

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS
ENGENHARIA MECÂNICA**

WILIAN NASCIMENTO SILVA

**PROJETO CONCEITUAL DE UM MECANISMO PARA REALIZAÇÃO
DO PROCESSO BORE WELDING**

CONGONHAS, 01 DE JULHO DE 2018

WILIAN NASCIMENTO SILVA

**PROJETO CONCEITUAL DE UM MECANISMO PARA REALIZAÇÃO DO
PROCESSO BORE WELDING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. CONGONHAS, 2018.

Orientador: Marcelo Henrique Souza
Bomfim

Coorientador: Frank de Mello Liberato.

Coorientador: Camilla Gonçalves Castro

CONGONHAS, 2018

WILIAN NASCIMENTO SILVA

**PROJETO CONCEITUAL DE UM MECANISMO PARA REALIZAÇÃO DO
PROCESSO BORE WELDING**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Instituto Federal de Minas
Gerais, como parte das exigências para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Congonhas, ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Henrique Souza Bomfim
Orientador

Prof. Frank de Mello Liberato
Coorientador

Prof. Camila Gonçalves Castro
Coorientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças, ao Instituto Federal Minas Gerais-Campus Congonhas e em especial ao seu corpo docente em geral; todos a quem procurei demonstraram enorme comprometimento com meu trabalho. Agradeço ao professor e coordenador do curso Dr.Fabício Carvalho por se empenhado para a criação e desenvolvimento do curso, aos professores Marcelo, Camila e Frank pelo apoio e orientação durante este trabalho, e aos demais professores que compõem o corpo docente da Engenharia Mecânica que foram importantes no meu desenvolvimento acadêmico. Dedico este trabalho aos meu pais e irmão e em especial à minha esposa Daniela que esteve ao meu lado em todos os momentos da graduação.

*“As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu.
Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e
sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos”.*

Paulo Beleki

“Dedico este trabalho à minha esposa Daniela, uma pessoa que sempre me ajuda.”

RESUMO

O processo bore welding, classificado como processo de usinagem em furos é um processo utilizado diariamente em todas as mineradoras do Brasil, este processo na maioria das vezes geram altas despesas as empresas devido a impor profissionais qualificados para tal atividade e demandam grande tempo da manutenção, uma vez que na maioria das vezes é necessário terminar este processo para dar sequencia na manutenção no efetivo da empresa. O produto desenvolvido neste trabalho executará as atividades de soldagem e mandrilhamento ao mesmo tempo e terá por principal função a redução do tempo do processo, demonstrando através de cálculos e desenhos computacionais as peças e mecanismo necessários para a confecção do protótipo de execução do processo.

Palavras-chaves: Bore welding, produto, protótipo, soldagem, mandrilhamento.

ABSTRACT

The bore welding process, classified as a hole machining process is a process used daily in all mining companies in Brazil, this process in most cases generate high expenses the companies due to impose qualified professionals for such activity and require great maintenance time, since most of the time it is necessary to finish this process to follow up the maintenance of the company. The product developed in this work will perform the welding and boring activities at the same time and will have as main function the reduction of the process time, demonstrating through calculations and computational drawings the necessary parts and mechanism for the preparation of the prototype of the process execution.

Keywords: Bore welding, product, prototype, welding, boring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 7 - Equipamentos básicos para soldagem Mig/Mag.	33
Figura 8 - Tocha manual refrigerada a ar.	34
Figura 9 - Efeito do tipo de gás de proteção no formato do cordão.	37
Figura 10 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência globular. ..	38
Figura 11 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência por curto-circuito.	39
Figura 12 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência por spray ou aerossol.	40
Figura 13 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência controlada ou arco pulsado.	41
Figura 14 - Conceito abrangente de automação.	42
Figura 15 - Comparativo de custos entre os processos de soldagem automatizado e manual.	
<i>Figura 1– Atividade de preenchimento de um furo por soldagem Mig-Mag (direita) e a atividade posterior, sendo a de mandrilhamento, em outro furo já preenchido (esquerda).</i> ..	17
<u>Figura 2 - Evolução da manutenção.</u>	22
<u>Figura 3 - Os 10 países que mais recebem investimentos em pesquisa em exploração mineral.</u>	26
<u>Figura 4 - Evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos.</u>	28
<u>Figura 5 - Classificação dos processos quanto ao método de união.</u>	30
<u>Figura 6 - Processo de soldagem Mig/Mag.</u>	32
.....	44
Figura 16 - Processo básico de mandrilhamento.....	47
Figura 17 - – Barra mandrilhadora ou mandril.....	48
Figura 18 - Tipos de mandrilhamento.	49
Figura 19 - Processo de soldagem em furos com desgaste.	51
Figura 20 - Processo de mandrilhamento em furos com desgaste.....	52
Figura 21 - Mecanismos de soldagem e mandrilhamento da empresa Climax.	60
Figura 22 - Mecanismos de soldagem e mandrilhamento da empresa Bore Repair.	60
Figura 23 - Corpo do eixo de soldagem.	62
Figura 24 - Tipos de buchas para fixação da tocha.....	63
Figura 25 - Fixação da tocha e dos elementos de soldagem.....	64
Figura 26 - Montagem completa do eixo de solda.	65
Figura 27 - Sentido de soldagem e ângulo de trabalho do bico.	66
Figura 28 - Sentido de soldagem e deposição com mesmos parâmetros de soldagem.	67
Figura 29 - Eixo de mandrilhamento.	74
Figura 30 - Barra de mandrilhamento proposta para o projeto.....	75
Figura 31- Luva de união entre os eixos de soldagem e de mandrilhamento.	79
Figura 32 - Sistema de união dos eixos.	79
Figura 33 - Suporte dos mecanismos do protótipo	80
Figura 34 - Aplicação do suporte no projeto	81
Figura 35 - Caixa de transferência.	82
Figura 36 - Configuração do motor de passo no projeto.....	83
Figura 37 - Luva para acoplamento do motor ao fuso.....	84

Figura 38 - Suporte de translação dos eixos.	85
Figura 39 - Dimensões do fuso.	87
Figura 40 - Pré-montagem do eixo de soldagem – Fixadores, tocha de soldagem e elemento de união dos eixos.	94
Figura 41 - Montagem do eixo de soldagem.....	94
Figura 42 - União entre os eixos de mandril e de soldagem.	95
Figura 43 - Fixação dos suportes à estrutura a ser corrigida a furação.	96
Figura 44 - Suportes dos motores elétricos e das caixas de transferência.	97
Figura 45 - Instalação do mecanismo de fuso.	98
Figura 46 - – Protótipo para o processo bore welding finalizado e preparado para atividade.	99

LISTA DETABELAS

Tabela 1 - Custo da manutenção em relação ao faturamento das empresas.....	25
Tabela 2 - Gases e misturas na soldagem Mig/Mag.	36
Tabela 3 - Variáveis de entrada aplicadas no protótipo piloto	67
Tabela 4 - Posições de soldagem e variáveis de alimentação em relação ao diâmetro do arame. Fonte: Apostila soldagem MIg/Mag ESAB.....	68
Tabela 5 - Proporção do gás de proteção em relação ao metal de base. Fonte: Manual de treinamento Palmer e Fricke (2015).....	70
Tabela 6 - Especificações do arame tubular utilizado no produto. Fonte: Catálogo de consumíveis Castolin Eutetic.....	71
Tabela 7 - Tipo de perfis de roscas conforme suas aplicações.....	86
Tabela 8 - Dimensões das roscas tipo acme.....	88
Tabela 9 - Mediadas utilizadas na confecção do fuso.....	89
Tabela 10 - Coeficiente de atrito para algumas combinações de materiais.	92
Tabela 11 - Avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça.....	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- τ – Tensão De cisalhamento
- ω - Velocidade angular
- η - Eficiência
- π – Constante PI
- σ – Tensão normal
- T – Torque
- c – Raio de aplicação do momento torçor]
- J – Momento de inércia
- F – Força
- D – Distância
- R – Raio da maior circunferência
- n – Rotação
- Re – Relação de transferência
- Z e K_{s1} – Constante de Kienzle para materiais em usinagem
- F_c e F_{corte} – Força de corte
- P_c – Potencia de corte
- V_c – Velocidade de corte
- d – Diâmetro
- $F_{\text{avnaço}}$ – Força de avanço
- $V_{\text{avanço}}$ – Velocidade de avanço
- P – Peso
- v – Volume
- g – Aceleração gravitacional
- ρ - Densidade

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DETABELAS	11
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	12
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos gerais.....	16
1.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Justificativa	17
1.4 Estrutura da monografia	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1. Manutenção	20
2.1.1 Tipos de manutenção.....	23
2.1.2. Manutenção de equipamentos e plantas em mineradoras.....	24
2.2. Processo de soldagem	27
2.2.1. Tipos de soldagem.....	31
2.2.2. Soldagem Mig/Mag (GMAW).....	31
2.3. Automação da soldagem.....	41
2.4. Soldagem Orbital.....	45
2.5. Mandrilhamento	46
2.6. Processo bore welding	50
3. Metodologia	53
4. Desenvolvimento e resultados.....	59
4.1 Pesquisas de mercado.....	59
4.2 Configurações do eixo de solda.....	61
4.2.1 Parâmetros de soldagem utilizados	65
4.2.1 Dimensionamento do eixo de soldagem.....	71
4.3 Configurações do eixo de mandrilar	73
4.3.1 Variáveis do processo e dimensionamento do eixo.....	74
4.4 Dimensionamentos do elemento de união dos eixos.....	78

4.5 Caixa de transferência.....	81
4.6 Mecanismo de fuso	82
4.7 Montagem do protótipo.	94
5. Considerações finais.....	101
5.1 Conclusão	101
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	102
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
7. ANEXOS	107

1. INTRODUÇÃO

A inovação não implica, necessariamente, a comercialização apenas de grandes avanços tecnológicos (um inovação radical), mas também inclui a utilização de mudanças em pequena escala no saber tecnológico (uma melhora ou inovação incremental). (ROY ROTHWELL; GARDINER, 1985).

Com a citação de anterior, pode-se perceber que em um cenário gigante como o da mineração, qualquer pequena inovação em algum processo de seus subprocessos pode gerar um impacto considerável na produção. O processo *bore welding* ocorre com muita frequência em equipamentos de minerações, e por isso quanto mais eficiente este processo, teremos uma efetividade melhor do reparo, além de eliminar o tempo de possível ociosidade dos mantenedores ou impedimento de alguma outra atividade.

Como explicado, este processo se torna duradouro devido as atividades de reparo dos olhais possuírem dois estágios, e sendo este um processo manual, com exceção do processo de usinagem por mandrilhamento, exigindo assim uma alta habilidade dos profissionais que realizam a atividade. Para tornar o processo mais eficiente e eficaz se torna necessário a aplicação da tecnologia para otimizar o processo. A otimização do processo *bore welding* irá trazer benefícios para as manutenções de mineradoras, pois além do processo ser realizado em um tempo muito menor que o método convencional, não será necessário a utilização de profissionais altamente instruídos sobre soldagem e usinagem, abrangendo assim, a inclusão de mais profissionais neste mercado.

1.1 Objetivos gerais

Desenvolver um protótipo virtual de uma máquina para otimizar o processo bore welding aplicado em manutenção de equipamentos em mineradoras utilizando o *software Solid Edge*.

1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver elemento de união de eixos que permita estes adquirirem rotações diferentes;
- Calcular o torque mínimo necessário para os processos de soldagem e mandrilhamento;
- Elaborar parâmetros para o processo de soldagem;
- Elaborar parâmetros para o processo de mandrilhamento;
- Calcular as solicitações impostas nos eixos de mandrilhamento e de soldagem;
- Dimensionar a resistência de tração e a de cisalhamento dos principais componentes sujeitos a solicitações;
- Calcular as principais variáveis dos elementos de máquinas como, por exemplo, as do fuso;
- Desenvolver as peças do protótipo virtualmente através do *software Solid Edge*;
- Desenvolver e dimensionar um mecanismo de fuso para translação dos eixos;
- Ilustrar a aplicabilidade do protótipo em um local de trabalho.

1.3 Justificativa

O processo bore welding comumente aplicado em minerações brasileiras consiste em um preenchimento do olhal pelo processo manual de soldagem Mig/Mag ou mecanizado, ou seja, um soldador ou um dispositivo de soldagem realizam a deposição do material até que se obtenha um diâmetro razoavelmente menor que o diâmetro original do olha, sendo este ultimo alcançado através do processo posterior de mandrilhamento. A Figura 1 a seguir ilustra o processo descrito mecanizado:



Figura 1– Atividade de preenchimento de um furo por soldagem Mig-Mag (direita) e a atividade posterior, sendo a de mandrilhamento, em outro furo já preenchido (esquerda).

Fonte: http://www.americanmachinetools.com/line_boring.htm acesso.

Como demonstrado na Flg.1, o processo consiste em duas etapas, ou seja, é necessário o encerramento de uma atividade para o início de outra. Esta troca de processos ocorre após o preenchimento da furação com desgaste e antecede o processo de mandrilhamento, gerando um elevado gasto de tempo de manutenção, podendo levar de horas a dias para a recuperação de furos com desgaste.

Caso ocorra um erro de medida, o processo deverá acontecer novamente até se obter a medida desejada da furação estipulada pela empresa ou pelo fabricante do maquinário.

Com as explicações anteriores, pode-se perceber que a principal função deste produto é a redução de tempos em reparos de furação, afetando diretamente os indicadores de manutenção. O protótipo terá a função de reduzir este de manutenção através da simultaneidade dos processos de soldagem e mandrilhamento, evitando assim a troca de maquinário existente atualmente, maximizando assim o tempo e também evitando erros provenientes dos operadores devido a alta taxa de repetitividade das atividades nos processos atuais, pois quanto mais se repete uma atividade em um processo, o risco de que ocorra um erro de processo é cada vez maior.

Além do tempo, existe outro fator que limita este processo, este se define pelos profissionais que realizam a atividade, uma vez que nos reparos de furações mais rústicos estudados, se encontram a preenchimento manual dos furos, ou seja, é necessário um soldador com certa experiência para realização da atividade. Assim como o soldador, o executando do processo de usinagem por mandrilhamento também deve obter conhecimento do processo, uma vez que existem diversos diâmetros e comprimentos de olhais, necessitando assim de conhecimento das variáveis do processo como qual ferramenta deve-se utilizar rotação necessária e avanço de ferramenta.

O produto desenvolvido utiliza as variáveis dos dois processos citados e as aplicam de forma a se tornarem constantes, porém, este se limita a um determinado *range* de diâmetros de furações. Ou seja, os processos de soldagem e mandrilhamento do protótipo, além de serem simultâneos, terão parâmetros de

usinagem e soldagem constantes, permitindo assim a utilização de pessoas não tão experientes no mercado, abrindo o mercado para pessoas que não possuem tanta qualificação, tornando-as aptas a executarem tais processos após treinamentos sobre as aplicações e funcionalidades do produto.

O protótipo apresentado nesta monografia está sendo desenvolvido para agilizar os processos de manutenções, obtendo os parâmetros de qualidade e segurança necessários e possui o intuito de introduzir cada vez mais profissionais ao mercado de trabalho.

1.4 Estrutura da monografia

Esta monografia está estruturada em sete capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica necessária ao entendimento dos assuntos abordados. No capítulo 3, é apresentada a metodologia adotada para a execução do protótipo que executará o processo bore welding de forma mecanizada, juntamente com os principais cálculos necessários para aplicação do projeto, softwares utilizados e literaturas necessárias para explicações. No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos e o processo de montagem do protótipo. No capítulo 6, tem-se a conclusão sobre os resultados do produto final assim como sugestões para trabalhos futuros. O capítulo 7 contém as referências bibliográficas que foram utilizadas para a realização do trabalho e por fim, o capítulo 8 apresenta os anexos necessários para a escolha dos materiais utilizados para os cálculos e desenvolvimento das peças.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico tem por objetivo explicar tecnicamente os processos que estão diretamente relacionados com o protótipo virtual que será desenvolvido, fazendo assim o entendimento sobre a sua aplicação, importância e funcionalidade em um contexto geral.

2.1. Manutenção

Existem várias definições para o conceito de manutenção, cada autor possui sua particularidade e a define conforme seus conhecimentos específicos, porém todos estes conceitos tendem a um mesmo ponto, permitindo assim um conhecimento pleno sobre este termo.

Através da norma NBR5674 a ABNT descreve manutenção como um conjunto de cuidados e conhecimentos técnicos e também administrativos, que são destinados a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar sua função requerida. Segundo Moubrey (1997) manutenção é a garantia que os ativos físicos de uma empresa continuem a fazer o que é de fábrica inerente a suas funções.

Já Xenos (2004) define as atividades de manutenção são basicamente ações que visam evitar a degradação de equipamentos e instalações causada pelo desgaste natural de seu uso. Tal degradação como citada ocorre naturalmente e deve ser corrigida devido a três principais fatores que são a estética, funcionalidade e mecanismos de segurança instalados. Fogliatto (2009) por sua vez, destaca que manutenções são atividades realizadas com o objetivo de prevenção de falhas ou restauração do sistema a seu estado operante.

Com estas citações pode-se perceber que manutenção está diretamente relacionada com os ativos físicos de uma empresa como, por exemplo, maquinários e plantas e com aqueles que fazem com que estes trabalhem com alta performance.

A evolução manutenção é dividida por Pinto e Xavier (2010) em quatro gerações a partir do ano de 1930. A primeira geração ocorre durante a segunda guerra mundial onde os equipamentos não possuem elevado grau de tecnologia e devido condições econômicas da época não era possível uma manutenção sistematizada, assim surgiu a manutenção corretiva não programada, ou seja, a falha só era corrigida quando ela realmente fosse visível e impedisse o funcionamento do equipamento. Na segunda geração que ocorreu entre os anos de 1950 e 1970 já demanda por produtos se tornou alta e a mão de obra era escassa devido à segunda grande guerra, assim se tornou necessário a mecanização de plantas e a garantia de que estas trabalhariam de forma confiável, evitando assim paradas inesperadas.

Neste contexto, percebe-se que os gastos com manutenção se tornam elevados em relação a outros custos operacionais das empresas, assim é criado o setor de planejamento e desenvolvimento de manutenção. A terceira é iniciada em 1970 e de acordo os autores é o ponto diferencial desta geração é o advento tecnológico, que permitiu o diagnóstico mais rápido das falhas, assim como foi de extrema importância nas programações de manutenção. As plantas e equipamentos se tornaram cada vez mais computadorizados e as falhas passaram a ser encontradas antes que ocorram, surgindo assim a manutenção preditiva. O termo confiabilidade é inserido no processo e se torna cada vez mais preponderante na manutenção, com a função de obter o menor número de falhas, neste tempo desenvolve-se a manutenção centrada na confiabilidade (MCC).

Pinto e Xavier (2010) descrevem a quarta geração como mantenedora da grande arte dos conceitos ainda existentes, como o de confiabilidade. Esta geração utiliza a disponibilidade como principal indicador para obter performance e a confiabilidade é obtida através de análises cada vez precisas dos sistemas operacionais utilizando ao máximo os recursos tecnológicos existentes.

Segundo Trombeta (2016), o foco da quarta geração é maximizar a eficácia de um ativo, reduzir ao máximo as falhas dos sistemas, eliminar ao máximo as perdas e maximizar ganhos. Segundo Rodrigues (2017) atualmente a manutenção industrial utiliza ideias e métodos da WCM – World Class Maintenance, análises de causas raiz, da falha, e inovações tecnológicas com uso de internet e redes. Na Figura 2 é exemplificado as diferenças entre as gerações da manutenção.

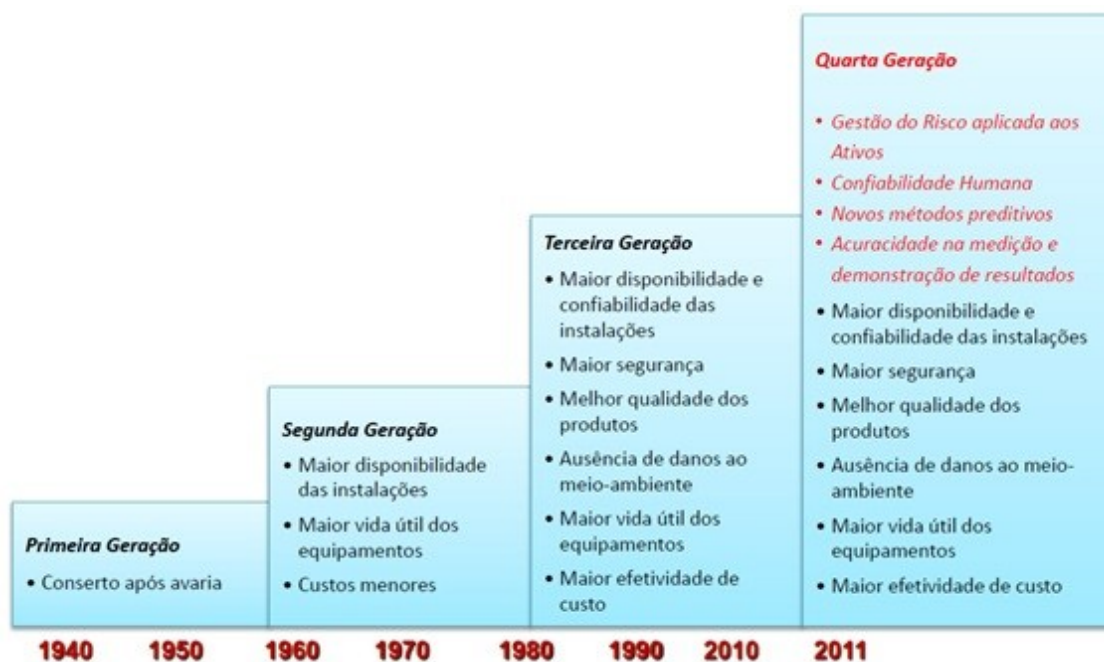


Figura 2 - Evolução da manutenção.
 Fonte: (Trombeta, 2016).

2.1.1 Tipos de manutenção

Com a evolução da manutenção, surgem três métodos básicos de manutenção que são empregados fortemente atualmente nas empresas; A NBR 5462-1994 define três tipos básicos de manutenção que são Manutenção corretiva, Manutenção preventiva e Manutenção preditiva.

Segundo Pinto e Xavier (2010) a manutenção corretiva pode ser considerada uma correção a uma falha inesperada ou por um desempenho menor que o esperado. Assim percebe-se que a manutenção corretiva não ocorre somente quando um efetivo apresenta falha, mas também quando não executa suas funções com eficácia, logo, a manutenção corretiva é subdividida em planejada e não planejada.

A manutenção preventiva é descrita por Pinto e Xavier (2010) como uma atuação de forma a evitar e/ou reduzir a falha ou queda de desempenho através de um plano de manutenção realizado em intervalos pré-determinados. Este é o tipo de manutenção mais cara destes três citados pois segundo Xenos (2004) pois a peças tem de ser trocadas e os componentes tem de ser reformados antes que falhem. Com estas ações se torna impossível a utilização total de um componente, mas por outro lado garante uma boa confiabilidade do efetivo em questão.

Já a manutenção preditiva é descrita por Pinto e Xavier (2010) como uma atuação devido à alguma alteração de condição ou desempenho obedecendo sempre a uma sistemática regida pela programação de manutenção. Xenos (2004) relaciona este tipo de manutenção a mais uma maneira de inspecionar os equipamentos, pois é assim que a manutenção preditiva realmente funciona, a

atuação na falha ocorrerá sempre devido a alguma anormalidade mensurada que não esteja nos parâmetros corretos de funcionalidade do equipamento.

Tendo esses três tipos básicos como pilares para manutenção, Xavier e Pino (2010) definem que em empresas de sucesso, o homem de manutenção deve saber associar estes pilares aos avanços tecnológicos, visando sempre buscar uma maior disponibilidade e confiabilidade da instalação, buscando sempre a redução de custos da empresa. Estas alterações que acontecem devem abranger a todos das empresas, desde coordenadores de manutenção até aos executantes.

2.1.2. Manutenção de equipamentos e plantas em mineradoras

A mineração é uma atividade que evolui ao longo do tempo em todo o mundo através da intervenção de novas tecnologias e aprimoramento de técnicas e conceitos. É através deste processo que se é possível a aquisição da matéria prima bruta para desenvolvimento de diversos utensílios necessários a humanidade.

No Brasil, o setor de mineração está cada vez mais consolidado e é um dos coadjuvantes na economia do país. Segundo o Portal Brasil, este mercado cresceu em 2017 e o setor de mineração foi responsável por 21% de todas as vendas realizadas pelo país no mercado externo no primeiro semestre de 2017. Assim é perceptível a importância da mineração no cenário econômico brasileiro.

Segundo Rodrigues (2017) a mineração está evoluindo com o passar do tempo, e para se adaptar ao mercado é necessário cada vez mais uma evolução e profissionalização de seus métodos, visando como principais metas a redução de custos e otimização dos processos internos.

Manutenção em equipamentos e plantas está entre os principais gastos das mineradoras, assim a redução deste gasto acarreta em um valor líquido cada vez maior. Estes custos são relativamente altos, a tabela a seguir publicada em 2003 pela Associação Brasileira de manutenção (ABRAMAN) e adaptada por Filho e Freitas (2005) ilustra a afirmativa:

Ano	Custo total de manutenção/ PIB	Estes dados fazem parte da resposta de uma pesquisa onde participaram 404 empresas (45 – Portugal, 197 – UK, 66 – Alemanha, 42 – França e 54 USA) elaborada pela Profitability Engineers							
2003	4,27 %	Custo da Manutenção pelo Faturamento							
2001	4,47 %	Setor	%	Setor	%	Setor	%	Setor	%
1999	3,56 %	Aeroespacial	2,7	Nuclear	7,3	Construção	8,1	Petróleo	2,5
1997	4,39 %	Químico	5,0	Embalagem	5,1	Bebidas	3,0	Papel	4,7
1995	4,26 %	Eletrônico	2,9	Farmácia	3,9	Alimentos	3,1	Plástico	5,0
Brasil: 4,27%		Engenharia	3,3	Borracha	4,3	Vidro	4,3	Têxtil	5,1
Média mundial 4,12%		Mineração	4,4	Serviços	8,0	Automotivo	4,6	Transporte	12,7

Tabela 1 - Custo da manutenção em relação ao faturamento das empresas.
Fonte: Associação Brasileira de manutenção (ABRAMAN).

A tabela mostra que os gastos com manutenção em mineração atingem valores de 4,4% em relação ao faturamento. O conceito atual de reduzir este valor está diretamente ligado a dois indicadores de manutenção; disponibilidade física e confiabilidade dos equipamentos. Uma vez que quanto mais tempo estiverem disponíveis e confiáveis, menor será o gasto com manutenção. Com estes indicadores elevados, a probabilidade ocorrer falhas se torna pequeno, reduzindo assim a chance de um gasto imediato. Em relação a segurança das pessoas, o setor de mineração apresenta grau de risco 4 segundo a NR4 (MTE, 2008) perdendo somente pra usinas nucleares, isso pode fazer com que determinada parada inesperada possa se tornar um grande empecilho e ter um custo bem superior ao previsto, além de uma possível fatalidade.

Germany (2002) ressalta que a mão de obra de manutenção mecânica e elétrica tem uma grande importância em mineradoras quando se visa alcançar elevada disponibilidade para os efetivos de uma mina. Para obter este indicador, as mineradoras devem capacitar seus mantenedores assim como propor a cooperação dos fabricantes, se tornando integrante das condições de aquisição dos equipamentos. Havendo esta interação, pode-se garantir uma performance elevada dos efetivos de uma mineradora.

Percebe-se que para uma mineradora obter lucros, seus efetivos devem operar com eficiência, como ressaltado anteriormente, para isto, a manutenção deve ter alto conhecimento. Para isso é necessário investimento em treinamentos, cursos e inovações no setor através de investimentos. Mesmo sendo um grande exportador de minério, o Brasil ainda não investe fortemente na exploração mineral segundo a Figura 3 de acordo com o IBRAM (2012):

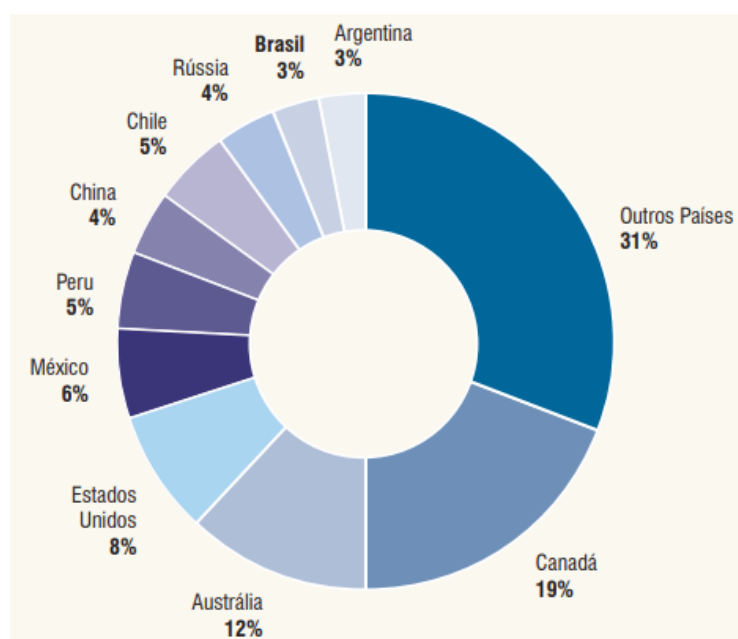


Figura 3 - Os 10 países que mais recebem investimentos em pesquisa em exploração mineral.
Fonte: IBRAM (2012).

O setor de manutenção das empresas visa o corte de custo através de políticas de manutenção como, por exemplo, a manutenção Centrada na Confiabilidade, que segundo Xenos (2004) é um processo utilizado para manter os efetivos físicos das empresas em suas funções operacionais de forma eficaz. Com o avanço tecnológico e com a forte concorrência de concorrentes, as empresas buscam uma manutenção cada vez mais veloz e confiante, assim surgem automações de processos de manutenção que visam justamente uma melhor manutenção nos efetivos, porém em um tempo inferior aos processos manuais com custos cada vez menores.

2.2. Processo de soldagem

O processo de soldagem é um método de união mundialmente conhecido, caracterizado pela junção microscópica (ou seja, ocorrem ligações atômicas) de dois ou mais materiais. Wainer (2004) denomina soldagem como processo de união entre duas partes metálicas usando uma fonte de calor, podendo ou não ser aplicada uma pressão no sistema, o resultado desta união é denominado solda.

A American Welding Society define a soldagem como “processo de união usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”. Esta afirmativa complementa a definição de Wainer (2004), pois diz que a soldagem pode também ser realizada em materiais não metálicos, como por exemplo, tem-se soldagem em polímeros.

Segundo Modenesi (2002) a soldagem pode ser simplesmente caracterizada como um método de união, porém, existem diferentes processos para

obtenção deste resultado. Além de a soldagem ser utilizada para união, pode ser usada para outras finalidades, como por exemplo, recuperação de peças com desgaste ou para formação de revestimentos em aplicações especiais. Há também variações dos processos de soldagem que podem ser utilizados para cortar peças. Wainer (2004) ilustra a evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo, mostrado na Figura 4.

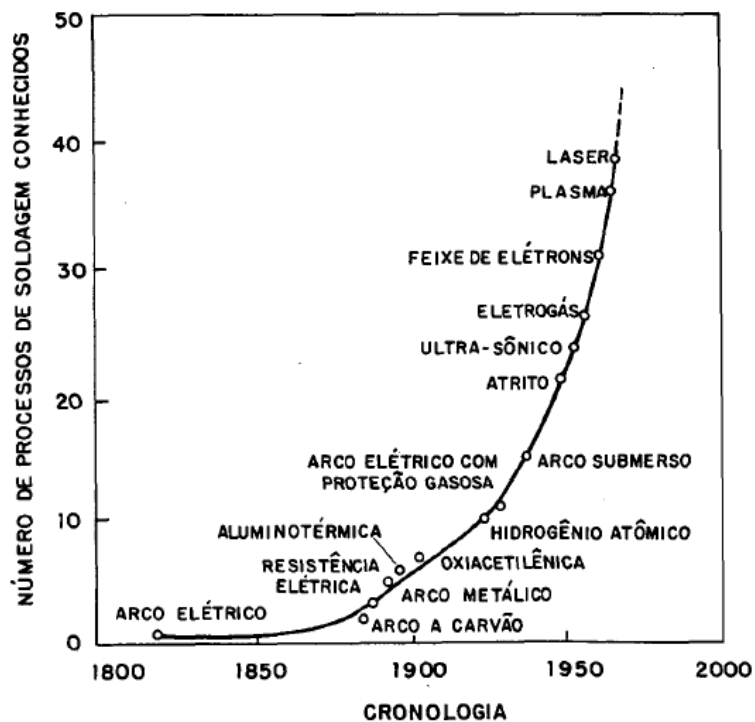


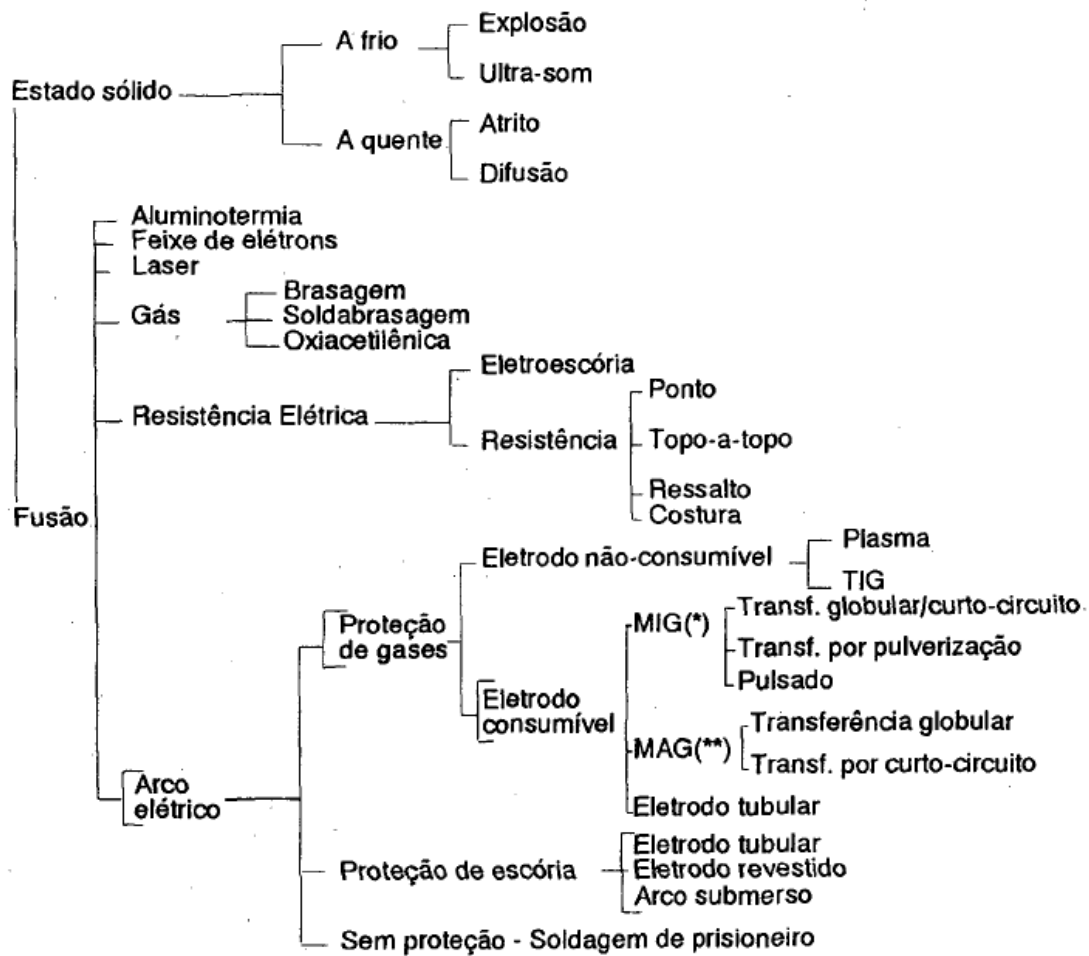
Figura 4 - Evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos.
Fonte: Wainer (2004).

Como observado na figura, pode-se perceber o crescimento exponencial dos processos de soldagem, isto é, com o passar dos anos, foram desenvolvidos cada vez mais novos processos de soldagem, devido a sua praticidade e aplicações mais específicas. Segundo Okumura (1982) a grande vantagem do processo de soldagem em relação aos demais processos de união é que este é relativamente mais simples e econômico, pois necessitam de pouco material depositado nas juntas

soldadas. Além da vasta gama de aplicação do processo que varia desde a indústria naval até componentes de usinas nucleares.

“O processo de soldagem teve seu grande impulso durante a II Guerra Mundial, devido a fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX” Wainer (2004). Devido a alta produtividade, seguida de um alto nível de confiabilidade em relação aos métodos de união macroscópicos como, por exemplo, parafusos e rebites, o processo de soldagem se tornou um grande aliado aos países para manterem sua frotas sempre operando e em números elevados para não serem surpreendidos durante a guerra.

Segundo Marques (2009) existem atualmente mais de 50 processos de soldagem sendo utilizados em indústrias, sendo este, o processo de união de materiais com maior importância e relevância no setor. Os processos de soldagem ainda podem ser classificados de acordo com o método que é utilizado para realizar as ligações atômicas, podendo estas ligações ocorrer em estado sólido ou por fusão na região a ser soldada. Wainer (2004) classifica os processos com seus respectivos métodos de união de acordo com método de união, como ilustrado na Figura 5.



Obs.: (*) Com argônio ou hélio

(**) Com argônio, oxigênio, CO₂ ou mistura destes gases.

Figura 5 - Classificação dos processos quanto ao método de união.

Fonte: Wainer (2004).

Embora sendo um processo apresentando certa simplicidade, Okumura (1982) ressalta que existe uma gama de conhecimento por trás de cada de processo de soldagem, dividindo assim a Engenharia a soldagem em Engenharia elétrica, mecânica, metalúrgica e química, além da Física Aplicada, Okumura (1982) exalta que é necessário certo conhecimento destas áreas para um entendimento dos processos de soldagem.

Wainer (2004) diz que cada processo possui suas vantagens e aplicações, sendo o balanço de suas características orientarão sua aplicação. Com essa afirmativa, é de fácil entendimento que tem-se situações em que um processo não poderá ser utilizado ou poderá ser o ideal.

2.2.1. Tipos de soldagem

Marques (2009) afirma que existem pouco mais de 50 tipos de soldagem, porém alguns processos possuem aplicações específicas, logo, como ilustrado na Fig.12, tem-se 20 principais tipos de soldagem que são aplicados em diversos processos atualmente. Norrish (2006) ressalta que dentre estes principais processos, existem três que são utilizados com maior frequência devido ao custo, capacitação da mão de obra, facilidade de mecanização simples e a ampla aplicabilidade são o eletrodo revestido (SMAW), Mig/Mag (GMAW) e Tig (GTAW), sendo este último menos produtivo e muito aplicado em processos de automação.

2.2.2. Soldagem Mig/Mag (GMAW)

De acordo com Norrish (2006) os processos de soldagem Mig/Mag e eletrodo revestido são os processos mais produtivos atualmente empregados devido a elevada taxa de deposição de material e alto fator de operação. Tais processos podem e são automatizados para atividades afins, porém por ser um processo semiautomático, tem-se maior facilidade em automatizar o processo Mig/Mag.

Modenesi (2011) define este processo com um processo de soldagem de fusão que ocorre através de um eletrodo, um gás consumível e a peça de trabalho. Sendo a proteção da poça de fusão realizada por um ou uma mistura de gases

sendo estes ativos ou inertes a poça de fusão. Na Figura 6, Wainer (2004) ilustra o processo de soldagem Mig/Mag:

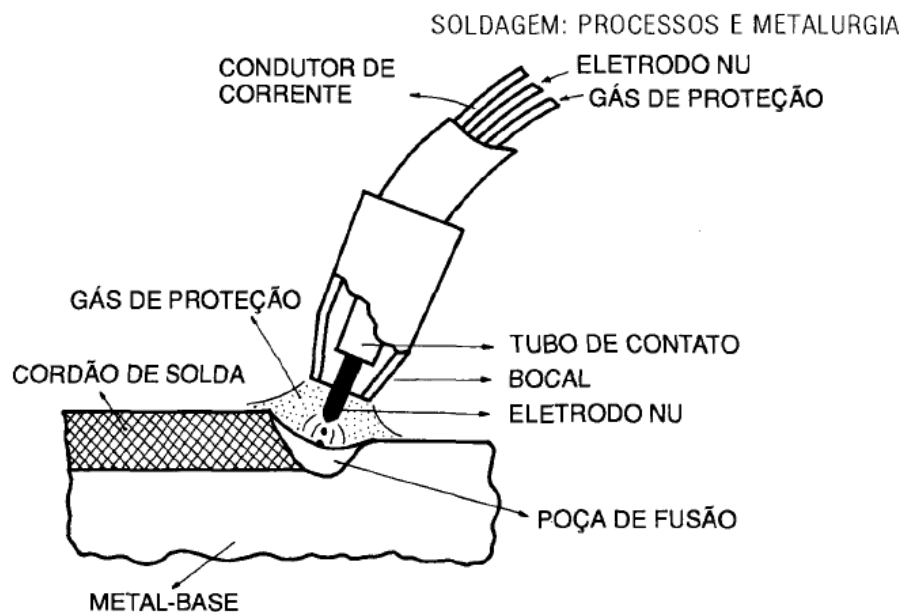


Figura 6 - Processo de soldagem Mig/Mag.

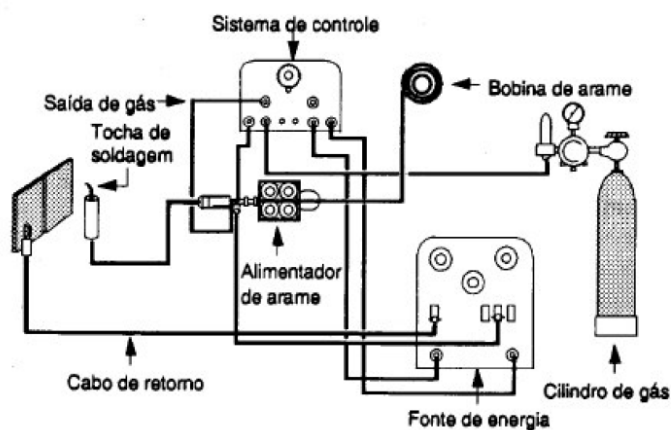
Fonte: Wainer (2004).

Os processos de soldagem Mig e Mag se diferenciam somente do gás de proteção aplicado sendo que a Mig (Metal inert gas) utiliza gases inertes ao processo de soldagem enquanto a Mag (Metal active gas) utiliza gases ativos. Wainer (2015) relata que o processo Mig/Mag utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar, sendo este processo automático ou semiautomático. Assim neste processo o arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão.

O processo Mig é adequado para soldagem em aços- carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobres e ligas enquanto o processo Mag é utilizado em aços de baixo carbono e

aços de baixa liga, ressalta Wainer (2015). Conforme citação é possível perceber que para cada tipo de material tem-se um gás apropriado para a soldagem, logo é de extrema importância o conhecimento das peças a serem unidas assim como os parâmetros a serem utilizados na soldagem.

Este processo de soldagem com dito anteriormente exige dois consumíveis sendo eles o gás de proteção da poça de fusão e o eletrodo nu que realizará a fusão dos materiais a serem unidos. Dentre os dispositivos eletroeletrônicos, temos a fonte de alimentação do elemento eletrodo, o sistema de controle, que controla a velocidade de alimentação e o momento em que ocorrerá a alimentação do eletrodo, e por último tem-se a tocha onde ocorre em si o processo de soldagem. Wainer (2015) ilustra os componentes básicos do processo Mig/Mag na Figura 7.



**Figura 7 - Equipamentos básicos para soldagem Mig/Mag.
Fonte: Wainer (2015).**

A tocha de alimentação, é o dispositivo que será manuseado pelo soldador e estará em contato com o local a ser soldado, logo seu manuseio correto é essencial para a obtenção de um bom cordão de solda. Este dispositivo possui certa complexidade em sua construção, pois é o local onde é acionada a alimentação do

arame, também é por onde passam o gás e o eletrodo ou arame. Como se tem uma grande concentração de energia próxima a este dispositivo, temos este refrigerado a ar ou a água. Na figura a seguir, Wainer (2015) mostra a composição de tal dispositivo.

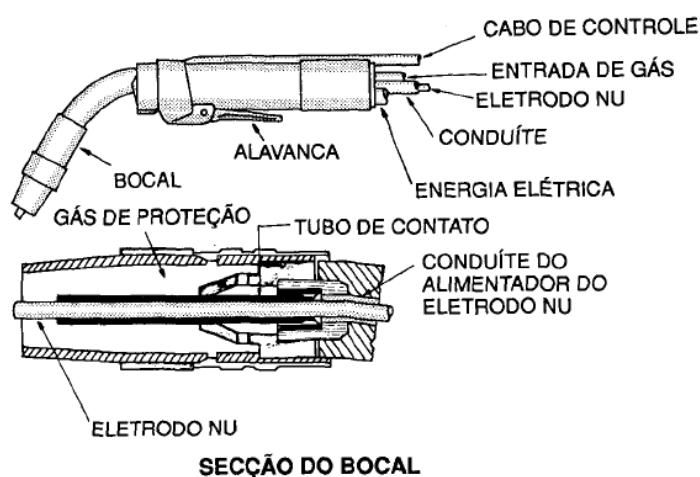


Figura 8 - Tocha manual refrigerada a ar.

Fonte: Wainer (2015).

2.2.2.1 Consumíveis do processo

Para que o processo de soldagem ocorra da melhor forma possível, a escolha do eletrodo ou arame de solda é de suma importância, pois a ser combinado com o gás de proteção, têm-se reações químicas que são diretamente ligadas as propriedades finais do cordão de solda. De acordo com a ESAB existem cinco fatores principais que influenciam a escolha do arame para a soldagem MIG/MAG, sendo estes:

- Composição química do metal de base;
- Propriedades mecânicas do metal de base;
- Gás de proteção empregado;

- Tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- Tipo de projeto de junta.

Modenesi (2011) classifica o arame tubular em duas grandes famílias, arames sólidos e arames tubulares, sendo o segundo formado por uma camada metálica fechada com um enchimento interno. Este enchimento pode ser por fluxo convencional, denominando-o arame tubular ou por misturas de pó metálicas, tendo assim o arame tubular com pó metálico.

Os arames tubulares com fluxo interno podem trabalhar sem um gás de proteção, sendo capaz de gerar sua própria camada gasosa protetora ou pode ter alguma proteção gasosa suplementar, Modenesi (2011). Porém quando não é possível realizar tal função, se torna necessário a implementação de outro consumível do processo, o gás de proteção.

A atmosfera terrestre é composta por vários tipos de gases, porém existem três principais gases que além de serem abundantes são danosos ao cordão de solda, eles são o Nitrogênio, o Oxigênio e o Hidrogênio. Ao iniciar o processo de fusão da região a ser unida, há energia suficiente para estes elementos agirem na poça de fusão, assim se torna necessário uma camada gasosa que impeça estes elementos e outras contaminações externas de entrarem em contato com a poça de fusão.

Para Wainer (2015), o tipo do gás de proteção influi no modo de transferência do metal e nos formatos do arco e do cordão de solda. Modenesi (2011) afirma a posição de Wainer (2015), porém adiciona outras variáveis como penetração e largura do cordão, velocidade máxima de soldagem, tendência ao aparecimento de mordeduras e custo de operação.

Percebe-se que não é possível aplicar somente um gás de proteção, pois cada material possui sua singularidade e através seus parâmetros químico, físicos e metalúrgicos que se escolherá o gás com maior afinidade para o processo, assim como o de menor valor financeiro. Existem variadas misturas que podem ser feitas com os gases de proteção para diversas aplicações, Modenesi (2011) cita algumas na Tabela 2:

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20 - 50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	—	Cobre, maior energia de soldagem
Ar + 20-30% N ₂	--	Idem N ₂ , mas melhor que 100% N ₂
Ar + 1 - 2% O ₂	Ligeiramente oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3 - 5% O ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50% CO ₂	Oxidante	Aços
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Aços

Tabela 2 - Gases e misturas na soldagem Mig/Mag.
Fonte: Modenesi (2011).

Em alguns materiais e/ou processos de soldagem com condições particulares, estudos recentes mostram que é possível obter combinações ótimas que apresentam melhores resultados na operação (Modenesi (2011)), sendo assim, misturas específicas são designadas para soldagens específicas.

Cada gás de proteção tem sua particularidade, assim é perceptível que cada um destes, ou uma mistura, apresentará cordões de soldas com características diferentes, logo, se torna necessário o conhecimento de qual é o tipo de cordão necessário a atividade proposta. Modenesi (2011) ilustra na Figura 9 alguns gases e

as características finais dos cordões de solda. Na figura pode-se observar que para aplicação do Hélio (He) tem-se um preenchimento superficial maior que os demais gases citados e que ao aplicar CO₂ tem-se uma maior penetração do cordão. O Argônio (Ar) e a mistura Argônio com Hélio geram cordões com propriedades intermediárias ao Hélio e CO₂.

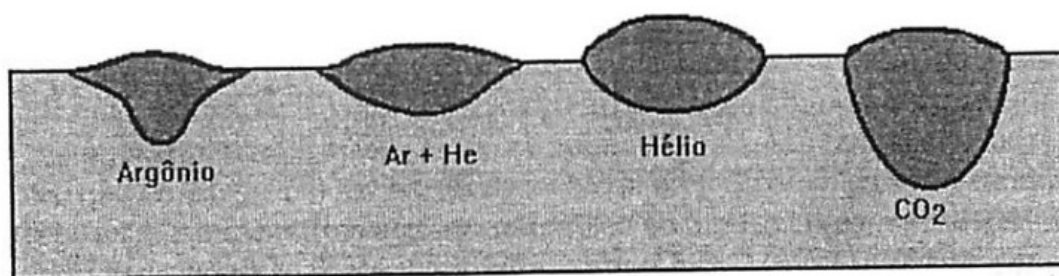


Figura 9 - Efeito do tipo de gás de proteção no formato do cordão.

Fonte: Modenesi (2011).

2.2.2.2. Métodos de transferência

Existem quatro formas básicas de transferir o material do arame de soldagem a poça de fusão sendo elas por curto-circuito, transferência globular, transferência por spray ou aerossol e transferência controlada ou arco pulsado, (Modenesi (2011) e Wainer (2015)).

A transferência globular, de acordo com Modenesi (2011), ocorre em valores intermediários de corrente e tensão de soldagem e ocorre em qualquer gás de proteção, especialmente para CO₂ e hélio. Com a variável corrente baixa em relação a outros métodos, se forma a gota na ponta do eletrodo nu com um diâmetro superior, ocorrendo o destacamento da gota por forças gravitacionais e a mesma se desloca em sentido a poça de fusão. Devido ao fenômeno de deposição do material, este método é pouco eficiente em outras posições que não sejam a plana. Wainer

(2015) identifica o processo em relação dos valores de tensão em corrente na Figura 10:

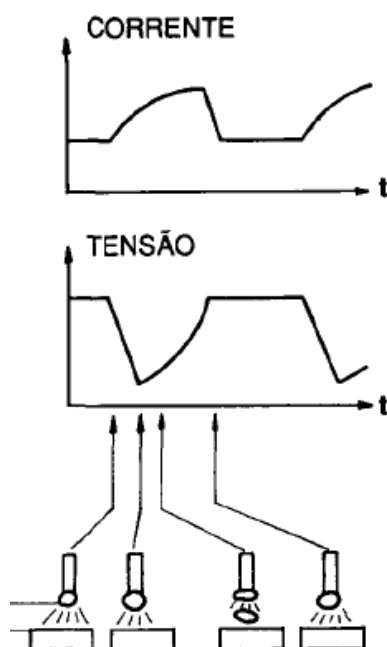


Figura 10 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência globular.
Fonte: Wainer (2015).

Modenesi (2011) explica que a transferência por curto-circuito ocorre em valores baixos de tensões e correntes, sendo este um dos métodos utilizados para soldagens fora de posições ou em peças de pequenas espessuras, pois possui pequena energia de soldagem. Neste tipo de transferência ocorre a formação de uma gota de metal com diâmetro inferior ao do eletrodo nu e esta vai se aumentando até se tocar na poça de fusão onde é atraída através da tensão superficial, neste momento ocorre o curto circuito. Modenesi (2011) ressalta que este processo gera alta instabilidade do arco e uma formação elevada de respingos, porém através do controle dos parâmetros de soldagem é possível a diminuição destes efeitos. A transferência por curto-circuito em relação a tensão e corrente é ilustrada a seguir, na Figura 11 por Wainer (2015):

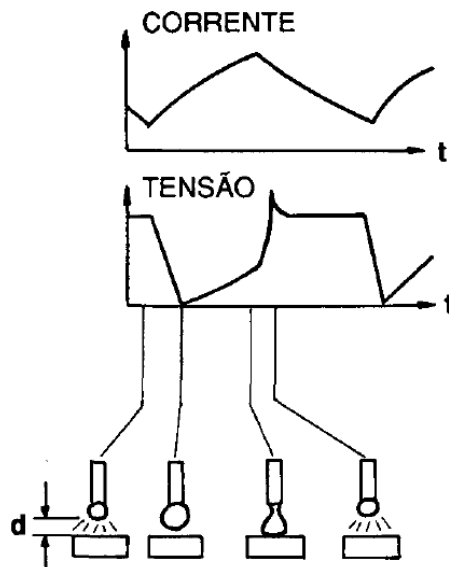


Figura 11 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência por curto-circuito.

Fonte: Wainer (2015).

A transferência por spray ou aerossol ocorre para elevadas densidades de corrente e quando o gás de proteção utilizado é o argônio ou uma mistura deste com outros gases, Wainer (2004). Neste processo se formam gotas com diâmetros menores que o do eletrodo nu que devido a alta energia sofrem ação de forças eletromagnéticas e se sobrepõem a força gravitacional. Segundo Modenesi (2011), estas forças eletromagnéticas se sobrepõem a força gravitacional, possibilitando assim soldagem em diversas posições além da plana, porém como os valores de corrente são elevados, não se recomenda a soldagem em chapas com pequenas espessuras. A performance do método de transferência em relação a corrente e tensão no tempo que esta ocorre é ilustrada por Wainer (2015) na Figura 12.

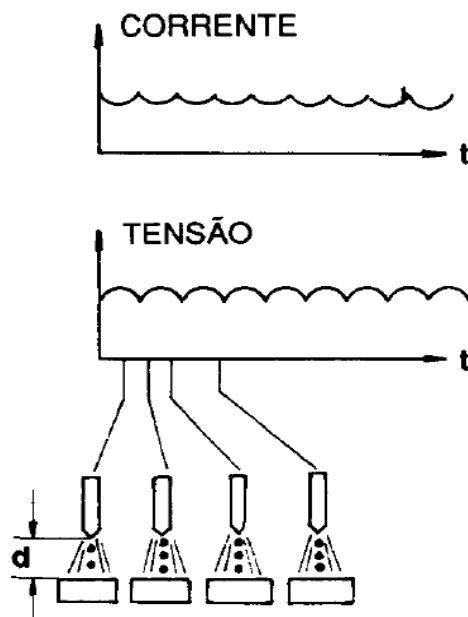


Figura 12 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência por spray ou aerossol.

Fonte: Wainer (2015).

Através da Figura 13 ilustrada a seguir por Wainer (2015) pode-se perceber o funcionamento deste método de transferência. Wainer (2015) explica que este processo gera dois níveis de corrente. No primeiro instante, a base I_b é muito baixa e não ocorre transferência, porém tem-se início a fusão do arame. No segundo instante, a corrente de pico I_p é superior a corrente de transição dos processos de transferência globular e também do spray sendo denominado corrente I_t , isso gera o destacamento e transferência de somente uma única gota. Assim o processo se torna cíclico e a cada ciclo o material de adição é transferido a poça de fusão.

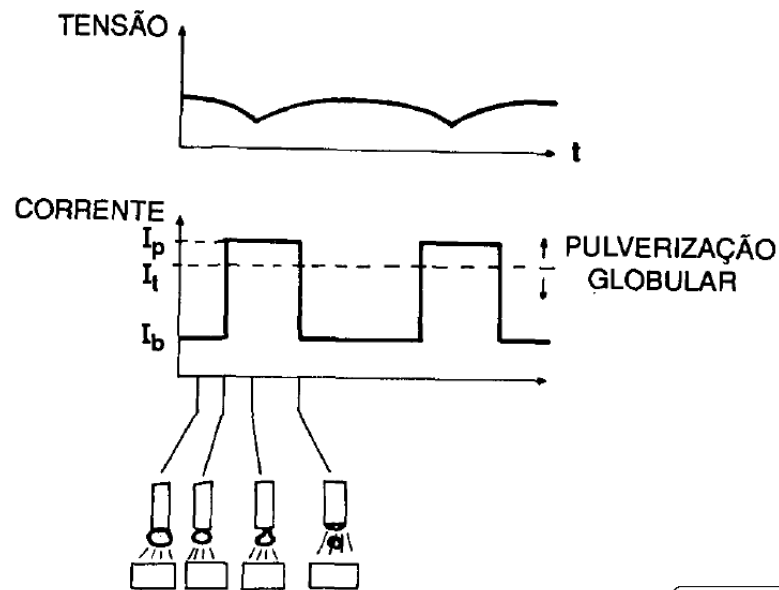


Figura 13 - Variação da corrente e tensão de soldagem durante a transferência controlada ou arco pulsado.

Fonte: Wainer (2015).

Com a diversidade de tipos e posições de juntas, assim como espessura das peças a serem unidas, torna-se necessário o conhecimento de todos os métodos de transferência do metal de adição, uma vez escolhendo o processo de forma errônea o resultado final não poderá ser o esperado, acarretando custo elevado do processo, retrabalho e possível incapacitação do reaproveitamento do material.

2.3. Automação da soldagem

A automação é uma ciência que trabalha em conjunto com os adventos tecnológicos, visando cada vez menos a aplicação da mão de obra humana e cada vez mais a implementação de equipamentos e plantas, tornando a linha de produção cada vez mais operante, segura e confiável.

Segundo Rosário (2009) Automação é todo processo que realiza atividades ou auxilia o homem de forma autônoma, substituindo a observação,

esforços e decisões humanas através de diversos dispositivos e softwares configurados e programados para determinada aplicação.

A automação assim como outros processos é um conjunto de várias ciências, portanto são necessárias para seu total entendimento. Rosário (2009) define o conceito abrangente de automação em uma imagem que divide as ciências que englobam o processo, conforme ilustra a Figura 14.

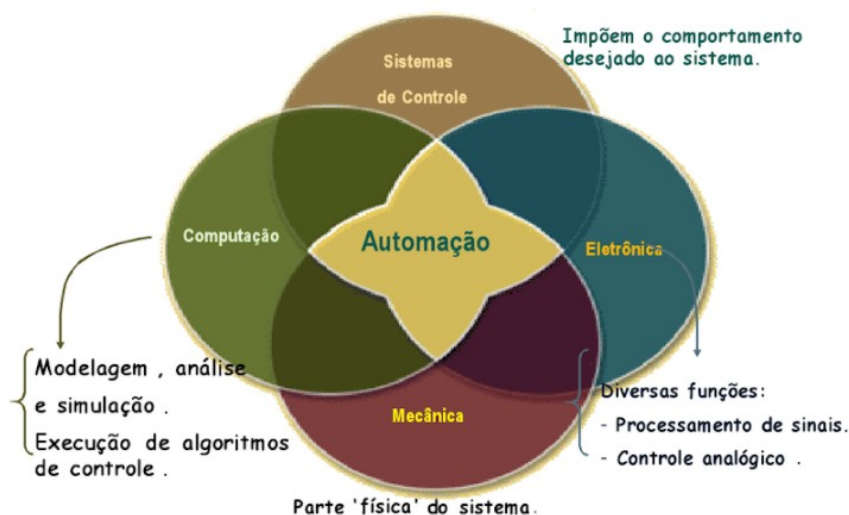


Figura 14 - Conceito abrangente de automação.
Fonte: Rosário (2009).

Rosário (2009) cita que a automação embora necessite várias vezes de tecnologia para seu avanço, esta se iniciou nos anos 20, com a linha de montagem modelo T, desenvolvida por Henry Ford, “a fim de aumentar a produtividade, reduzir os custos de produção e garantir a segurança dos operadores na realização de atividades perigosas”.

“A integração da automação nasceu, na prática, nos anos 20, quando Henry Ford criou a linha de montagem modelo T, a fim de aumentar a produtividade,

reduzir os custos de produção e garantir a segurança dos operadores na realização de atividades perigosas”.

A automação é comumente aplicada em trabalhos com alta repetibilidade e/ou que oferecem risco aos trabalhadores, diminuindo assim o custo com desperdícios de matérias primas, aumentando a qualidade do produto final e a sua padronização e contribuindo com a segurança dos efetivos físicos e dos operadores. Os processos de soldagem são em geral repetitivos, possuindo somente alteração dos parâmetros de soldagem, permitindo assim automatizar vários de seus métodos de união com custos acessíveis às empresas.

Segundo Norrish (2015) o mundo está passando por uma escassez de soldadores com elevado conhecimento do processo e também a preocupação devido aos perigos de exposição a soldagem veem tornando cada vez mais necessário a simplificação e/ou automação de alguns destes processos. Norrish (2015) enfatiza seu comentário com uma publicação do The Wall Street Journal que publicou em 15 de agosto de 2006 que a demanda por soldadores qualificados nos Estados Unidos ultrapassará o valor de 200000. Tal fenômeno não acontece somente nos Estados unidos, adicionando também Austrália, Japão e o oeste europeu.

Norrish (2006) diz que muitos dos processos de soldagem são potencialmente perigosos, pois geram fumos e partículas metálicas, gases tóxicos, elevado ruído e alta taxa de radiação como por exemplos radiações ultravioletas e raios-x. A automação oferece meios de remover os operadores da frente de serviço, evitando assim a chance da ocorrência de doenças ocupacionais.

O fator custo está diretamente ligado ao processo de automação de alguns métodos de soldagem, uma vez que na maioria das vezes para implementar

a automação não implica em altos investimentos e o retorno se torna satisfatório rapidamente. Os processos automatizados possuem um custo de investimento superior aos processos manuais de soldagem, porém tal custo é recuperado superficialmente no gasto com consumíveis, uma vez que o processo automatizado utiliza praticamente os consumíveis necessários para que ocorra a soldagem. A grande economia ocorre na ocupação do processo, uma vez que o processo manual é dependente de operadores, sendo assim disponibiliza um alto tempo para que ocorra a soldagem, já os processos automatizados não precisam de paradas, ou seja, a soldagem é realizada de forma contínua e sempre com a mesma qualidade de união.

Norrish (2006) realizou na Austrália um comparativo do custo dos processos automatizado e manual de soldagem em aço com 20 mm de espessura, afirmando a citação anterior através da Figura 15.

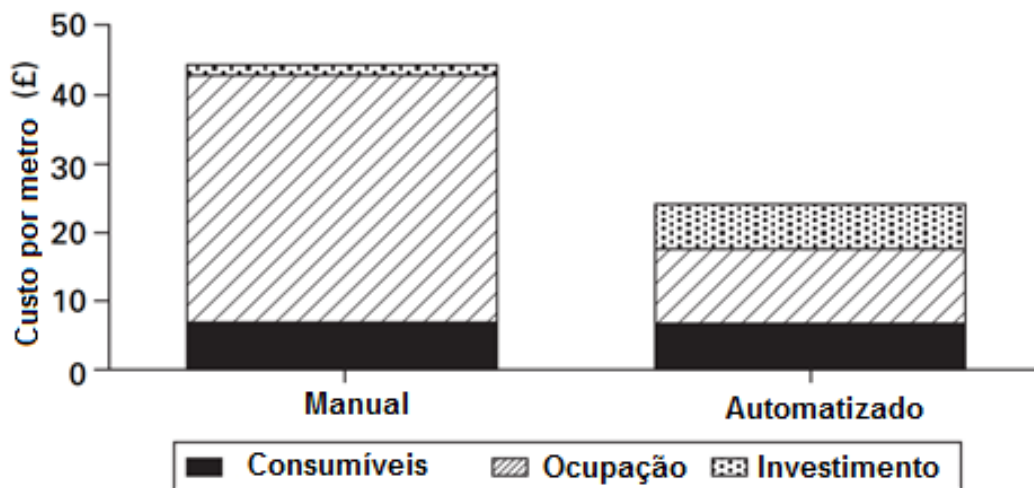


Figura 15 - Comparativo de custos entre os processos de soldagem automatizado e manual.
Fonte: Norrish (2006).

A qualidade de reprodução do produto pode muitas vezes ser difícil de conseguir com técnicas manual de soldagem, particularmente quando materiais

avançados e juntas complexas configurações estão envolvidas. Aumentar o nível de automação pode significar melhorar a consistência, aumentar o rendimento e reduzir o custo da inspeção e rejeição. Norrish (2006)

A automação da soldagem pode ocorrer de diversas formas uma vez que existem diversas configurações, materiais, posições, dentre outros parâmetros que vão indicar qual o processo de automação mais específico para cada atividade em relação a soldagem empregada. Logo temos várias maneiras de automações em soldagem, Norrish (2006) classificam estes processos em grandes grupos e os nomeiam da seguinte forma:

- Mecanização simples;
- Automação dedicada e de propósito especial;
- Soldagem robótica;
- Automação modular;
- Controle programável;
- Servo de controle remoto e sistemas automatizados

2.4. Soldagem Orbital

A soldagem orbital é um método de soldagem utilizado em tubos, tubulações e furos, podendo ser realizada por diversos processos de soldagem. Segundo Norrish (2006) os sistemas de soldagem existentes são cabeça tubo a tubo, placa tubo a tubo e soldadores internos sendo estes sistemas aplicados dentro ou fora da tubulação a ser unida, assim um cabeçote com realiza a soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding – TIG) ao redor da junta ou ponto a ser soldado.

Outro método comumente aplicado é o qual também se tem um cabeçote rotativo, porém se utiliza a soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding – Mig/Mag) onde a alimentação do arame e o controle do arco podem ser automatizados e incorporados no cabeçote de soldagem, Norrish (2006). Alguns sistemas mais sofisticados permitem a alteração dos parâmetros de soldagem de acordo com o ponto onde está ocorrendo a soldagem, Norrish (2006). Segundo a norma ASME e ISO, a soldagem orbital ocorre nas posições 5G e 6G, assim em cada revolução ocorrem às soldagens plana, vertical ascendente, sobre cabeça e vertical descendente. Como dada posição de soldagem exige um parâmetro especial, se torna necessário uma melhor configuração do equipamento de soldagem para que não apareçam descontinuidades nos cordões de solda.

Portanto, a soldagem orbital é um processo muito eficiente, com as variáveis corretamente aplicadas, podem-se obter cordões com as propriedades mecânicas desejáveis. É um processo que manualmente se torna pouco produtivo e a qualidade do produto final se torna duvidosa. A aplicação deste processo é recomendada em várias etapas da soldagem, desde o passe raiz, enchimento da junta a ser soldada e até mesmo em preenchimento de furos como é aplicado no processo bore Welding por exemplo.

2.5. Mandrilhamento

Segundo a empresa Sandvick (2018) mandrilhamento ou mandrilamento é um processo de usinagem para aumentar ou fazer o acabamento de um furo existente. O mandrilhamento é um processo frequentemente empregado na

usinagem para acabamento de furos, em peças que já adquiriram um elevado valor agregado através de horas de usinagem prévia, Mühle (2000).

Ferraresi (1969) afirma que neste processo, uma ferramenta de ponto único cortante é alimentada linearmente, paralelamente ao eixo de rotação, no interior diâmetro de um furo existente na peça, e ainda ressalta que para este processo, pode-se ter a rotação tanto do eixo e a manutenção da peça estática, ou o contrário, sendo assim, a peça realizaria as revoluções, o método básico é ilustrando esta ação por Norrish (2006) na Figura 15.

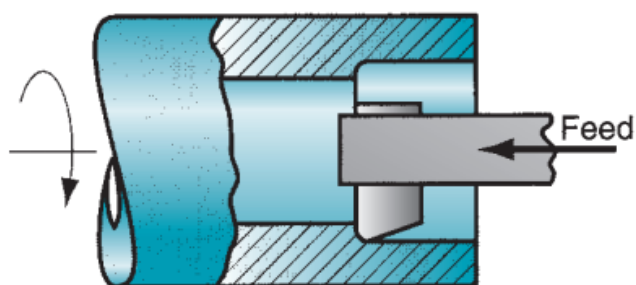


Figura 16 - Processo básico de mandrilhamento.
Fonte: Norrish (2006).

Groover (2010) explica que para realizar este processo de usinagem, o eixo deve ser muito rígido, uma vez precisa resistir a deflexão e vibração durante o corte. Sendo assim, as barras de mandrilhar devem ser fabricadas de metal duro, cujo módulo de elasticidade passe de 620×10^3 MPa.

Muhle (2010) afirma que o processo de mandrilhamento embora menos conhecido e aplicado que os processos mais convencionais como, por exemplo, fresamento e torneamento, mandrilhar é um processo de muita aplicabilidade uma

vez que este processo faz parte de aproximadamente 15% de todas as ferramentas envolvidas em um processo de usinagem.

Polli (1995) releva a utilização do mandrilhamento afirmando que o emprego do mandrilhamento nos atuais centros de usinagem é crescente, exigindo cada vez mais ferramentas modernas que possam trabalhar confiavelmente, aumentando a segurança, a confiabilidade e a produtividade do processo. A ferramenta empregada no processo é denominada mandril, sendo esta ilustrada a seguir na Figura 16.

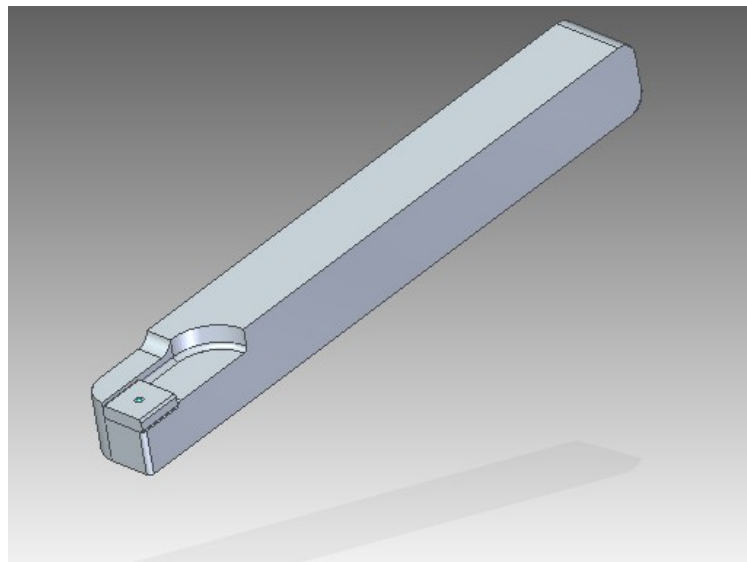


Figura 17 - - Barra mandrilhadora ou mandril.

Este processo é realizado por uma ferramenta de corte é fixada em um eixo com um determinado ângulo que realiza revoluções, removendo assim o material usinado. Uma prática comumente aplicável e conhecida do processo de mandrilhamento ocorre em bloco de motores de automóveis, onde é necessário uma pequena alteração do diâmetro do cilindro e um excelente acabamento superficial.

Existem vários tipos de mandrilhamento, dentre estes se destacam o cilíndrico, radial, cônico e esférico. Tais métodos são descritos por Ferraresi (1969) e

estes conceitos são utilizados até nos dias atuais. Ferraresi (1969) o descrevem da seguinte maneira:

- **Cilíndrico** é o processo em que a superfície usinada é cilíndrica e o seu eixo de rotação coincide com o eixo em torno do qual a ferramenta gira.
- **Cônico** é o processo em que a superfície usinada é cônica e seu eixo de rotação coincide com o eixo em torno do qual a ferramenta gira.
- **Radial** é o processo em que a superfície usinada é plana e perpendicular ao eixo em torno do qual gira a ferramenta.
- **Esférico** é o processo em que a superfície usinada é esférica e o eixo de rotação coincide com o eixo em torno do qual a ferramenta gira.

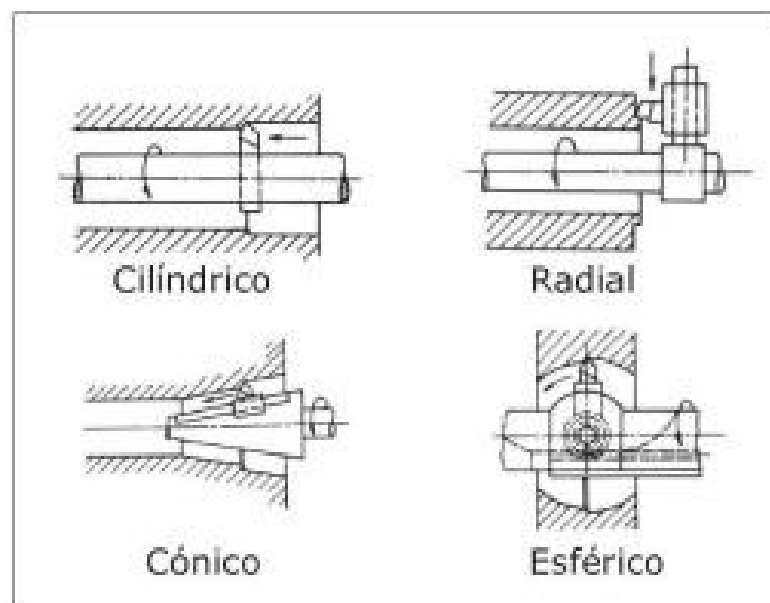


Figura 18 - Tipos de mandrilhamento.
Fonte: Ferraresi (2009).

Segundo Mühle (2000), no mandrilhamento, as dimensões dos furos usinados dependem da excentricidade da ferramenta de cortes, ou seja, é possível usinar furos de variados diâmetros utilizando a mesma ferramenta de corte, porém é necessário a regulagem da mesma no eixo onde a ferramenta está alojada.

2.6. Processo bore welding

O processo bore welding é comumente aplicado em furos cilíndricos e tem como principal objetivo a recomposição do furo com desgaste, para que este obtenha novamente as dimensões originais. Este processo ocorre em duas etapas principais, que são compostas pelo processo de soldagem e posteriormente pelo de mandrilhamento. Este processo por ser composto não possui uma literatura aplicada, sendo ela dividida entre os dois processos inerentes à atividade.

A primeira etapa consiste na centralização do furo com desgaste e preenchimento com solda, sendo assim a peça trabalhada obtém dimensões inferiores à aplicação do mesmo. Norrish (2006) classifica este processo de soldagem como automação dedicada e de propósito especial, uma vez que são necessárias adaptações do processo para determinada finalidade. A soldagem no furo, pode ser manual ou automatizada, sendo este último mais eficiente. A soldagem automatizada exige várias adaptações em relação ao processo manual, e é necessário: um eixo que realize revoluções em torno do furo, um dispositivo para alinhamento e fixação do mesmo, um motorreductor que é responsável por transmitir torque ao eixo e por último um fuso responsável pelo deslocamento transversal do eixo. Norrish (2006) define este processo de automação como soldagem orbital. Este mecanismo é ilustrado pela empresa XDEM na Figura 19.

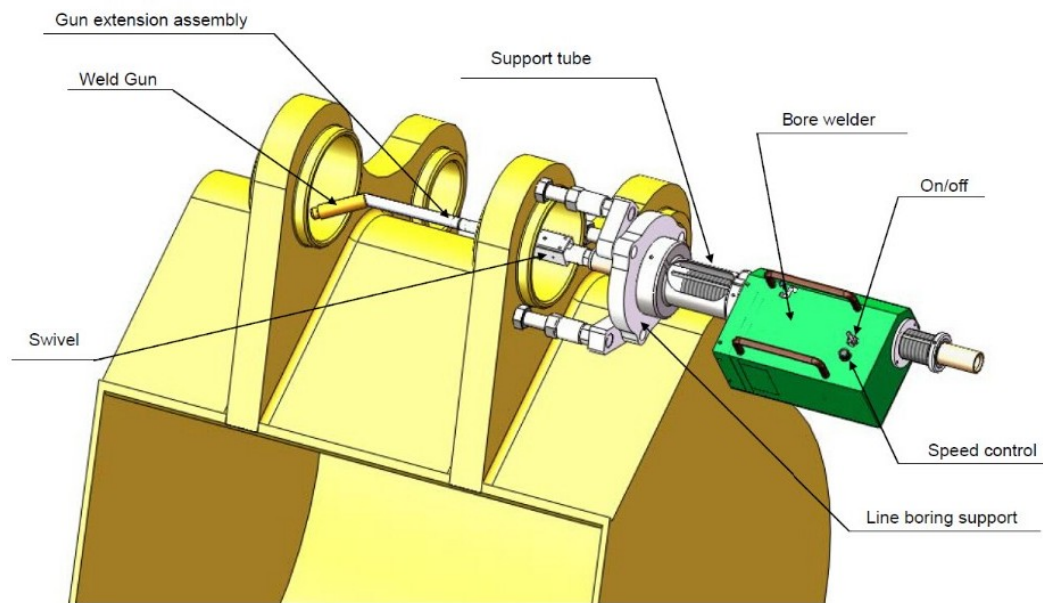


Figura 19 - Processo de soldagem em furos com desgaste.
Fonte: <https://xdem.en.alibaba.com/product/>

Após o furo ser preenchido com solda, seu diâmetro se torna inferior ao de aplicação e apresenta superfície irregular devido a vários passes dos cordões de solda. Assim, é necessária a remoção de material através do processo de usinagem, com o intuito de obter o diâmetro de trabalho do furo, assim como a melhoria do acabamento superficial.

Assim como o mecanismo de soldagem, o mandrihamento também necessitará de adaptações para corresponder a esta solicitação. O mecanismo de mandrihar é composto por um eixo com vários furos transversais onde se alojam as ferramentas de corte, o eixo é acoplado em uma lupa que faz o alinhamento deste. O mecanismo responsável pelas revoluções e translações é semelhante ao do mecanismo de soldagem. O mecanismo é apresentado pela empresa XDEM na Figura 20.

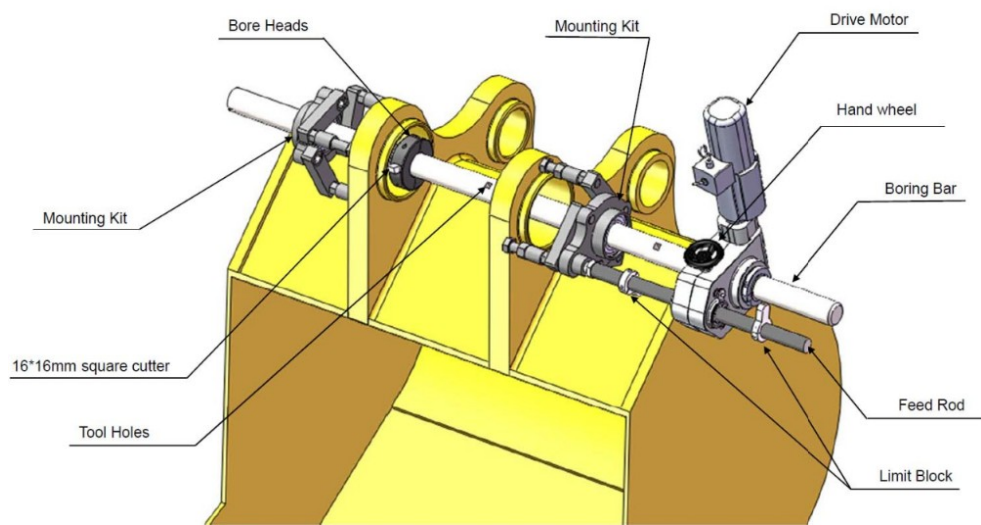


Figura 20 - Processo de mandrilhamento em furos com desgaste.

Fonte: <https://xdem.en.alibaba.com/product>

Devido às posições de soldagem e mandrilhamento e as aplicações de seus respectivos mecanismos, o processo bore welding é permissível à aplicação em furos em todas as posições.

3. Metodologia

Para o desenvolvimento do projeto, foi analisada demanda do processo em mineradoras localizadas no quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. Foram analisados vários aspectos desta atividade, uma vez que este é sempre realizado por empresas terceirizadas. Os dados foram obtidos através de entrevistas com os profissionais envolvidos tanto diretamente quanto indiretamente no processo, estas informações não foram contabilizadas e inseridas em gráficos e/ou tabelas uma vez que possuem elevada complexidade.

Nas entrevistas foi analisado como o processo ocorre atualmente em uma mineradora, considerando os processos de soldagem e mandrilhamento, obtendo assim informações das variáveis de cada processo isoladamente. Logo, foram obtidas informações a respeito de como o processo *bore welding* performa em uma mineradora.

Após aprofundar o conhecimento do processo realizado nestas mineradoras, foi realizado uma pesquisa a respeito de novas tecnologias implementadas ao processo, aprimorando assim o conhecimento a respeito do processo e alterando a concepção estrutural do protótipo virtual, uma vez que este será projetado com o intuito de obter desempenho superior aos dispositivos utilizados atualmente.

Esta pesquisa envolveu uma busca em artigos científicos, nas bases de dado Capes e Scielo, no período de outubro à novembro de 2017. Para esta busca foram utilizadas as palavras automação da soldagem, mandrilhamento, em português, e também *bore welding*, *wear bores* em inglês.

Uma pesquisa de mercado também foi feita para identificar produtos similares que realizam a mesma função. No cenário nacional tem-se escassez de recursos inerentes ao processo *bore welding*, assim, foi analisado o que o mercado internacional oferecia de novo para análise. O site <http://borewelderparts.com> possui sua localização física na Espanha e oferece tanto dispositivos quanto peças para aplicações especiais no processo requerido, assim foi possível analisar as limitações do protótipo, uma vez que este deve se adaptar as peças fornecidas pelo mercado. A empresa multinacional *Climax* é contatada através do site <https://www.climaxportable.com/about-us/bortech>, atuando na América do norte, Europa e Ásia, possui sua sede nos Estados Unidos . Esta empresa disponibiliza equipamentos que realizam o processo *bore welding* de forma automatizada, sendo assim, foi possível realizar análise a respeito da automação do produto, sendo este, o ponto forte desta empresa.

Os levantamentos de custos dos componentes e dispositivos trabalham em conjunto com o estudo de novas tecnologias, uma vez que por ser um produto e/ou um serviço, se obteve muitos mecanismos em sites e lojas de vendas. Assim, foram realizadas avaliações inerentes ao preço dos produtos atualmente disponíveis no mercado, analisando de forma empírica a viabilidade financeira de construção posterior do protótipo projetado.

Inicialmente foi pensado na parte estrutural da máquina, buscando-se definir suas funções principais e resultados que se podiam esperar do produto. Nesta parte foram identificados pontos de fixação do protótipo em seu posto de trabalho, assim como a fixação e união de cada módulo.

Para o desenvolvimento da atividade foi elaborado uma sequência de trabalho do produto, assim, o projeto foi subdividido em três módulos, sendo eles o

de soldagem, de mandrilhamento e o responsável pela translação dos eixos, sendo esta a sequencia de desenvolvimento dos módulos propostos. Com esta divisão, foi possível encontrar e calcular as características dimensionais de cada grupo e realizar a ligação entre eles, uma vez que no final todos formarão somente um projeto e devem desempenhar suas funções em um mesmo eixo de translação.

As primeiras alternativas do projeto foram executadas à mão, assim foi-se analisando as dimensões de cada grupo. Foram projetadas algumas peças necessárias para a estrutura do produto responder de forma satisfatória a sua operação. Após este desenvolvimento, o projeto se deslocou para sua etapa final que se estabeleceu na confecção das peças através do *software CAD solid edge*. Nesta etapa ocorreu o desenvolvimento das peças, montagem o protótipo e animação do mesmo para analisar seu desempenho em operação. A montagem do produto ocorreu posteriormente ao desenvolvimento de cada módulo.

O primeiro valor analisado no produto foi o diâmetro dos eixos, uma vez que a parte de soldar e a de mandrilhar possuem o mesmo diâmetro, porém, estes recebem solicitações diferentes, tanto em sentido quanto em módulo. Através deste diâmetro, foi possível desenvolver a parte estrutural do protótipo, pois variáveis como resistência à torção, torque e a deflexão foram encontradas através de cálculos envolvendo estes valores com variáveis preestabelecidas no protótipo.

Para o cálculo de torção que os eixos seriam submetidos foi utilizada a fórmula matemática expressada por Norton (2013) expressa na Eq.1:

$$\tau = \frac{Tc}{J}$$

Eq.1

Onde:

- τ = Tensão de cisalhamento imposta ao eixo;
- T = Torque aplicado;
- C = raio do eixo;
- J = momento polar de inércia da seção transversal.

O valor do torque dos motores foi encontrado utilizando os conceitos de Shiegley (2011) através da eq.2:

$$T = FD$$

Eq.2

Onde:

- F = Força de corte para o motor de translação do conjunto e para o motor de mandrilhamento. O motor de soldagem só precisa vencer sua inércia polar, assim possui um torque efetivamente baixo;
- D = Distância da aplicação da força ao centro do eixo que receberá a solicitação.

Os demais cálculos referentes a projetos de máquinas e também a análise da estrutura dos componentes foram adquiridos a partir das literaturas de Shiegley (2011), Norton (2013) e Hallyday e Resnick (2015), sendo os dois primeiros a referência para o desenvolvimento do protótipo. Através dos conceitos destes dois

autores, foram elaborados os mecanismos necessários para realizarem a atividade proposta ao produto desenvolvido, sendo estes o mecanismo de fuso, a caixa de transferência e a aplicação dos rolamentos nos suportes.

No módulo referente à soldagem, foram formalizados variáveis do processo, sendo elas a velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, tipo de consumíveis utilizados assim como a fonte utilizada. Estes parâmetros foram encontrados a partir de tabelas e relações de custo benefício para a atividade a ser realizada.

Após o término deste módulo, se inicia o segundo, onde foram encontradas variáveis que podiam gerar deformações ou fraturas do eixo devido à força de corte, neste contexto foi avaliados parâmetros como torção e deflexão, sendo estas solicitações explicadas anteriormente. Com estes parâmetros foi possível definir de quais materiais o eixo poderia ser confeccionado.

O terceiro módulo se resumiu na confecção de um mecanismo que realizaria o deslocamento longitudinal do eixo. Foi elaborado tal dispositivo em um sistema de fuso, que foi analisado o torque suportado e requerido pelo mesmo, assim como o torque necessário pelo motor, uma vez que deve suprir a força de corte que gera uma reação no sentido oposto ao movimento e ao peso dos eixos, que mesmo sendo baixo, é fundamental para o dimensionamento deste mecanismo.

Após confeccionar e analisar o funcionamento isolado de cada módulo foi realizada a união dos três módulos e analisado o funcionamento do protótipo. Foi analisado o protótipo do produto e as solicitações impostas inerentes ao processo proposto, em seguida foi elaborada uma simulação no *software solid edge* para melhor apresentação do sistema operacional do protótipo, identificando os pontos de

soldagem, mandrilhamento e translação dos eixos através das rotações impostas pelos motores de atuação destes.

4. Desenvolvimento e resultados.

O desenvolvimento do produto ocorreu em módulos, e dentro destes há algumas peças que possuem suas particularidades e, assim será explicado o projeto de cada uma das peças separadamente.

4.1 Pesquisas de mercado

Atualmente, existem várias empresas que se destacam em produtos de reparo bore welding devido à alta tecnologia implementada em seus dispositivos e a facilidade execução das atividades, dentre estas se destacam as empresas Climax e bore repair.

Seus dispositivos se diferem do protótipo em relação a execução das atividades, uma vez que estas empresas vendem produtos que soldam e mandrilam em etapas, ou seja, é necessário realizar a soldagem primeiramente para em seguida realizar a usinagem do furo, sendo ainda necessário a remoção da tocha de soldagem do local. O protótipo proposto tem por finalidade evitar tais trocas, tornando o processo mais dinâmico. Os equipamentos destas empresas são mostrados nas Figuras 21 e 22.

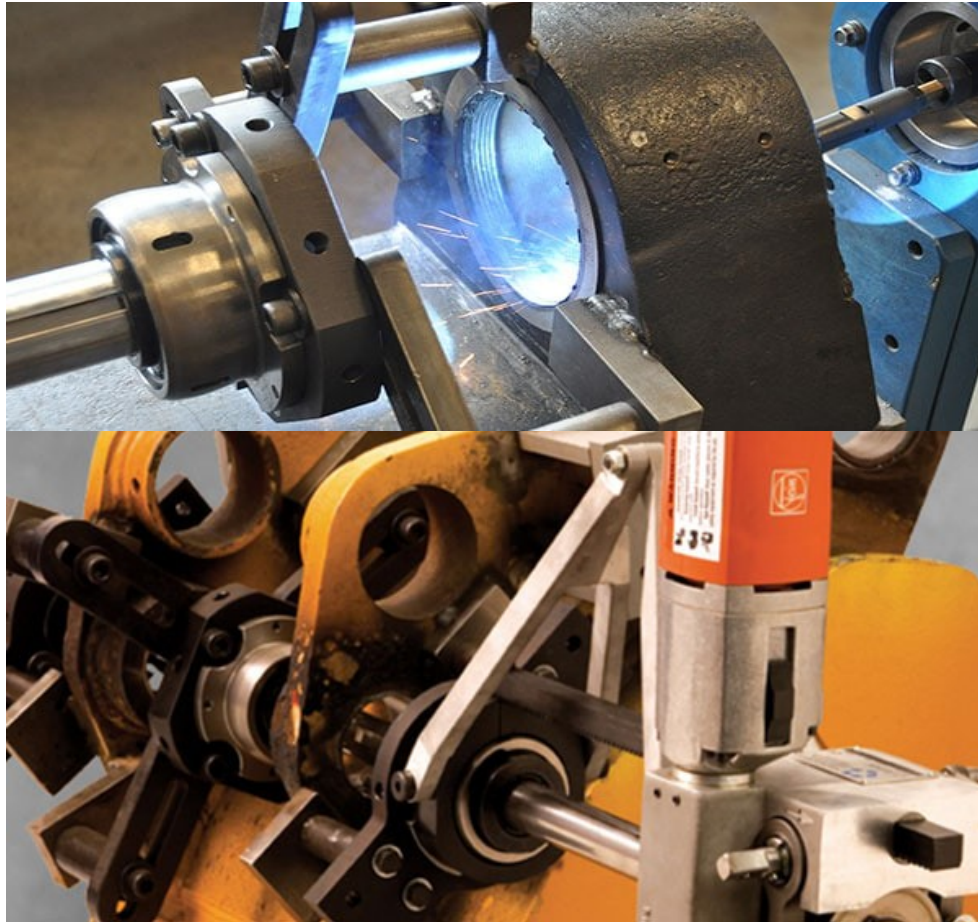


Figura 21 - Mecanismos de soldagem e mandrilhamento da empresa Climax.

Fonte: <https://www.climaxportable.com/about-us/bortech>.

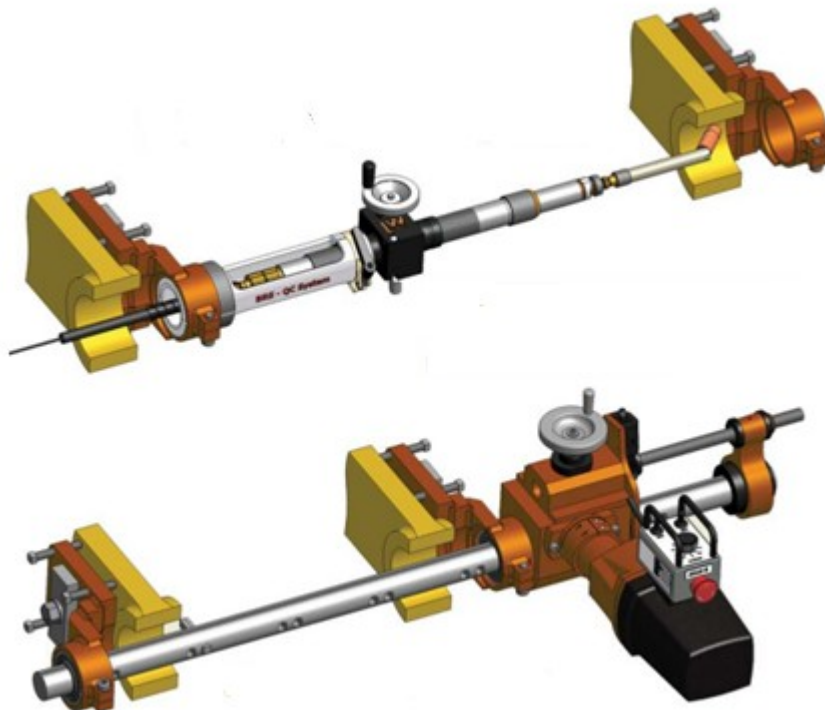


Figura 22 - Mecanismos de soldagem e mandrilhamento da empresa Bore Repair.

Fonte: www.repairbores.com.

Como observado nos modelos encontrados no mercado, tanto a parte de usinagem quanto a parte de mandrilhamento são automatizadas, fazendo assim com que o processo se torna cada vez mais rápido, prático e efetivo. O protótipo desenvolvido tem como finalidade a realização das ações propostas por estas empresas, se destacando pela sua melhor funcionalidade, tornando o processo bore welding mais rápido.

4.2 Configurações do eixo de solda

A ideia do projeto é desenvolver um protótipo que reparasse furos com pequenos diâmetros devido ao maquinário encontrado na região. Devido à análise em equipamentos nas mineradoras foi verificado que furos comumente usinados são superiores a 50 mm, assim optou-se por um eixo com diâmetro de 40 mm de diâmetro externo para realização da soldagem.

O eixo de soldagem é dividido em duas partes, sendo elas denominadas corpo do eixo e tampa. O corpo do eixo possui alojamentos onde buchas serão aplicadas para fixação da tocha de soldagem. Neste elemento existe um alojamento rosqueado em sua extremidade que tem por finalidade a aplicação do elemento de união dos eixos. Este elemento é ilustrado a seguir na Figura 22.



Figura 23 - Corpo do eixo de soldagem.

Como dito anteriormente, esta parte do eixo possui sulcos que são responsáveis pelo alojamento de buchas de borracha. Estes têm por função fixar e a tocha e dimensionar o diâmetro que será soldado, pois serão confeccionadas buchas com furos excêntricos, logo se torna possível a soldagem de diferentes diâmetros. As buchas são mostradas na Figura 24.

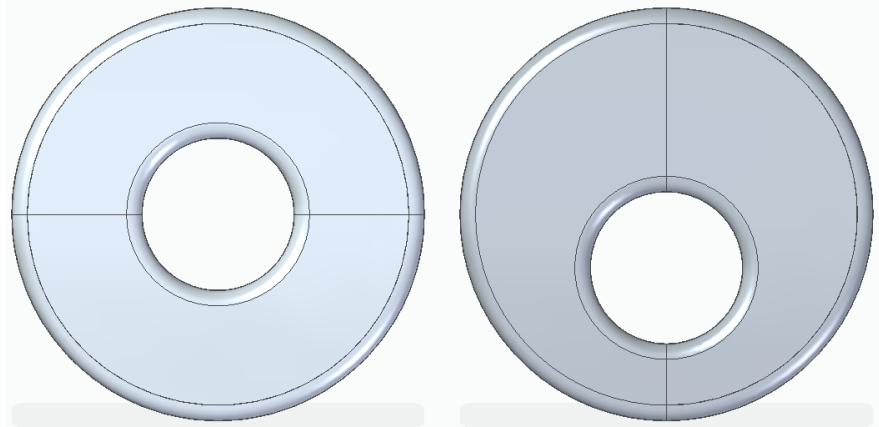


Figura 24 - Tipos de buchas para fixação da tocha

Estas buchas são dispostas no corpo do eixo e fixam a tocha de soldagem de acordo com a Figura 25. A tocha de soldagem utilizada é uma tocha especial para este processo, não sendo encontrada no mercado nacional. Este bico configura uma inclinação de soldagem de 75° e permite uma excelente soldagem. Este pode ser conectado a mangueiras ou tubos através de conectores que são ligados a uma central de soldagem onde são configurados os valores de algumas variáveis de soldagem.

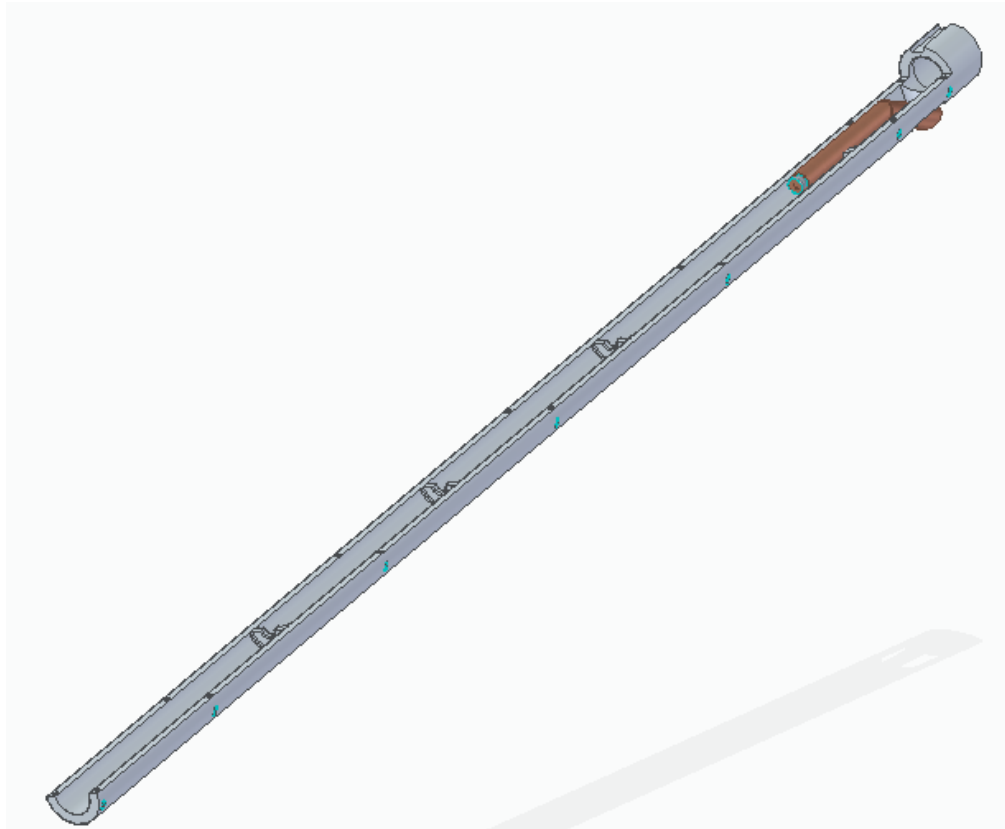


Figura 25 - Fixação da tocha e dos elementos de soldagem.

Para conclusão da montagem do eixo, instala-se a tampa, que tem por principal função o pensamento das buchas de borracha para fixação da tocha de soldagem. É possível perceber que o corpo do eixo possui furos com rosca, estes são os pontos de fixação da tampa ao corpo, uma vez que a tampa possui o alojamento adequado para os fixadores dos elementos (parafusos). A montagem do eixo completo é mostrada na Figura 26. Assim, como na parte do corpo eixo, a tampa do eixo de soldagem possui um rasgo responsável pelo alojamento da chaveta. Este elemento como finalidade transmitir a rotação da caixa de transferência ao eixo, trabalhando com uma pequena folga pois irá transladar em torno do eixo.



Figura 26 - Montagem completa do eixo de solda.

Como se pode observar na Figura 26, na outra ponta do eixo de soldagem, tem-se furos com roscas para fixação do rolamento responsável por alojar o cabo da tocha de soldagem e evitar o desgaste prematura do mesmo através do atrito com as bordas cortantes do eixo.

4.2.1 Parâmetros de soldagem utilizados

Para o produto performar o mais próximo possível do real, foram realizados estudos, assim foram selecionadas e dimensionadas algumas variáveis do processo de soldagem para o protótipo.

Segundo a ESAB, em seu material de soldagem Mig/Mag, é definido uma direção de soldagem, assim como determinada o intervalo de ângulos onde o processo de soldagem atingirá seus padrões ótimos de soldagem, tais definições são ilustradas na Figura 27.



Figura 27 - Sentido de soldagem e ângulo de trabalho do bico.

Com foi explicado anteriormente o produto desenvolvido trabalha com uma tocha onde o bico possui uma inclinação de 75°, como a direção de soldagem foi estabelecida conforme a ESAB e o ângulo de soldagem estão dentro os parâmetros, pode-se concluir que o protótipo se torna eficiente para o processo de soldagem em relação a estas duas variáveis.

Já para o sentido de soldagem, Garcia e Santana (2015) realizaram estudos no sentido de soldagem em processos orbitais, assim, demonstraram que um dos sentidos que ocorrem uma deposição mais uniforme utilizando o método de transferência por curto-circuito é o vertical descendente, assim, o protótipo utilizará o sentido vertical descendente anti horário até realizar um ângulo de 180°, após esta ação, a tocha retornará até sua posição de origem e em seguida realizará a soldagem vertical descendente no sentido horário, executando assim, a soldagem total do furo. A deposição de material é justificada por Garcia e Santana (2015) através da Figura 28.

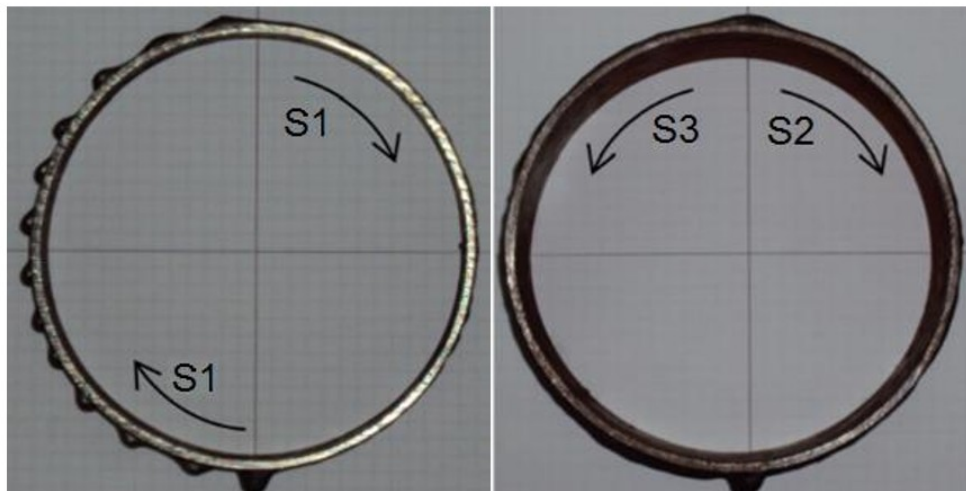


Figura 28 - Sentido de soldagem e deposição com mesmos parâmetros de soldagem.

Meneses (2013) demonstra em seus estudos o acabamento superficial e as descontinuidades encontradas em soldagens orbitais através da transferência por curto circuito. Para tal conclusão, a autora utilizou vários parâmetros de soldagem e os analisou de forma empírica, obtendo assim, inúmeras configurações possíveis de algumas variáveis do processo, dentre estas, as que apresentaram melhor desempenho segundo a autora estão a seguir na Tabela 3 e foram aplicadas no protótipo.

Velocidade de soldagem	Velocidade de alimentação do arame	DBCP (Distância do bico de contato a peça)
13 mm/s	5,5 m/min	12 mm

Tabela 3 - Variáveis de entrada aplicadas no protótipo piloto

Com a velocidade de soldagem deduzida por Meneses (2013), foi possível encontrar a corrente e a tensão aplicada através de cálculos matemáticos trabalhando com os intervalos aplicados pela ESAB a partir de seu material didático que é demonstrado na tabela 4. Nesta tabela, também é limitado o diâmetro da arame de soldagem em 1,2mm, sendo este valor, de melhor aplicabilidade para o produto desenvolvido, uma vez que a ESAB denomina a soldagem orbital utilizada no processo como 5G.

POSIÇÕES	Diâmetro 1,2mm Stick-out 15-20mm			Diâmetro 1,4mm Stick-out 15-20mm			Diâmetro 1,6mm Stick-out 20-25mm		
	Corrente (A)	Velocid. (m/min)	Tensão (V)*	Corrente (A)	Velocid. (m/min)	Tensão (V)*	Corrente (A)	Velocid. (m/min)	Tensão (V)*
1F 2F	180-300	6-14	24-31	190-340	4,5-10,5	24-32	200-400	4,0-10,5	25-35
3F 4F	180-250	6-10	23-28	190-240	4,5-6	24-28	3F 220-250 4F 200-250	5-5,8 4-5,8	24-28 25-29
1G Ralz** Enchimento	180-200 180-280	6-8 6-12	23-26 25-31	*** 190-340	4,4-10,5	24-32	*** 210-400	4,5-10,5	25-35
2G Ralz** Enchimento	180-210 180-260	6-8,5 6-9	23-26 25-29	180-210 190-300	4-5 4,4-8,5	23-27 24-32	190-220 210-320	3,7-5 4,5 8	25-28 25-33
3G Ralz** Enchimento	180-220 180-240	6-8,5 6-9	23-27 24-28	180-210 190-240	4-5,5 4,4-6,2		*** 200-250	5-6	24-28
4G Ralz Enchimento	não 180-260	6-10	24-28	*** 190-240	4,5-6		***		
5G Ralz Enchimento	não 180-240	6-9	24-28	*** 190-240	4,5-6		***		
6G Ralz Enchimento	não 180-240	6-9	24-28	***190- 240	4,5-6		***		

* Tensão de arco válida para mistura de gás Ar+20%CO₂, para 100% CO₂ aumenta a tensão de 1-2v. ** Utilização de backing cerâmico

07

Tabela 4 - Posições de soldagem e variáveis de alimentação em relação ao diâmetro do arame.
Fonte: Apostila soldagem MIG/Mag ESAB.

Identificando a posição do processo como a 5G e utilizando a velocidade de soldagem de 5,5 m/min que está dentro os parâmetros recomendados pela ESAB foi possível encontrar parâmetros a serem utilizados pelo protótipo. Logo, foi

possível encontrar os valores de tensão e corrente sendo eles 23,3 V e 205 A. A velocidade determinada por Meneses (2013) é a velocidade linear da tocha, assim, será necessário converter esta velocidade para velocidade angular, porém, esta velocidade angular varia de acordo com o diâmetro do furo a ser soldado, assim, a fórmula genérica para encontrar a rotação do eixo de soldagem é dada a seguir pela Eq. 3.

$$\omega = \frac{5,5}{R}$$

Eq.3

Onde:

- ω = Velocidade linear do eixo (RPM);
- R = Raio do furo a ser soldado (metros);
- 5,5 = Velocidade de soldagem adotada (m/min).

Outra variável importante neste processo de soldagem é mostrada nas observações da Tabela 5 que é o tipo de gás ou mistura serão utilizadas no processo, assim como a vazão deste elemento que será aplicada na poça de fusão. A ESAB recomenda uma proporção de 80% AR + 20% CO₂.

Tendo como material base aço carbono, foi utilizado o material de treinamento da Palmer e Fricke soldas (2015) para utilizar uma proporção de gás de 75% AR + 25% CO₂, mesmo esta proporção sendo um pouco diferente da especificada pela ESAB, se torna aplicável ao processo *bore welding* justificado pela Tabela 5, que mostra a aplicação dos gases em relação ao metal de base. Segundo o diretor da empresa Powermig, Fochesatto (2018) a vazão de gás no processo de

soldagem Mig/Mag deve ser de aproximadamente 10 vezes o diâmetro do arame empregado, ou seja, como o arame utilizado é de 1,2 mm, o fluxo de gás será de 12 l/min.

Metal	Gás de Proteção	Espessura	Transferência	Vantagens
Aço carbono	95% Ar + 3,5% O ₂	-	SPRAY	Mais fluidica e controlada poça de fusão
	90% Ar + 8-10% CO ₂	-	SPRAY	Altas velocidades e baixo custo
	75% Ar + 25% CO ₂	até 3,2 mm	Curto-Circuito	Mínima distorção e respingos
	75% Ar + 25% CO ₂	mais 3,2 mm	Curto-Circuito	Adiciona-se a facilidade de soldas nas posições vertical e sobre-cabeça
	Ar + 5-10% CO ₂	-	Curto-Circuito	Altas penetrações com rápidas velocidades
Aço baixa liga	98% Ar + 2% O ₂	-	SPRAY	Baixa mordedura e boa resistência
	60% He + 25% Ar + 4,5% CO	-	Curto-Circuito	Excelentes resistência, estabilidade do arco, características de solda
	75% Ar + 25% CO ₂	-	Curto-Circuito	Satisfatórias resistência e características da solda
Aço inoxidável	99% Ar + 1% O ₂	-	SPRAY	Mais fluidica e controlada poça de fusão
	98% Ar + 2% O ₂	-	SPRAY	Melhora a estabilidade do arco e a velocidade de soldagem
	90% He + 7,5% Ar + 2,5% CO		Curto-Circuito	Mínima distorção, sem mordedura e corrosão por resistência
Alumínio	100% Ar	até 25 mm	SPRAY	Melhor transferência do metal
	35% Ar + 65% He	25 a 76 mm	SPRAY	Maior calor no arco
	25% Ar + 75% He	mais 76 mm	SPRAY	Melhor calor no arco, mínima porosidade
	Ar + He	mais 3,2 mm	Curto-Circuito	Argonio e hélio são preferíveis pelo metal base

**Tabela 5 - Proporção do gás de proteção em relação ao metal de base.
Fonte: Manual de treinamento Palmer e Fricke (2015).**

Para tornar o produto o mais próximo possível de sua realidade, foi realizada uma pesquisa de mercado a fim de encontrar um arame tubular (eletrodo) compatível com o projeto, uma vez que atendesse a especificação de possuir 1,2 mm de espessura e ser destinada a aplicação em locais que sofrerão desgaste por abrasão e são submetidos ao impacto. Para estes requisitos foi utilizado o arame tubular EnDOtec DO*12 da empresa Castolin Eutetic, suas especificações são demonstradas na Tabela 6.

EnD0tec DO*12

Descrição: A liga EnD0tec DO*12 contendo como elementos de liga, Fe, Cr, Mo, foi especialmente desenvolvida para revestimentos de peças submetidas ao desgaste por abrasão com impacto, ao atrito metal/metal e submetidas a altas pressões.

Aplicações: Revestimento de facas na indústria de papel, e reciclagem de plástico, guias em indústria siderúrgica, raspadores, transportadores helicoidais, etc.

Caract. Mecânicas (Valores Típicos)

□ Dureza: 57 HRc

Depósito pode ser tratado termicamente.

Diâmetro (mm): 1,2

Tabela 6 - Especificações do arame tubular utilizado no produto.

Fonte: Catálogo de consumíveis Castolin Eutetic.

O cordão de solda obtido com essas variáveis é muito difícil de ser calculado, devido este ser resultado de um produto de variáveis que podem se alterar como o tempo e devido a alteração das posições de soldagem. Lermen (2011) realizou um estudo empírico em processos de soldagem por curto circuito alterando os valores das principais variáveis do processo e assim, medindo a largura e altura dos cordões obtidos. Tendo em base seus estudos, foi adotado um cordão utilizando os valores mínimos obtidos em sua análise, como margem de segurança do protótipo piloto, com 6mm de espessura e com altura de 1,5mm e 0,8 mm de profundidade relação ao metal base.

4.2.1 Dimensionamento do eixo de soldagem

Para obter as propriedades mecânicas do eixo, foi utilizado um furo de 100 mm para análise, assim o mesmo foi superdimensionado por motivos de segurança e aplicabilidade do produto a elevados diâmetros de furos. Logo, através da Eq. 4 o motor terá que fornecer a seguinte rotação.

$$\omega = \frac{5,5}{0,1} = 55 \text{ RPM}$$

Eq.4

O material utilizado para confecção do eixo será o aço SAE 1010 devido a seu baixo preço de mercado, que possui uma tensão cisalhante de 260 Mpa. O eixo

possui diâmetro interno de 27 mm e externo de 40mm e 1m de comprimento. Através destes valores foi possível encontrar o momento de inércia imposta pelo eixo, além disso, a tocha de soldagem e os fixadores foram desprezados devido a complexidade cálculo, além de não imporem significativas alterações no valor final do torque. Utilizando a Eq. 5 pôde-se encontrar o valor do torque máximo suportado pelo eixo que foi de:

$$260 = \frac{T * 20}{\frac{\pi}{2} * (20^4 - 13,5^4)}$$

$$T = 2,589 \text{ KNm}$$

Eq.5

Através destas informações foi possível analisar que o motor empregado para rotacionar o eixo de soldagem deve oferecer rotações até 55 RPM e um torque de no máximo 2,589 KNm para que a soldagem ocorra de forma corre e para que não ocorra deformações no eixo.

Como a rotação transmitida do motor ao eixo ocorre por uma caixa de transferência, será necessário encontrar a rotação real fornecida pelo motor que dependerá da relação da caixa de transferência, a relação utilizada no protótipo foi de 1:1, assim não se teve alterações nos valores de rotação e torque, a Eq. 6 mostra a rotação real necessária ao motor elétrico para as demais aplicações.

$$n = \omega * Re$$

Sendo

- n = Rotação do eixo (RPM);
- ω = Rotação do eixo de solda (RPM);
- Re = Relação da caixa de transferência aplicada.

4.3 Configurações do eixo de mandrilar

Para a confecção do eixo de mandrilar, foram utilizados valores aproximados de processos já existentes de usinagens, assim como adotadas variáveis em processos empíricos e tabelas de alguns fabricantes de ferramentas e máquinas

O eixo de mandrilar é um eixo maciço, com furos no qual se pode alojar uma ou mais ferramentas nestes, caso seja necessário mais um passe para melhor acabamento, pode-se aplicar a outra ferramenta na furação posterior. Semelhante ao eixo de soldagem, este eixo possui 40mm de diâmetro e 1m de comprimento, sendo este, um eixo maciço. Além desta particularidade, o eixo possui um alojamento no qual será aplicado a elemento de união dos eixos. A Figura 29 ilustra a configuração do eixo de mandrilar.

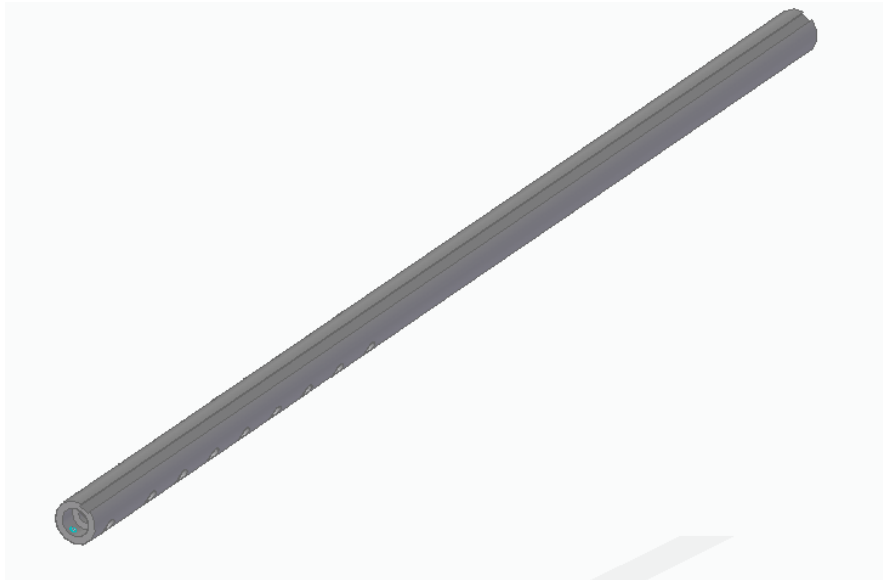


Figura 29 - Eixo de mandrilhamento.

Assim como no eixo de soldagem, foi necessário calcular certos parâmetros do processo para o dimensionamento e aplicação do eixo.

4.3.1 Variáveis do processo e dimensionamento do eixo

Para calcular as solicitações impostas ao eixo foi utilizado a barra de mandrilar da empresa SEC com suas características expressas na Figura 30, para os cálculos foram utilizadas medidas superiores ao projeto, deixando-o assim superdimensionado, isso fez com que o projeto se tornasse mais seguro e confiável em relação as interferências internas:

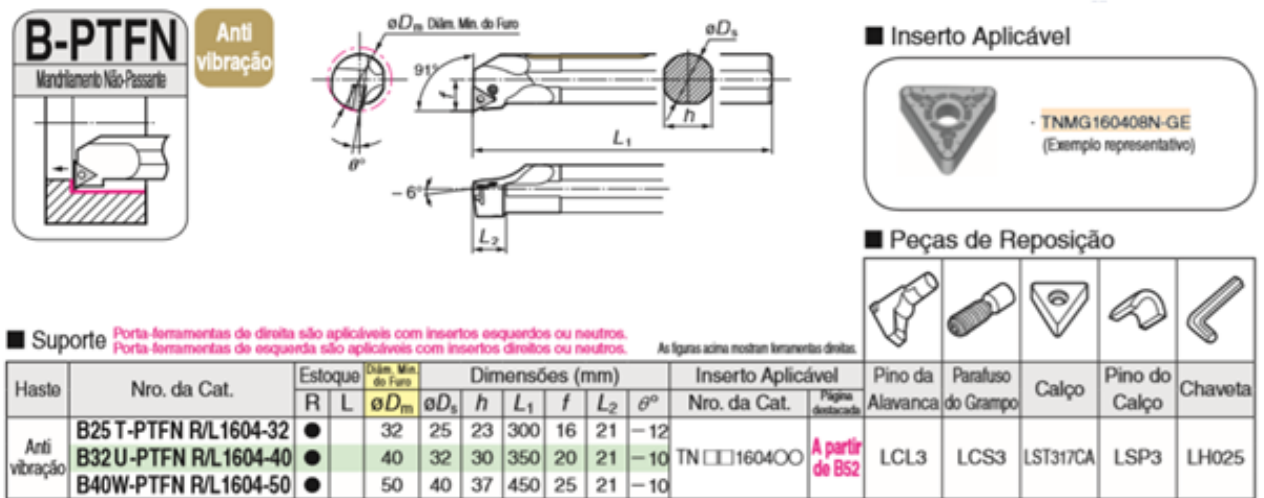


Figura 30 - Barra de mandrilamento proposta para o projeto.
Fonte: Catálogo de ferramentas SEC.

Através da ferramenta adotada para o processo piloto, pode-se obter um valor importante para encontrar as medidas de usinagem, este variável é o ângulo de contato da ferramenta com a peça, como a barra de mandrilar irá trabalhar na vertical, a ângulo adotado será de 91° .

Com as medidas do cordão de solda expressas por Lermen (2011), os valores para máximas profundidade (b) e espessuras de corte (h) serão apresentados por duas fórmulas básicas de usinagem, sendo a profundidade (b), a razão entre a profundidade do material removido (ap) pelo seno do ângulo da ferramenta e a espessura de corte o produto entre a espessura do material removido e o seno do ângulo da ferramenta. Com estas equações, forma obtidos os seguintes valores. As Eq. 6 e 7 apresentam os cálculos da profundidade e espessura de material removido no processo.

$$b = \frac{ap}{\text{sen}\theta} = \frac{1,6}{\text{sen}(91)} = 1,6 \text{ mm}$$

Eq.6

$$h = f * \text{sen}(\theta) = 6 * \text{sen}(91) = 6 \text{ mm}$$

Eq.7

Para encontrar as demais variáveis do processo, se tornou necessário a escolha do material será usinado. Com os dados obtidos na tabela 5, observou-se que a dureza proveniente do arame de solda se apresenta próxima aos valores do aço SAE 1045, assim, foi utilizado os valores de usinagem deste tipo de aço como parâmetros para o processo de usinagem do protótipo.

Tendo o SAE 1045 como material a ser usinado, pôde-se encontrar o valor da força de corte de Kienzle através da Eq. 8. A força de corte é a força resultante que pode ser denominada como um vetor a 90° da ferramenta de corte, assim, seu módulo se torna diretamente responsável pelo cálculo do torque atuante no eixo de mandrilhamento, sendo este último denominado através da força de corte de Kienzle pela distância da sollicitação ao centro do eixo.

$$F_c = K_{s1} * h^{1-z} * b$$

Eq.8

Onde:

- z e K_{s1} = Constantes do material definidas experimentalmente;
- h = Espessura de corte (mm);
- b = profundidade de corte (mm).

Como o valor de b e h já foram calculados anteriormente, se tornam necessários os valores das constantes z e K_{s1} . Ferraresi (1995) destacam esses valores para aços carbono sendo 0,86 e 2220 N/mm² respectivamente. Aplicando esses valores na eq.8 obtive o valor a força de corte de 2931,8N. Assim, o torque necessário para usinar um furo de 100mm é dado a partir da eq.9.

$$T = F_c * \frac{D}{2} = 2931,8 * \frac{100}{2} = 146590 \text{ Nmm} = 146,59 \text{ Nm}$$

Eq.9

Como o eixo de mandrilhamento foi considerado maciço, a resistência que o mesmo suportará a torção será de:

$$\tau = \frac{146590 * 50}{\frac{\pi}{2} * (50^4)} = 0,75 \text{ Mpa}$$

O valor obtido para tensão cisalhante atuante no eixo possibilitou a aplicação de diversos tipos de materiais para confecção de eixo, porém de todos os aços SAE 10XX analisados, o que possui o maior valor foi o aço SAE 1040 laminado a frio, por motivo de segurança para projeto, foi adotado este aço para confecção do eixo, fornecendo ao projeto uma confiabilidade elevada e fazendo com que o eixo tenha um elevado tempo de vida.

Segundo a empresa Indaço, que fabrica equipamentos e ferramentas, destaca em seu manual o valor de velocidade de corte para ferramentas com perfis cortantes entre 18 a 28 m/min para desbaste. Foi adotado o valor de 20m/min para o protótipo, em seguida, foi encontrado o valor da potência de corte através da eq. 10, uma vez que a relação da caixa de transferência ao eixo foi de 1:1.

$$P_c = \frac{F_c * V_c}{60000} = \frac{2931,8 * 20}{60000} = 1,31 \text{ cv}$$

Eq.10

O elemento que transmitirá rotação e torque ao eixo, será um motor elétrico, este tipo de motor possui elevada eficiência, para dimensionar a real potência necessária, foi utilizada a eq.11 e adotada uma eficiência de 0,7.

$$P_{motor} = \frac{P_c}{\eta} = \frac{1,31}{0,7} = 1,87 \text{ cv}$$

Eq.11

4.4 Dimensionamentos do elemento de união dos eixos.

O elemento de união entre o eixo de soldagem e o de mandrilhamento foi denominado e luva, esta peça é responsável não somente pela união dos dois eixos com também por permitir que cada eixo tenha sua própria rotação, uma vez que o processo de soldagem e usinagem necessitam de velocidades completamente diferentes suas respectivas aplicações.

A peça básica, consiste em uma parte com rosca que é onde ocorrerá a fixação com o eixo de solda; um sulco central, sendo responsável pela aplicação de uma chapa que impedirá que a peça solte da rosca; a última parte possui dois diâmetros diferentes, sendo o maior responsável pelo alojamento da peça no eixo de mandrilhar e de menor diâmetro pelo alojamento do rolamento. A Figura 31 ilustra a luva aplicada no protótipo.

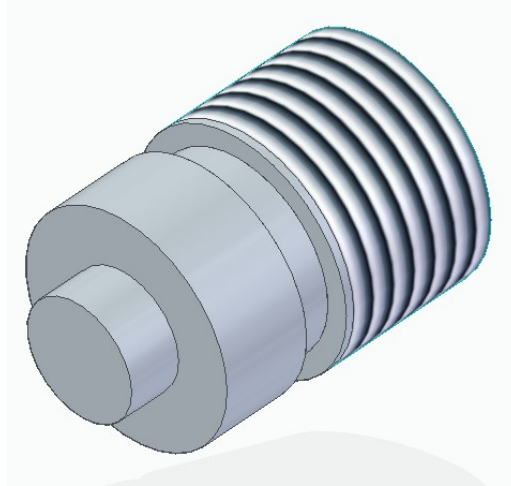


Figura 31- Luva de união entre os eixos de soldagem e de mandrilhamento.

A Figura 32 ilustra a montagem do produto em sua parte de união dos processos, a luva é rosqueada e assim se fixa no eixo de soldagem, duas placas são fixas por parafusos em três furos situados no eixo de soldagem. Na ponta da luva, aloja-se o rolamento, este por sua vez, é fixo por um parafuso no alojamento do eixo de mandrilar, este por sua vez recebe o rolamento e a parte de maior diâmetro da luva.

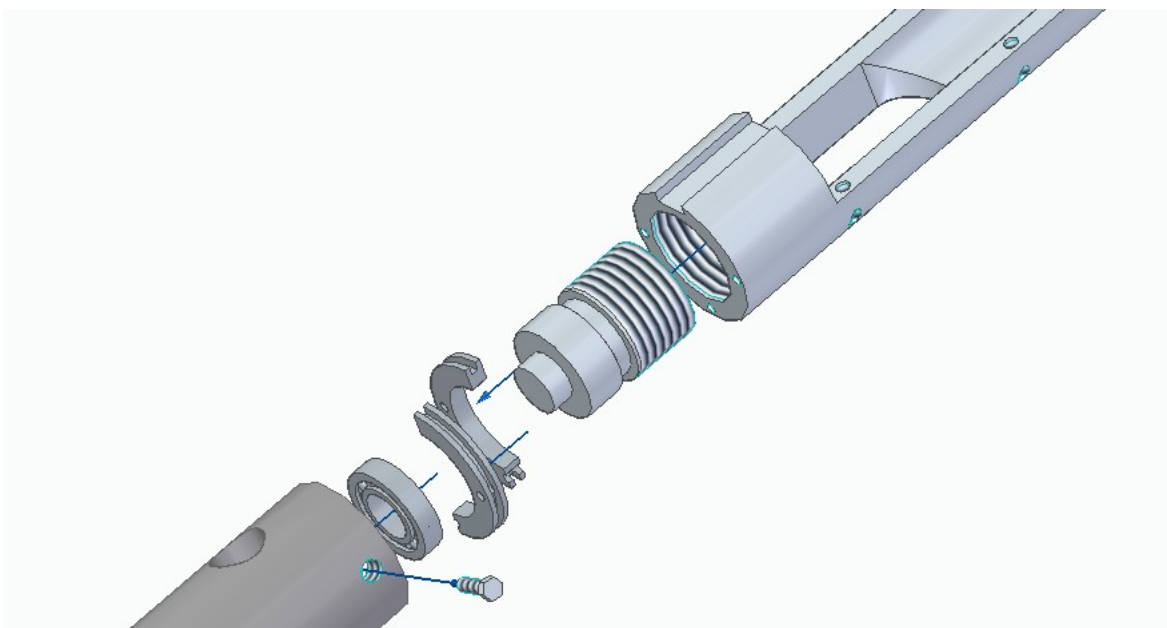


Figura 32 - Sistema de união dos eixos.

O protótipo possui dois suportes nos quais são aplicados os eixos, as caixas de transferência e o mecanismo de fuso, ou seja, suportam todos os componentes do produto. Os suportes possuem um furo central na qual são responsáveis pelo alojamento do rolamento que sustenta os eixos e uma haste quadrada que é responsável pela sustentação das caixas de transferência e pelo mecanismo de fuso. A Figura 33 ilustra o suporte que é fixado na peça a ser reparada por soldagem, esta fixação, pode ocorrer no próprio suporte ou pode-se utilizar parafusos para aumentar o curso do mesmo, uma vez este possui três roscas em sua estrutura.

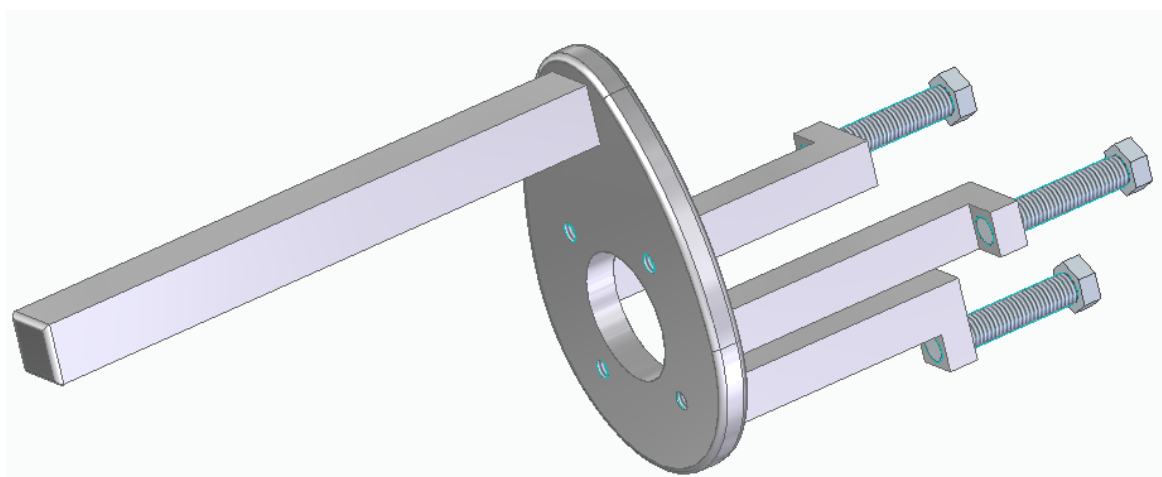


Figura 33 - Suporte dos mecanismos do protótipo

A Figura 34 ilustra a aplicação de um dos suportes no protótipo, este suporte é o que possui a caixa de transferência que transmitira rotação e torque para o eixo de solda e o mecanismo de fuso. Para minimizar os custos, foram desenvolvidos alojamentos dos motores elétricos iguais para os dois eixos, padronizando assim estas peças e evitando a confecção de dois alojamentos diferentes. Como no eixo de soldagem não possui mecanismo de fuso, esta parte do alojamento se encontrará vazia no outro lado do protótipo.

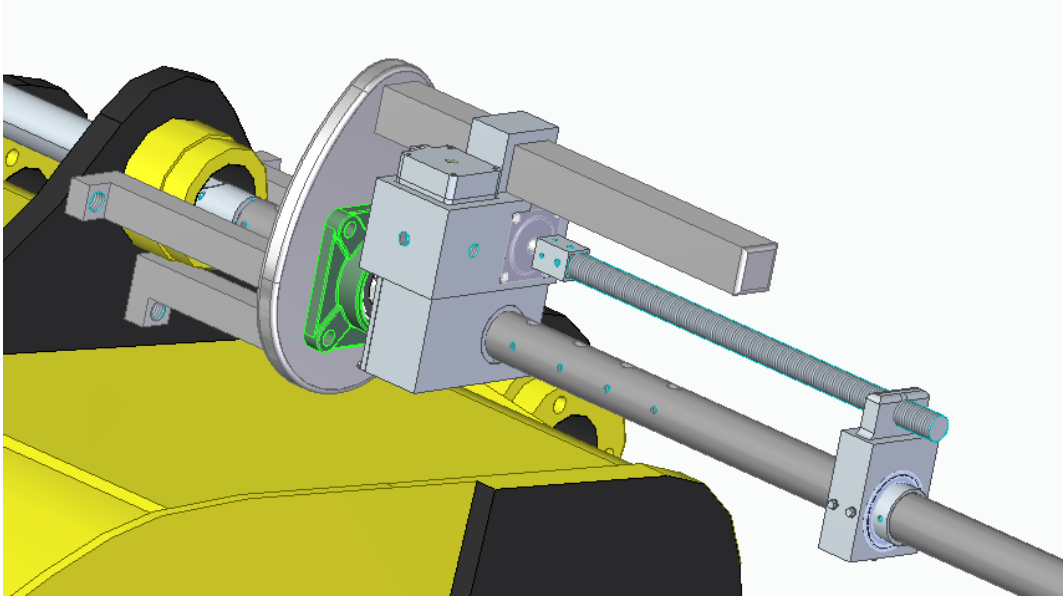


Figura 34 - Aplicação do suporte no projeto

4.5 Caixa de transferência

A caixa de transferência é um mecanismo do protótipo que possui a função de transmitir a rotação do motor elétrica que está na vertical para os eixos que estão na horizontal através de um mecanismo pinhão coroa. Como demonstrado na Figura 34, este mecanismo situa-se logo acima do eixo. Como a aplicação do produto se designa a furos de pequenos diâmetros, não houve necessidade de utilizar uma coroa de elevado número de dentes e diâmetro, então optou-se pela relação de transferência de 1:1. A Figura 35 ilustra a caixa de transferência desenvolvida para o protótipo, este mecanismo apresenta dois furos com chavetas, sendo o de menor diâmetro responsável por receber a rotação do motor elétrico e o de maior responsável por transmitir rotação ao eixo, no segundo eixo ocorre também a aplicação da chaveta, que apresentará um pequena folga, pois o eixo translada sobre a caixa de transferência.

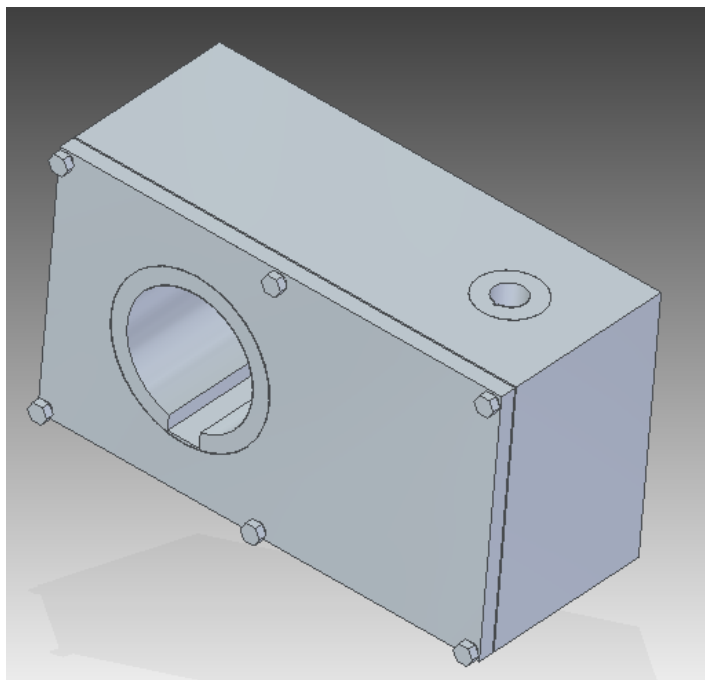


Figura 35 - Caixa de transferência.

4.6 Mecanismo de fuso

O mecanismo de fuso é responsável pela translação dos eixos, é constituído por um motor elétrico que é fixo no mesmo alojamento do motor de rotação do eixo de mandrilhamento, uma luva que une o eixo deste motor ao fuso, um fuso de 500mm de comprimento e um suporte responsável por transferir o movimento de rotação do fuso em translação dos eixos. A Figura 36 mostra a configuração do motor de passo no projeto.

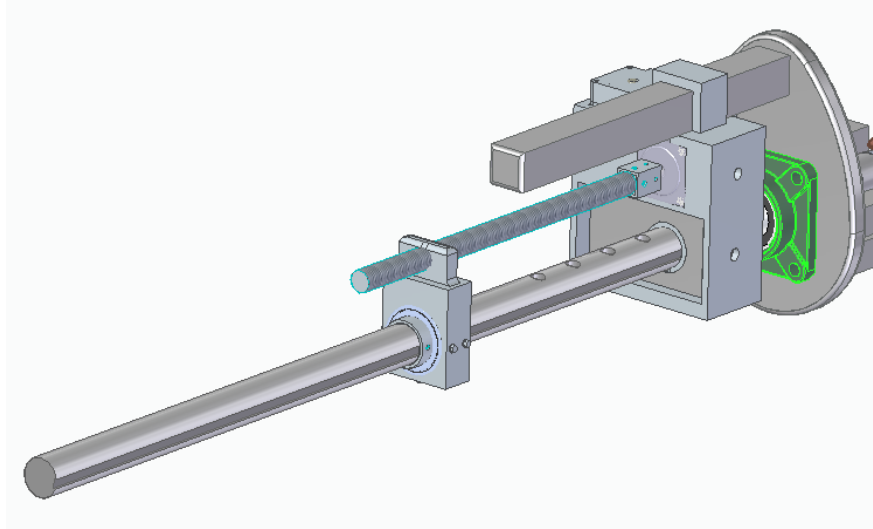


Figura 36 - Configuração do motor de passo no projeto.

Como pode-se observar na Figura 36, para a adaptação da caixa de transferência no protótipo, foi realizada uma alteração no suporte do mecanismo de fuso, sendo necessário a confecção de mais um alojamento para o mesmo.

Como os três motores elétricos serão idênticos, o motor de acionamento do fuso também terá 1,87 cv de potência, sendo esta responsável por transmitir ao fuso o torque necessário para que ocorra o movimento linear dos elementos.

A luva é a peça responsável por transmitir a rotação do motor elétrico a fuso, este acoplamento necessitou de mudanças de seções, uma vez que o eixo do motor possui uma sessão circular e o fuso quadrada, com isso, foi desenvolvida uma luva com uma sessão para fixação de cada componente deste mecanismo, sendo a primeira parte circular com dito, com o alojamento do eixo e sua chaveta e na outra extremidade, foi desenvolvida a parte quadrada da luva. O acoplamento fixa os elementos através de fixadores (parafusos) que são instalados em furos com roscas conforme ilustrado na Figura 37.

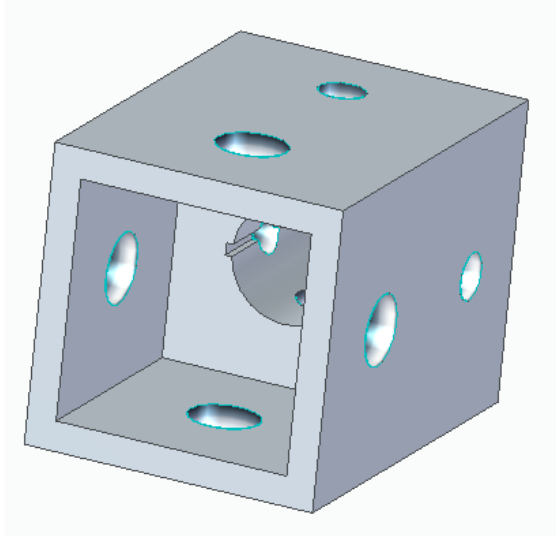


Figura 37 - Luva para acoplamento do motor ao fuso.

A Figura 38 apresenta o suporte responsável por converter o movimento de rotação do fuso para o de translação do eixo. Esta peça possui um furo com rosca semelhante ao do fuso, sendo esta parte responsável pelo movimento de avanço ou retorno dos eixos. O eixo escolhido para a aplicação dessa peça foi o eixo de mandrilamento devido a alguns fatores, dentre eles se destacaram as suas propriedades mecânicas serem superiores ao do eixo de solda, a sua baixa complexidade geométrica, ao sentido de aplicação da força de corte e a fácil fixação da peça neste eixo.

O eixo de mandrilamento se torna um elemento fixo na peça nos eixos X e Y, porém através de um rolamento instalado na peça, é permitido o movimento de rotação do elemento de mandrilar. O rolamento é fixo na peça por seis parafusos e outros dois são responsáveis pela fixação da peça ao eixo, este meio de união peça-eixo foi elaborado a partir dos processos bore welding utilizados atualmente, onde o avanço do eixo ocorre de forma muito semelhante, alterando somente o método de fixação.

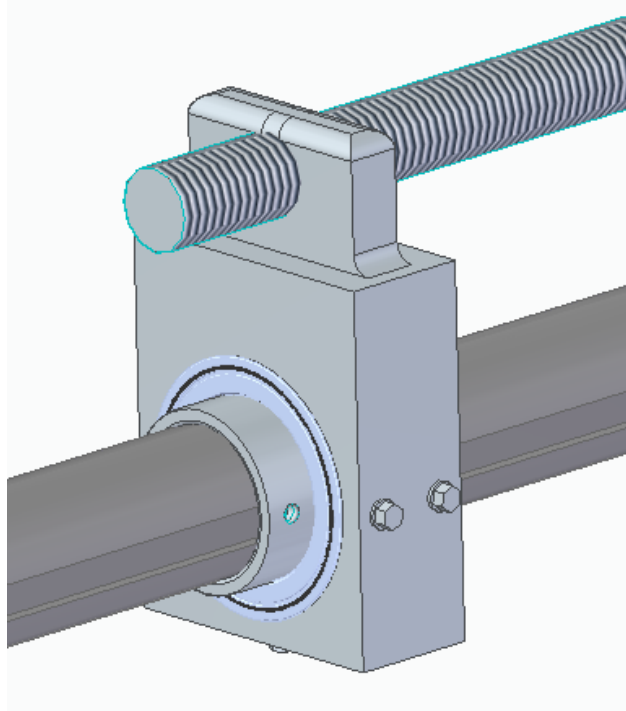


Figura 38 - Suporte de translação dos eixos.

Para projetar o fuso, foi primeiramente analisado o tipo de rosca a ser aplicada, pois existem uma gama de tipos de roscas, cada uma com sua respectiva aplicação. Gordo e Ferreira (2012) mostram na Tabela 7 as aplicações de diferentes tipos de rosca, sendo assim, foi aplicada no projeto uma rosca do tipo trapezoidal sendo esta desejável e aceitável às características do protótipo e comumente aplicada em fusos de máquinas como, por exemplo, em fresadoras, Shigley (2011) e Norton (2013) utilizam a nomenclatura americana e chamam este tipo de rosca de Acme.

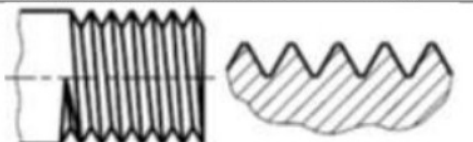
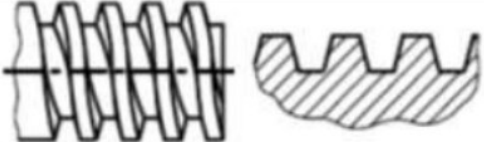

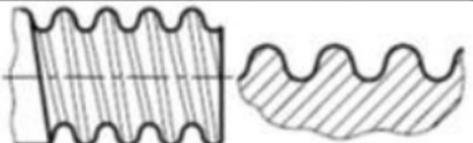

TIPOS DE ROSCAS (PERFIL DE FILETE)		APLICAÇÃO
Triangular		Parafusos e porcas de fixação na união de peças. Ex.: Fixação de roda de carro.
Trapezoidal		Parafusos que transmitem movimento suave e uniforme. Ex.: Fusos de máquinas.
Quadrado		Parafusos que sofrem grandes esforços e choques na transmissão. Ex.: Prensas e morsas.
Redondo		Parafusos de grandes diâmetros sujeitos a grandes esforços. Ex.: Equipamentos Ferroviários
Dente de Serra		Parafusos que exercem grande esforço num só sentido. Ex.: Macacos de catraca.

Tabela 7 - Tipo de perfis de roscas conforme suas aplicações.
Fonte: Gordo e Ferreira (2012).

O fuso é o um dos elementos com maior grau de complexidade não somente desta peça, como também de todo o protótipo, sendo ele responsável pela translação dos eixos. Este elemento deve possuir propriedades mecânicas e geométricas peculiares, tal fato ocorre devido ao mesmo ser imposto a torque e cargas axiais consideravelmente elevados. As forças radiais por serem consideravelmente baixas, serão adotadas como desprezíveis, eliminado assim o desenvolvimento da análise de flexão deste elemento.

Esta peça é constituída por uma parte quadrada na qual será responsável por se alojar na luva e pela parte com rosca acme. As medidas da peça foram escolhidas de acordo com o desenvolvimento do protótipo, e a partir delas foram

desenvolvidos os cálculos das propriedades que o fuso deve obter para executar sua função. A Figura 39 apresenta as medidas escolhidas para confecção do fuso.

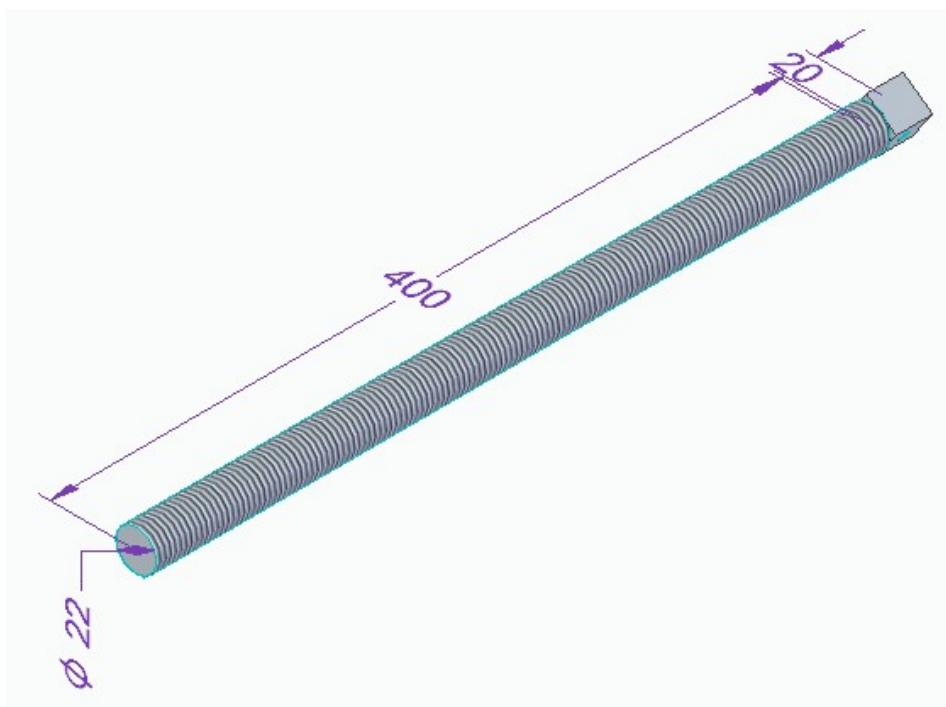


Figura 39 - Dimensões do fuso.

Como o sistema utilizado no projeto foi o americano, foram encontradas somente roscas em polegadas para o tipo acme, logo, foi escolhida a rosca acme com o diâmetro de $\frac{7}{8}$ ou 0,875 in por apresentar valores próximos a 22mm e por já possuir um processo de fabricação, evitando a fabricação de uma rosca para aplicação especial que traria maior custo ao produto. Norton (2013) demonstra na Tabela 8 medidas pré-estabelecidas para roscas acme, sendo estes valores utilizados no fuso do protótipo.

Diâmetro maior (in)	Roscas por polegada	Passo de rosca (in)	Diâmetro primitivo (in)	Diâmetro menor (in)	Área sob tração (in ²)
0,250	16	0,063	0,219	0,188	0,032
0,313	14	0,071	0,277	0,241	0,053
0,375	12	0,083	0,333	0,292	0,077
0,438	12	0,083	0,396	0,354	0,110
0,500	10	0,100	0,450	0,400	0,142
0,625	8	0,125	0,563	0,500	0,222
0,750	6	0,167	0,667	0,583	0,307
0,875	6	0,167	0,792	0,708	0,442
1,000	5	0,200	0,900	0,800	0,568
1,125	5	0,200	1,025	0,925	0,747
1,250	5	0,200	1,150	1,050	0,950
1,375	4	0,250	1,250	1,125	1,108
1,500	4	0,250	1,375	1,250	1,353
1,750	4	0,250	1,625	1,500	1,918
2,000	4	0,250	1,875	1,750	2,580
2,250	3	0,333	2,083	1,917	3,142
2,500	3	0,333	2,333	2,167	3,976
2,750	3	0,333	2,583	2,417	4,909
3,000	2	0,500	2,750	2,500	5,412
3,500	2	0,500	3,250	3,000	7,670
4,000	2	0,500	3,750	3,500	10,321
4,500	2	0,500	4,250	4,000	13,364
5,000	2	0,500	4,750	4,500	16,800

Tabela 8 - Dimensões das roscas tipo acme.

Fonte: Norton (2013).

Como dito anteriormente, a rosca utilizada foi a de 0,825 in, porém, para facilitar os próximos cálculos foram convertidas as medidas inerentes a este diâmetro de rosca para o sistema métrico, conseqüentemente foram obtidas as medidas expressas na tabela 9.

Medidas do fuso do protótipo		
Geometria	Dimensão em polegadas	Dimensão em milímetros
Diâmetro maior	0,875 in	22,225 mm
Rosca	6 por in	0,24 por mm
Passo de rosca	0,167 in	4,24 mm
Diâmetro primitivo	0,792 in	20,12mm
Diâmetro menor	0,708 in	18 mm
Área sobre tração	0,442 in ²	285.16 mm ²

Tabela 9 - Mediadas utilizadas na confecção do fuso.

Como o fuso é uma barra circular e possui 400 mm de comprimento com rosca, obteve-se um total de 96 roscas com passos de 4,24 mm através dos dados obtidos na Tabela 7.

Shigley (2011) denota a tensão nominal máxima de cisalhamento τ na torção no corpo do parafuso pode ser demonstrada de acordo com a Eq.12. Sendo esta uma reformulação da Eq.1 onde T é torque no qual o fuso é submetido e d é seu diâmetro maior, assim é possível obter o maior valor de tensão de cisalhamento no qual a peça é submetida.

$$\tau = \frac{16 * T}{\pi * d^3}$$

Eq.12

O torque utilizado no fuso foi o torque de 146,59 Nm encontrado na Eq.9 e o diâmetro foi o de 22,225 mm encontrado na Tabela 7, adotando esses valores foi obtida a tensão de cisalhamento de 68 Mpa.

O autor também destaca a tensão axial σ no corpo do fuso em relação a força que ele é submetido. Esta tensão é a razão entre a força axial que atua no fuso e a área sobre tração que pode ser encontrada na Tabela 7, sendo a primeira variável a soma da força de avanço do eixo de mandrilhamento com a força de arraste imposta pelos eixos.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F_{avanço} + F_{arraste}}{A}$$

Eq.13

Ferraresi (1969) fundamenta as relações entre a força de corte (F_{corte}) e de avanço ($F_{avanço}$) em um processo de usinagem, sendo esta relação expressa na Eq.14. Como a força de corte foi de 2931,8N encontrada na Eq.8, foi possível encontrar a força de avanço da ferramenta de mandrilhar.

$$F_{avanço} = \frac{F_{corte}}{4,5} = \frac{2931,8N}{4,5} = 651,5 N$$

Eq.14

Halliday e Resnick (2008) denotam a força de arraste como força de atrito, sendo esta o produto entre o peso do corpo sujeito ao arraste e o coeficiente de atrito entre este com a superfície de contato. O peso que o fuso terá de movimentar será o peso dos dois eixos, para encontrar este valor foram considerados os dois eixos sendo maciços, como ambos possuem 1 m de comprimento e 40 mm de diâmetro externo, foi encontrado um volume (v) de 0,00126 m³ por eixo. Shigley (2013) adota a densidade (ρ) do aço sendo 7,86 g/cm³, assim o peso (P) dos eixos é expressado pela Eq.15, sendo esta equação denominada pelo autor.

$$P = v * g * \rho = 2 * 0,00126 * 9,81 * 7860 = 96,9N$$

Eq.15

Com o peso determinado, faltou a determinação do coeficiente de atrito (μ) para o cálculo da tensão imposta no fuso, Norton (2011) determina alguns coeficientes de atritos para contatos de determinados materiais na Tabela 10. Foi escolhida esta tabela para a determinação do coeficiente de atrito (μ) devido a trabalhar com diferentes tipos de configurações de materiais.

Material 1	Material 2	Estático		Dinâmico	
		Seco	Lubrificado	Seco	Lubrificado
aço doce	aço doce	0,74		0,57	0,09
aço doce	ferro fundido		0,183	0,23	0,133
aço doce	alumínio	0,61		0,47	
aço doce	latão	0,51		0,44	
aço duro	aço duro	0,78	0,11–0,23	0,42	0,03–0,19
aço duro	metal branco (<i>babbitt</i>)	0,42–0,70	0,08–0,25	0,34	0,06–0,16
Teflon	Teflon	0,04			0,04
aço	Teflon	0,04			0,04
ferro fundido	ferro fundido	1,10		0,15	0,07
ferro fundido	bronze			0,22	0,077
alumínio	alumínio	1,05		1,4	

Tabela 10 - Coeficiente de atrito para algumas combinações de materiais.

Como se tratava de peças em contatos que se movem, foi adotado o coeficiente de atrito dinâmico, assim como adotado o contato de aço doce com aço doce para obter o maior valor de força de arraste, conseqüentemente foi adotado o coeficiente de atrito (μ) de 0,57. Após encontrado o coeficiente de atrito foi possível encontrar a tensão axial (σ) através da Eq.13, a área utilizada para o cálculo foi a sobre tração estabelecida na Tabela 7, sendo ela 285.16 mm². Assim a tensão encontrada foi de:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F_{avanço} + F_{arraste}}{A} = \frac{651,5 + (96,9 * 0,57)}{285.16} = 2,5 \text{ MPa}$$

O valor de tensão axial encontrado foi consideravelmente baixo, logo, como no eixo de soldagem, o fuso poder ser confeccionado por qualquer material aço SAE 10XX.

Para encontrar a rotação do fuso, foi-se necessário encontrar a velocidade de avanço da ferramenta de corte, a empresa OBR (2018) destaca

alguns avanços de corte de acordo com o diâmetro da peça a ser usinada na Tabela 11.

Diâmetro em mm	Avanços para desbaste	Avanços para acabamentos	Avanços para: Sangrar, Torneamento interno.
	Em mm/rotação	Em mm/rotação	Em mm/rotação
10 a 25	0,1	0,05	0,05
26 a 50	0,2	0,1	0,1
51 a 75	0,25	0,15	0,1
76 a 100	0,3	0,2	0,1
101 a 150	0,45	0,3	0,2
151 a 300	0,5	0,3	0,2
301 a 500	0,6	0,4	0,3

Tabela 11 - Avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça.

Como o protótipo realizará somente um passe de usinagem e o diâmetro mínimo de aplicação foi considerado o do próprio eixo de mandrilhamento, sendo este de 40mm, foi-se adotado um avanço de corte de acabamento de 0,1 mm/rotação. A espessura do cordão de solda adotado foi anteriormente explicada e foi de 6mm, utilizando uma interpolação linear simples foi possível encontrar a velocidade angular do fuso, sendo este igual a 60 RPM. Shigley (2011) utiliza a Eq.16 para a conversão de velocidade angular e linear, com tal formulação foi possível encontrar a velocidade linear de avanço.

$$V = \omega * R = 60 * \frac{0,875}{2} = 26,25 \text{ mm/min}$$

4.7 Montagem do protótipo.

Com todos os componentes dimensionados e projetados, foi terminado o produto com a montagem do mesmo.

Inicialmente foi realizado a montagem do eixo de soldagem, constituída pelas buchas fixadoras do eixo, o elemento de união dos dois eixos, da tocha de soldagem e conseqüentemente pela tampa e corpo do eixo. A Figura 40 e Figura 41 demonstram como foi realizada a montagem do eixo de soldagem.

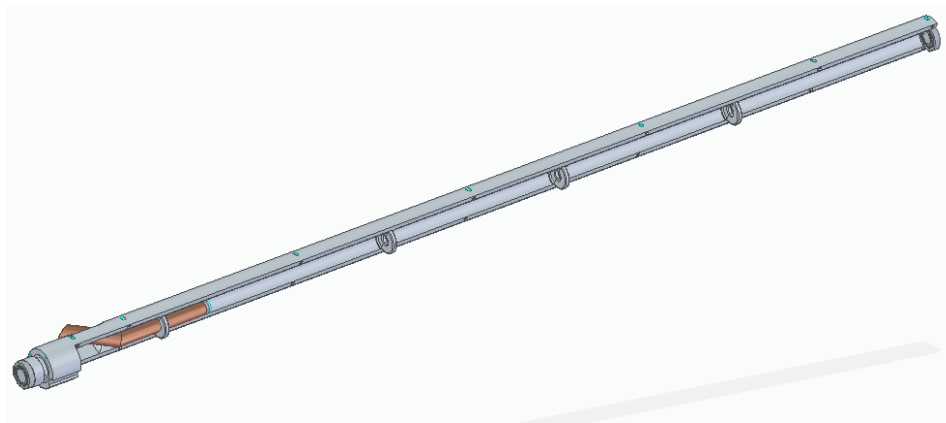


Figura 40 - Pré-montagem do eixo de soldagem – Fixadores, tocha de soldagem e elemento de união dos eixos.

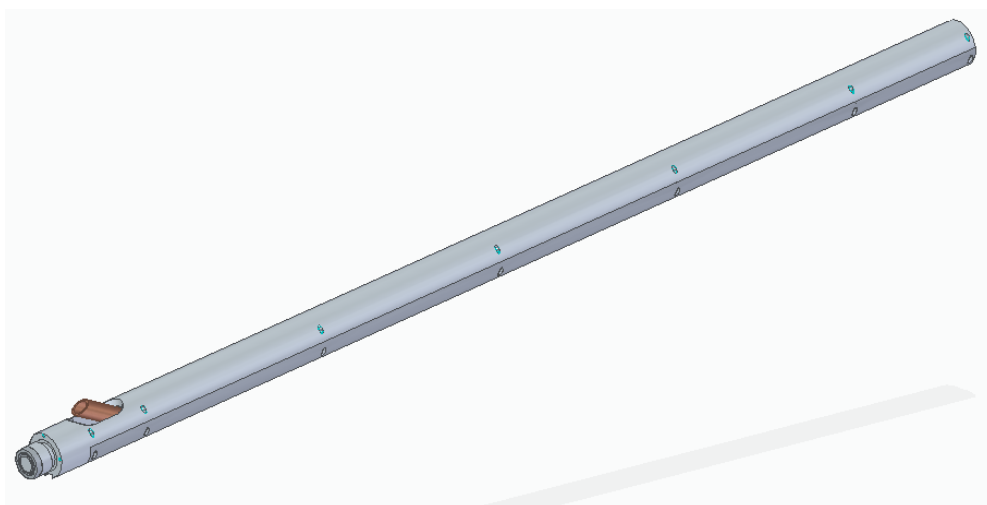


Figura 41 - Montagem do eixo de soldagem.

Como ilustrado nas Figuras 40 e 41, a tocha de soldagem é fixa pelos fixadores que posteriormente fixarão o cabo de soldagem. O rolamento na extremidade do eixo tem a função de permitir uma melhor rotação do cabo de soldagem que ligará a tocha com a máquina de soldagem, evitando o desgaste prematuro do mesmo. O elemento de união é rosqueado ao eixo de soldagem e fixado uma chapa bipartida com a função de evitar desacople do elemento, na ponta deste acoplamento possui um rolamento que tem a função de dar mobilidade independente ao eixo de mandrilar, uma vez que este será unido ao rolamento por um parafuso.

Em seguida, foi instalado o eixo de mandrilar unindo-o ao eixo de soldagem, o furo na extremidade do eixo de mandrilar como explicado anteriormente aloja-se no rolamento e no corpo do elemento de união e ocorre a fixação do eixo ao rolamento por um parafuso. A Figura 42 ilustra como ficou o protótipo após esta união.



Figura 42 - União entre os eixos de mandrilar e de soldagem.

Após a união do eixo, ocorre a fixação dos suportes dos mesmos, este processo é ilustrado na A Figura 43. Estes suportes são soldados na estrutura que

possui uma furação a ser trabalhado. Os suportes são soldados com um pré alinhamento por duas buchas cônicas que se alojam na furação, em seguida os eixos são instalados no suporte e a verificação da concentricidade dos eixos se dá através de relógio comparador, a correção que é pequena pode e deve ser corrigida através da folga encontrada nos parafusos do rolamento destacado pela coloração verde, esta centralização ocorrerá poucas vezes devido a excelente centralização das buchas cônicas, porém se necessário consistirá somente no afrouxamento dos parafusos, correção da centralização e posteriormente o aperto dos mesmos.

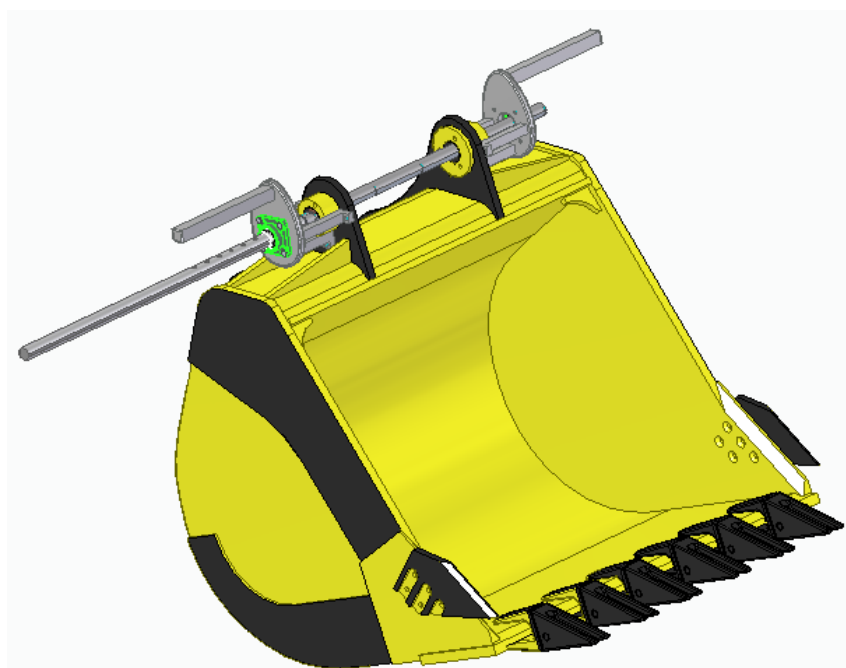


Figura 43 - Fixação dos suportes à estrutura a ser corrigida a furação.

Os suportes sustentam todos os demais componentes e mecanismos do protótipo, com isso, após a fixação destes na peça a ser trabalhada, foram instalados os suportes dos motores elétricos assim como os motores juntamente com a caixa de transferência. A Figura 44 ilustra esta parte da montagem do produto, sendo esta imagem dividida em duas partes, a primeira destaca o suporte

do eixo de mandrilamento e a segunda a do eixo de soldagem, foi percebido que as caixas de transferência tinham a necessidade de serem instaladas juntas ao suporte e aos motores devido a seu acoplamento com os eixos dos motores elétricos, esta ligação impediu deste componente ser instalado posteriormente.

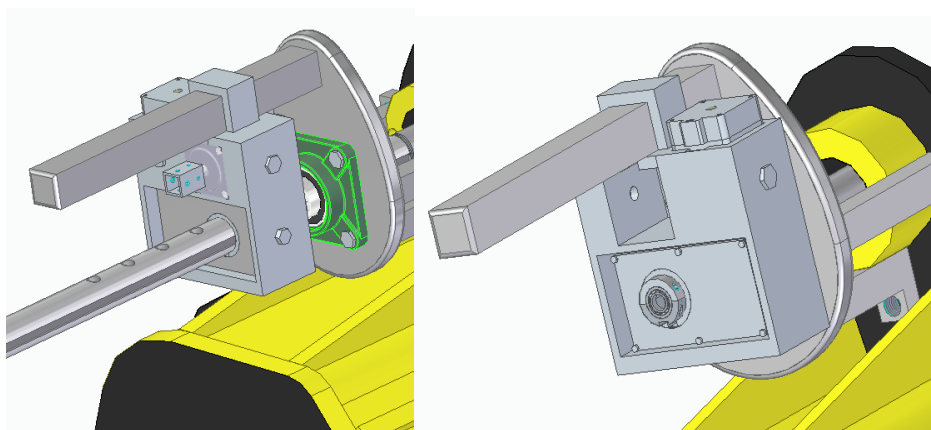


Figura 44 - Suportes dos motores elétricos e das caixas de transferência.

Pode-se observar que mesmo os suportes sendo simétricos, existem componentes diferentes instalados, uma vez que o suporte designado ao eixo de mandrilamento, ilustrado a esquerda da Figura 44 precisou de um motor longitudinal para a aplicação do mecanismo de fuso enquanto o suporte a direita referente a atividade de soldagem, não necessitou deste componente, assim deixou-se o espaço vazio. Com exceção do mecanismo de fuso explicado anteriormente, os suportes apresentam os demais componentes semelhantes um ao outro.

Posteriormente a montagem dos suportes, foi instalado o mecanismo de fuso, a Figura 45 demonstra a montagem deste mecanismo que podia ser instalado juntamente com os suportes ou logo após a aplicação do mesmo. Foi adotada a sua montagem posterior devido a sua regulagem ocorrer melhor isoladamente.

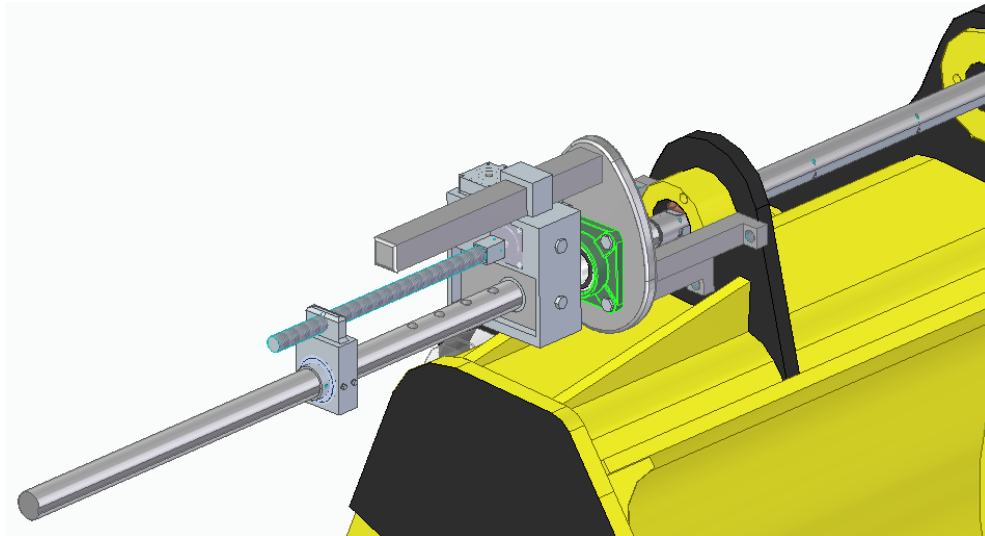


Figura 45 - Instalação do mecanismo de fuso.

Após a instalação do mecanismo de fuso, o protótipo foi totalmente instalado na peça a ser trabalhada e estava pronto para executar sua atividade proposta. Para melhor visualização do processo, foi pintada a furação na qual o protótipo atuará, deixando-a transparente no software utilizado. Como explicado anteriormente, o processo de soldagem ocorrerá no sentido vertical descendente até 180° , retornará ao ponto inicial e após soldará 180° no outro sentido de giro, com base neste conhecimento, foi posicionado a tocha de soldagem no ângulo de 90° tendo como base o círculo trigonométrico.

A tocha de soldagem é ligada ao cabo de soldagem, sendo estes elementos encontrados no mercado atualmente. O funcionamento da parte de soldagem, de usinagem e dos motores ocorrerão por botões e inicialmente foi adotado de forma manual, sendo necessário um conhecimento do operador do protótipo.

Na parte de mandrilar, não existe posicionamento para a ferramenta, uma vez que o eixo revoluciona durante toda a atividade, nesta parte do produto,

ocorreu somente a regulagem do mecanismo de fuso que foi posicionado a uma distância maior que a largura do furo trabalhado. Caso o furo usinado fosse maior que o mecanismo de fuso, seria necessário usinar o material até a distância máxima do fuso, parar o processo e regular o suporte de translação do eixo, direcionando-o a ponta do fuso e fixando-o novamente ao eixo de mandrilhamento.

A Figura 46 ilustra o protótipo completamente instalado na peça a ser trabalhada e regulado, ou seja, preparado para o início da atividade.

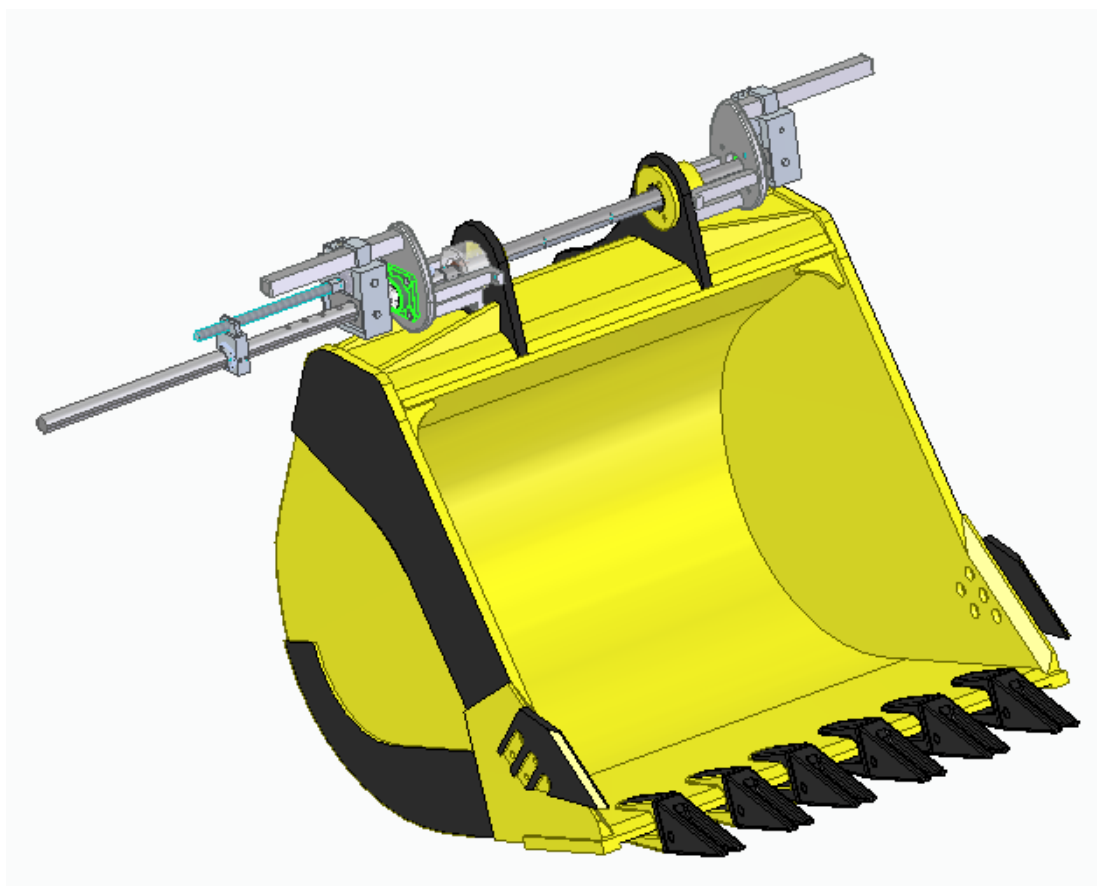


Figura 46 - - Protótipo para o processo bore welding finalizado e preparado para atividade.

Após a conclusão do montagem do protótipo, foi verificado parâmetros de sua funcionalidade através de uma simulação realizada no *software solid edge*. Porém a simulação não ocorreu na primeira tentativa, foi necessário configurar a

função motor do *software* e as relações entre as peças, isso mostrou algumas peculiaridades do *solid edge*, porém tais relações não afetavam diretamente o projeto, pois se tratavam da aplicação de parafusos que geravam restrições ao *software*, assim em alguns pontos, como por exemplo na luva do mecanismo de fuso, optou-se por realizar a simulação sem a utilização de alguns parafusos, o que não afetaria no resultado final do projeto, com isso, foi possível verificar se o projeto funcionou conforme o proposto e analisou-se as relações entre os elementos.

5. Considerações finais

5.1 Conclusão

O processo bore welding proposto neste projeto apresentou maior simplicidade de confecção em relação aos dispositivos encontrados no mercado, se destacando principalmente pela simultaneidade das atividades de soldagem e mandrilhar, o que não é entregue no mercado atualmente.

Os processos de soldagem e mandrilhamento ocorrendo de forma simultânea é o diferencial neste projeto em relação aos existentes, pois tende diminuir o tempo de parada dos efetivos de manutenção de uma empresa uma vez que não existe a parada após o processo de soldagem para a instalação do mecanismo de mandrilhamento, sabendo que o tempo é um dos fatores preponderantes para se obter lucros em uma linha de produção, esta união de processos pode atuar de forma benéfica a manutenção.

Este protótipo teve a necessidade de confecção de peças para determinadas funções, como por exemplo, a de translação e união dos eixos, assim os cálculos estruturais e geométricos foram de suma importância para o produto, pois através destes parâmetros se tornará mais fácil o desenvolvimento de protótipos para atuarem em furações com diâmetros maiores sendo as equações propostas aplicáveis a qualquer diâmetro, sendo somente necessária a escolha do material de composição das peças, uma vez que quanto maior o diâmetro a ser trabalhado, maiores será os valores das solicitações impostas no protótipo. O uso de algum *software* de armazenamento de fórmulas, como por exemplo, o *Microsoft Excel* será muito eficiente para o desenvolvimento de tabelas e gráficos para obter os valores destes parâmetros.

O superdimensionamento de projetos é comumente utilizado em confecção de produtos, uma vez que a segurança do usuário é a parte mais importante, não sendo diferente deste conceito, o protótipo, como observado, foi superdimensionado em seu todo, aumentando de certa forma seu custo de desenvolvimento e implementação, porém trazendo alta margem de segurança e confiabilidade de seus componentes.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como dito anteriormente, o desenvolvimento de planilhas base para o desenvolvimento de protótipos maiores será de extrema importância para projetos futuros, uma vez que possuímos um país com grades mineradoras e algumas utilizarem equipamentos de grande porte, se torna necessário a utilização de produtos semelhantes ao desenvolvido, porém, com dimensões cada vez mais elevadas.

O projeto abordou a parte geométrica e estrutural do protótipo, sendo sua parte elétrica rústica em relação aos modelos propostos pelo mercado que realizam o processo *bore welding*, porém para este obter alto padrão de performance será necessária uma implementação de um sistema elétrico por PLC ou um sistema eletroeletrônico com base computacional, como por exemplo a utilização de placas, tendo o Arduino como exemplo. Assim, o processo será cada vez mais automatizado, reduzindo assim o desgaste físico e mental do operador deste tipo de serviço.

O mecanismo da caixa de transferência apresentou a relação de 1:1, sendo responsável somente pela transmissão de rotação do sentido vertical para o horizontal, seria interessante a realização de cálculo para obter uma relação de

transmissão ótima assim como o melhor rolamento para a aplicação de cada suporte inerente ao processo, gerando assim uma possível redução de custo ao projeto, tanto na confecção das peças quanto no consumo de energia, uma vez que o protótipo necessita de energia elétrica para funcionar.

6. BIBLIOGRAFIA

7.

1. **Indaço.** *Especificações técnicas para ferramentas de corte.* s.l. : <http://www.grupoindaco.com.br/parametros/parametros.pdf>. Manual de especificações.
2. **Resnick, Hallyday e.** *Fundamentos de física.* Rio de Janeiro : Jearl Walker, 2015. Vol. 1 - 8ª Edição.
3. **Germany, Darcy José.** *A mineração no Brasil.* Rio de Janeiro : Secretaria técnica do fundo setorial mineral, 2002.
4. **Wainer, Emílio.** *Soldagem: Processos e metalurgia.* São Paulo : Edgard Blucher Ltda, 2004. 4ª Reimpressão.
5. —. *Soldagem: Processos e metalurgia.* São Paulo : Edgar Blucher, 2015. 7ª Reimpressão.
6. **técnicas, ABNT - Associação Brasileira de normas.** *NBR5674.* Rio de Janeiro : Printed in Brazil, 1999.
7. **Fogliatto, Flávio Sanson.** *Confiabilidade e manutenção industrial.* Rio de Janeiro : Elsevier Editora, 2009.
8. **Moubray, John.** *Reability centered maintenance.* London : British Library, 1997.
9. **Nascif, Alan Kardec e Júlio.** *Manutenção, Função estratégica.* Rio de Janeiro : Qualimark: Petrobras, 2009. 3ª Edição.
10. **Xenos, Harilaus G.** *Gerenciando a manutenção produtiva.* Belo Horizonte : EDG, 2004.
11. *Confiabilidade e manutenção industrial.* Rio de Janeiro : Elsevier editora Ltda, 2009.
12. **Rodrigues, Marley Eustaquio.** *Gestão da Manutenção em Mineração de Agregados.* Faculdade IETEC. Belo Horizonte : Faculdade IETEC, 2017.
13. **Brasil, Portal.** www.portalbrasil.net/indices.htm. www.portalbrasil.net. [Online] [Citado em: 05 de 12 de 2018.] www.portalbrasil.net/indices.htm.
14. **ABRAMAN.** ABRAMAN. <http://www.abraman.org.br>. [Online] [Citado em: 5 de 12 de 2018.] <http://www.abraman.org.br/sidebar/bibliotecas-e-publicacoes/apostilas-artigos-boletins-e-trabalhos-tecnicos/trabalhos-tecnicos/20-congresso-brasileiro-de-manutencao--2005>.
15. **MTE.** NR4 - SERVIÇOS ESPECIALIZADOS EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA. s.l. : Portaria SIT nº 17, de 1º de agosto de 2007 02/08/07, 2007.
16. **Filho, Menildo Freitas e Nourival.** *Custos de manutenção: competência e racionalidade na gestão de recursos objetivando.* Florianópolis : IX Congresso Internacional de Custos, 2005.

17. **Mineração, Instituto Brasileiro de.** www.ibram.org.br/. *Ibram.org.br*. [Online] [Citado em: 13 de 05 de 2018.] <http://www.ibram.org.br/>.
18. **Society, American Welding.** AWS. *American Welding Society*. [Online] [Citado em: 16 de 5 de 2018.] www.aws.org.
19. **Modenesi, Paulo José.** *Soldagem: Fundamentos e tecnologias*. Belo Horizonte : Didática, 2002. 3ª Edição.
20. —. *Soldagem: Fundamentos e tecnologias*. Belo Horizonte : Didática, 2011. 4ª Edição.
21. **Okumura, Toshie.** *Engenharia de soldagem e aplicações*. São Paulo : Livros técnicos e científicos editora S.A., 1982.
22. **Marques, Paulo V.** *Introdução a soldagem*. Belo Horizonte : Notas de aula, 2009.
23. **Norrish, John.** *Advanced welding: Technologies and process control*. Cambridge : WOODHEAD PUBLISHING LIMITED, 2006.
24. **ESAB.** *Guia de soldagem: ARAMES TUBULARES PARA AÇOS AO CARBONO E DE BAIXA LIGA EM TODAS AS POSIÇÕES DE SOLDAGEM*. Rio de Janeiro : ESAB, 2005.
25. —. *Apostila de Soldagem Mlg Mag*. Rio de Janeiro : s.n., 2005.
26. **Rosário, João Maurício.** *Automação industrial*. São Paulo : Pearson , 2009.
27. **Tangel, Andrew.** Business. *Wall Street Journal*. [Online] [Citado em: 27 de 5 de 2018.] <https://www.wsj.com/articles/metal-benders-fear-tariffs-might-break-them-1520506800>.
28. **Sandvick.** Sandvick Coromant. <https://www.sandvik.coromant.com>. [Online] [Citado em: 28 de 05 de 2018.] <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/boring.aspx>.
29. **MÜHLE, HENRIQUE BRÜGGMANN.** *MANDRILAMENTO COM CABEÇOTES DE EXCENTRICIDADE REGULÁVEL E*. FLORIANÓPOLIS : DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2000.
30. **Polli, ilton Luis.** *Estudo do processo de mandrilamento de acabamento*. Florianópolis : DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA, 1995.
31. **Ferraresi, Dino.** *Fundamentos da usinagem dos metias*. São Carlos : Edgard Blucher, 1969.
32. **Climax.** <https://www.climaxportable.com>. [Online] [Citado em: 02 de 06 de 2018.] <https://www.climaxportable.com/about-us/bortech>.
33. **Hibbeler, R. C.** *Resistência dos materiais*. São Paulo : Pearson, 2004. 5ª Edição.
34. **Norton, Robert L.** *Projetos de máquinas*. Santana : Bookman, 2013. 4ª Edição.
35. **Budynas, Rchard G.** *Elementos de máquinas de Shiegley*. Santana : Bookman, 2011. 8ª Edição.
36. **Borges, Prof. Joel Brasil.** *Usinagem Básica*. Araranguá. : s.n., 2009. Notas de aula.

37. **Ltda, OBR - Equipamentos industriais.** *Formulas para cálculos de fusos.* Catálogo da empresa.
38. **Frickes, Palmer e.** *Apostila de treinamento para vendedores e representantes.* Ijuí : s.n., 2015.
39. **Santana, Garcia e.** *CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA USO EM SOLDAGEM ORBITAL.* Brasília : s.n., 2015. Trabalho de graduação.
40. **MENESES, LISSY YOJANA HURTADO.** *MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW-S EM SOLDAGEM ORBITAL.* Brasília : s.n., 2013. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.
41. **Fochesatto, Juarez.** *Vazão de gás adequada e consumo na soldagem.* Caxias do Sul : <https://www.powermig.com.br/pt-br/novidades/vazao-de-gas-adequada-e-consumo-na-soldagem-229>, 2017.
42. **Lermen, Richard Thomas.** *Influência da Velocidade de Soldagem sobre as Geometrias dos Cordões de Solda Realizados Através dos Processos de Soldagem FACW e Soldagem Híbrida (TIG/FACW).* Horizontina : SIEF – Semana Internacional das Engenharias da FAHOR, 2011.
43. **Eutetic, Castolin.** *Catálogo de consumíveis para soldagem Img Mag Castolin Eutetic.* Belo Horizonte : s.n.
44. **Rothwell, Roy e Paul Gardiner.** *Invention, innovation, re-innovation and the role of the user in technovation.* s.l. : Issue 3, 1985. Volume 3.
45. **XDEM.** <https://xdem.en.alibaba.com/product>. <https://xdem.en.alibaba.com/product>. [Online] [Citado em: 24 de 02 de 2018.] https://xdem.en.alibaba.com/product/60357386550-802877993/XDEM_XDTH50_Line_Bore_Welder_Portable_Line_Boring_Welding_Machine.html.
46. **TROMBETA, A.** Artigo A Quarta Geração da Manutenção, publicação internet, 2016, disponível em www.linkedin.com/pulse/quarta-geracao-da-manutencao-me-alessandro-trombeta-mba/trk=mp-reader-card.
47. **GUIBERT, A.A.P.** Telecurso 2000 profissionalizante: Processos de fabricação: Mandrilhamento. São Paulo: Globo. 4ª Ed, 1996
48. **GORDO, Nívea; Ferreira, Joel.** **Mecânica: Elementos de máquinas.** 12 Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

8. ANEXOS

Tabela utilizada para encontrar as propriedades dos materiais que serão confeccionadas as peças do protótipo e encontrar o peso das mesmas.

<http://www.uff.br/petmec/downloads/resmat/W%20-%20Apendice%20C%20Materiais.pdf> acessada dia 20/05/2018 às 20:56.

APÊNDICE – C – Propriedades Mecânicas de alguns materiais ⁽¹⁾

Materiais	ρ	E	G	Tensão de Escoamento ⁽²⁾		Tensão Última (Ruptura)			ϵ	α
	Massa Especif. (ton/m ³)	Módulo Elastic. longitud. (GPa)	Módulo Elastic. transver. (GPa)	σ Tração (MPa)	τ Cisalh. (MPa)	σ Tração (MPa)	σ Compres. (MPa)	τ Cisalh. (MPa)	Elong. Percent. (%)	Coef. Dil.Tér (10 ⁻⁶ C ⁻¹)
Aço Estrutural	7,86	200	76	250	150⁽³⁾	450	450⁽³⁾	270⁽³⁾	28	11,7
Aço 1010 ⁽⁴⁾ Lamin. quente)	7,86	205	79	180	108	330	330	198	25	11,7
Aço 1010 (Lamin. a frio)	7,86	205	79	300	180	370	370	220	20	11,7
Aço 1020 (Lamin. quente)	7,86	205	79	210	125	380	380	225	22	11,7
Aço 1020 (Lamin. a frio)	7,86	205	79	350	210	420	420	250	18	11,7
Aço 1030 (Lamin. quente)	7,86	205	79	260	155	470	470	280	20	11,7
Aço 1030 (Lamin. a frio)	7,86	205	79	450	270	530	530	315	16	11,7
Aço 1040 (lamin. quente)	7,87	210	80	290	215	530	530	315	18	11,7
Aço 1040 (lamin. a frio)	7,87	210	80	490	290	590	590	350	15	11,7
Aço 1050 (Lamin. quente)	7,86	210	80	340	200	630	630	375	15	11,7
Aço 1050 (Lamin. quente)	7,86	210	80	340	200	630	630	375	15	11,7
Aço CA 25 ⁽⁵⁾	7,86	210	80	250	150	300	300	180	18	11,7
Aço CA 60 ⁽⁵⁾	7,86	210	80	600	360	660	660	390	5	11,7
Aço CP 150 ⁽⁶⁾	7,86	210	80	1500	900	1570	1570	940	8	11,7
AçoInox (recoz)	7,92	190	78	510	305	1300	1300	780	12	11,7
Ferro Fundido Cinzento	7,64	90	641	-	-	210	800	-	4	10,4
Ferro Fundido Nodular	7,64	170	83	250	165	370	-	330	20	12,1
Liga Titânio	4,63	96	36	930	-	1.070	1.070	-	13	
Alumín-2014T6	2,77	75	28	365	214	414	414	241	20	23,2
Alumín-6061T6	2,77	70	26	241	138	262	262	207		23,4
Latão (temper) ⁷	8,47	105	39	105	65	330	332	220	62	20,0
Bronze (recozid)	8,86	100	45	140	85	340	340	200	50	16,9
Concreto (média)	2,41	24	-	-	-	-	25	-	-	10
Concreto (alta)	2,41	31	-	-	-	-	34	-	-	10,8
Vidro	2,50	75	27	-	-	5	10	-	-	79
Pinho (8)	0,55	13	-	56	-	-	51	7,6	-	-
Carvalho (8)	0,69	12	-	58	-	-	48	13	-	-
Polietileno	0,91	3	-	-	-	48	90	55	-	-
Granito	2,7	70	-	-	-	21	240	35	-	7,2