



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**SELEÇÃO DE LIGA DE COBRE PARA COMPONENTE DE
MÁQUINA DE SOLDADA POR COSTURA, UTILIZANDO
CONCEITOS DE ENGENHARIA REVERSA**

Renan Luis Hahn

Lajeado/RS, junho de 2021

Renan Luis Hahn

**SELEÇÃO DE LIGA DE COBRE PARA COMPONENTE DE
MÁQUINA DE SOLDA POR COSTURA, UTILIZANDO
CONCEITOS DE ENGENHARIA REVERSA**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricson Rocha de Souza

Lajeado/RS, junho de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e sobretudo, agradeço a Deus, por dar-me vida, saúde e força para seguir de cabeça alçada esta longa jornada acadêmica. Foi um período extenso e exaustivo, e sem uma força divina nada seria capaz.

Aos meus pais, Maristela e Leonel, e a minha irmã, Maria de Lourdes, me incentivando e mostrando que a educação é sobretudo importante para o crescimento pessoal e profissional, além de alicerçarem a minha escolha que foi a Engenharia Mecânica. Em nenhum momento exigiram-me seguir uma carreira “padrão”, mas sim o que realmente era minha paixão e o que flui no meu sangue.

Meu cordial agradecimento ao ilustríssimo professor Dr. Ricson Rocha de Souza, meu orientador que sempre esteve disposto às minhas dúvidas e atendimentos. Agradeço à paciência e os conselhos construtivos depositados em nossos encontros de orientação, que não foram poucos no decorrer deste último ano.

Um obrigado especial ao colega de trabalho Leonardo Chaves, que foi fundamental para o sucesso deste trabalho, pois sem seu envolvimento o processo estaria comprometido. Agradeço por ter “comprado a briga” comigo e por comprovar que tudo é possível, desde que haja trabalho em equipe.

A um grande amigo e irmão que a vida me deu, além de incentivador também foi colega por mais de uma década nesta extensa caminhada acadêmica, Éder Aita Zanini, meu reconhecimento e gratidão por tua ajuda e sobretudo teu caráter.

À família do “202”, pelo gigantesco laço de amizade criado nestes anos, meu mais sincero agradecimento.

Por fim, às demais pessoas envolvidas nesta trajetória, que foram importantes de alguma forma, professores, funcionários e colegas da Univates. Aos demais colegas e amigos de âmbito profissional e pessoal, meu agradecimento.

RESUMO

A Engenharia Reversa além de auxiliar na fabricação de um produto, acelera o desenvolvimento de um objeto já existente, sendo empregada para recuperar projetos e peças obsoletas ou simplesmente para produzir algo a um custo menor dentro do território nacional (redução de despesas com importações). É neste contexto que foi selecionado e desenvolvido o principal item de um rolo soldador que é o anel central (item de desgaste), utilizado em uma roldana de solda que é responsável por unir duas extremidades de embalagens metálicas através da solda por costura. Os métodos necessários para este desenvolvimento consistem na desmontagem, medição e modelagem computacional, acompanhada da lista de peças. Também foi realizada a identificação e caracterização do material da peça para a fabricação, remontagem do conjunto e testes em condições reais de funcionamento. Os resultados se mostram promissores, visto que foi possível realizar a modelagem do anel central, foco desta pesquisa, caracterizá-lo, selecionando um material de composição equivalente, que foi a liga de cobre, segundo a norma, EN 1652, CW103C. Além disso, foram registradas 8,96 milhões de embalagens soldadas, considerando 50% da vida útil do anel central fabricado com a nova liga de cobre, o que indica que o estudo foi satisfatório, pois ficou acima da média que foi de 16,196 milhões, considerando 100% da vida útil (registro de durabilidade dos últimos quatro discos de solda).

Palavras-chave: Engenharia Reversa. Anel central. Roldana de solda. Liga de cobre.

ABSTRACT

Reverse engineering apart from assisting the fabrication of a product, speeds up the development of an already existing object, being used to recover obsolete projects or parts or simply to manufacture something at a lower cost within the national territory (reduction of import costs). In this regard, it was selected and developed the main item of a welding roller that is its central ring (wear item), used in a welding sheave responsible for uniting two edges of a metal packaging through seam welding. The methods necessary for this development consist of disassembly, measurement, computational modeling, accompanied by the parts list. It was also performed the identification and characterization of the workpiece material for its fabrication, reassembly of the set, and test in real working conditions. The results are promising, given that it was possible to model the central ring, the main focus of this research, characterize it, and select an equivalent compositional material, that was the copper alloy, according to the standard EM 1692, CW103C. Moreover, 8,96 million welded packaging were registered considering 50% of the service life of the central ring manufactured with the new copper alloy, which indicates that the study was satisfactory, as it was above the average of 16.196 million, considering 100% of its service life (durability record of the last four welding rollers).

Keywords: Reverse engineering. Central ring. Welding roller. Copper alloy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de projeto tradicional versus engenharia reversa	23
Figura 2 – Representação de uma lista de peças e vista explodida.....	27
Figura 3 – Representação solda por resistência	32
Figura 4 – Processo de solda de costura em tubos	33
Figura 5 – Representação da soldagem por costura (a) versus soldagem ponto por ponto de rolo (b)	34
Figura 6 – Representação do processo de solda por costura com sobreposição de materiais (transpasse)	35
Figura 7 – Soldagem por costura com arame de cobre entre os discos	35
Figura 8 – Corte transversal de um braço soldador, representando a montagem da barra “Z”	36
Figura 9 – Tipos de ensaio de dureza e respectivos penetradores	43
Figura 10 – Método de medição da resistividade elétrica	45
Figura 11 – Fluxograma das atividades apresentadas na metodologia	54
Figura 12 – Roldana de solda original	55
Figura 13 – Preparação de amostras 1 e 2 para análise.....	56
Figura 14 – Durômetro de bancada modelo Fixo-Test	57
Figura 15 – Espectrômetro de emissão óptica	58
Figura 16 – Embutimento de amostras 1 e 2 no baquelite	59
Figura 17 – Politriz metalográfica (a) e base de lixamento (b)	60
Figura 18 – Microscópio óptico com câmera acoplada.....	61
Figura 19 – Roldana de solda desmontada, com destaque para o objeto de estudo	63
Figura 20 – Vista explodida e lista de peças	64

Figura 21 – Representação 2D do anel central da roldana	65
Figura 22 – Representação das amostras 1 e 2 após análise química	67
Figura 23 – Fotomicrografia da liga de cobre relativa à amostra 1 (ampliação 1000 X)	68
Figura 24 – Fotomicrografia da liga de cobre relativa à amostra 2 (ampliação 1000 X)	69
Figura 25 – Fotomicrografia da liga de cobre relativa à amostra 3 (ampliação 1000 X)	72
Figura 26 – Anel central da roldana, confeccionado pelo processo de usinagem.....	73
Figura 27 – Roldana de solda montada, desenvolvida com anel central nacionalizado	74
Figura 28 – Comparativo de produção das roldanas de solda	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Condutividades elétricas para alguns metais à temperatura ambiente ..	46
Quadro 2 – Propriedades térmicas de alguns metais e cerâmicas	48
Quadro 3 – Resultados de dureza para amostras 1 e 2	66
Quadro 4 – Resultado da análise química para as amostras 1 e 2	67
Quadro 5 – Relação de ligas alto cobre, com ênfase para a liga CW103C	70
Quadro 6 – Resultados de dureza para a amostra 3	71
Quadro 7 – Resultado da análise química para a amostra 3	71
Quadro 8 – Histórico de produção das últimas roldanas originais	76

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Ampere
A/cm ²	Ampere / Centímetro Quadrado
ABEAÇO	Associação Brasileira de Embalagens de Aço
ap	Profundidade de Corte
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldagem)
Be	Berílio
BOM	<i>Bill of Materials</i> (Lista de Materiais)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
Cu	Cobre
Co	Cobalto
Cp	Calor Específico
ER	Engenharia Reversa
FEA	<i>Federation European Aerosol</i> (Federação Europeia de Aerosol)
FeCl ₃	Percloroeto de Ferro III
g	Gramas
HB	<i>Hardness Brinell</i> (Dureza Brinell)
HCl	Ácido Clorídrico
HRB	<i>Hardness Rockell B</i> (Dureza Rockwell B)
I	Corrente Elétrica
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i> (Padrão Internacional para Cobre Recozido)

k	Condutividade Térmica
K	Kelvin
kgf	Quilograma Força
kgf/mm ²	Quilograma Força / Milímetro Quadrado
mm	Milímetro
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
MPa	Mega Pascal
Ni	Níquel
N/mm ²	Newton / Milímetro Quadrado
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> (Fabricante de Equipamento Original)
POL	Polegada
q	Fluxo de Calor
R	Resistência Elétrica
rot	Rotação
RPD	<i>Rapid Product Development</i> (Desenvolvimento Rápido de Produto)
RPM	Rotações por Minuto
RPW	<i>Resistance Projection Welding</i> (Soldagem por Projeção por Resistência)
RSEW	<i>Resistance Seam Welding</i> (Soldagem por Costura por Resistência)
RSW	<i>Resistance Spot Welding</i> (Soldagem por Pontos por Resistência)
RWMA	<i>Resistance Welder Manufacturers</i> (Fabricantes de Soldadoras por Resistência)
V	Volt
ϵ	Deformação
ρ	Resistividade Elétrica
σ	Condutividade Elétrica
oe	Tensão de Escoamento
σ	Tensão de Ruptura
τ	Tensão de Cisalhamento
\emptyset	Diâmetro
°C	Graus Celsius
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Tema.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Justificativa da pesquisa.....	17
1.4 Delimitação do trabalho.....	18
1.5 Resultados esperados.....	18
1.6 Estrutura do trabalho.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Engenharia Reversa.....	20
2.1.1 Desmontagem e observação.....	26
2.1.2 Medição e modelagem.....	28
2.2 Soldagem.....	30
2.2.1 Soldagem por resistência.....	31
2.2.2 Soldagem por costura por resistência.....	33
2.2.3 Materiais utilizados em eletrodos.....	37
2.3 Propriedades dos materiais.....	40
2.3.1 Propriedades mecânicas.....	41
2.3.2 Propriedades elétricas.....	44
2.3.3 Propriedades térmicas.....	46
2.4 Caracterização de materiais.....	48
2.4.1 Microscopia óptica.....	49

2.4.2 Espectrometria óptica	50
3 METODOLOGIA	52
3.1 Classificação da pesquisa	52
3.1.1 Modo de abordagem.....	52
3.1.2 Quanto aos objetivos	53
3.1.3 Quanto aos procedimentos técnicos	53
3.2 Métodos e processos	53
3.3 Desmontagem, medição e modelagem	54
3.4 Identificação e caracterização do material	56
3.4.1 Ensaio de dureza	57
3.4.2 Análise química	58
3.4.3 Análise microestrutural.....	59
3.5 Seleção do material	61
3.6 Fabricação	61
3.7 Montagem e testes.....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 Desmontagem, medição e modelagem	63
4.2 Identificação e caracterização do material	65
4.2.1 Ensaio de dureza	66
4.2.2 Análise química	66
4.2.3 Análise metalográfica.....	68
4.3 Caracterização e aquisição	69
4.4 Fabricação	73
4.5 Montagem e testes finais	74
5 CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Tecnicamente, a embalagem de aço é uma das mais eficientes formas de armazenar produtos, pois ela é hermeticamente fechada e autocravada, protegendo a integridade dos produtos armazenados, no transporte e na comercialização (ABEAÇO, 2020). Hoje, com mais de 200 anos de história, o mercado de embalagens de aço, especificamente as latas de aerossol que contemplam uma produção mundial de 15,5 bilhões de latas, onde o Brasil, com 1,18 bilhões de aerossóis produzidos, ocupa a quarta colocação, representando 7,6% desta produção, ficando atrás do Estados Unidos que produziu 3,7 bilhões, da China que obteve uma produção de 2,6 bilhões e do Reino Unido com 1,5 bilhões de aerossóis. Além disso, é importante ressaltar que o Brasil teve um crescimento de mais de 350% em dez anos, enquanto a China aumentou sua produção em 230%, Estados Unidos apenas 3% em relação à 2009. Na Europa, o crescimento total não ultrapassou os 2% (FEA, 2019).

É neste cenário onde percebe-se um enorme potencial da indústria de aerossol no Brasil que se vê o interesse em desenvolver um complemento de roldana para soldadora de embalagens. Segundo a AWS (2001), Sociedade Americana de Solda, o processo de soldagem por resistência, pelo método de solda por costura, utiliza eletrodos em forma de roldana para fornecer força e corrente de soldagem às peças. As soldas criadas neste processo são sobrepostas, devido à alta corrente que circula entre os polos e o tempo de contato. Os eletrodos, que são usualmente construídos a partir de ligas de cobre, por possuírem propriedades condutivas elevadas, são resfriados pela água que circula por entre as cavidades do eletrodo (roldana) e as outras ferramentas condutoras da máquina de solda por resistência.

Em tempos recentes, muitos episódios ocorrem, em escala global e, portanto, mudam para sempre a forma como as companhias fazem seus negócios. Ingle (1994), diz que a competitividade do mercado torna-se internacional, a matéria prima e os suprimentos dos quais são necessários para a fabricação de seus produtos tornam-se multinacionais e a tecnologia da informação amplifica a facilidade de comunicação entre as pessoas para a troca de informação. Devido a estas mudanças, econômicas, políticas e tecnológicas, as empresas são forçadas a mudar a maneira de negociar e acabam alterando a sua infraestrutura organizacional.

Diante deste cenário, as companhias são forçadas a reduzir seus níveis de investimento de capital em ativos para produção de bens. Com o passar dos anos, os ativos vão se tornando obsoletos e na maioria das vezes diferem do projeto original da linha, isso torna-se um caos, pois os sistemas começam a entrar em declínio, a menos que medidas preventivas ou corretivas sejam tomadas. Organizações que visam lucro, jamais permitirão que sistemas produtivos se decomponham, certamente irão intervir para manter o sistema produtivo em uma posição eficiente e lucrativa. É nesta hora que surge a Engenharia Reversa (ER), onde a ideia de modernização do sistema é mais relevante antes que o sistema se torne uma necessidade econômica. A substituição do ativo é o último recurso, apenas se houver retorno de investimento (INGLE, 1994).

A filosofia básica quando se deseja executar projetos de engenharia e manufatura em um mundo capitalista, é aumentar os lucros, gerar empregos qualificados e desenvolver tecnologia única para comandar o mercado por um tempo significativo. A engenharia reversa funcional, nasce quando uma empresa independente, uma nova empresa adicional, em um conglomerado de empresas, ou um grupo completamente novo de pessoas, desenvolve o interesse em produzir um objeto ou uma série de objetos que estão em falta ou podem ser produzidos em um custo mais baixo em território nacional. Essa necessidade também surge quando uma nação se esforça para reduzir suas importações (KHAN et. al., 2019).

É quase impossível criar algo totalmente novo, sem nenhum traço similar à algo existente. Messler (2014) comenta que seres físicos, providos de inteligência, que também são parte de um mundo físico, onde cérebros são inundados com informações para os cinco sentidos, as mentes, de onde nascem todos os pensamentos, são feitas de experiências. Como pode algo ser criado a partir de um vácuo físico, mental, emocional, sensual ou ainda intelectual? Dentre as técnicas mais

poderosas para resolução de problemas, utilizadas pelos engenheiros é a engenharia reversa.

É nela que desmontamos algo para recriar algo novamente, semelhante ou idêntico. Essa dissecação ou “desmontagem” pode ser conceitual, física, literal ou figurativa. Ao analisar o que construiu o original, e prever, deduzir ou inferir o que fez e como fez, surgem ideias sobre como criar uma cópia idêntica ou uma criação totalmente aleatória, ou ainda intermediária, com base no que se aprendeu. Muitas vezes entendida como atalho de um indivíduo preguiçoso que copia a ideia de outro indivíduo, a engenharia reversa é ou deveria ser muito mais do que imitação ou cópia sem arte, e deveria ser colocada no topo da lista de maneiras para se aprender com as próprias experiências (MESSLER, 2014).

De forma preliminar, Wang (2011) conceitua engenharia reversa como um processo de desmontar, analisar, mensurar, reconstruir e testar a figura de um objeto novo ou um evento obsoleto. É uma reinvenção, um processo de reconstrução e repetição aplicado à peça original a fim de reconstruí-la na sua forma original. Pode ser aplicada para recriar peças comerciais de alto custo para os lucros das empresas ou ainda para peças sem valor definido, apenas como restauração histórica.

No processo de fabricação da embalagem de aerossol, existe uma roldana de material condutor a qual é responsável por unir através de solda por costura as extremidades da folha metálica. A roldana é complexa e é constituída de um conjunto de muitas peças, por este motivo, tem alto custo de aquisição, além de ser importada, o que faz com que seu valor seja ainda mais alto.

Esta roldana possui uma vida útil de 2,0 mm no seu diâmetro, sofre retíficas constantes de recuperação do canal, ou limpeza da região soldadora, o que acaba provocando seu desgaste. O período de uso deste conjunto contempla mais duas revisões, ou seja, após o final de sua vida útil, o conjunto pode ser enviado para o fabricante que faz uma revisão com substituição do anel central (item de desgaste), tendo um custo de aproximadamente 50% de uma roldana nova.

Desse modo, devido aos custos elevados com frete, impostos e valor das revisões, foi estudado no decorrer do trabalho, um método para a construção do anel central da roldana, através dos conceitos de ER, selecionando um material adequado e posteriormente construindo-o a partir de matéria prima nacional, reduzindo despesas e por consequência melhorando a relação custo-benefício no processo de fabricação de aerossóis.

1.1 Tema

O tema do seguinte trabalho contempla o desenvolvimento de um anel central de uma roldana de solda (elemento utilizado na soldagem de embalagens metálicas), a partir da engenharia reversa. Com isso, foi selecionado um material de engenharia o mais adequado possível, conforme o original, tendo como foco principal a fabricação deste anel. Espera-se que, com o sucesso deste desenvolvimento, tenha-se uma considerável redução no custo dos serviços de recuperação das roldanas, cujo valor é elevado em função da necessidade de exportação e posteriormente reimportação.

1.2 Objetivos

Para que se tenha sucesso na modelagem, seleção do material adequado, fabricação do anel central da roldana de solda e garantia da produtividade com a peça desenvolvida, apresenta-se os objetivos, geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Modelagem de uma roldana de solda de embalagens de aço, através da metodologia de engenharia reversa e desenvolvimento de um material de engenharia igual ou equivalente à peça do fabricante original (*OEM – Original Equipment Manufacturer*), como uma possibilidade de redução de custo.

1.2.2 Objetivos específicos

A seguir, são apresentados os objetivos específicos da pesquisa, que além de delimitar o tema geral, são responsáveis por detalhar os processos necessários para o desenvolvimento do estudo:

- realizar a desmontagem da roldana original importada, com foco na análise visual da macroestrutura do anel central e do conjunto como um todo;
- desenhar no formato de vista explodida, o conjunto completo da roldana e também desenhar o anel central em 2D, utilizando software Solid Edge;

- analisar a composição química, microestrutura e as propriedades mecânicas do anel central importado, comparando com as propriedades de uma liga de cobre do mercado nacional;
- construir um anel central usinado através do modelo matemático, selecionando o material estabelecido após conclusão da análise química e metalográfica;
- testar a funcionalidade do material apropriado em máquina, nas condições reais de operação, no que se refere à produtividade e à qualidade da solda.

1.3 Justificativa da pesquisa

A competitividade das indústrias, originada pelas crises ocorridas nas últimas décadas, vem forçando as companhias a diminuir ao máximo seus custos para assim maximizar seus lucros. Essa situação econômica estimula e desperta as pessoas a buscarem alternativas para fazer mais com menos.

Durante muitos anos a importação de peças de reposição foi motivo de grandes gastos para a fábrica. Hoje esta situação é ainda pior, devido à condição cambial em que o Brasil se encontra, além das elevadas taxas de importação e demais despesas aduaneiras praticadas no país.

Analisando os altos custos de aquisição, percebe-se o desafio que a engenharia reversa tem em reproduzir essa “mesma” peça com funcionalidade melhor ou equivalente a custos mais baixos (WANG, 2011).

Em análise de longo prazo, se percebe que as roldanas de solda normalmente são substituídas por novas quando chegam no fim de sua vida útil. As roldanas são retificadas periodicamente, o processo de solda de latas exige esta prática para manter as boas condições do canal da roldana e por consequência da solda, o que ocasiona a redução da medida original, que possui uma vida útil de 2,0 mm no seu diâmetro.

A grande questão é que a roldana chega no fim de sua vida útil em boas condições funcionais. É sabido que o fabricante original reforma estas peças por um custo de 50% do valor da peça nova, mas mesmo assim os valores são absurdamente caros com o envio e retorno da peça para o exterior. Além do mais, uma certeza se tem sobre a reforma: o anel central é substituído por um novo de diâmetro original.

Sabendo dos altos custos de aquisição destas peças e instigado a querer desenvolver um anel central idêntico ao original, a fim de reduzir a compra ou reforma

das roldanas, percebe-se o potencial conteúdo que a engenharia reversa entrega, pois como cita Messler (2014), o propósito mais usual no processo de ER é entender o dispositivo, a peça, o produto, substância, material, estrutura ou montagem suficientemente, a fim de permitir que um novo seja criado com a capacidade de fazer a mesma coisa ou desempenhar sobretudo a mesma função, não necessariamente melhor, mas a um baixo custo, sem usar ou simplesmente duplicar (sem compreender totalmente) todo ou alguma parte importante do original.

Ingle (1994), relata que no processo de engenharia reversa, o que define a sequência do desenvolvimento de um produto alvo são: falta de informações técnicas a respeito do produto, necessidade de assegurar ou remodelar uma linha de produtos, custo elevado na aquisição de determinado componente ou alta incidência de defeitos.

1.4 Delimitação do trabalho

Este estudo está delineado na desmontagem, análise do conjunto e fabricação do um anel central de uma roldana soldadora de embalagens metálicas, de diâmetro nominal Ø52,0 mm (49,0 mm medido), de uma empresa produtora de latas de aerossóis. Com esta fabricação, pretende-se reduzir gastos com envio do conjunto para revisão no fabricante, que é estrangeiro.

Além da fabricação, análises precedentes precisam ser feitas, com o estudo aprofundado das funções da roldana e seleção de um material de engenharia para atender as condições mais próximas possíveis de funcionalidade da peça original.

1.5 Resultados esperados

A principal ambição do estudo é definir um material com composição química, propriedades e geometria equivalentes ao produto original, podendo soldar um número considerável de embalagens, tendo como parâmetro os dados de produção das peças do fabricante original (média de produção das últimas quatro roldanas instaladas). Portanto, espera-se usufruir da tecnologia de engenharia reversa como uma alternativa de redução de custos.

Além do mais, com a implementação da nacionalização poderá ser reduzido o tempo de disponibilidade de peças no estoque, visto que a produção ocorrerá em

poucos dias, o que não acontece com o envio da roldana para revisão, que costuma retornar entre 6 e 8 semanas.

1.6 Estrutura do trabalho

A organização do primeiro capítulo manifesta as informações preliminares do trabalho, que é estruturado pela introdução, o tema, todos os objetivos, a justificativa do estudo, a delimitação do trabalho e os resultados previstos, além da estrutura que faz parte deste item.

A revisão bibliográfica está embasada no capítulo dois. É nesta seção que se pesquisa informações sólidas a respeito do assunto, a fim de dirimir bons conceitos para estruturar de forma clara o trabalho.

O terceiro capítulo é formado pela metodologia do trabalho, onde estão apresentados os principais métodos, materiais e equipamentos para execução das análises e fabricação da peça, além da classificação da pesquisa.

No capítulo quatro são apresentados os resultados do estudo e por fim, no quinto e último capítulo, apontadas as conclusões e considerações finais relativas à pesquisa e os resultados alcançados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos pertinentes no desenvolvimento do estudo. Os principais conceitos retratam sobre definição, métodos de construção e execução da engenharia reversa, soldagem por resistência e materiais empregados em eletrodos de solda, além das propriedades dos materiais, a fim de selecionar de forma correta o elemento base deste estudo que é o anel central da roldana soldadora.

2.1 Engenharia Reversa

Utilizada a muito tempo por engenheiros, a engenharia reversa infelizmente foi desassistida no cenário de hardware, onde a maioria dos livros retratam o assunto voltado a software ou design de produtos, este último, tendo apenas enfoque na criação de um design novo, baseado em um produto antigo. A engenharia reversa é muito mais que uma ferramenta de design, ela tem a função primária de analisar a funcionalidade do objeto e também descobrir os materiais empregados nos mecanismos, sempre na constante melhora dos produtos, instigando a criatividade ou engenhosidade, e não simplesmente a cópia (MESSLER, 2014).

Segundo Ingle (1994), desde o princípio se sabia que 90 - 95% das bibliografias disponíveis falavam sobre a engenharia reversa de software, com apenas 5 ou 10% da literatura voltada para modelo de hardware. Dentre esses, a maioria são direcionados a apenas uma parte do processo, como métodos de inspeção dimensional ou digitalização de dados.

Para Wong (2018), quebrar algo e juntá-lo novamente é um método que ajuda as pessoas a compreender como as coisas foram feitas. Uma pessoa seria capaz de reproduzir um origami, desdobrando-o primeiro. O funcionamento dos carros, também exige a compreensão de cada subconjunto mecânico, principal e secundário e de suas finalidades. Na própria natureza, através da sua mais complexa forma, a anatomia humana, exige um entendimento de cada parte do corpo, como? Dissecando-o.

A ER faz entender como as coisas foram construídas e como funcionam, por que está em seu estado, quando é acionada, como atua e qual é o objetivo. Estas informações são utilizadas para redesenhar e melhorar, buscando obter um melhor desempenho e custo, podendo até auxiliar na eliminação dos defeitos (WONG, 2018).

Na visão da engenharia de software, esse método já existe há muitos anos. O processo de reversão de conceito acontece toda vez que alguém olha o código de outro desenvolvedor. Pode também ocorrer quando uma pessoa examina sua própria criação dias depois da escrita. A engenharia reversa nada mais é do que uma descoberta. Quando olhamos novamente o código, criado por nós ou outros, analisamos, descobrimos e percebemos coisas que não podemos esperar. Apesar de ter sido pauta de sessões em conferências e grupos de usuários de computador, a engenharia reversa de software atingiu sua maioria nos anos 90 (EILAM, 2005).

Messler (2014), define engenharia reversa no contexto de hardware físico (assunto abordado neste trabalho), como um método de descobrir a razão e os princípios de funcionamento que admitem a um produto, objeto, material, dispositivo, substância ou sistema através de uma análise aprofundada de sua estrutura, função e operação. Este processo envolve a desmontagem, análise da composição e funcionamento, peça por peça, desmembrando o conjunto como uma cadeia, até que todo sistema seja analisado e compreendido.

Na engenharia existem dois métodos de construir um produto, através da engenharia direta ou através da engenharia reversa, comentam Raja e Fernandes (2008). A engenharia direta acontece no processo convencional, que parte de um projeto, fabricação, montagem e manutenção dos produtos e sistemas. A ER parte do pressuposto de que não existe um projeto, um desenho, um material definido para fabricação de um item, portanto através de um produto físico, este é reconstruído, sem quaisquer documentos disponíveis, e por isso leva o nome de engenharia reversa.

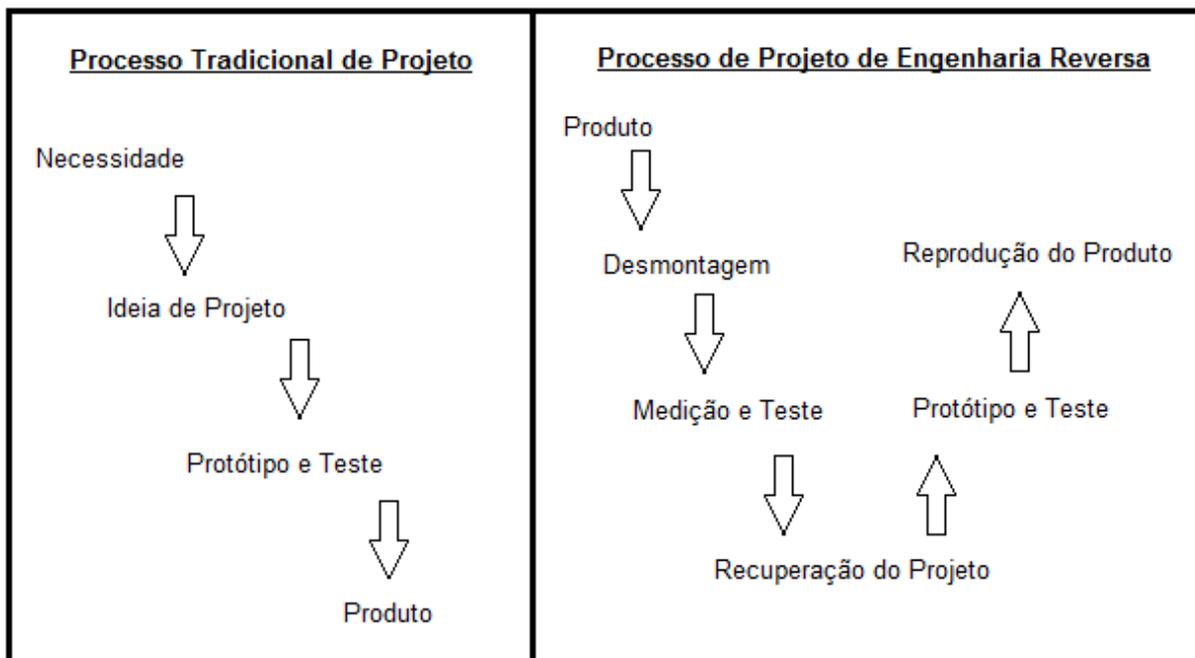
Wang (2011), diz que a engenharia reversa é definida pelo processo de análise, medição e testes, a fim de reconstruir a imagem de um objeto, ou resgatar algum

episódio passado. Também comenta que é a arte da ciência utilizada para preservar o propósito do projeto do elemento original. Para que o engenheiro realize este método de reconstrução, ele precisa entender a funcionalidade e as habilidades do produto original, para poder copiar seus detalhes específicos.

Gupta et al (2014), interpretam a engenharia reversa como uma prática utilizada para coletar informações precisas a respeito de um produto qualquer. Cita que dentro da engenharia reversa ainda existem a engenharia reversa de material, a engenharia reversa geométrica, a engenharia reversa de projeto, e assim por diante. Esta prática ajuda os engenheiros a coletar informações necessárias sobre uma peça referência em um curto período de tempo. A engenharia reversa de material ou química, é a técnica utilizada para identificar uma composição química de um determinado produto, ou o tipo de material empregado na fabricação.

Ingle (1994), estabelece que ER é em sua essência, o desenvolvimento de dados técnicos incompletos de um objeto existente, desenvolvido em retrospecto aplicado a hardware. Este processo possui quatro estágios e contribui para o uso eficiente dos recursos de capital e aumento da produtividade. Normalmente utilizado para alavancar a capacidade de produção ou melhorar a eficiência das linhas. Um projeto de engenharia reversa deve ser selecionado com diligência, a fim de garantir uma confiante probabilidade de sucesso, pois projetos que não atendem os critérios mínimos de seleção não são considerados, afinal, o sucesso de um projeto de ER, é medido através do retorno sobre o investimento. A Figura 1 ilustra a diferença entre o projeto de engenharia direta, ou tradicional e o processo de engenharia reversa, ou seja, passando de conceitos de abstração de elevado nível para o projeto lógico e soberano de execução necessário em um composto físico.

Figura 1 – Processo de projeto tradicional versus engenharia reversa



Fonte: Adaptado de Ingle (1994, pg. 9).

Souza e Ulbrich (2009), de uma forma mais simples e direta, caracterizam o processo de engenharia reversa como um método de reprodução de um objeto físico, para posteriormente transformá-lo em um modelo digital. No desenvolvimento tradicional de engenharia, inicialmente cria-se o modelo virtual, para posteriormente fazer a criação de um objeto físico. Portanto, como diz o nome, engenharia reversa é o processo de trás para frente, através do modelo físico já existente, objetiva-se a criação de um modelo virtual, ou modelo matemático.

Ingle (1994), indaga o motivo de desenvolver dados, através do método de engenharia reversa em produtos que atualmente são fabricados em células produtivas existentes. Na maioria dos casos não há dados técnicos, ou se há, estes são insuficientes, ou ainda podem estar desatualizados ou imprecisos. Comenta ainda, que muitas vezes equipamentos são adquiridos de segunda mão, maquinários usados por exemplo, logo faltam dados e informações para manter e reparar estes ativos. Este é um problema que vitima companhias de todos os tamanhos e no mundo todo. Posto isto, essa é uma das respostas sobre o porquê de utilizar engenharia reversa, aumento da produtividade através de documentação aprimorada.

Neste mesmo contexto, Wang (2011), reforça que um dos poucos métodos disponíveis para reparar uma peça original quando os dados de projeto do OEM não são disponibilizados, é a engenharia reversa. Esta prática tornou-se um método

padrão para engenheiros que precisam replicar ou reparar um componente desgastado quando não se dispõe dos dados originais. Essa tecnologia também se faz valer para novos projetos de peças antigas sendo empregada na criação de objetos “iguais” porém com funcionalidade melhorada ou equivalente a custos menores. A demanda de mercado de uma peça é determinante na escolha de seu desenvolvimento.

Sob outra perspectiva, além do design do produto, Messler (2014) diz que pode existir muitas outras ramificações positivas em um produto desenvolvido. O profissional executante da engenharia reversa está sempre atento a encontrar novas tecnologias ou fundamentos tecnológicos, afinal, ele é um tecnólogo. Ademais, a ER é amplamente utilizada na descoberta de novos métodos de fabricação ou projeto de um objeto, mecanismo, componente, montagem ou sistema, como pode ser percebido ao entender um produto/projeto através de sua geometria ou das partes e detalhes que o envolvem, os materiais empregados nestas partes ou ainda os meios de processamento destes materiais empregados.

Em outro panorama, utiliza-se engenharia reversa com objetivo de reduzir os tempos de ciclo de desenvolvimento de produtos. Em um mercado altamente competitivo, se faz necessária a busca de novos métodos de redução no tempo de espera para comercialização de um novo produto. O desenvolvimento rápido de produto, (*RPD - Rapid Product Development*), refere-se a novas tecnologias e técnicas desenvolvidas, afim de ajudar os fabricantes a atender às demandas de tempo reduzido no desenvolvimento de produtos. Pode ser citado como exemplo, companhias que fazem moldes para injeção, precisam encurtar projetos de ferramentas e matrizes (RAJA & FERNANDES, 2008; ZHANG, 2003).

Para Zhang (2003) é muito difícil modelar um CAD – *Computer-Aided Design* de um objeto existente que conserva uma superfície livre, ou uma superfície esculpida. O setor de engenharia automotiva, naval, aeroespacial ou medicina enfrenta esse problema no desenvolvimento de um produto. Nestes casos faz-se o uso da ER, pois é muito eficaz e agiliza o processo de desenvolvimento.

Um fato muito interessante, comentado por Mello, et al (apud Zhu, Liang e Xu, 2005), sobre como a China adquire a tecnologia? Geralmente através do estudo de linhas de manufatura e estratégias de países mais desenvolvidos que ela. Modifica o processo e identifica partes e componentes, alcançando o desenvolvimento do produto através da ER e por fim, otimizando-os. Da mesma forma acontece com o

processo de inovação da Coreia do Sul, espera os países desenvolvidos talhar novas tecnologias e mercados para depois desenvolver seus produtos. (MELLO et al apud HOBDAI, RUSH; BESSANT, 2004).

Raja e Fernandes (2008) citam algumas razões pelas quais se faz o uso da engenharia reversa:

- a fábrica do produto original faliu, porém há fábricas que necessitam deste produto, por exemplo, peças de reposição de aeronaves, necessárias normalmente após um avião estar em atividade por vários anos;
- a fábrica do produto original ainda existe, porém não produz mais este determinado item, por exemplo, o produto foi descontinuado, ou tornou-se obsoleto;
- quando a documentação do produto original foi extraviada, ou então, desconhece a sua existência;
- quando a finalidade é criar informações para recuperar ou fabricar uma nova peça, para a qual não existem dados CAD ou no caso de peças onde os dados tornaram-se obsoletos ou perdidos;
- onde se deseja fazer o comparativo de um modelo físico com seus documentos (especificações) para fins de controle de qualidade/inspeção – comparar uma peça produzida com o desenho ou peça padrão;
- em casos onde é necessário eliminar as características ruins de uma peça ou onde precisam ser melhoradas, por exemplo, ruína excessiva de um local definido, pode ser um indicativo de onde o produto necessita ser aprimorado;
- análise de produtos da concorrência, características positivas e negativas;
- investigar novos métodos, buscando melhorar a funcionalidade do produto e seus recursos;
- obter dados 3D de um objeto, indivíduo ou escultura para dimensionar, criar ou desenvolver uma obra de arte;
- levantamento de documentação e mensuração arquitetônica e de construção;
- adequar peças de roupas ou sapatos à sujeitos e também determinar a antropometria de um determinado grupo de pessoas.

2.1.1 Desmontagem e observação

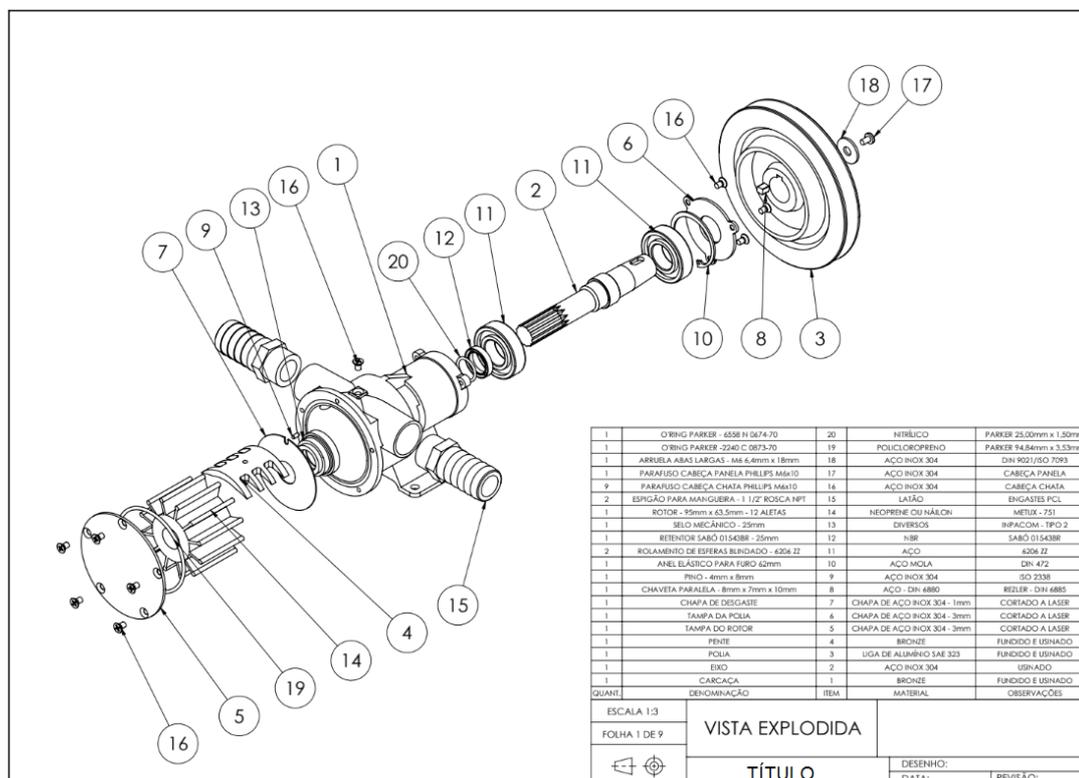
Para desvendar o segredo das coisas, desde o princípio, as pessoas com um nível elevado de curiosidade, estão sujeitas a destruir ou desmontar algo que é misterioso para elas, desejando entendê-las ou saber como funcionam. Quando pretende-se entender totalmente algum mecanismo, é imprescindível desmontá-lo e em seguida remontá-lo. Durante essa atividade, espera-se que o sujeito descubra os segredos contidos em tal dispositivo, isso o torna valioso, desperta sua imaginação, descobrindo algo novo (INGLE, 1994).

A desmontagem do produto marca o início da segunda etapa da ER. Otto e Wood (1998), sugerem desenvolver um plano incremental para a atividade de desmonte, ou seja, listar um passo a passo de acordo como acontece. Registrar a ordem em que ocorre a atividade, a sequência em que cada componente ou conjunto é removido, tipo de ferramenta utilizado, posição de acesso e orientação do objeto, a fim de evitar que os componentes caiam. Este plano é cuidadosamente construído para que se tenha um meio de avaliar a capacidade de remontar o produto, assim como um meio de voltar o produto às suas características originais.

Neste plano, é importante ressaltar, que nem sempre corresponderá ao plano de montagem especificado pelo fabricante do objeto original, é apenas fornecido com o intuito de avaliar o arranjo. A atividade de desmonte é feita sistematicamente, identificando (com etiquetas se possível) cada parte do conjunto que é removido.

À medida em que a atividade ocorre, faz-se necessária a construção de uma lista de materiais BOM - *Bill of Materials*, além de uma vista explodida do subconjunto, conforme Figura 2. A lista de materiais e a vista explodida precisam conter todas as montagens, submontagens e as peças na sua ordem, conforme foram montadas originalmente (OTTO & WOOD, 1998).

Figura 2 – Representação de uma lista de peças e vista explodida



Fonte: Adaptado de Otto e Wood (1998, pg. 233).

Messler (2014) argumenta que o ser humano é uma espécie destrutiva, possui em seu instinto o prazer por desmontar as coisas por curiosidade, cita que o interesse pela desmontagem de peças é normalmente maior que a disposição por montá-las. Portanto, no contexto de engenharia reversa, o profissional engenheiro pratica o ato da desmontagem basicamente por duas principais razões: para buscar conhecimento e/ou estudar algo que exerça sua função de forma constante e perfeita, ou para aprender com algo que deveria estar funcionando, mas não está e tentar solucionar esta falha.

O processo de desmontagem, deve atender a três objetivos centrais:

1. dissecação para análise técnica aprofundada (com análise de custos);
2. sapiência e cognição para o banco de dados próprio (ou de uma companhia);
3. *Benchmarking*.

O processo de desmontagem exige uma observação detalhista, Messler (2014) ressalta a importância de ao dissecar um objeto, é de fundamental importância analisar tudo que há de ser visto, cada detalhe, e se não bastasse, documentar toda informação coletada. Em um olhar crítico, analisando a fabricação de um produto,

pode ocorrer injustiça ou falsidade ao mencionar que este seja bom, apenas analisando seu acabamento, no entanto a certeza é grande ao afirmar que um produto é ruim, quando seu acabamento realmente é um desleixo. O olho do profissional observador deve ser delicado, possuir uma noção do produto; É um produto novo ou usado? Qual o valor de compra? O custo compensa sua funcionalidade? Enfim, quando o desmonte começa, é preciso analisar como foi montado, como as peças se inserem umas nas outras, disponibilizando-as em sua ordem, facilitando a construção da vista explodida.

Pistas que auxiliam na identificação de materiais de construção (metal, vidro, polímero, cerâmico, elastômero, compósito) devem ser observadas. Em detalhes de acabamento pode-se revelar o método de fabricação ou processamento de cada objeto (usinagem, conformação, fundição, injeção, etc.), registrando tudo o que for observado (MESSLER, 2014).

2.1.2 Medição e modelagem

No processo de engenharia direta, em um projeto de máquina, o modelo matemático do produto primeiramente é criado a partir de uma inovação ou ideia, posteriormente a produção da peça. A primeira etapa da engenharia reversa não é o desenho e sim a medição e coleta de dados de uma peça já existente. Essas informações, portanto, são interpretadas e analisadas. Durante a coleta de dados, o profissional deve alcançar o máximo de informações pertinentes possíveis, abrangendo documentação disponível e dados técnicos existentes, além de desenhos não proprietários se possível. Se faz importante também, identificar todo e qualquer dado de engenharia absorto o mais breve possível. Para obter sucesso no exercício da engenharia reversa, é necessário se ter conhecimento suficiente e adequado da peça que está sendo submetida ao método. Ainda que o principal objetivo da ER de um produto original seja copiar a peça e reproduzi-la, geralmente a peça duplicada não será idêntica à peça OEM, portanto, pode ser equiparada, mas não há possibilidade de duplicar as tolerâncias dimensionais e métodos de fabricação. Mesmo assim, as peças de engenharia reversa devem ser similares às peças OEM tanto quanto possível (WANG, 2011).

Segundo Messler (2014), a medição seguida da observação prévia durante a desmontagem do conjunto tem extrema importância no sucesso de uma criação de

engenharia reversa. Duas grandes categorias de medições são apresentadas: (1) medição de uma geometria e (2) medição de uma função (quando possível). A medição geométrica é aquela que se faz de forma direta, cada parte da geometria de um objeto precisa ser mensurado ou quantificado, seguindo uma escala de medida apropriada, isso inclui todo tipo de medida, até que o produto seja inteiramente reproduzido, ou quando se tratar de um conjunto, todas as peças sobressalentes que o contenham.

Paquímetros e outros instrumentos de medição manuais, foram os primeiros instrumentos utilizados para a medição de peças para engenharia reversa. Raja e Fernandes (2008), abordam inicialmente estes dispositivos como ferramentas de mensurar diâmetros, comprimentos, profundidades e outras medidas de peças precisas. Este processo por ser totalmente manual, requer um maior esforço quando os objetos possuem superfícies mais complicadas ou indefinidas, de geometria livre por exemplo (praticamente impossível mensurar). Neste contexto, surgem nos anos 1960 as primeiras máquinas de medição por coordenadas – MMC, que foi a primeira tecnologia voltada à automação dos processos de ER. As máquinas de medição por coordenadas, consistem em uma sonda ligada a três eixos perpendiculares entre si (x, y e z). Os eixos possuem um referencial padrão integrado, quando a sonda toca o objeto, a máquina detecta um ponto no espaço, identificando a posição deste ponto com base na referência da máquina.

Largura, comprimento, espessura, diâmetros, profundidade, posição entre furos, raios de geometrias simples, parecem muito simples e podem ser mensurados com instrumentos manuais mais simples. Por outro lado, quando um objeto é constituído por alguma geometria livre, ou seja, onde os raios de curvatura são compostos (em duas direções ou não uniforme), a tarefa é mais complexa e, portanto, equipamentos mais sofisticados se fazem necessários, como uma máquina de medição por coordenadas por exemplo (MESSLER, 2014).

Quando necessita-se coletar informações para caracterizar uma função de um produto, ou seja, informações de uso ou desempenho, precisa-se fazer medições apropriadas para isso. Messler (2014) cita que nesse procedimento de medição funcional, separa-se o produto em vários elementos que representam as funções-chaves, depois de medidas individualmente, une-se cada função à função geral e assim quantifica-a no todo.

A medição através de visão computacional surge quando se verifica que a máquina de medição por coordenadas não consegue alcançar algumas geometrias por se tratar de uma medição por contato físico. Ainda considerada uma tecnologia contemporânea, as medições por afastamento utilizam tecnologia por meio de sensores e outros sistemas baseados em imagens (RAJA & FERNANDES, 2008).

Wang (2011) define cinco etapas na modelagem geométrica através da engenharia reversa. A primeira contempla a definição do escopo do trabalho, identificando os principais requisitos, posteriormente os métodos apropriados são utilizados para obter os dados relevantes do objeto, como sua geometria. Na etapa dois, obtém-se os dados dimensionais do projeto, para criar um desenho de projeto, ou modelo CAD da peça. A medição pode ser de várias maneiras, dependendo da geometria do objeto e precisão exigida no projeto. Na terceira etapa, são analisados os dados medidos, ocorre a formulação das dimensões nominais da peça com os dados de geometria coletados, levando em consideração os padrões e especificações do cliente, garantindo os requisitos da etapa um. Na etapa quatro, as linhas de melhor ajuste dão forma à um modelo CAD 3D e por fim, na quinta e última etapa, podem ser comparados a peça de projeto por uma peça da vida real, através da digitalização, verificando a qualidade por comparação da nuvem de pontos.

2.2 Soldagem

Há milhares de anos os processos de união de metais são conhecidos, no entanto a maior parte do tempo essa junção era feita através de forja, por um ferreiro. No final do século XIX surgiram vários princípios de soldagem. A armazenagem com segurança de gases como oxigênio e acetileno foi possível, e assim os processos de aquecimento se deram suficientes. Além disso, a corrente elétrica surgiu para a soldagem à arco e por resistência, aumentando a intensidade da fonte quente e permitindo que o calor gerado formasse uma poça localizada de material fundido, não propagando para outras partes do metal além da região a ser unida (WEMAN, 2012).

Segundo Wainer (2019), a soldagem é um processo comumente conhecido na indústria metalmeccânica e é responsável por fazer a união entre duas partes metálicas, podendo ser do mesmo material ou não. Através de uma fonte de calor os materiais se fundem entre si. Além do aquecimento localizado, pode ou não ser

aplicada uma pressão na junção destes metais. O resultado deste processo térmico, é conhecido por solda.

Marques (2009), define o processo de soldagem muito além da junção de duas partes metálicas. O autor cita que atualmente os processos de soldagem e outras variações, são utilizadas frequentemente para recuperação de peças danificadas, ou desgastadas, através de deposição de material adicional sobre a superfície da peça. Esta deposição pode ter propriedades diferentes da sua base, muito utilizada em casos onde se buscam características especiais: resistência ao desgaste, resistência à corrosão, maior dureza, etc. Além disso, outros meios relacionados a soldagem podem ser utilizados para corte de peças, pois muito se assemelham.

2.2.1 Soldagem por resistência

Dentre os métodos mais conhecidos de soldagem, as técnicas de soldagem por resistência foram as primeiras a serem inventadas. Weman (2012), expõe que neste tipo de técnica, normalmente a ação da soldagem ocorre de forma rápida, pouco poluente e eficiente, nenhum material de adição se faz necessário. O que a torna não muito atrativa são os custos de capital e de equipamentos, além das limitadas aplicações. Depois de ajustada, a técnica de soldagem por resistência normalmente é utilizada apenas em um tipo de atividade.

A passagem da corrente elétrica pelas peças a serem unidas, gera uma determinada resistência, essa resistência gera calor. Devido a densidade dessa corrente ser tão alta, uma poça de metal fundido é formada entre as peças metálicas, e por isso a junção entre as partes. A corrente que circunda geralmente está na casa dos 1000 – 100.000 A e a tensão na faixa de 1 – 30 V (WEMAN, 2012).

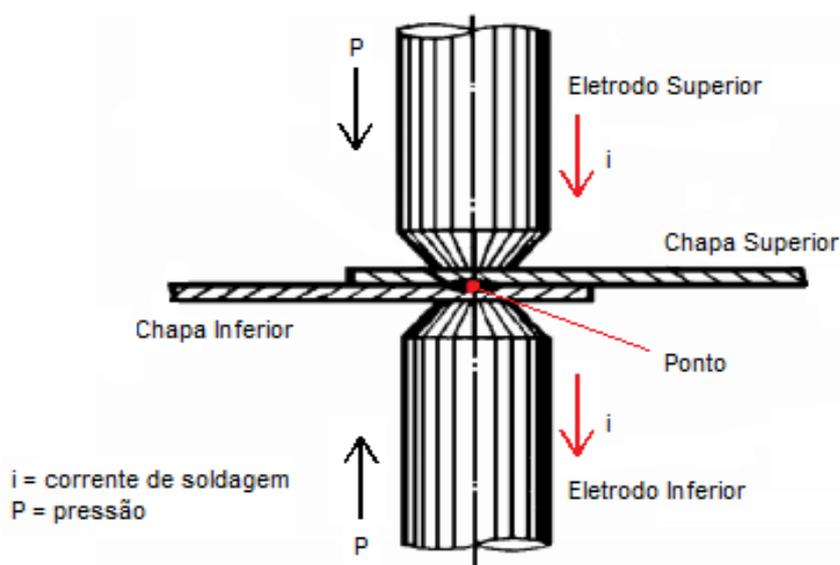
O princípio de funcionamento da solda por resistência se dá através da união de duas peças metálicas através da geração de calor, onde eletrodos são responsáveis por aplicar uma pressão e transmitir corrente elétrica na região de contato entre as partes, fundindo o material. O calor gerado é devido à resistência à passagem da corrente (efeito Joule), gerada entre peça/eletrodo e peça/peça, conforme pode ser verificado na Figura 3 (WAINER, 2019; MARQUES, 2009).

Segundo o manual da RWMA (2003), o processo de soldagem por resistência difere dos demais por que não faz uso de materiais de adição, como fluxos, varetas, etc., portanto, a metalurgia da solda não é comprometida por conta desses materiais

auxiliares, comuns em outros tipos de soldas. Descreve ainda que devido às forças aplicadas e ao calor gerado, o resultado deste processo é uma região forjada, com microestrutura refinada e propriedades físicas iguais ou superiores ao metal base.

Geralmente, os processos de soldagem por resistência mais utilizados são soldagem por resistência a ponto (RSW), soldagem por projeção por resistência (RPW), soldagem por costura por resistência (RSEW) e soldagem de topo por resistência. As variantes do processo de solda associadas a esses tipos de soldagem por resistência são: corrente elétrica, tempo de solda, força do eletrodo (pressão), material dos eletrodos e o aspecto da ponta. Pouca habilidade é necessária para operar um equipamento de solda, se todos estes parâmetros forem ajustados corretamente. Os processos de solda por resistência citados acima, são comumente empregados na soldagem de metais de até 4,8 mm (3/16 pol) de espessura. Os eletrodos são construídos em liga de cobre, que aplicam uma determinada pressão nas peças a serem unidas, expulsando o ar dentre elas e rapidamente fundindo ambas as partes, um curto-circuito acontece quando a alta corrente elétrica empregada, combinada a baixa tensão se aplicam as peças. É necessário manter em boas condições a ponta dos eletrodos, pois são fatores importantes na relação com a qualidade da solda. Assim, é usual nas operações de produção, definir um cronograma de inspeção, limpeza e repasse (usinagem) para as configurações do eletrodo original. (AWS, 2001).

Figura 3 – Representação solda por resistência



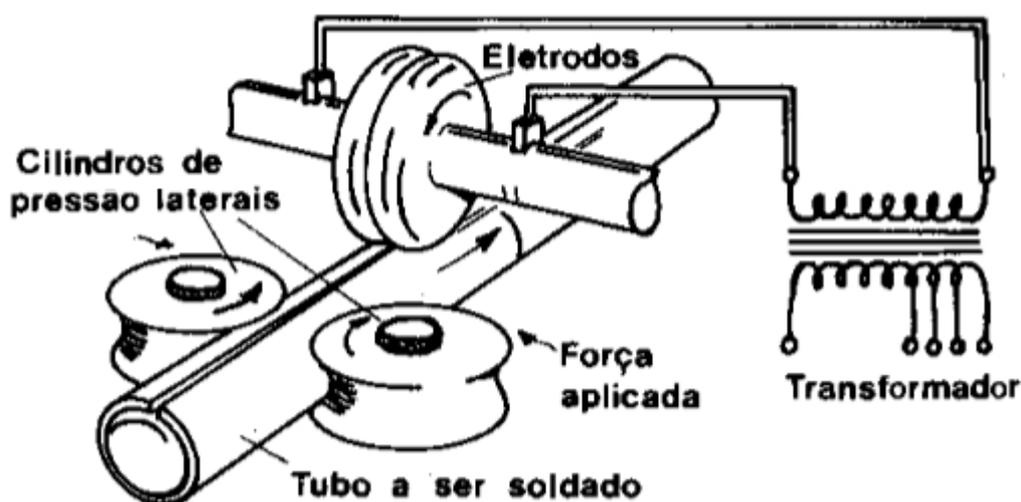
Fonte: Adaptado de Wainer (2019, pg. 218).

2.2.2 Soldagem por costura por resistência

O processo de soldagem por costura utiliza os mesmos princípios da soldagem por ponto, os dois processos são muito similares, a diferença entre as técnicas está na configuração do eletrodo, que na soldagem por costura são constituídos por eletrodos em formato de discos ou rolos de solda (roldanas), fabricados em ligas de cobre. Devido a esta diferença, a solda que era formada por pontos dispersos, agora é formada por pontos tão próximos que distribuem-se de forma a originar um “cordão” de solda (WAINER, 2019; WEMAN, 2012; KHAN, 2007; MACHADO, 1996).

Segundo Wainer (2019), esta técnica é muito empregada na fabricação de tubos costurados. Os tubos são conformados a partir de chapas planas, por roletes em forma de cilindros rotativos, onde ao final do processo as faces são pressionadas e unidas através de soldagem por costura. Os eletrodos são roldanas que acompanham o sentido de deslocamento do tubo, conforme representado na Figura 4.

Figura 4 – Processo de solda de costura em tubos



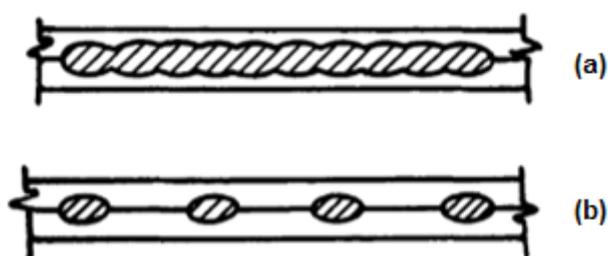
Fonte: Adaptado de Wainer (2019, pg. 225).

Neste processo de solda de tubos, não há sobreposição do material do tubo. Wainer (2019), explica que a soldagem é executada de topo, conforme pode ser verificado na Figura 4. Ambos os roletes eletrodos encontram-se posicionados acima

do tubo, separados pela fenda a ser soldada, produzindo um curto circuito nesta região.

Segundo o manual da RWMA (2003), a solda reproduzida utilizando discos eletrodos giratórios, sem intervalo (abertura dos eletrodos) entre os pontos, resulta em uma solda estanque a gases e líquidos. Descreve também que o método é o mesmo utilizado na solda por pontos, inclusive se forem feitas soldas simultâneas sem abrir os eletrodos entre os pontos, apenas deixando tempo de resfriamento suficiente entre as soldas, esta é conhecida como solda por ponto de rolo, conforme ilustra a Figura 5, solda contínua (costura) e solda por ponto de rolagem. A solda feita por ponto de rolo não é estanque à gases e líquidos. A corrente elétrica requerida na solda de costura é mais elevada do que na solda por ponto de rolo, no mesmo material. O equipamento pode ser o mesmo, basta ajustar o controle do tempo de solda.

Figura 5 – Representação da soldagem por costura (a) versus soldagem ponto por ponto de rolo (b)

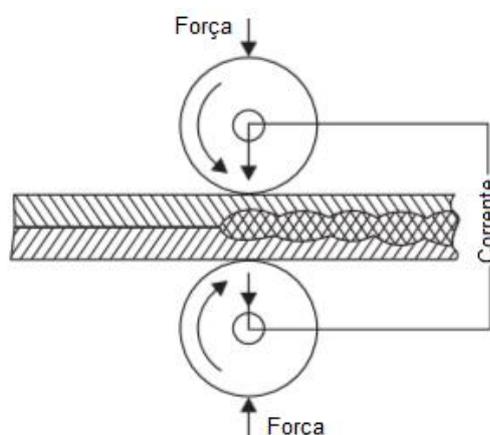


Fonte: Adaptado de RWMA (2003, pg. 4-2).

A soldagem por costura é muito utilizada em processos de alta velocidade, reproduzindo uma aparência consistente e resistência significativa da junta soldada. Com exceção das soldas costuradas unidas topo a topo, as soldas de emenda, todas são executadas com sobreposição de material (transpasse).

Khan (2007) explica que na soldagem por costura as peças são sobrepostas e alimentadas entre um par de discos eletrodos de liga de cobre, conforme representado na Figura 6, reforça ainda a relação entre a soldagem por costura e a soldagem por pontos, que o que difere é apenas a geometria dos eletrodos e o tempo entre um ponto de solda e outro.

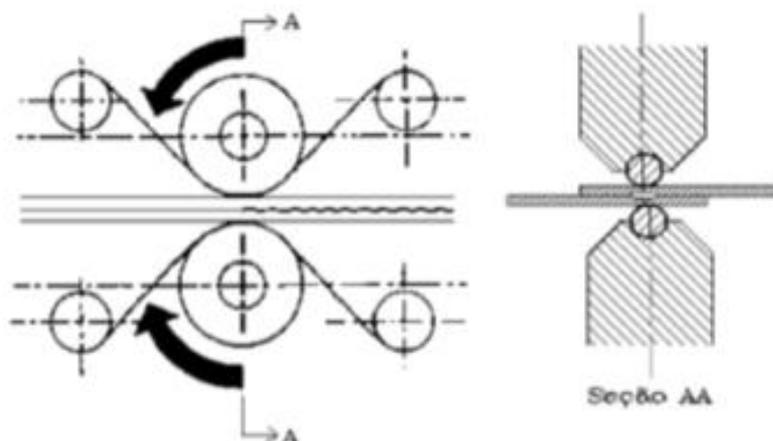
Figura 6 – Representação do processo de solda por costura com sobreposição de materiais (transpasse)



Fonte: Adaptado de Khan (2007, pg. 21).

Machado (1996) explica que nos casos onde a soldagem por costura é efetuada em latas de aço (embalagens metálicas), latas fabricadas a partir de folhas de flandres com revestimento de estanho, se faz necessária a interposição de arame de cobre entre os eletrodos (discos), conforme mostra a Figura 7, o emprego deste complemento na soldagem reflete na concentração do calor, na região soldada. Lembra ainda que este arame de cobre não é consumível, podendo ser utilizado várias vezes.

Figura 7 – Soldagem por costura com arame de cobre entre os discos



Fonte: Adaptado de Machado (1996, pg. 266).

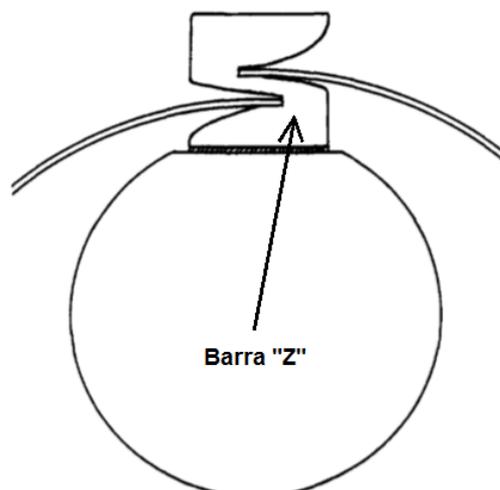
O manual da RWMA (2003), complementa que o processo de soldagem por costura é capaz de unir peças com uma espessura aproximada de 0,04 mm até 6,35

mm de aço carbono. As velocidades variam de poucos centímetros por minuto até trinta metros por minuto, dependendo das características que envolvem o processo de soldagem.

O manual ainda relata sobre o uso de máquinas de solda por pontos automática com controle eletrônico completo para uma melhor eficiência da solda. Uma das principais aplicações em solda por costura sobreposta e soldagem de costura “*mash*” é na confecção de juntas soldadas no sentido longitudinal em recipientes ou outros produtos cilíndricos. Nesta aplicação, deve ser considerado a manutenção e obtenção de uma quantidade controlada de sobreposição. O que se utiliza para este controle, é um dispositivo de medição especial, conhecido como barra “Z”, ou régua “Z”, conforme esboçado na Figura 8. Uma coisa a ter em mente é que quaisquer erros ou tolerâncias no cisalhamento serão refletidos nas dimensões do produto soldado. Desde que seja necessário manter as dimensões acabadas com precisão e permitir que os erros de cisalhamento sejam eliminados na quantidade de sobreposição, é necessário recorrer a um dispositivo de medição e fixação especial.

A barra “Z” pode ser montada diretamente na soldadora, medindo assim o transpasse diretamente na solda de emenda e eliminando a operação de solda descontínua. Quando isso é feito, um acessório adicional de algum tipo, como um rolo de ampulheta, deve abrigar o trabalho na linha de solda para evitar que a sobreposição se estreite.

Figura 8 – Corte transversal de um braço soldador, representando a montagem da barra “Z”



O manual da RWMA (2003) cita que um fator muito importante na soldagem por costura é a limpeza das superfícies que serão soldadas. Na soldagem por ponto, a sujeira pode até ser desconsiderada pois alguns ajustes de tempo, pressão e corrente, podem compensar estas sujidades. O que não acontece na soldagem por costura, onde os melhores resultados do processo acontecem com aço laminado a frio que foi limpo de maneira correta na superfície a ser soldada. Uma outra opção, porém, não muito boa, é a soldagem do aço laminado a quente, decapado e oleado, e antes do processo de solda, isentado de óleo e quaisquer gorduras excedentes.

Weiner (1992), complementa que é de fundamental importância, quando se deseja obter uma boa qualidade de solda, a isenção de quaisquer tipos de óxidos na região a ser soldada (são substâncias isolantes, que comprometem a solda) ou carepas (resultado de tratamentos térmicos) ou ainda substâncias orgânicas.

2.2.3 Materiais utilizados em eletrodos

De acordo com Callister (2007), os aços e suas ligas, possuem ótimas propriedades mecânicas, são fáceis de serem produzidos, além de baratos, isso explica a grande procura por estes materiais e a grande variedade de aplicações. No entanto, eles possuem limitações, principalmente no que diz respeito a sua alta densidade, condutibilidade elétrica baixa e muito suscetíveis a corrosão. Assim sendo, outras ligas são requisitadas quando há necessidade de atingir propriedades mais apropriadas para a aplicação. Neste caso surgem as ligas não ferrosas, que são classificadas de acordo com seu metal base, como: ligas de cobre, magnésio e titânio, alumínio, metais nobres, metais refratários, superligas e outras ligas que apresentam chumbo, estanho, zinco, zircônio e níquel como metais base. Dentre os metais não ferrosos, destacam-se as ligas de cobre, que é o objeto deste estudo, objetivando a fabricação de eletrodos de cobre, pois como Callister (2007) descreve, as propriedades elétricas do cobre o tornam o elemento metálico mais utilizado nas aplicações onde se deseja ter ótimas propriedades elétricas.

Callister (2007) ainda comenta que as ligas não ferrosas são divididas em dois tipos. As *ligas fundidas*, quando são frágeis, incapazes de serem deformadas ou modeladas sem que rompam, e as *ligas forjadas*, que ao contrário das ligas fundidas, são moldáveis e deformáveis sem sofrer quaisquer catástrofes. Além disso, quando

se faz necessária a melhora na resistência mecânica, as ligas podem ser “tratadas termicamente”, ou seja, através de um endurecimento por precipitação ou têmpera (endurecimento por precipitação é mais utilizado).

Quando a soldagem por resistência entra em pauta, é necessário entender como operam os eletrodos e quais os materiais empregados na construção deles. Os eletrodos são complementos da máquina de solda que entram em contato direto com as peças a serem soldadas, conduzem a corrente elétrica, aplicam a carga (pressão) na região de solda e têm uma função importante que é a dissipação do calor gerado. Os eletrodos precisam garantir uma densidade de corrente entre 800 e 10.000 A/cm² e pressões na casa dos 70 a 400 MPa sem alteração de forma. Portanto, as propriedades mecânicas em altas temperaturas devem ser boas, além disso, não podem formar liga quando em contato com o metal a ser soldado (WEINER, 1992; MACHADO, 1996).

Os discos de solda produzidos para eletrodos geralmente são fabricados com materiais do Grupo A, conforme especificados pelo manual (RWMA, 2003). Machado (1996) reforça a importância da refrigeração e da montagem correta dos discos eletrodos garantindo uma boa eficiência da solda. A refrigeração pode ser externa, através de jatos contra a junta, quando o produto fica submerso e, portanto, entra em contato com a água. Ou internamente, quando a água circunda entre o braço e os discos de solda.

Segundo Weiner (1992), as ligas geralmente utilizadas na confecção de eletrodos devem possuir elevada temperatura de recozimento e precisam ter boa resistência à compressão e ao atrito. Para adquirir estas propriedades, além dos tratamentos mecânicos de forja e laminação, passam por processos de solubilização, com resfriamento rápido, seguido de um tratamento de envelhecimento com temperaturas mais elevadas que as do processo de solda. Estas propriedades mecânicas são adquiridas em ligas cobre-berílio, cobre-cromo, cobre-cádmio, cobre-cromo-zircônio, etc.

As classes mais utilizadas segundo o manual da RWMA (2003) na fabricação de eletrodos de solda por resistência são as classes de 1 a 3 do Grupo A, conforme segue:

- classe 1: composição química de 1% cádmio e o 99% cobre, sem tratamento térmico. Não possui vantagem nenhuma em relação ao cobre fundido não ligado. A resistência mecânica se dá através da conformação a frio, obtendo

uma resistência a tração mínima de 414 N/mm², com 13% de alongamento e 65 HRB de dureza. A condutibilidade elétrica é alta, na faixa de 80% IACS, assim como térmica. Recomenda-se para eletrodos que soldam aços baixo carbono, com ou sem revestimento de estanho, zinco e cromo. Não ferrosos também podem ser soldados, como latão, bronze, alumínio, magnésio e suas ligas. Solda ponto e costura;

- classe 2: composição química de 0,8% cromo e o 99,2% cobre, é tratado termicamente. Possui melhores propriedades mecânicas ao ser tratado termicamente aliado à conformação a frio, obtendo uma resistência a tração mínima de 448 N/mm², com 13% de alongamento e 75 HRB de dureza. A condutibilidade térmica e a elétrica são menores que a Classe 1, na faixa de 75% IACS (condutibilidade elétrica), assim como térmica. Material bem comum e bastante utilizado na soldagem de aços baixa liga, baixo carbono e inoxidáveis;
- classe 3: composição química de 0,5% berílio; 1,0% níquel (pode ser excluído); 1,0% cobalto e 97,5% (ou restante) de cobre, é tratado termicamente, possui melhores propriedades mecânicas em relação aos anteriores, obtendo uma resistência a tração mínima de 690 N/mm², com 9% de alongamento e 90 HRB de dureza. A condutibilidade elétrica é menor, na faixa de 45% IACS. Esta liga de cobre apresenta alta resistência ao desgaste, comumente utilizado onde há grandes pressões e altas resistências elétricas, nos casos de soldagem de aços ao carbono, com grandes espessuras, aços ligados ao inox e quando a temperatura de trabalho é muito alta.

Em aplicações mais severas de soldagem, com elevadas pressões, altas temperaturas e tempos, utilizam-se algumas classes de cobre-tungstênio, produzidos a partir da metalurgia do pó. Suas propriedades elétricas e mecânicas dependem da quantidade de cobre e tungstênio presente na composição (RWMA, 2003; WEINER, 1992).

As classes mais usuais são:

- classe 10 – ligas cobre-tungstênio, com ponto de fusão elevado, são utilizadas em revestimento de soldagem por ponto, onde se faz necessária a combinação entre dureza, característica encontrada no tungstênio e elevada condutibilidade térmica e elétrica, propriedades do cobre;

- classe 11 – ligas mais resistentes ao desgaste (mais duras) que as ligas da classe 10, porém possuem menos condutibilidade elétrica e térmica, são ligas com 8% de tungstênio e 42% de cobre, indicadas para soldagem de aço inoxidável (ligas ferrosas com elevada resistência elétrica);
- classe 12 – muito similar às ligas anteriores, no entanto, aumentam as propriedades mecânicas e diminuem as propriedades elétricas;
- classes 13 e 14 – na classe 13, os eletrodos são fabricados a partir do tungstênio puro e na classe 14, de molibdênio puro, utilizadas nas mais severas condições, onde os eletrodos são muito afetados pelo desgaste (não são utilizados para soldagem de aços de baixo teor de carbono).

Marques (2009), explica que na solda por resistência os eletrodos são substituídos com uma certa frequência devido ao desgaste das suas superfícies que tem contato direto com a solda. Este processo de soldagem não utiliza consumíveis, portanto, o desgaste se dá diretamente na região peça/solda.

2.3 Propriedades dos materiais

Quando se deseja selecionar um material para um determinado projeto, é necessário obter uma boa relação custo/benefício, precisa ter bom desempenho e por conta disso, o material precisa ser selecionado de forma a satisfazer as funções desejadas no projeto, ou seja, as propriedades termomecânicas do material são importantes a fim de obter sucesso na função desejada (ASHBY, 2005).

Dentre as propriedades, pode-se destacar aquelas que se aplicam às forças externas ou a deformação, definidas propriedades mecânicas; as de caráter elétrico ou eletromagnético, denominadas propriedades elétricas; casos de propriedades térmicas, onde o calor é aplicado externamente; propriedades magnéticas, onde um campo magnético é aplicado externamente; além de óticas e químicas, onde dependem da luz e dos agentes químicos que são aplicados externamente. As propriedades físicas podem ser de acordo com o estado da matéria (sólido, líquido, gasoso ou plasma) ou densidade e volume específico (MESSLER 2014).

Ainda conforme Ashby (2005), os materiais para projeto são classificados em cinco grandes grupos: metais, cerâmicos, polímeros, vidros e compósitos, sendo selecionados de acordo com a aplicação requerida, visto que apresentam

propriedades específicas. Cada grupo de materiais, tem suas características em comum, como propriedades semelhantes, processos de fabricação equivalente e finalmente aplicações similares. Os metais como o cobre, por exemplo, foco deste trabalho, são materiais que possuem módulos relativamente elevados, em sua forma natural (pura), além de ser facilmente deformados. Os cerâmicos, também possuem elevados módulos, no entanto são frágeis (quebradiços), por terem baixas concentrações de tensões.

2.3.1 Propriedades mecânicas

Os metais em geral, possuem uma enorme variação de suas propriedades mecânicas, de acordo com o tratamento ao qual são submetidos (mecânico, térmico ou superficial). Cada aplicação determinará suas propriedades desejadas, ou seja, a definição do tipo de material e seu tratamento adequado, resultará em propriedades bem definidas para satisfazer a função desejada no projeto (SOUZA, 1982).

Para o cobre puro, que contém cerca de 99,9% de cobre e 0,04% de oxigênio, de acordo com o tipo de deformação sofrida, Souza (1982) comenta que o limite de resistência (σ_r) pode variar de 20 a 45 kgf/mm² e o limite de escoamento (σ_e) de 7 a 30 kgf/mm², o alongamento entre 4 e 55% e a dureza Rockwell entre 40 e 90 na escala F. Para os valores de alongamento mais baixos, foram considerados cobres extraduros.

As propriedades mecânicas são medidas através de ensaios e experimentos em laboratório, reproduzindo o mais próximo possível das condições de projeto. Os ensaios são executados através de carregamentos de tração, compressão ou cisalhamento. Nos ensaios de tração os corpos de prova são submetidos à cargas axiais de tração que são aumentadas gradativamente, partindo da deformação até sua ruptura. Nos ensaios de compressão, o carregamento é feito de maneira semelhante ao ensaio de tração, no entanto a força é compressiva e o corpo de prova se contrai. Em ambos os ensaios, o que se procura identificar são os valores de tensão (σ) e deformação (ϵ) do material. Nos ensaios de cisalhamento, uma carga é aplicada na direção paralela às faces do corpo de prova, e este ensaio mede a tensão cisalhante (τ). Nos ensaios de torção uma das extremidades do corpo de prova é fixa e a outra móvel, carregada através de uma força de torque, e também é medida pela tensão de cisalhamento (τ) (CALLISTER, 2007; ASKELAND 2014).

Callister (2007) e Askeland (2014) ainda descrevem que quando uma estrutura é carregada, ocorre um alongamento ou deformação, dependendo da magnitude da força aplicada. Em casos de carregamentos relativamente baixos, a tensão e deformação acabam sendo proporcionais e, portanto, ocorre apenas uma deformação elástica, pois o material quando submetido a carga alonga-se, e após o alívio da carga o mesmo retorna a sua forma original. Quando a carga ultrapassa o limite elástico, aparecem as propriedades de tração que são denominadas escoamento e limite de escoamento. O escoamento ocorre quando a tensão é excessiva e ultrapassa o limite elástico, iniciando a fase plástica da deformação.

Além das propriedades já citadas, os metais ainda possuem propriedades importantes como *Ductilidade* que é a capacidade de suportar a deformação plástica até sua fratura, a *Resiliência*, que é a capacidade de absorção de energia durante a deformação elástica, seguido da remoção da carga aplicada e recuperação da energia. E a *Tenacidade*, que é a capacidade de absorção de energia até sua ruptura (CALLISTER, 2007; ASKELAND 2014).

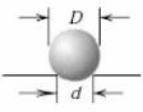
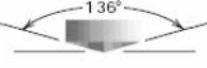
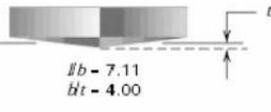
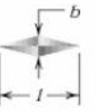
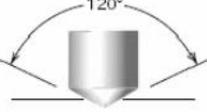
Outra importante propriedade mecânica dos materiais e que mais interessa para o estudo em questão, é a dureza, que é um método de medição da resistência de um material, através de uma pequena deformação plástica. O ensaio de dureza é o mais frequente ensaio utilizado em componentes/peças mecânicas devido à sua praticidade e baixo custo, além de não ser um ensaio destrutivo. Além disso, o limite de resistência a tração de um produto pode ser estimado através do ensaio de dureza (CALLISTER, 2007).

Souza (1982) diz que o conceito de dureza é diferente dependendo da área de atuação profissional. Para um metalúrgico, a dureza é a resistência à deformação da fase plástica permanente, já para o engenheiro mecânico, a dureza é conceituada como a resistência à penetração de um metal duro no outro. O projetista considera dureza como uma base de medida para a resistência de um material, assim como informações de tratamento térmico e mecânico, para mensurar os mecanismos de desgaste. O técnico de usinagem, confere dureza para mensurar a resistência ao corte do metal, no desbaste ou acabamento de uma peça em trabalho.

Várias técnicas para execução do ensaio de dureza são conhecidas, como: Rockwell, Brinell, Knoop e Vickers. Segundo Callister (2007), o método Rockwell é o mais utilizado por ser muito versátil, podem ser utilizadas várias escalas assim como diversos penetradores e cargas, permitindo ensaios de todos os metais e ligas, desde

os mais macios até os mais duros. No método Brinell, as cargas são maiores, e apenas utiliza-se um modelo de indentador em formato esférico de 10 mm de diâmetro, a medida se dá através da calota formada e posteriormente convertida ao número Brinell. Os métodos Vickers e Knoop, utilizam indentadores em formato de pirâmide de diamante e são mais usuais para mensurar microdureza, por isso a superfície do metal ensaiado deve ser rigorosamente preparada, pois a marca do penetrador é tão pequena que deve ser visualizada através de um microscópio. O resultado se dá através da dimensão de suas diagonais. Pode ser visualizado na Figura 9, os diversos métodos de ensaio de dureza, assim como seus possíveis penetradores e cargas.

Figura 9 – Tipos de ensaio de dureza e respectivos penetradores

Ensaio	Penetrador	Forma de Impressão		Carga	Fórmula para o Índice de Dureza
		Vista Lateral	Vista Superior		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> ⎧ Diamond cone ⎧ 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres 	 	 	<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 100 kg 150 kg 15 kg 30 kg 45 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Rockwell Superficial Rockwell

Fonte: Adaptado de Callister (2007, pg. 116).

Segundo Souza (1982) a dureza por penetração Brinell (HB), é o tipo mais utilizado na engenharia, as cargas são elevadas e alcançam os 3000 kgf. A carga pode ser diminuída quando a impressão resultar em uma calota muito profunda, conseqüentemente o tamanho da esfera também deve ser alterado, sempre obedecendo os critérios para o ensaio correto.

Shigley et al (2005) define dureza como a resistência de um material a penetração de uma ferramenta em formato de ponta, além disso fala de forma sucinta sobre os dois métodos de medição mais utilizados.

A norma E18 – 15 da ASTM é onde os ensaios de dureza Rockwell são descritos. Este ensaio é muito utilizado pois o equipamento é simples e fácil de ser operado, além disso o próprio ensaio é de fácil execução, por este motivo, será o ensaio utilizado neste trabalho. O resultado da medida no ensaio Rockwell se dá diretamente no mostrador do equipamento e as durezas são classificadas em escalas A, B e C, com respectivas cargas principais de 60, 100 ou 150 kg. Nas cargas de 150 kg, que são relacionadas a escala C, utiliza-se um indentador de diamante em formato de ponta com ângulo de 120°. A medida de dureza é relativa, portanto, um valor qualquer de dureza só é válido se comparado a uma medição de dureza de mesma escala. Segundo Souza (1982), a dureza HRB (Dureza Rockwell na escala B) é utilizada para medição de dureza em aços moles, ferro maleável, ligas de alumínio e também ligas de cobre que será o material motivo deste trabalho.

A dureza Brinell, também muito empregada na engenharia, faz o uso de um indentador em formato de esfera e o resultado se dá através do valor da carga aplicada, dividido pela área demarcada pelo indentador, na superfície da peça, utiliza como referência a norma E10 – 15 da ASTM. Este modelo de ensaio é mais demorado, pois demanda tempo para lançamento dos dados coletados, por isso não será utilizado neste estudo. Ambos os ensaios estão diretamente relacionados com a resistência à tração do material, portanto podem ser medidos um a um, durante sua fabricação, se desejável, sem a necessidade de um ensaio de tração por exemplo, que é mais complexo (SHIGLEY et al 2005).

Para cada escala, segundo Callister (2007), a variação da dureza pode ser até 130, embora, conforme os valores ultrapassem de 100 ou fiquem abaixo de 20, indiferentemente da escala utilizada, estas medidas constam como imprecisas. Nestes casos, é melhor utilizar a próxima escala, ou a anterior, de acordo com a medida de dureza encontrada.

2.3.2 Propriedades elétricas

Segundo Callister (2007), uma importante propriedade elétrica de um material sólido é a facilidade em que este transmite uma determinada corrente elétrica (I). A lei

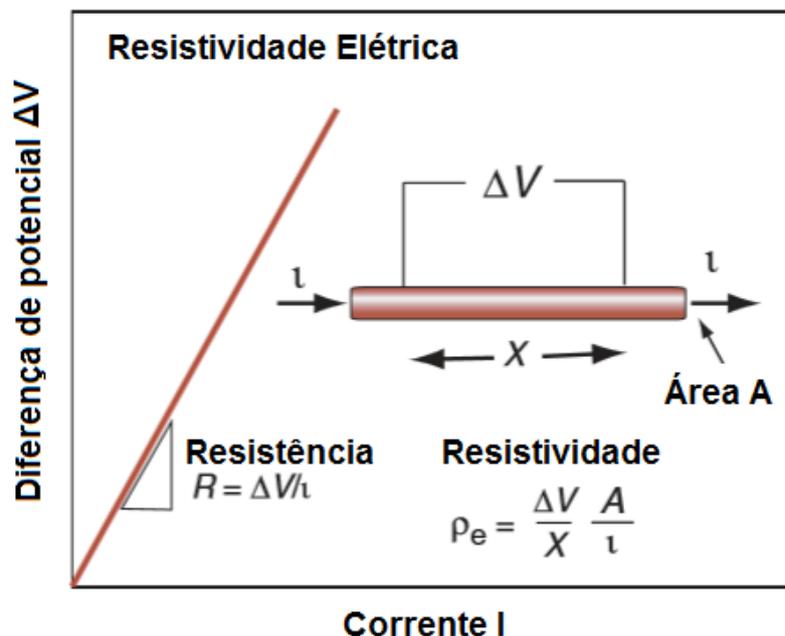
de Ohm faz relação com a corrente elétrica (também conhecida como taxa de passagem de cargas ao longo do tempo) e à voltagem aplicada (V). O resultado desta relação é a resistência (R) com que o material deixa a corrente elétrica passar.

Ashby (2005) comenta sobre a resistividade elétrica (ρ), que é a resistência de um determinado material medido, através da diferença de potencial unitário entre suas faces. Messler (2014) complementa que a resistividade é uma medida do impedimento que um material apresenta à condução dos elétrons, na forma de corrente elétrica. O valor de ρ geralmente é necessário ser alto para um material isolante.

Callister (2007), complementa que a resistividade elétrica depende da resistência, a área da secção transversal medida e a distância entre os pontos de contato.

Na Figura 10 pode ser verificado como é calculada a resistividade elétrica, dado fundamental para classificar outra importante propriedade elétrica de um material, que é a condutividade elétrica (σ).

Figura 10 – Método de medição da resistividade elétrica



Fonte: Adaptado de Ashby (2005, pg. 41).

Após a medição da resistividade a condutividade elétrica pode ser calculada através da relação inversa entre a resistividade e a condutividade elétrica, ou seja,

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

A condutividade elétrica é a forma de medir a capacidade que um material possui em conduzir a eletricidade, utilizando elétrons em metais e elétrons em semicondutores. É muito importante onde uma corrente elétrica precisa circular entre um eletrodo e outro por exemplo, ou em casos de semicondutores onde o campo elétrico ou eletromagnético precisa ser isolado (proteção Faraday) (MESSLER, 2014).

O Quadro 1 representa uma série de metais e suas respectivas condutividades elétricas. Importante destacar o valor da grandeza do cobre, que é o objeto de estudo deste trabalho.

Quadro 1 – Condutividades elétricas para alguns metais à temperatura ambiente

<i>Metal</i>	<i>Condutividade Elétrica</i> [$(\Omega\cdot m)^{-1}$]
Prata	$6,8 \times 10^7$
Cobre	$6,0 \times 10^7$
Ouro	$4,3 \times 10^7$
Alumínio	$3,8 \times 10^7$
Latão (70 Cu–30 Zn)	$1,6 \times 10^7$
Ferro	$1,0 \times 10^7$
Platina	$0,94 \times 10^7$
Aço-carbono	$0,6 \times 10^7$
Aço inoxidável	$0,2 \times 10^7$

Fonte: Adaptado de Callister (2007, pg. 496).

2.3.3 Propriedades térmicas

Ashby (2005) define duas temperaturas mais importantes no projeto de engenharia, que são a temperatura máxima de serviço e a temperatura mínima de serviço (ambas medidas em K ou °C). A primeira diz respeito à máxima temperatura que o material pode atingir sem que haja alterações significativas nas suas propriedades (oxidação, mudança na composição química ou fluência). A segunda diz respeito à temperatura mínima que o material pode sofrer, evitando que se torne frágil e inseguro ao uso.

Messler (2014) explica que o ponto de fusão é importante nos materiais cristalinos, pois é a temperatura na qual o material muda de fase, ou seja, do estado sólido para líquido. Esta temperatura diz respeito à limites de trabalho para determinada aplicação, onde ligas podem sofrer recristalização, ou até amolecimento (fusão).

A condutividade térmica (k) é a taxa em que o calor é conduzido por um material sólido sem alteração da temperatura com o passar do tempo. O fluxo de calor é calculado através da lei de Fourier, e é representado pela letra q , (ASHBY, 2005).

A transferência de calor de uma região de alta temperatura para outra de baixa temperatura é designada condução térmica. Na transferência de calor que acontece em regime estacionário, a condução térmica é proporcional à variação da temperatura na direção do deslocamento, esta constante de proporcionalidade é denominada condutividade térmica. Nos metais puros, sólidos, a condutividade térmica é alta, em virtude da ação dos elétrons livres, portanto o calor é transferido de forma mais eficiente em virtude dessa concentração de elétrons e por isso a transferência de calor se dá de maneira mais fácil, ao contrário das cerâmicas e polímeros por exemplo que possuem baixa concentração de elétrons livres e por isso são maus condutores térmicos (CALLISTER, 2007).

Messler (2014) de outra forma, dita que a condutividade térmica é a medida da facilidade ou dificuldade em que o calor conduz em um material sólido. Valores altos desta grandeza são favorecidos onde é necessária a dissipação do calor (para mover ou remover). Para materiais isolantes, o valor de k deve ser baixo, bloqueando a passagem do calor. O autor ainda fala sobre o calor específico (C_p), que é uma medida a fim de identificar se um material tem boa capacidade de armazenar calor ou não. É medido através do calor que um sólido absorve, antes que sua temperatura aumente 1 grau (normalmente medido em K ou °C).

Pode-se verificar no Quadro 2 as principais propriedades térmicas de alguns materiais, destacando a diferença dos valores da condutividade térmica dos metais e das cerâmicas, conforme citado acima.

Quadro 2 – Propriedades térmicas de alguns metais e cerâmicas

<i>Material</i>	c_p (J/kg-K) ^a	α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m-K) ^c	L [Ω-W/(K) ² × 10 ⁻⁸]
<i>Metais</i>				
Alumínio	900	23,6	247	2,20
Cobre	386	17,0	398	2,25
Ouro	128	14,2	315	2,50
Ferro	448	11,8	80	2,71
Níquel	443	13,3	90	2,08
Prata	235	19,7	428	2,13
Tungstênio	138	4,5	178	3,20
Aço 1025	486	12,0	51,9	—
Aço inoxidável 316	502	16,0	15,9	—
Latão (70Cu-30Zn)	375	20,0	120	—
<i>Cerâmicas</i>				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7,6	39	—
Magnésia (MgO)	940	13,5 ^d	37,7	—
Espinélio (MgAl ₂ O ₄)	790	7,6 ^d	15,0 ^e	—
Sílica fundida (SiO ₂)	740	0,4	1,4	—
Vidro de cal de soda	840	9,0	1,7	—
Vidro borossilicato (Pyrex)	850	3,3	1,4	—

Fonte: Adaptado de Callister (2007, pg. 533).

2.4 Caracterização de materiais

De acordo com Messler (2014), os engenheiros manipulam um mundo físico onde os objetos são construídos com materiais de diversas classes e subclasses, isto posto, são encarregados de entender a essência e os fundamentos, assim como propriedades destes materiais, a fim de tornar a vida do homem melhor e mais segura.

Ao realizar uma desmontagem de engenharia reversa, uma etapa sucessora ou predecessora da identificação das partes, funções e propósitos de cada detalhe do conjunto é fazer a identificação do material, sua caracterização é feita através de análise observatória e laboratorial.

A identificação por observação começa com o tipo, ou classe do material, por exemplo um metal ou liga metálica, cerâmica, polímero, elastômero, vidro ou um material híbrido (compósito). Particularmente para os metais esta identificação por observação é mais fácil, a distinção pode ser feita através de modelos fundamentais como aparência (utilizando a visão), o tato (utilizando o toque) e som (pela audição). Os metais e suas ligas devem estar em suas formas naturais, sem tintas ou quaisquer revestimentos, caso tenham, precisam ser raspados. Pela aparência visual podem ser identificados através do seu brilho, apesar de serem opacos devido a oxidação, basta

riscá-los com um objeto pontiagudo ou lima por exemplo para realçar a característica brilhante que os contêm. Através do toque, podem ser identificados pela sua densidade, metais costumam ser mais densos que polímeros por exemplo, além disso, com o toque, é possível verificar uma certa frieza nos metais, em comparação com outras classes de materiais, isto ocorre pois os metais ligeiramente possuem maior condutividade térmica do que quaisquer outros materiais de engenharia. Por fim, os metais emitem um determinado som ao serem atingidos por outro objeto de metal ou uma rocha por exemplo, pode-se dizer que é percebido um som metálico. (MESSLER, 2014).

Wang (2011) reforça que as características coletadas de um material, devem ser testadas e verificadas previamente, antes deste ser considerado igual à especificação do projeto OEM. O que geralmente acontece na prática da engenharia reversa, é que apenas algumas características são testadas e comparadas, pois nem todas as propriedades do material fazem parte dos aspectos críticos no que se refere a funcionalidade da peça.

Depois da identificação por observação, com uma possível ideia da classe do material ou subclasse do metal por exemplo, pode-se partir para a análise laboratorial, que será abordado nos próximos capítulos.

2.4.1 Microscopia óptica

Segundo Messler (2014), um exame metalográfico utilizando um microscópio óptico oferece muitas informações que um bom engenheiro precisa para caracterizar a maior parte dos metais ou outras ligas.

A microestrutura de uma liga revela um histórico de tratamento térmico e o caminho do processo de fabricação, além de evidenciar como a liga foi fabricada. As características coletadas em uma análise microestrutural, vão além disso, e estão diretamente relacionadas às propriedades mecânicas de um material. A morfologia do grão manifesta a sua forma, tamanho, textura e configuração que o engloba (WANG, 2011).

Callister (2007) e Voort (1984) comentam que esta técnica exige uma preparação cuidadosa da superfície a ser analisada. A região escolhida precisa ser lixada e polida até atingir um bom acabamento, espelhado comentam. O método de preparação contempla o lixamento, com a utilização de uma sequência de lixas, a

partir das maiores granulações até as mais finas, e por fim um polimento com pós-abrasivos. Após a superfície estar totalmente lisa, a microestrutura pode ser revelada através de um ataque químico com reagente específico para cada metal. Com o ataque químico a microestrutura do material se destaca, facilitando a análise e destacando os contornos de grão e fases da amostra.

Para Colpaert (2008), a preparação das amostras no ensaio de metalografia é dividido em seis fases:

- escolha da região a ser analisada;
- preparação da superfície escolhida, deve ser plana e polida;
- verificação no microscópio antes do ataque, se a superfície não possui detalhes significativos;
- ataque da superfície selecionando um reagente adequado;
- examinar no microscópio e observar a microestrutura;
- fotografar e registrar a microestrutura revelada.

O autor ainda reforça a importância da planicidade da superfície do material, comenta que é fundamental evitar o arredondamento dos cantos no trabalho de acabamento, para eliminar quaisquer chances de interferência ou desvio da imagem refletida pelas lentes do microscópio.

2.4.2 Espectrometria óptica

O método de espectrometria por emissão óptica, faz a identificação e quantificação de elementos da liga analisada, basta uma pequena amostra de 5 a 10 mg de um material para a execução. O ensaio utiliza um feixe de laser ou arco elétrico, que é responsável por vaporizar a amostra e excitar os elétrons dos diversos átomos que a compõe, emitindo luz dos elétrons excitados que retornam ao seu estado fundamental. Cada comprimento de onda dos diversos sinais de luz revelados, fornecem uma única característica do elemento e através deste espectro, com dados de comprimento e intensidade das ondas, é possível identificar (calcular) os elementos presentes bem como sua composição (MESSLER, 2014).

Wang (2011) explica de maneira mais detalhada como a análise quantitativa e qualitativa é feita neste ensaio. A espectrometria de emissão óptica, é um dos métodos mais utilizados na análise elementar de produtos de engenharia reversa. Muitos

elementos podem ser medidos em caráter quantitativo, até partes por bilhão, usando este método.

Na análise espectrométrica, uma amostra líquida (solução) é vaporizada em um plasma acoplado indutivamente, este tem energia suficiente para quebrar as ligações químicas, liberando elementos e transformando em um estado gasoso para o espectro de emissão atômica. Nesta ação, os átomos são excitados e emitem radiação, o comprimento de onda da radiação é próprio do elemento que a emite, e a intensidade da radiação emitida, é proporcional à concentração do elemento da solução. O método de espectrometria óptica é utilizado tanto para identificar o número de elementos contidos na amostra, ou seja, caráter quantitativo e também a qualidade de cada um dos elementos (WANG, 2011).

3 METODOLOGIA

No presente capítulo, são abordados a classificação da pesquisa, os métodos e os materiais necessários a serem utilizados a fim de alcançar os objetivos propostos, conforme mencionado no Capítulo 1.

3.1 Classificação da pesquisa

A metodologia da pesquisa está dividida em três bases principais. Quanto à abordagem, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos técnicos.

3.1.1 Quanto ao modo de abordagem

Segundo Richardson (2012), define dois métodos para classificar uma pesquisa quanto ao modo de abordagem, as de âmbito quantitativo ou as de âmbito qualitativo. O método quantitativo, como já diz o próprio nome, é definido nas pesquisas onde faz-se o uso da quantificação dos dados coletados, ou seja, onde indicadores, números, percentuais, médias, desvio-padrão e demais dados estatísticos se fazem presentes. Para o método qualitativo, ao contrário do quantitativo, não faz-se o uso de nenhum dado estatístico, procura-se comprovar de forma teórico-empírica, a cientificidade do estudo.

Esta pesquisa está abordada tanto em caráter quantitativo como qualitativo. Onde faz-se o uso de grandezas e médias para quantificar uma medida de resistência a penetração de um indentedor sobre um material por exemplo, ou na quantificação de uma amostra quanto aos seus elementos químicos, em percentuais, pode-se dizer

que são dados quantificáveis. Já para dados qualitativos, pode-se definir resultados obtidos através de análises descritivas, de forma empírica como no resultado de uma imagem metalográfica, ou simplesmente de uma desmontagem de um conjunto de peças, como é o caso deste trabalho.

3.1.2 Quanto aos objetivos

Segundo Gil (2002), as pesquisas são classificadas em três grupos: Explicativas, exploratórias e descritivas.

As pesquisas exploratórias, como comenta o autor, são pesquisas que proporcionam maior proximidade com o problema, além do mais, o planejamento é bastante flexível e a maioria dos estudos envolvem levantamentos bibliográficos, portanto esta pesquisa está classificada como exploratória, pois tem o intuito de aprimorar ideias ou descobrir o propósito de como funciona e o que é imprescindível ao construir um anel central para uma roldana soldadora (aprimorar o conhecimento).

3.1.3 Quanto aos procedimentos técnicos

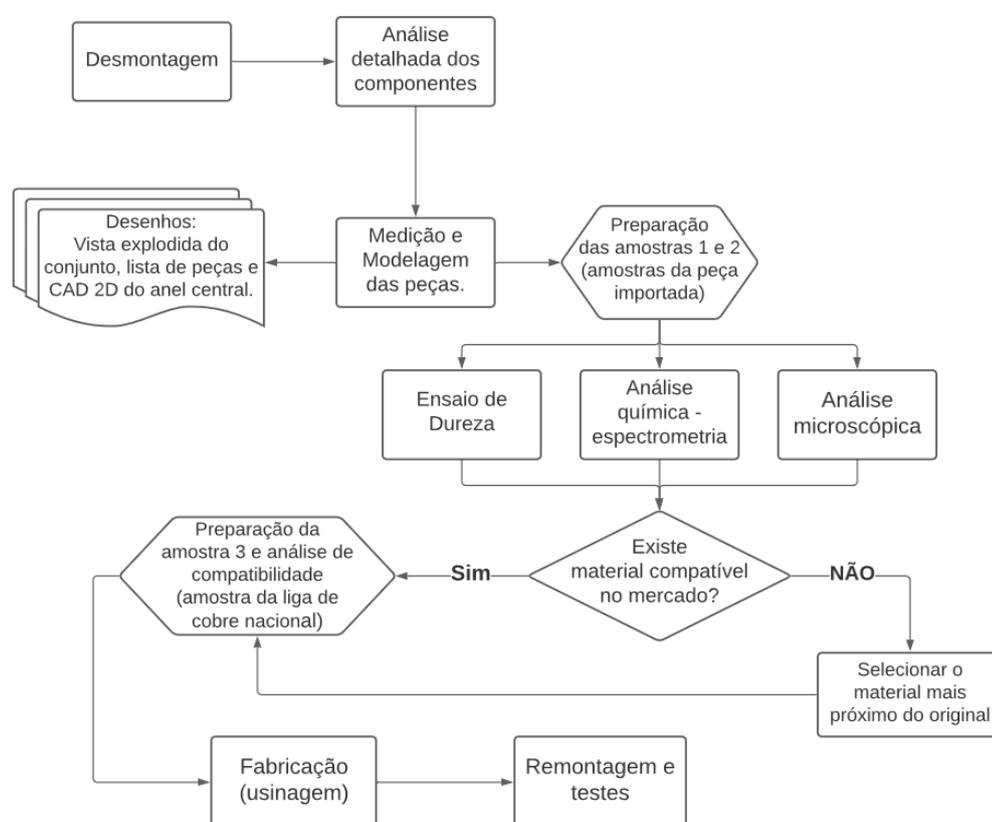
Gil (2002), define pesquisa de cunho bibliográfico como sendo desenvolvida sobretudo com materiais já elaborados, ou seja, basicamente livros e/ou artigos científicos. Grande parte de estudos exploratórios podem ser definidos como pesquisas bibliográficas, que é o caso deste trabalho. Inclusive esta pesquisa é caracterizada por ser bibliográfica e exploratória, pois faz uso de materiais científicos como livros, artigos e monografias e já foi classificada no subitem 3.1.2 como exploratória.

3.2 Métodos e processos

Os métodos foram divididos em quatro etapas principais e suas atividades complementares, conforme Figura 11. Na primeira etapa foi realizada a desmontagem da roldana de solda, posteriormente feita uma análise detalhada dos componentes, de maneira a verificar como são distribuídos e ajustados no conjunto. A segunda etapa contemplou a medição de todas as peças do conjunto, com enfoque no anel central da roldana, que é o objeto de estudo deste trabalho. Além da coleta dimensional, todos

os componentes foram desenhados, a fim de construir uma vista explodida, com lista de peças para documentação do projeto. A terceira etapa se deu na identificação e caracterização do material de estudo (elemento central da roldana), a fim de buscar um material idêntico no mercado nacional. Por fim, na quarta e última etapa a peça foi fabricada pelo processo de usinagem, a partir do material que foi identificado na etapa três, seguido da montagem do conjunto e testes pertinentes à operação de solda.

Figura 11 – Fluxograma das atividades apresentadas na metodologia



Fonte: Do autor (2021).

3.3 Desmontagem, medição e modelagem

A desmontagem foi executada utilizando ferramentas manuais simples: um alicate de anel elástico, um macete de poliuretano e um tucho de material polimérico utilizado para bater no eixo no momento da divisão das partes, evitando danificar o conjunto.

Na Figura 12, pode ser verificado em duas perspectivas similares o conjunto, onde se dispõe montado o anel central em sua forma original. Este item é o objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 12 – Roldana de solda original



Fonte: Do autor (2021).

Na etapa de medição, apenas o objeto de pesquisa foi levado em consideração para estudo da engenharia reversa, como já informado no Capítulo 1 deste trabalho, onde constam as limitações do estudo. As demais peças do conjunto foram medidas de forma contingente, com instrumentos de medição analógicos, apenas à caráter de modelagem, montagem e documentação do conjunto.

Na etapa da medição do anel central, motivo do estudo e interesse do desenvolvimento, houve a medição com instrumentos básicos, no entanto delicados e precisos, como paquímetro quadrimensional do tipo digital, 0 – 200 mm, marca Mitutoyo, modelo ABSOLUTE, resolução de 0,01 mm para medições gerais de diâmetros internos, externos e profundidades. Para os diâmetros internos que obrigatoriamente exigem maior precisão, foi utilizado um micrômetro interno de três pontas, 40 – 50 mm, marca Mitutoyo, modelo HOLTEST com resolução de 0,005 mm.

É importante salientar que o anel do respectivo estudo não passa de uma peça extremamente simples, simétrico e com geometria bem definida, por isso não necessitou de equipamentos sofisticados como, máquina de medição por coordenadas e scanner para a coleta de dados geométricos para superfícies livres.

Posterior à medição, foi feito o detalhamento de um esboço e utilizado o software de modelagem Solid Edge Classic ST20 da Siemens, versão 220.00.09.004 x64, para desenhar o anel central, bem como todos os demais itens da roldana.

A ação da modelagem em conjunto com o desmonte foi fundamental, pois assim se deu a identificação correta das partes, posições de montagem, orientação e sequência correta das partes, evitando desvios de informação no momento da remontagem do conjunto.

Posto isso, com todas as peças modeladas, foi criada uma vista explodida do conjunto completo do disco eletrodo, assim como a lista de peças, conforme já informado no subitem 2.1.1.

3.4 Identificação e caracterização do material

Na seguinte etapa, após a desmontagem do conjunto e com todos os elementos a parte, foi caracterizado o material do anel central da roldana, através de análise química por espectrometria, microscopia óptica para análise da microestrutura e ensaio de dureza Rockwell para não ferrosos.

As amostras foram identificadas em dois tipos para diferenciação dos ensaios e é possível visualizá-las na Figura 13.

Figura 13 – Preparação de amostras 1 e 2 para análise



Fonte: Do autor (2021).

A amostra número 1 trata-se de uma fração cortada do anel central da roldana original no sentido longitudinal, já a amostra número 2 é a fração transversal do anel central. As amostras são do mesmo material, apenas foram cortadas em sentidos distintos para comparativo de possíveis distorções devido ao processo de fabricação.

3.4.1 Ensaio de dureza

O equipamento para o ensaio de dureza utilizado foi um durômetro marca Industécnica modelo Fixo-Test tipo 81C, nº de série 151089, conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Durômetro de bancada modelo Fixo-Test



Fonte: Do autor (2020).

A norma consultada para a execução do ensaio de dureza foi a norma ASTM E18 – 15, que define os métodos para os ensaios de dureza Rockwell. Portanto segundo a norma utilizou-se um indentador tipo esfera, de 1,5875 mm (1/16 pol) e a carga maior aplicada foi de 100 kgf. Foram efetuadas cinco medições distintas e posteriormente calculado a média dos valores encontrados. A medida é direta e se dá

através da escala vermelha do durômetro. A escala utilizada para ligas de cobre é Rockwell B.

3.4.2 Análise química

Na etapa de identificação dos elementos químicos contidos no material da roldana, foi utilizado um equipamento cuja essência de funcionamento está na espectrometria óptica. Neste ensaio, o material foi acoplado no aparelho e, em um tempo entre 15 e 30 segundos, a composição foi listada automaticamente através de um relatório emitido pelo software da máquina. O equipamento é um espectrômetro de emissão óptica, marca Oxford Instruments, modelo Foundry-Master Pro, número de série 44R0031, como mostra a Figura 15. O instrumento é indicado para análise de materiais ferrosos como aços e ferros fundidos e não ferrosos como ligas de cobre e ligas de alumínio.

Figura 15 – Espectrômetro de emissão óptica



Fonte: Arquivo de laboratório externo (2020).

A espectrometria foi executada nas dependências de uma empresa terceira situada em um município da região metropolitana do RS que presta serviços laboratoriais nas áreas de ensaios mecânicos destrutivos dos mais variados tipos além de calibração de instrumentos. O laboratório da empresa é reconhecido segundo a norma NBR ISSO/IEC 17025.

O ensaio foi executado segundo a norma BS EN 15079 - *Copper and copper alloys analysis by spark optical emission spectrometry (S-OES)* sob condições controladas, temperatura de 23 °C (± 5 °C) e umidade relativa $\leq 70\%$.

3.4.3 Análise microestrutural

Esta etapa do trabalho foi executada nas dependências do laboratório de mecânica da Univates.

Primeiramente foram separadas as amostras 1 e 2, onde foram embutidas no baquelite com auxílio de uma pressão constante de 100 Bar e temperatura de 170 °C. O equipamento utilizado foi uma embutidora metalográfica marca TECLAGO modelo EM40D e as amostras embutidas podem ser visualizadas na Figura 16.

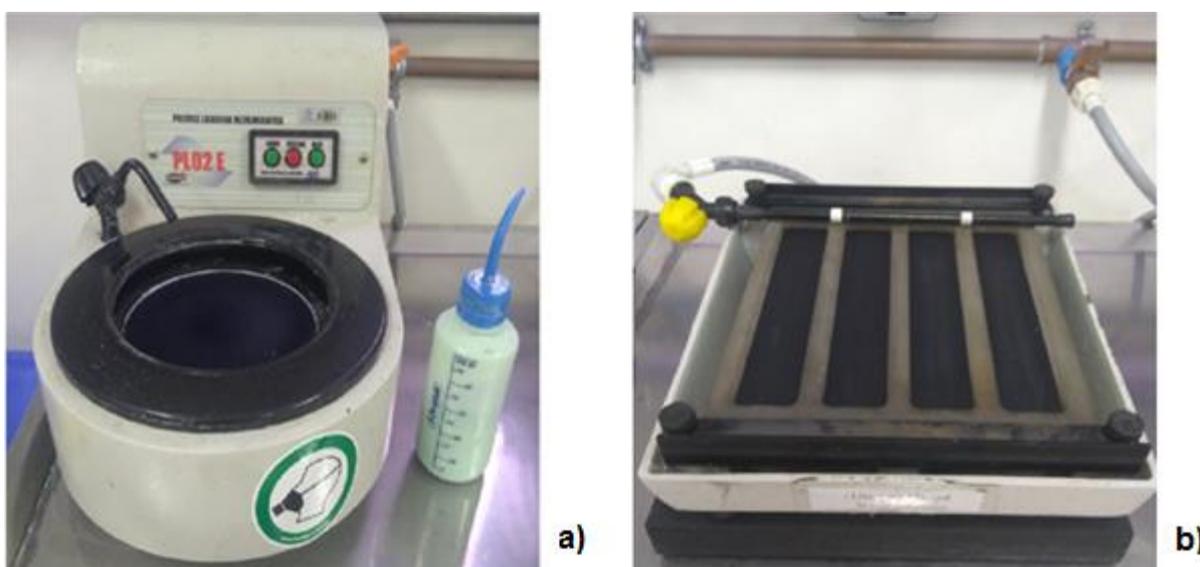
Figura 16 – Embutimento de amostras 1 e 2 no baquelite



Fonte: Do autor (2021).

Posteriormente, as amostras foram lixadas e polidas, a Figura 17 identifica uma base de lixamento e uma politriz (marca TECLAGO, modelo PL02E) para acabamento das amostras. É lembrado que o acabamento foi feito de maneira a eliminar todos os riscos resultantes do lixamento, por este motivo utilizou-se quatro classes granulométricas de lixas; 600, 800, 1000 e 1200, além do polimento final, com alumina 3%. Após o polimento, faz-se importante a visualização microscópica, antes do ataque químico, a fim de identificar possíveis detalhes no polimento conforme menciona Colpaert (2008).

Figura 17 – Politriz metalográfica (a) e base de lixamento (b)



Fonte: Arquivo Laboratório de Mecânica - Univates (2021).

Após a identificação do acabamento, a quarta e última etapa foi a revelação da microestrutura, assim como a análise microscópica. Neste momento, através do ataque químico, a estrutura foi revelada utilizando uma solução de um reagente constituído por Ácido Clorídrico (HCl) 30 ml e Percloroeto de Ferro III (FeCl₃), 5 g, para 100 ml de água. O reagente específico é utilizado para destacar contornos de grão e demais detalhes micrográficos das amostras de ligas de cobre. Posteriormente introduziu-se a amostra no microscópio ótico (FIGURA 18), equipamento da marca Pantec que contém uma câmera digital acoplada para captar a imagem ampliada e melhorar a resolução, além de facilitar a visualização da microestrutura revelada. A resolução da lente utilizada foi de 1000 X.

Figura 18 – Microscópio óptico com câmera acoplada



Fonte: Arquivo Laboratório de Mecânica - Univates (2021).

3.5 Seleção do material

Após os resultados da seção 3.2, foi necessário através de catálogos de fabricantes e normas específicas para a liga em questão, selecionar o material compatível e assim, fazer a aquisição e programar a fabricação do anel central da roldana.

É importante salientar, que no ato do recebimento do material nacional adquirido, todos os ensaios e análises mencionados na seção 3.2 foram reproduzidos novamente, a fim de garantir e comprovar a veracidade da liga de cobre conforme sua especificação. A liga recebida foi identificada como amostra 3 e trata-se do material adquirido no mercado interno.

3.6 Fabricação

A penúltima etapa do estudo portanto, foi a fabricação do anel central da roldana, onde através de um torno mecânico convencional, marca Nardini, modelo ND250 se deu a usinagem. Esse processo de fabricação foi executado com suporte e

insertos padronizados, através de um suporte esquerdo com inserto modelo TNMG 160404 TT8030 marca TAEGUTEC. A velocidade do eixo árvore foi de 800 RPM e o avanço no desbaste de $f = 0,1$ mm/rot com profundidade de corte $a_p = 0,5$ mm.

O acabamento externo, por se tratar de uma superfície em ângulo, foi manual, sem avanço automático, pois o deslocamento do castelo do torno se fez necessário.

O acabamento final, principalmente respectivos aos ajustes das tampas, que possuem maior precisão, foram aproximados e acabados com lixas de grão 600.

3.7 Montagem e testes

Por fim, a montagem seguiu rigorosamente as etapas especificadas no ato da desmontagem, a sequência indicada assim como a configuração e posicionamento de todas as partes. Para isto, foi utilizado o projeto, a vista explodida e a lista de peças, obedecendo o sequenciamento, evitando avarias em quaisquer componentes do conjunto. Um trabalho absolutamente delicado e rigoroso.

Assim que a roldana foi montada, introduziu-se na máquina de solda para os testes finais em produção. O equipamento foi uma eletrosoldadora com capacidade de 100 corpos por minuto. Os testes pertinentes às latas soldadas com o novo rolete, foram executados pelo controle de qualidade da própria empresa, conforme os procedimentos internos, estes não divulgados por motivos sigilosos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão os resultados da pesquisa, a qual levantou a possibilidade de construir a partir de matéria prima nacional, um elemento específico de uma roldana soldadora de embalagens de aerossol, constituído de liga de cobre, cujos resultados são apresentados e discutidos a seguir.

4.1 Desmontagem, medição e modelagem

A desmontagem se deu de forma organizada e delicada. Por se tratar de um objeto grandioso em sua função, procurou-se manter as peças distribuídas na sequência da montagem para execução da modelagem, assim como evitar danificá-las. Nas Figuras 19 e 20 pode ser observado o trabalho minucioso de desmonte e detalhamento das partes.

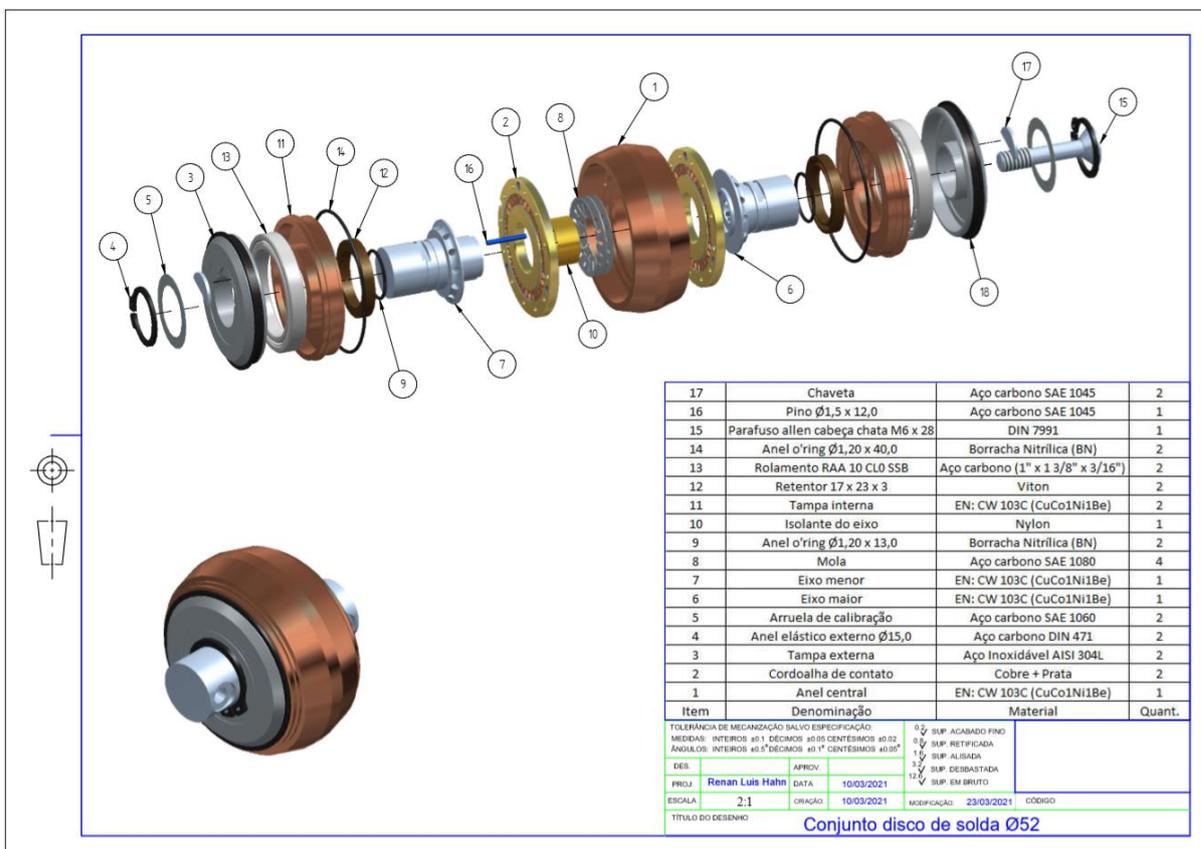
Figura 19 – Roldana de solda desmontada, com destaque para o objeto de estudo



Fonte: Do autor (2021).

A modelagem em 3D com vista explodida e lista de peças foi executada a fim de garantir uma sequência de montagem correta, devido ao grande número de partes do conjunto.

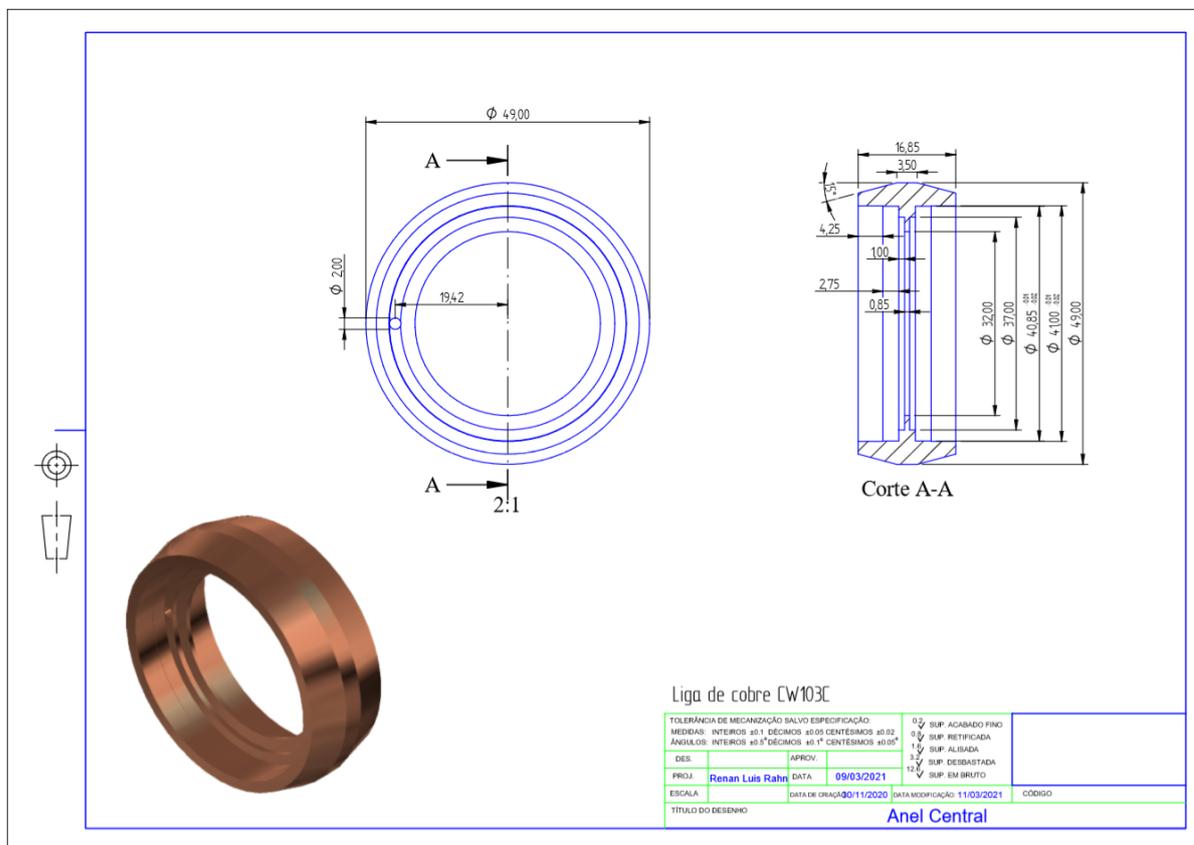
Figura 20 – Vista explodida e lista de peças



Fonte: Do autor (2021).

O desenho em 2D foi executado apenas no objeto do anel central, pois somente este foi construído, ademais peças foram utilizadas do conjunto já utilizado. A representação do desenho 2D do anel central pode ser conferida na Figura 21.

Figura 21 – Representação 2D do anel central da roldana



Fonte: Do autor (2021).

É possível verificar que nas dimensões de 40,85 mm e 41,0 mm do anel central foram especificadas dimensões com tolerâncias centesimais devido ao ajuste de montagem da tampa que é sob interferência, a fim de evitar vazamento de fluido lubrificante, fluido este que circula internamente a roldana de solda. Também foi indicado ajuste centesimal no apoio do elemento de contato elétrico, que é responsável por transferir a corrente elétrica de solda do eixo da roldana para o anel central. Este é fixo no anel central da roldana, mas móvel no apoio do seu eixo e, portanto, gira em torno dele.

4.2 Identificação e caracterização do material

Nesta etapa, as amostras 1 e 2 que se referem ao material importado, foram caracterizadas de acordo com sua dureza, composição química e microestrutura.

4.2.1 Ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza, foram executadas cinco medições para as amostras 1 e 2, posteriormente calculado a média aritmética dos resultados obtidos.

O Quadro 3 apresenta os resultados da dureza Rockwell B das amostras que foram medidas conforme especificação da norma ASTM E18 – 15.

Quadro 3 – Resultados de dureza para amostras 1 e 2

Ensaio de dureza (Rockwell B)		
Amostra \ Ensaio	Amostra 1 (longitudinal)	Amostra 2 (transversal)
1	102	99
2	101	100
3	101,5	95
4	102	96
5	102,5	92
Média	101,8	96,4
Desvio padrão	0,57	3,21

Fonte: Do autor (2021).

É possível verificar que no sentido longitudinal do anel central (amostra 1), os valores de dureza são maiores, em torno de 5%, se comparados ao sentido transversal (amostra 2), possivelmente por conta do processo de fabricação, que é fundido e conformado, podendo ocorrer pequenos desvios de dureza de acordo com o sentido de conformação do tarugo.

4.2.2 Análise química

Com os resultados da análise química, foi possível quantificar os elementos contidos na liga de cobre.

A imagem das amostras é representada a seguir, na Figura 22, onde é possível visualizar a região da superfície que sofreu a queima, resultado da emissão dos raios do espectrômetro.

Figura 22 – Representação das amostras 1 e 2 após análise química



Fonte: Do autor (2021).

No Quadro 4 são representadas as quantidades em percentual médio para cada elemento contido na liga de cobre de ambas as amostras.

Quadro 4 – Resultado da análise química para as amostras 1 e 2

Ensaio de análise química (valor médio (%))					
Elemento	Amostra 1 (longitudinal)	Amostra 2 (transversal)	Elemento	Amostra 1 (longitudinal)	Amostra 2 (transversal)
Cobre (Cu)	97,4333	97,4667	Enxofre (S)	0,0001	0,0001
Cobalto (Co)	0,9480	0,9193	Arsênio (As)	0,0066	0,0067
Níquel (Ni)	0,9090	0,9077	Prata (Ag)	0,0059	0,0073
Berílio (Be)	0,5543	0,5670	Bismuto (Bi)	0,0179	0,0147
Zinco (Zn)	0,0163	0,0016	Cádmio (Cd)	0,0008	0,0009
Chumbo (Pb)	0,0005	0,0091	Antimônio (Sb)	0,0048	0,0054
Estanho (Sn)	0,0005	0,0008	Zircônio (Zr)	0,0008	0,0009
Fósforo (P)	0,0005	0,0005	Boro (B)	0,0001	0,0001
Manganês (Mn)	0,0072	0,0103	Selênio (Se)	0,0071	0,0101
Ferro (Fe)	0,0005	0,0005	Telúrio (Te)	0,0001	0,0002
Silício (Si)	0,0145	0,0161	Titânio (Ti)	0,0015	0,0086
Magnésio (Mg)	0,0007	0,0007	Carbono (C)	0,0430	0,0471
Cromo (Cr)	0,0102	0,0099	Nióbio (Nb)	0,0430	0,0471
Alumínio (Al)	0,0028	0,0031			

Fonte: Do autor (2021).

É importante salientar que foram desconsiderados elementos que contenham percentuais abaixo de 0,02% nas amostras, pois o somatório de todos estes

elementos não foi superior a 0,2%, portanto representam muito pouco em relação aos demais elementos químicos presentes.

É evidente que os elementos mais importantes para caracterização das amostras são: cobre (Cu), cobalto (Co), níquel (Ni) e berílio (Be), que representam mais de 99,8% do total.

4.2.3 Análise metalográfica

A seguir são apresentadas as metalografias das amostras 1 e 2 respectivamente nas Figuras 23 e 24. São metalografias relativas à liga de cobre coletadas do anel central da roldana.

Figura 23 – Fotomicrografia da liga de cobre relativa à amostra 1 (ampliação 1000 X)



Fonte: Do autor (2021).

Figura 24 – Fotomicrografia da liga de cobre relativa à amostra 2 (ampliação 1000 X)



Fonte: Do autor (2021).

É possível perceber que ambas as imagens micrográficas possuem um arranjo similar dos grãos metalográficos. Os contornos de grão estão bem definidos e estão distribuídos de forma alongada, muito provavelmente devido ao mecanismo de endurecimento sofrido pela liga, o que faz com que ela tenha uma maior resistência mecânica.

O sentido de orientação das amostras coletadas não alterou o arranjo microestrutural, muito provavelmente devido ao método de produção da liga, por se tratar de uma liga fundida e posteriormente conformada.

4.3 Caracterização e aquisição

Segundo o manual da RWMA (2003), e a norma europeia BS EN 12420 (1999), de acordo com os resultados encontrados para a dureza, a análise da composição química e a metalografia, é possível caracterizar a liga como sendo uma liga alto-cobre, identificada como uma liga de cobre pertencente ao Grupo A, Classe 3, que são ligas utilizadas na fabricação de eletrodos de solda por resistência. Ainda, segundo o manual, este tipo de liga é tratado termicamente para aumento de sua resistência mecânica.

Weiner (1992), comenta que as ligas utilizadas para fabricação dos discos eletrodos precisam passar por mecanismos de endurecimento. Além dos processos mecânicos de endurecimento, forja e laminação comumente utilizados, passam por tratamentos térmicos de solubilização com resfriamento rápido, seguido de tratamento de envelhecimento com temperaturas superiores às utilizadas no processo de solda. Uma das ligas de cobre que pode adquirir estas propriedades é a liga cobre-berílio, que foi a liga caracterizada no presente estudo.

O manual da RWMA (2003) indica os percentuais de cada elemento químico constante na liga pertencente ao Grupo A, Classe 3, que são: 0,5% de berílio, 1,0% de níquel (pode ser excluído), 1,0% de cobalto e o restante de cobre (em torno de 97,5%). Além disso informa que esta liga possui uma dureza de 90 HRB.

Ainda assim, esta classificação é muito generalista. Portanto, de acordo com os resultados coletados na Tabela 10, resultantes da análise química, infere-se que a designação mais correta da liga, segundo uma norma mais específica é a liga CW103C, ou também conhecida como *CuCo1Ni1Be*, de acordo com a norma europeia, BS EN 1652: 1998 e BS EN 12420: 1999.

No Quadro 5 é possível visualizar a composição química da liga CW103C para comparativo com a liga analisada neste trabalho.

Quadro 5 – Relação de ligas alto cobre, com ênfase para a liga CW103C

Designação do material		Composição em % (m/m)												Densidade g/cm ³ aprox.
Símbolo	Número	Elemento	Cu	Be	Co	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Si	Zn	Outros Total	
CuBe2	CW101C	min.	Rem.	1,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,3
		max.	—	2,1	0,3	0,2	—	0,3	—	—	—	—	0,5	
CuCo1Ni1Be	CW103C	min.	Rem.	0,4	0,8	—	—	0,8	—	—	—	—	—	8,8
		max.	—	0,7	1,3	0,2	—	1,3	—	—	—	—	0,5	
CuCo2Be	CW104C	min.	Rem.	0,4	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	8,8
		max.	—	0,7	2,8	0,2	—	0,3	—	—	—	—	0,5	
CuNi2Be	CW110C	min.	Rem.	0,2	—	—	—	1,4	—	—	—	—	—	8,8
		max.	—	0,6	0,3	0,2	—	2,2	—	—	—	—	0,5	
CuNi2Si	CW111C	min.	Rem.	—	—	—	—	1,6	—	—	0,4	—	—	8,8
		max.	—	—	—	0,2	0,1	2,5	—	0,02	0,8	—	0,3	
CuZn0,5	CW119C	min.	Rem.	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1	—	8,9
		max.	—	—	—	—	—	—	0,02	—	—	1,0	0,1	

Fonte: Adaptado de BS EN 1652 (1998).

Feita a caracterização da liga de cobre, uma barra cilíndrica foi adquirida no mercado nacional de acordo com a seguinte especificação: 01 barra de cobre

CW103C, conforme norma BS EN 1652 e BS EN 12420, dureza maior ou igual a 90 HRB, dimensões da barra, Ø 55 x 500 mm.

Posto isso, e tão logo do recebimento da liga de cobre, os ensaios pertinentes foram realizados novamente, a fim de comprovar a especificação do material.

Os resultados para a dureza podem ser visualizados no Quadro 6. O Quadro 7 representa os resultados da análise química e a Figura 25 a metalografia do material recebido, específico da amostra 3.

Quadro 6 – Resultados de dureza para a amostra 3

Ensaio de dureza (Rockwell B)	
Ensaio \ Amostra	Amostra 3
1	90,5
2	92
3	91
4	90
5	92
Média	91,1
Desvio padrão	0,89

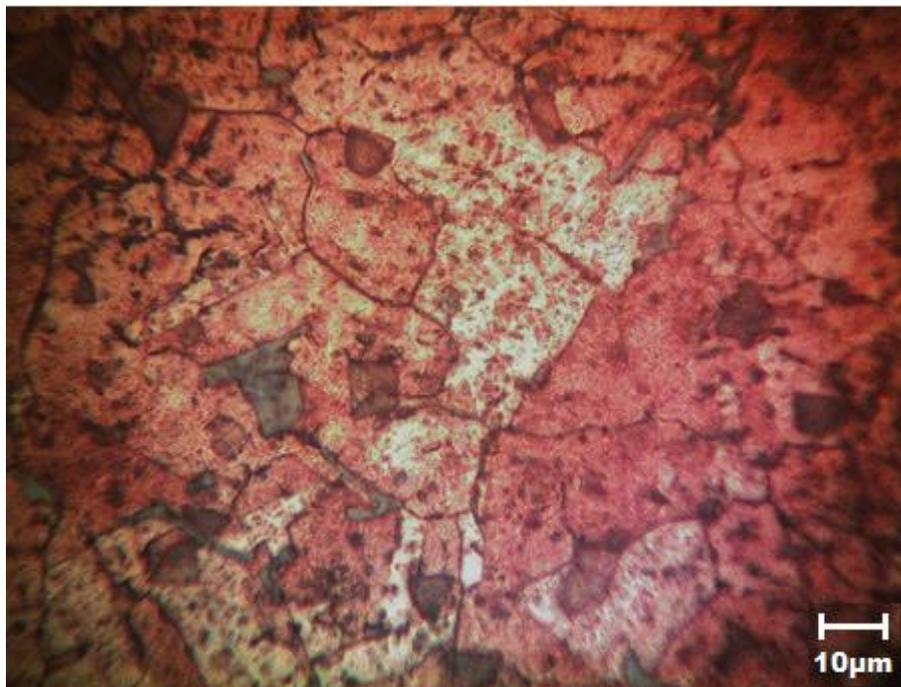
Fonte: Do autor (2021).

Quadro 7 – Resultado da análise química para a amostra 3

Ensaio de análise química (valor médio (%))			
Amostra \ Elemento	Amostra 3	Amostra \ Elemento	Amostra 3
Cobre (Cu)	97,2433	Fósforo (P)	0,0704
Cobalto (Co)	1,5067	Manganês (Mn)	0,0023
Níquel (Ni)	0,1473	Ferro (Fe)	0,0499
Berílio (Be)	0,5320	Silício (Si)	0,0590
Zinco (Zn)	0,0697	Cromo (Cr)	0,0871
Chumbo (Pb)	0,0281	Alumínio (Al)	0,0081
Estanho (Sn)	0,0341	Prata (Ag)	0,0032

Fonte: Do autor (2021).

Figura 25 – Fotomicrografia da liga de cobre relativa à amostra 3 (ampliação 1000 X)



Fonte: Do autor (2021).

De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que a dureza média da amostra 3, que foi de 91,1 HRB, ficou em torno de 10% abaixo da dureza em relação a amostra 1 e em torno de 5% no comparativo com a amostra 2. Apesar da diferença, está de acordo com a especificação, pois segundo o manual da RWMA (2003), define valores de dureza de 90 HRB para o tipo de liga de cobre CW103C, portanto, satisfatório.

Quanto a análise química, verifica-se que no resultado da amostra 3, os percentuais de cobre (Cu) e níquel (Ni) ficaram abaixo se comparados com as amostras 1 e 2. Para o cobalto (Co), o valor ficou acima. Mesmo com estas diferenças, todas as amostras constam dentro da especificação segundo as normas, BS EN 1652, BS EN 12420 e convergente ao manual da RWMA (2003).

No comparativo da micrografia da amostra 3, é possível evidenciar nitidamente os contornos de grão, a diferença é que não possuem um alongamento tão evidente como nas amostras 1 e 2, isso pode ter ocorrido devido ao processo de endurecimento (endurecimento por trabalho mecânico ou tratamento térmico). A dureza inferior pode comprovar essa inferência.

Apesar de tudo, pode ser considerado que o material da amostra adquirida para reprodução do anel central (amostra 3) é compatível com as amostras do fabricante

original (amostras 1 e 2), pois de acordo com Monteiro et al (1994), a morfologia de todas as amostras apresenta maclas térmicas, característico de processos de tratamento térmico. Ainda segundo os autores, constatam que em ligas alto cobre, em que a matriz predominante é cobre alfa, há pontos escuros que podem ser designados como beriletos, que são precipitados intermetálicos e são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica das ligas Cu-Ni-Be. Estes beriletos podem ser ricos em níquel.

Além disso, Monteiro et al (1994), faz um comparativo com ligas de cobre com diferentes percentuais de berílio, registram o aumento da dureza com o aumento dos teores de berílio, portanto, outro motivo pelo qual a amostra 3 registrou uma medida inferior para valores de dureza.

Ainda, é possível dizer que a rota de fabricação destas ligas é constituída de fundição, seguida de conformação (laminação ou forja) e tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento, etapa onde ocorre a formação dos precipitados (CALLISTER, 2007).

4.4 Fabricação

O processo de fabricação utilizado na confecção do anel central da roldana foi usinagem convencional. Embora houvessem dimensões rigorosas com determinada precisão, na casa de centésimos de milímetros, a usinagem convencional foi a melhor alternativa a ser executada.

Na Figura 26 é possível visualizar o elemento central do disco finalizado.

Figura 26 – Anel central da roldana, confeccionado pelo processo de usinagem



Fonte: Do autor (2021).

4.5 Montagem e testes finais

Posteriormente a fabricação do anel central, e de posse das peças sobressalentes da roldana, de forma organizada se deu a montagem do conjunto, fazendo o uso da vista explodida que também é resultado deste trabalho. O conjunto montado pode ser verificado na Figura 27, em três perspectivas distintas.

Figura 27 – Roldana de solda montada, desenvolvida com anel central nacionalizado



Fonte: Do autor (2021).

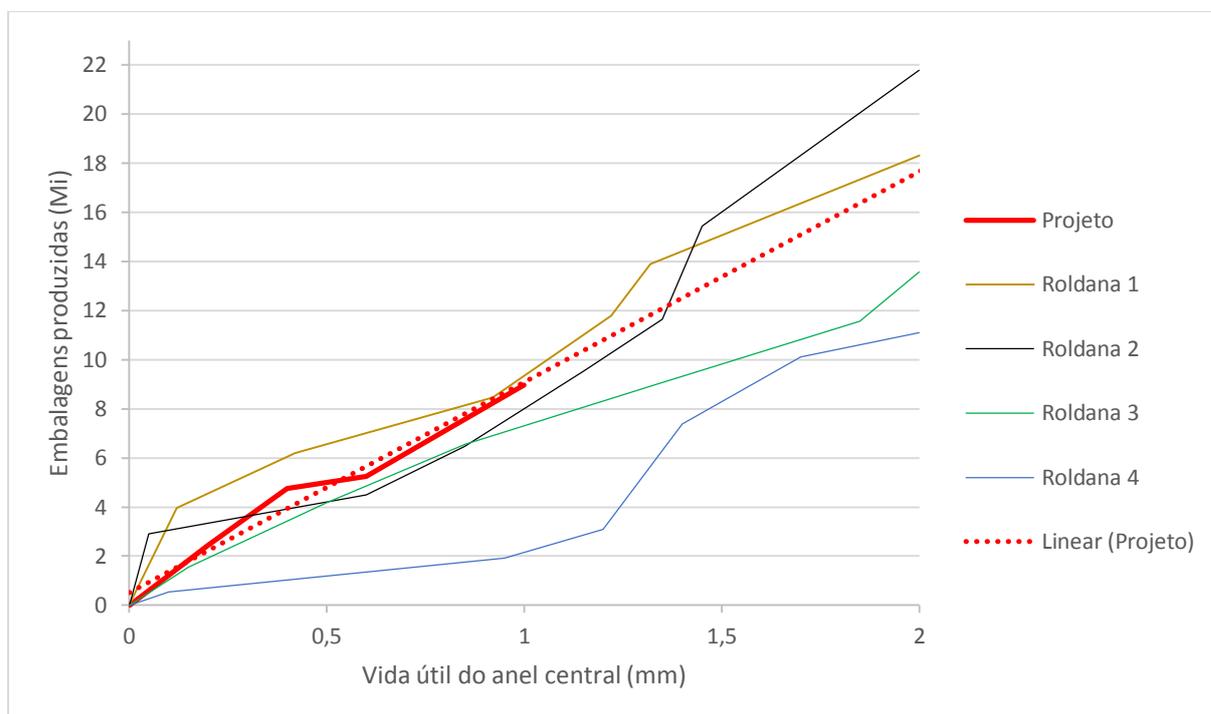
Após a montagem, a roldana foi introduzida no equipamento para testes em linha, ou seja, em condições reais de funcionamento. As primeiras embalagens soldadas foram satisfatórias e por se tratar de produção em linha, foram testadas junto ao controle de qualidade da fábrica, segundo procedimentos internos para a análise de resistência da solda, não mencionados no trabalho por questões de sigilo.

Os testes pertinentes a solda, foram todos satisfatórios, tendo o aval do setor de qualidade para liberação da produção em larga escala.

Além disso, é necessário comunicar que devido ao curto espaço de tempo para os testes em produção, não foi possível concluir o teste considerando a vida útil completa da roldana (2,0 mm), pois para isso, é necessário dispor de um período de tempo maior, em torno de um ano.

Nem por isso o teste foi desclassificado, mesmo em um curto espaço de tempo, notou-se grande satisfação com os resultados obtidos até o momento. Na Figura 28, é possível analisar o comparativo entre algumas peças registradas.

Figura 28 – Comparativo de produção das roldanas de solda



Fonte: Do autor (2021).

De acordo com o gráfico, é possível verificar que a roldana estudo deste trabalho foi utilizada até o momento 50% da sua capacidade total, nesta ocasião apresenta um número de embalagens produzidas de aproximadamente 8,96 milhões.

As demais roldanas identificadas de 1 à 4, são peças originais utilizadas anteriormente (registros internos da empresa), de acordo com seus registros de produção, a Roldana 1 foi a que obteve maior número de embalagens produzidas (aproximadamente 21,8 milhões) e a que menos produziu foi a Roldana 4, com apenas 11,1 milhões de embalagens soldadas.

Neste caso, é possível inclusive traçar uma linha de tendência (linha tracejada em evidência no gráfico da Figura 28), estimando uma produção aproximada de 18 milhões de embalagens, o que é um número muito bom comparando com as demais roldanas (apenas 17,5% menor que a roldana mais eficaz e aproximadamente 62% mais produtiva que a roldana menos eficaz). No Quadro 8 é possível visualizar as capacidades produtivas e o período de duração das últimas quatro roldanas de solda, visando o comparativo com a roldana do projeto.

Quadro 8 – Histórico de produção das últimas roldanas originais

Produção registrada nas últimas quatro roldanas (em milhões de embalagens) e período (em meses)		
Roldana 1	18,307	8,3
Roldana 2	21,800	11,7
Roldana 3	13,576	9,8
Roldana 4	11,101	8,1
Média	16,196	9,5
Desvio padrão	4,78	1,67

Fonte: Do autor (2021).

Conforme registros, a média das últimas quatro roldanas foi de 16,196 milhões de embalagens produzidas, isso equivale a 10% a menos do que se espera fazer com a roldana do projeto, portanto é um número satisfatório, tornando o estudo promissor. A durabilidade média é de 9,5 meses.

Considerando que a cada roldana nova adquirida, esta permite realizar duas reformas com substituição do anel central.

O fabricante da peça original pratica um preço de 50% do valor de uma nova para executar o serviço de reforma. Considerando que a roldana nova tem um custo aproximado de R\$ 50.000,00, pois como já mencionado, é um produto importado e o torna muito caro devido a conversão de moeda principalmente. Neste caso tem-se um custo de reparação de R\$ 25.000,00 para cada reforma, considerando a aquisição e mais duas reformas, tem-se um valor de R\$ 100.000,00 para a utilização completa da roldana.

Se optar por utilizar o método de construção e montagem do anel central citado neste trabalho, como uma alternativa de redução de custos, tem-se uma economia estimada de R\$ 47.000,00 para cada roldana nova adquirida, pois o custo total estimado para fabricação e montagem do anel central nacional gira em torno de R\$ 1.500,00 por peça.

Considerando que cada roldana possui uma durabilidade média de 9,5 meses por equipamento (registros dos apontamentos de substituição das roldanas), projeta-se uma economia anual de R\$ 20.000,00. A companhia possui quatro equipamentos similares, portanto podendo chegar a uma redução de custo de R\$ 80.000,00 ao ano.

Lembrando que a viabilidade econômica é sobre o estudo preliminar, ou seja, até onde é possível chegar em termos de produtividade, com a recuperação da roldana de solda dentro do mercado nacional.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados levantados neste trabalho, é possível inferir que a engenharia reversa acelera o processo de projeto de um determinado componente ou de um conjunto de peças, diferente do que ocorre em um projeto convencional. Mesmo assim, percebe-se que há uma série de etapas a serem cumpridas, como por exemplo, análise detalhada do produto ou conjunto, desmontagem, diversas análises e ensaios mecânicos pertinentes ao produto, caracterização do material, prototipagem e/ou fabricação e testes de funcionamento. O engenheiro executante necessita ter um conhecimento categórico do objeto a ser estudado, caso contrário, os resultados poderão ser comprometidos.

É importante salientar que nenhum tipo de estudo deste modelo trará resultados exatos, ainda mais se tratando de tecnologia importada. Cabe ao executante procurar entender e comparar da melhor forma possível os resultados encontrados, fazendo correlações com outros trabalhos similares e interpretação com normas específicas.

A consequência dos ensaios e análises executadas de forma correta, através de bons equipamentos e auxílio de laboratório externo para a execução da análise química, possibilitou que este trabalho fosse desenvolvido de maneira coerente.

Nos ensaios de dureza, percebeu-se uma variação de 5% a menos, comparando a amostra 2 com a amostra 1 (101,8 HRB para amostra 1), que foram coletadas da mesma liga de cobre, apenas em sentidos distintos, o que indica uma possível influência da anisotropia do material devido ao processo de fabricação, visto que sofreu endurecimento por trabalho mecânico e posteriormente, por tratamento térmico (precipitação).

O ensaio de dureza da amostra 3, por conseguinte, executado a partir do material adquirido no mercado nacional, registrou dureza ainda menor (5% em relação a amostra 2), indicando novamente influência do processo de fabricação sofrido na liga de cobre. Contudo, todas as amostras registraram valores acima do especificado, conforme RWMA (2003), que é superior a 90 HRB, portanto satisfatório.

Para os resultados da análise química, as amostras 1 e 2 obtiveram valores relativamente precisos, ficando exatamente dentro do que especifica a norma BS EN 12420 (1999). A amostra 3 obteve uma pequena variação para o elemento cobalto (Co), 0,2% a mais, possivelmente por distorções na preparação da amostra ou variação do próprio espectrômetro, o que não interfere nas características do material e suas funções.

Na comparação com o elemento berílio (Be), a amostra 3 também obteve valores inferiores às amostras 1 e 2, aproximadamente 0,02%, o que é uma variação muito pequena. Mesmo assim, acredita-se que há influência do elemento berílio na resistência mecânica da liga, pois segundo Monteiro et al. (1994), o berílio atua como mecanismo de endurecimento da liga de cobre, ou seja, quanto maior seu percentual, maior será a dureza do material.

Também é possível inferir que a dureza é influência dos precipitados de berílio, evidenciados nas fotomicrografias de todas as amostras. Estes precipitados intermetálicos são chamados de beriletos e são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica da liga e também da melhora da condutibilidade elétrica do material.

Portanto, de acordo com os ensaios realizados, foi possível identificar o material estudado como sendo uma liga de alto cobre, caracterizada como uma liga cobre-berílio, normatizada segundo BS EN 1652 (1998) e BS EN 12420 (1999).

É importante frisar que o tempo de vida médio de uma roldana (estima-se em torno de 9,5 meses) impossibilitou a finalização do teste de produtividade, pois o tempo foi curto. Este foi o inconveniente para satisfazer o estudo integralmente. Embora a produção registrada até o momento seja promissora (50% da vida útil), podem ocorrer problemas posteriormente, inviabilizando o projeto.

Mesmo assim, é evidente que a vida de uma roldana de solda depende de muitas variáveis e elas muitas vezes dificultam o estudo por completo da roldana (o elevado desvio padrão apresentado no Quadro 8 pode ser um indicativo desta afirmação). Portanto, assim como a matéria prima, principalmente o equipamento

deve estar em plenas condições para tal estudo, caso contrário o teste acaba sendo camuflado por outros problemas.

Por fim, pode-se inferir que o objetivo geral do presente trabalho foi consolidado em parte, ou seja, o anel central foi concluído com sucesso, produzindo uma quantidade satisfatória de embalagens no intervalo de tempo considerado, inclusive acima da média para o período (8,96 milhões de latas soldadas), comparado ao histórico de produção das quatro roldanas anteriores, viabilizando de forma preliminar o estudo e muito provavelmente, a transmissão para outros equipamentos equivalentes, podendo chegar a uma redução de custo de até R\$ 80.000,00 ao ano.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS. **Resistance Welder Manufacturers. RWMA:** Standing committee of the american welding society, AWS. 4th ed. Miami, Florida, USA: AWS, 2003.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS. **Welding handbook:** welding science and technology. 9th ed. Miami, Florida, USA: AWS, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E10 – 15:** Standard test method for brinell hardness of metallic materials. ASTM International, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E18 – 15.** Standard test method for rockwell hardness of metallic materials. ASTM International, 2015.

ASHBY, Michael F. **Materials selection in mechanical design.** 3th ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth Heinemann, 2005. *E-book*.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais;** elaboração da versão SI D. K. Bhattacharya; tradução Solange Aparecida Visconti; revisão técnica Daniel Rodrigo Leiva. 3. ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS DE AÇO - ABEAÇO. **Centro de aprendizagem – por que as latas?** São Paulo, SP: [2020?]. Disponível em: <http://www.abeaco.com.br/lataabeacotexto.html>. Acesso em: 05 out. 2020.

BRITISH STANDARD. **BS EN 1652:** Copper and copper alloys – Plate, sheet, strip and circles for general purposes. European Standard, 1998.

BRITISH STANDARD. **BS EN 12420:** Copper and copper alloys – Forgings. European Standard, 1999.

CALLISTER, Jr., Willian D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução; tradução Sérgio Murilo Stamile Soares M.Sc.; revisão técnica José Roberto Moraes d’Almeida, D.Sc. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2007.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**; revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. 4. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2008.

EUROPEAN AEROSOL FEDERATION. FEA. **European aerosol production 2019**. 2019. Disponível em: <https://www.aerosol.org/wp-content/uploads/2020/09/2019-FAE-European-Aerosol-Production-compressed.pdf>. Acesso em: 04 out. 2020.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2002.

GUPTA, Saikat D. et al. **Reverse engineering of rubber products: concepts, tools, and techniques**. Florida, USA: CRC Press, 2014. *E-book*.

INGLE, Katheryn. A. **Reverse engineering**. New York, USA: McGraw-Hill, 1994. *E-book*.

KHAN, Md. Ibrahim. **Welding science and technology**. Lucknow, Uttar Pradesh, India: New Age, 2007. *E-book*.

KHAN, W. Ahmed et al. **Functional reverse engineering of machine tools**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2019. *E-book*.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre, RS: editado pelo autor. 1996. *E-book*.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2009.

MESSLER, Robert W. **Reverse engineering**. mechanisms, structures, systems and materials. New York, USA: McGraw-Hill. 2014. *E-book*.

MONTEIRO, Waldemar A.; SILVEIRA, Marcilei A. G. da; JUNIOR, Osvaldo Júlio. Estudos em ligas Cu-Ni-Be para fins elétricos. **Revista Metalurgia e Materiais**. IV seminário sobre materiais magnéticos e elétricos ABM – 27-29 de abril de 1994; p. 440 – 444. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/6505/01843.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 de jun. 2021.

RAJA, V.; FERNANDES, K. J. **Reverse engineering: an industrial perspective**, London, United Kingdom: Springer, 2008. *E-book*.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2012.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica: tradução João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar**. 7. ed. Porto Alegre, RS: Bookman. 2005.

SOUZA, Adriano F. de; ULBRICH, Cristiane B. L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações**. São Paulo, SP: Artliber, 2009.

SOUZA, Sérgio A. de. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**; 5. ed. São Paulo. SP: Blucher, 1982.

VOORT, George F. Vander. **Metallography: principles and practice**. New York, USA: McGraw-Hill, 1984. *E-book*.

WAINER, Emílio. BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H. de. **Soldagem: processos e metalurgia**, 11ª reimpressão, São Paulo, SP: Blucher, 2019. *E-book*. Disponível em: <<https://www.univates.br/gnuteca>>. Acesso em: 28 set. 2020.

WANG, Wego. **Reverse engineering; technology of reinvention**. Florida, USA: CRC Press. 2011. *E-book*.

WEMAN, Klas. **Welding processes handbook**; 2nd ed. Stockholm, Sweden: Woodhead Publishing. 2012. *E-book*.

WONG, Reginald. **Mastering reverse engineering: re-engineer your ethical hacking skills**. Birmingham, United Kingdom: Packt. 2018. *E-book*.

ZHANG, Yu. Research into the engineering application of reverse engineering technology. **Jornal of materials processing technology**. Yunnan, China: v. 139, p. 472-475. Elsevier, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 05 out. 2020.