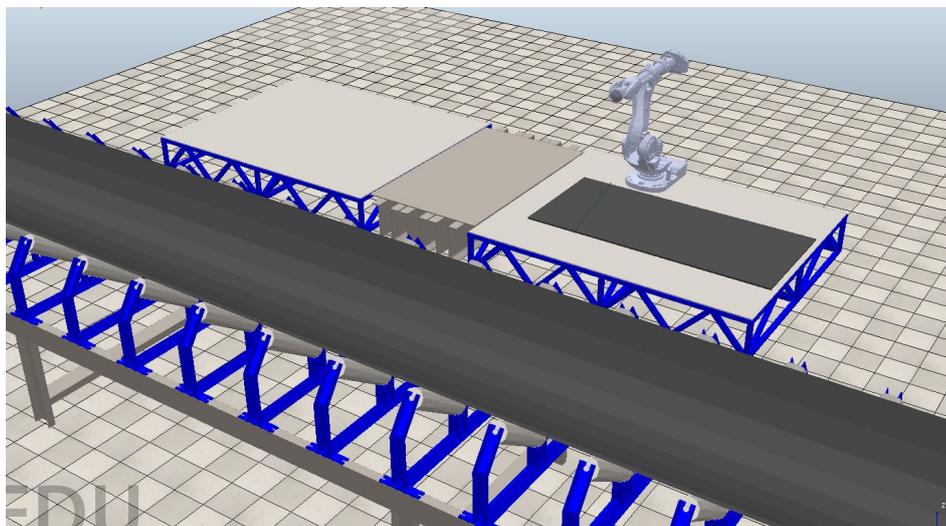


Figura 4.19: Ambiente de simulação.

Um efetuador robótico foi projetado com o objetivo de fornecer um método automatizado de preparação das extremidades da correia de cabo de aço. Este dispositivo foi construído para permitir a remoção da borracha que envolve os cabos de aço com precisão e uniformidade, e manter uma camada residual de borracha sobre os cabos. Esta ferramenta compreende uma garra com lâminas metálicas em formato de W em seus dedos (Figura 4.20-5), na qual são ajustadas sobre os cabos por roldanas guia, e são acopladas a um transformador de tensão.

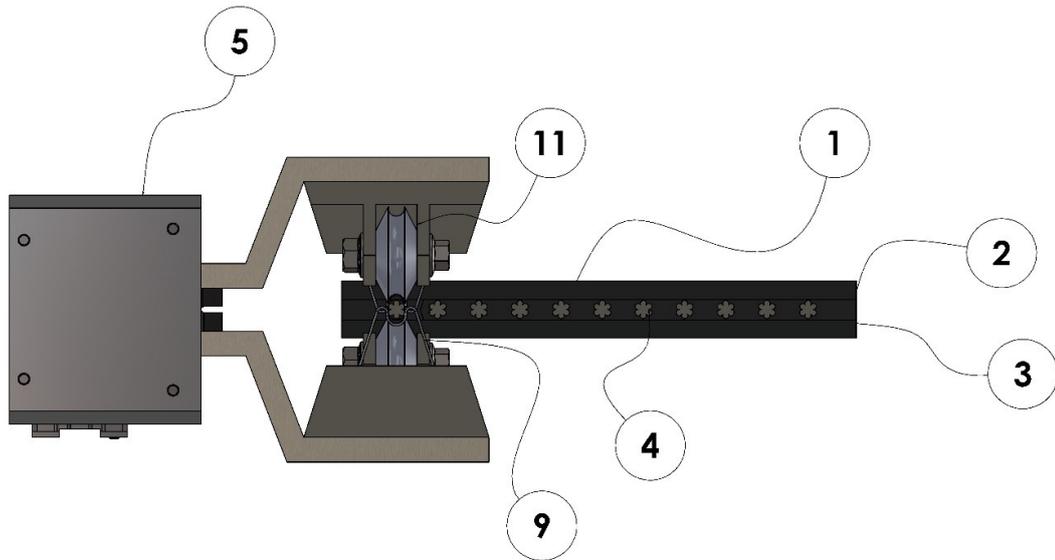


Figura 4.20: Representação: (5) Efetuador, (9) Lâmina W aquecida, (11) Roldana guia.

O dispositivo deve fornecer uma quantidade de calor suficiente para elevar a temperatura do elastômero. Em elastômeros, a temperatura tem grande ação nas propriedades mecânicas. O aumento de temperatura em elastômeros reduz a resistência ao rasgo, apesar dos elastômeros presentes na correia transportadora apresentarem boa resistência ao rasgo à quente. A faixa de operação de corte usando este efetuador é similar ao apresentado no processo manual, compreende a zona entre a temperatura de transição vítrea (T_g) e a temperatura de degradação (T_d) do elastômero da correia.

O método de separação da borracha dos cabos de aço da correia se inicia após a remoção das camadas superior e inferior da correia, ou com a separação direta da borracha dos cabos sem remoção previa das camadas. Neste trabalho, o procedimento inicializa a partir da remoção antecipada das camadas superior e inferior, seguindo a norma padrão de emenda de correia.

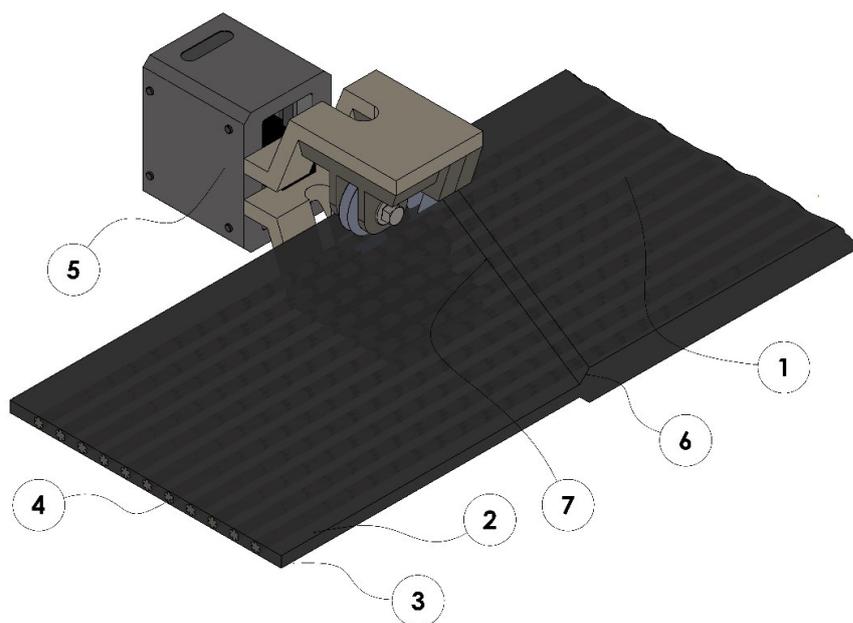


Figura 4.21: Posição inicial do efetuador.

A figura 4.21 representa etapa inicial procedimento de separação da borracha sobre os cabos, nesta operação efetuador com as lâminas de corte aquecidas é posicionado sobre um dos cabos de aço da estrutura da correia. O movimento do corte é direcionado para extremidade livre da correia, o deslocamento longitudinal do efetuador sobre o cabo impõe uma força de separação do material elastomérico do cabo de aço da correia figura 4.22. Esta etapa deve ser repetida para cada cabo de aço presente na estrutura da correia transportadora de cabos de aço.

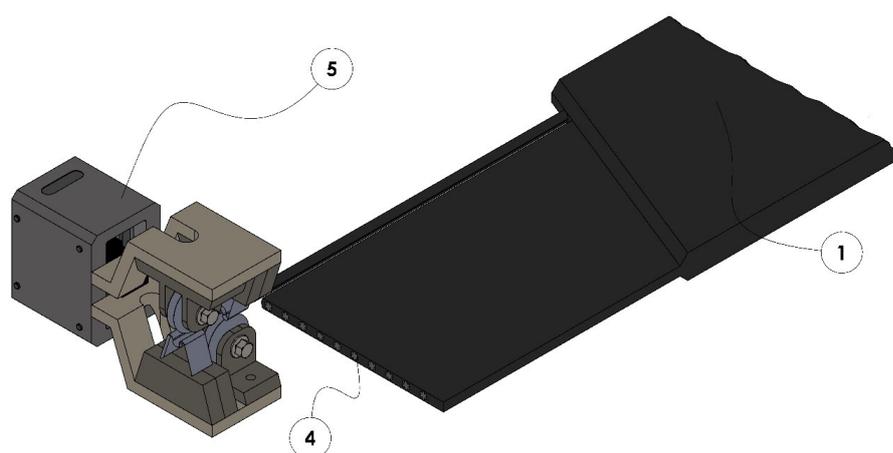


Figura 4.22: Representação do movimento do efetuador.

5. Resultados e Discussão

Os resultados dos testes com lâminas padrão são apresentados na Figura 5.1. Neste gráfico as forças de corte [N] estão agrupadas para cada ângulo de ataque da lâmina. Foram feitos três testes para cada ângulo de corte e a média foi calculada. O ângulo reto apresentou maior força média, aproximadamente $297 N$ para realização do corte de $500 mm$ de comprimento e penetração $15 mm$. A força média necessária para execução do corte com a lâmina inclinada em 75° foi de $214 N$. Os ângulos 60° e 45° apresentaram menores esforços na execução de cortes na correia de $137 N$ e $156 N$, respectivamente. Os testes com as lâminas apenas consideraram as forças de corte no sentido longitudinal, as forças de penetração não foram mensuradas.

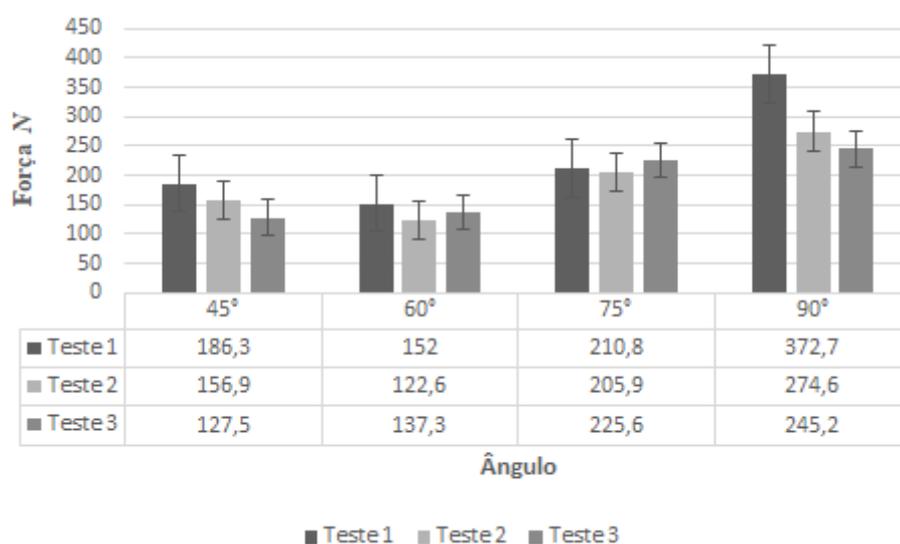


Figura 5.1: Força obtidas no processo de corte com lâmina convencional.

As ferramentas para corte sobre a correia devem obedecer alguns critérios. As propriedades do material da correia devem prevalecer inalterada após o processo de corte, e os cabos de aço presentes na estrutura da correia não podem sofrer danos. A temperatura tem grande impacto nas propriedades mecânicas dos elastômeros. A faixa de uso dos elastômeros é limitada pela temperatura de transição vítrea (T_g) e pela temperatura de degradação (T_d). O elastômero (EPDM) presente na amostra de correia utilizada neste trabalho apresenta faixa de uso de -65 a $250^\circ C$ (Figura 2.12).

O procedimento de remoção da borracha sobre os cabos usando sistema de conversão de energia elétrica em calor apresentou bons resultados. O conjunto composto por lâmina W e um transformador de corrente permitiu realizar testes variando a quantidade de calor dissipada na lâmina por meio da alteração da corrente elétrica transformada. O transformador é composto por sete níveis de corrente.

O elastômero do tipo EPDM presente na correia, de modo geral, apresenta baixa condutividade térmica, e grande resistência à chama. Desta forma, a corrente da ferramenta precisou

ser ajusta de modo que não excedesse a temperatura de degradação da correia (250 °C). A quantidade de calor dissipada na lâmina é diretamente proporcional ao quadrado da corrente elétrica . Pequenos ajustes nos níveis de corrente eram suficientes para realizar cortes limpos na correia, ou atingir a temperatura de degradação.

Nos testes em bancada, maiores níveis de correntes apresentaram os melhores resultados práticos. Baixas correntes não conseguiram fornecer calor suficiente para realizar cortes na borracha sobre os cabos. As forças destes testes e a temperatura na zona de corte são apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3 respectivamente.

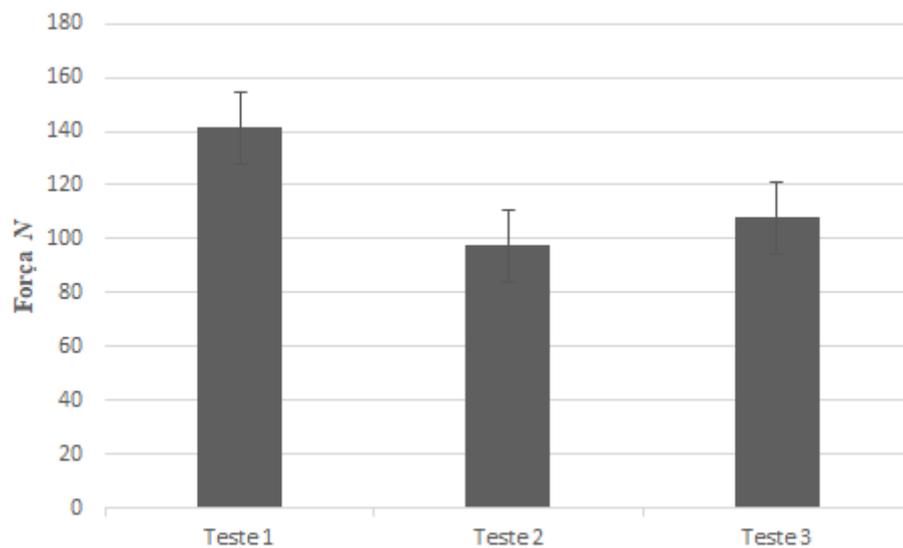


Figura 5.2: Força obtidas no processo de corte com lâmina aquecida.

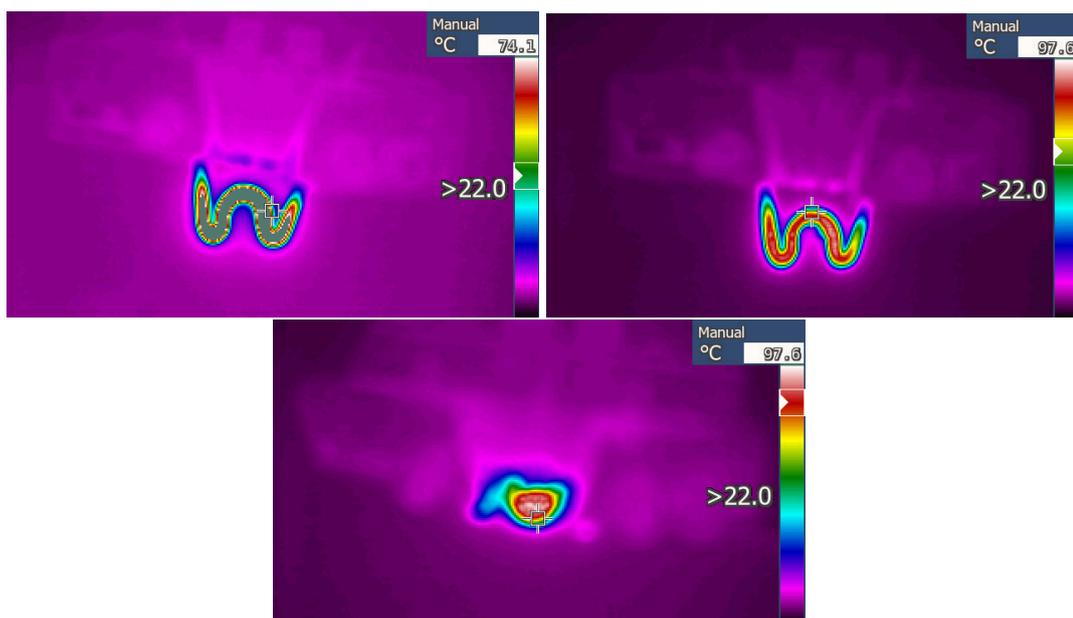


Figura 5.3: Temperatura de corte com lâmina aquecida.

As forças obtidas nos testes usando a ferramenta aquecida são inferiores quando comparadas aos esforços usando a lâmina padrões sem aquecimento. Durante o processo de corte com a lâmina aquecida, a temperatura não excedeu aos 100 °C na zona de corte. Porém, a correia degradava e liberava muita fumaça quanto a ferramenta permanecia por períodos maiores sobre a amostra (Figura 5.4).

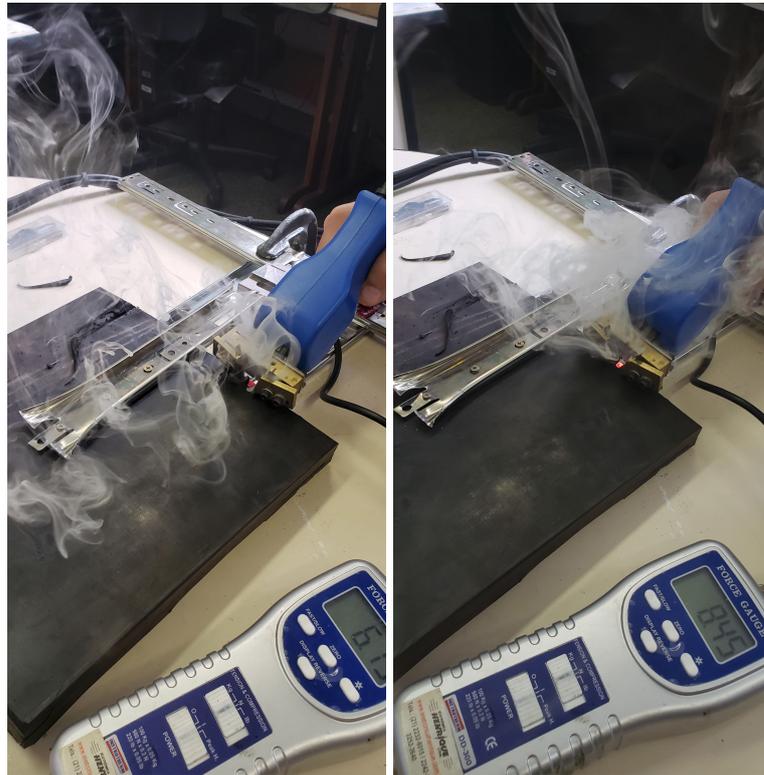


Figura 5.4: Decomposição da correia no processo de corte com lâmina aquecida.

A utilização da lâmina W aquecida apresentou bons resultados nos cortes sobre a amostra de correia. A aplicação desta lâmina sobre a correia exigiu menor esforço durante a execução dos cortes comparada a lâmina padrão. A borracha que envolve os cabos de aço foi removida com boa precisão, apresentando uniformidade ao longo do cabo de aço (Figura 5.5). A camada residual de borracha envolta do cabo também foi preservada usando essa ferramenta.

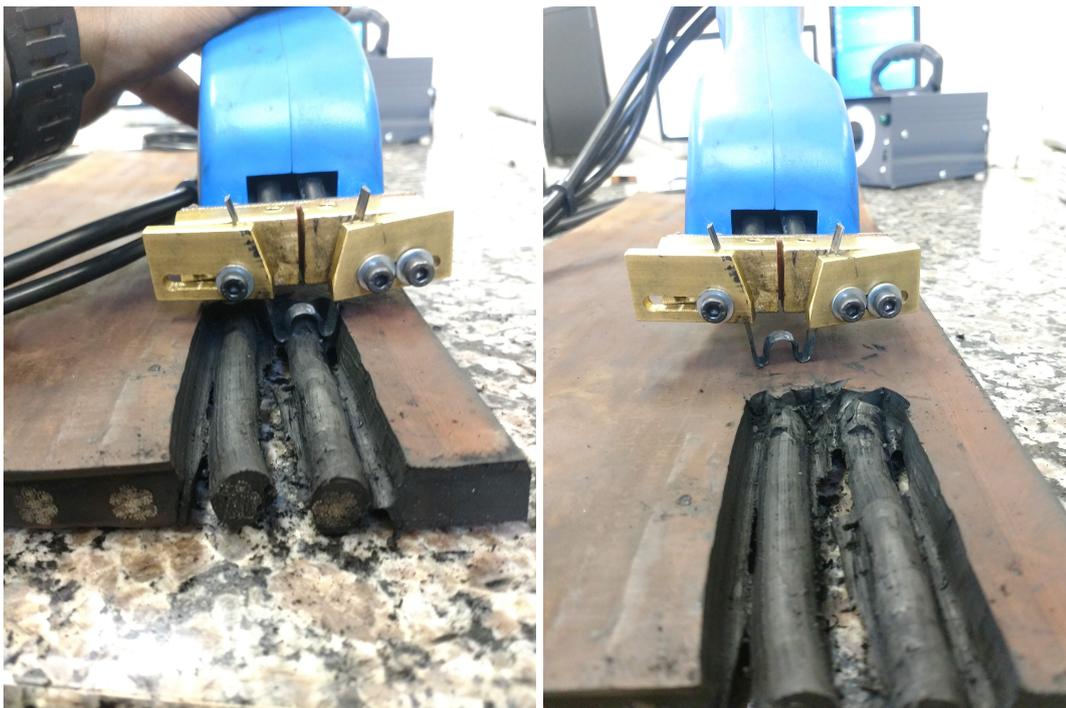


Figura 5.5: Cortes com lâmina W.

A usinagem da correia por ultrassom com frequências 20 kHz e 40kHz também apresentaram bons resultados, principalmente na frequência de 20kHz. Nesta frequência, os cortes foram executados mais rápidos quando comparado ao cortes em 40kHz. Durante a execução dos cortes a ferramenta de 20 kHz exigia menor tempo de permanência do sonotrodo sobre a correia para execução do corte.



Figura 5.6: Usinagem da correia por ultrassom.

Na figura 5.7 é apresentado as imagens ópticas (800x) das superfícies das amostras reti-

radas da correia transportadora de cabos de aço através dos processos: convencional (lâmina), lâmina W aquecida, e ultrassom (20 e 40 kHz). No método com lâmina aquecida, as amostras apresentaram ranhuras espessas e algumas zonas sofreram degradação devido a permanência da ferramenta sobre a correia além do tempo necessário. Por ser um dispositivo resistivo, quanto maior o tempo de permanência da ferramenta sobre uma região, maior é a quantidade de calor dissipada pela ferramenta e absorvida pela correia.

As amostras obtidas por ultrassom em 40 kHz apresentaram resultados semelhantes aos obtidos com a lâmina aquecida, devido também ao tempo de permanência excessivo da ferramenta sobre a correia. Entretanto, a usinagem ultrassom em frequência 20kHz apresentou características na superfície das amostras semelhantes as obtidas utilizando a lâmina convencional.

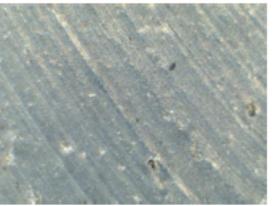
Método	1	2	3
Lâmina			
Lâmina W aquecida			
Ultrassom 20 kHz			
Ultrassom 40 kHz			

Figura 5.7: Resultados.

Em termos de peso todas as ferramentas avaliadas podem ser utilizadas no processo de emenda de correia, entretanto a lâmina W e o Ultrassom oferecem menores riscos de acidente, menores forças de corte e conseqüentemente maiores velocidades e precisão que a faca manual atualmente utilizadas.

6. Conclusões

- Estudo do procedimento de emenda de correia de cabos de aço e identificação das possíveis melhorias no processo - Dentre as tarefas do processo de emenda de correia transportadora do tipo cabo de aço, algumas podem ser melhoradas. Este trabalho teve como foco atividades que envolvam grandes esforços dos operadores em condições ergonômicas desfavoráveis como a remoção da borracha sobre cada cabo utilizando uma faca, operação de filetagem. Essa operação pode ser auxiliada com a utilização de uma ferramenta que exige menores esforços dos operadores, como ferramentas mecanizadas ou automatizadas, que evitem o alto risco de acidente e minimizem os problemas de saúde ocupacional dos operadores: riscos ergométricos, riscos de inalação de poeira e resíduos do corte da borracha (fumaça tóxica).

- Estudos dos materiais constituintes das correias transportadoras de cabo de aço, e seus elementos estruturais – Uma variável importante para avaliação dos cortes realizados no processo de filetagem é a faixa de temperatura de uso dos elastômeros utilizados na construção das correias transportadoras. Essa faixa é limitada pela temperatura de transição vítrea (T_g) e pela temperatura de degradação (T_d). O elastômero (EPDM) presente na amostra de correia utilizada neste trabalho apresenta faixa de uso de -65 a 250 °C. Um estudo visual Figura 5.7, apresentado no capítulo de resultados, é possível perceber em escala microscópica uma mudança na superfície do material durante o filetagem utilizando diferentes ferramentas. Pode-se concluir que as ferramentas de filetagem por lâmina a temperatura ambiente e o filetagem por corte ultrassônico de 20 kHz apresentam aspectos visuais equivalentes e aparentemente sem danos provocados ao material da correia. A utilização do filetagem por lâmina aquecida apresentou, de forma visual, danos pontuais na superfície de corte da correia, sendo possível verificar áreas comprometidas em termos de propriedades dos elastômeros. O corte ultrassônico de 40 kHz também apresentou em menor escala essas áreas comprometidas pelo aquecimento, mas ainda visíveis.

- Realização dos testes preliminares com uma lâmina usualmente empregada para corte de correia - Os testes preliminares realizados e apresentados no capítulo de resultados desse trabalho permitiram levantar os esforços necessários para o corte a borracha, processo de filetagem, utilizando uma lâmina. Essa lâmina é empregada no procedimento manual de emenda de correia. Os testes apontaram que o ângulo de ataque, de aplicação da lâmina de corte, tem grande influência na força de execução do corte. Os ângulos menores, 60° e 45° testados, apresentaram forças menores no corte da correia. As forças médias encontradas nos ensaios realizados no laboratório ficaram em torno de 297.5 N para um corte executado com um ângulo de 90° , 214.1 N para um corte executado com um ângulo de 75° , 156.9 N para um corte executado com ângulo de 45° e 137.3 N para um corte executado com ângulo de 60° . Com esses testes foi possível encontrar uma variação da força de acordo com a posição (ângulo) de corte da ordem de até 216 % do valor mínimo encontrado. Portanto a posição (ângulo de incidência) do corte é uma variável importante no processo de filetagem.

- Teste de duas ferramentas diferentes – Nessa etapa do trabalho foram escolhidas duas ferramentas diferentes das usualmente utilizadas no processo de filetagem dos cabos de uma correia transportadora no processo de emenda. A primeira ferramenta testada foi a de lâmina aquecida. Essa ferramenta apresentou uma redução da força média exercida pelo operador da ordem de 16%, ficando em torno de 114.7 N. Os cabos não sofreram danos e a camada residual de borracha sobre os cabos foi mantida com precisão e uniformidade, mas com algumas pequenas áreas com comprometimento da propriedade do material. Velocidade constante da ferramenta e um ajuste adequado da corrente podem evitar essas zonas de degradação da borracha. Comparado ao processo convencional, a aplicação deste método resultaria num ganho de tempo considerável na realização da atividade de filetagem. Um problema detectado no corte por lâmina aquecida foi a formação de fumaça tóxica durante todo o processo, o que não seria recomendado para utilização por um operador manual, mas seria interessante aprofundar os estudos da ferramenta para ser utilizada por um sistema mecânico ou manipulador mecânico com a ferramenta de corte acoplada com seu sistema de atuador. Uma outra ferramenta utilizada foi o corte por ultrassom da borracha da correia. Esse teste foi realizado em duas frequências diferentes 40 kHz e 20 kHz. O corte ultrassônico apresentou também bons resultados como método de corte e separação da borracha sobre os cabos. A frequência de operação de 20 kHz, apresentou vantagens consideráveis em relação à frequência de 40 kHz e os demais métodos: menor esforço do operador e redução do tempo de execução do corte. A frequência de 40 kHz apresentou no início de cada teste emissão de fumaça tóxica e pequenas áreas de degradação da borracha ao longo do corte. A frequência de 20 kHz não apresentou nenhum desses problemas, sendo, portanto, mais adequada para este processo.

- Simulação do uso das ferramentas como efetadores robóticos acopladas em manipulador robótico – A simulação no software CoppeliaSim mostrou ser uma ferramenta adequada para execução dos cálculos cinemáticos e planejamento das trajetórias de um manipulador. A partir da identificação da posição dos cabos na estrutura da correia, realizadas por um sistema de identificação robótico/sensorial, seria possível definir a trajetória dos cortes da borracha sobre os cabos, processo de filetagem, por meio do controle por cinemática inversa. A simulação realizada utilizou garras robóticas utilizando lâminas W aquecidas, projetadas neste trabalho, como uma possível solução robótica para remoção de borracha sobre os cabos de aço.

As ferramentas testadas nesse trabalho e os dados coletados podem propiciar uma melhoria no processo de filetagem dos cabos de uma emenda de correia, reduzindo o tempo e os riscos de operação, que hoje é feita de forma manual e praticamente artesanal.

Referências Bibliográficas

- ABB. “IRB 6650S”. 2020. Disponível em: <<https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6650s/irb-6650s-data>>.
- ALTINTAS, Y., BER, A. “Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design”, *Appl. Mech. Rev.*, v. 54, n. 5, pp. B84–B84, 2001.
- APPLETON, E., WILLIAMS, D. J. *Industrial robot applications*. Halsted Pres, 1987.
- ASKELAND, D. R., PHULÉ, P. P. *The science and engineering of materials*. Springer, 2003.
- BOGUE, R. “Cutting robots: a review of technologies and applications”, *Industrial Robot: An International Journal*, v. 35, n. 5, pp. 390–396, 2008.
- CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. *Fundamentals of materials science and engineering*, v. 471660817. Wiley London, UK:, 2000.
- CANEVAROLO JR, S. V. “Ciência dos polímeros”, *Artiber editora, São Paulo*, pp. 110–115, 2002.
- CEMA, C. E. M. A. *Belt conveyors for bulk materials*. Conveyor Equipment Manufacturers Association, 1997.
- CHEN, Y., DONG, F. “Robot machining: recent development and future research issues”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 66, n. 9-12, pp. 1489–1497, 2013.
- CORKE, P. *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB® second, completely revised*, v. 118. Springer, 2017.
- DIN22131-4. “Steel cord conveyor belts for hoisting and conveying - belt joints - dimensions, requirements”, *Deutsches Institut Fur Normung E.V.*, 1988.
- DIN8580. “Manufacturing processes - terms and definitions, division”, *Deutsches Institut Fur Normung E.V.*, 2009.
- EL-HOFY, H. A.-G. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. McGraw Hill Professional, 2005.

- FURTADO, L., VILLANI, E., TRABASSO, L., et al.. “A method to improve the use of 6-dof robots as machine tools”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 92, n. 5-8, pp. 2487–2502, 2017.
- HEITZMANN, P., ZAREMBA, D., DITTMAR, H., et al.. “Automatable Splicing Method for Steel Cord Conveyor Belts-Finding a Suitable Preparation Process”. Em: *Automated Systems and Technologies AST’2017*, pp. 17–24, 2017.
- HOFFMAN, W. “Rubber technology handbook, Hanser”, *New York*, p. 239, 1989.
- JI, W., WANG, L. “Industrial robotic machining: a review”, *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, v. 103, n. 1-4, pp. 1239–1255, 2019.
- KARIM, A., VERL, A. “Challenges and obstacles in robot-machining”. Em: *IEEE ISR 2013*, pp. 1–4. IEEE, 2013.
- LUO, J. *Machining of elastomers*. University of Michigan, 2005.
- MACHADO, Á. R., COELHO, R. T., ABRÃO, A. M., et al.. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher, 2015.
- MERCÚRIO, C. “Manual Técnico Correias Transportadoras”, *3ª Edição*, 2015.
- MOREIRA, FLÁVIO CAMARINHO, C. R. T. “Introdução aos processos não-convencionais de fabricação”. 2020.
- OWEN, W., CROFT, E., BENHABIB, B. “On-line trajectory resolution for two-armed systems with conflicting performance criteria”, *Mechanism and machine theory*, v. 44, n. 5, pp. 949–965, 2009.
- PADILHA, A. F. “Microestrutura e Propriedades”, *São Paulo: Hemus*, 1997.
- PANDEY, P. C., SHAN, H. *Modern machining processes*. Tata McGraw-Hill Education, 1980.
- ROBOTICS, E. “Robotics Engenharia Desenvolve ferramenta para usinagem de borracha de correias transportadoras.” 2020. Disponível em: <<https://roboticsengenharia.com.br>>.
- ROHMER, E., SINGH, S. P. N., FREESE, M. “CoppeliaSim (formerly V-REP): a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework”. Em: *Proc. of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013.
- ROS, O. S. R. F. “SolidWorks to URDF Exporter”. 2020. Disponível em: <https://wiki.ros.org/sw_urdf_exporter>.

- SHIH, A. J., LEWIS, M. A., STRENKOWSKI, J. S. “End milling of elastomers—fixture design and tool effectiveness for material removal”, *J. Manuf. Sci. Eng.*, v. 126, n. 1, pp. 115–123, 2004.
- SICILIANO, B., SCIAVICCO, L., VILLANI, L., et al.. *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- SPONG, M. W., HUTCHINSON, S., VIDYASAGAR, M., et al.. *Robot modeling and control*, v. 3. wiley New York, 2006.
- STOETERAU, R. “Fundamentos dos Processos de Usinagem”, *São Paulo: USP*, 2003.
- WEIGANG, S., WENJIE, S., XIAOSEN, L. “Finite element analysis of steel cord conveyor belt splice”, 2009.
- ZAREMBA, D., HEITZMANN, P., OVERMEYER, L., et al.. “Automatable Splicing Method for Steel Cord Conveyor Belts-Evaluation of Water Jetting as a Preparation Process.” *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, v. 63, n. 10, 2017.