

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

JACQUELINE FILGUEIRA TAVARES

**INFLUÊNCIA DO AMANTEIGAMENTO NA SOLDAGEM DE REVESTIMENTO
DURO APLICADO SOBRE O MATERIAL SAE 1020 UTILIZANDO
O PROCESSO SMAW**

São Paulo

2024

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

JACQUELINE FILGUEIRA TAVARES

**INFLUÊNCIA DO AMANTEIGAMENTO NA SOLDAGEM DE REVESTIMENTO
DURO APLICADO SOBRE O MATERIAL SAE 1020 UTILIZANDO
O PROCESSO SMAW**

Projeto científico elaborado como requisito
para a conclusão do Curso Superior de
Tecnologia em Mecânica Processos de
Soldagem.

Orientador: Me. Edgar de Souza Dutra

São Paulo

2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

JACQUELINE FILGUEIRA TAVARES

**INFLUÊNCIA DO AMANTEIGAMENTO NA SOLDAGEM DE REVESTIMENTO
DURO APLICADO SOBRE O MATERIAL SAE 1020 UTILIZANDO
O PROCESSO SMAW**

Projeto científico elaborado como requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Mecânica Processos de Soldagem.

Orientador: Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____ / ____ / ____

Prof. Dr. Fabrício Iusuti de Medeiros

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____ / ____ / ____

Prof. Me. Silvestre da Silva Neto

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____ / ____ / ____

Dedico este trabalho de graduação as duas pessoas responsáveis pela minha formação pessoal: minha mãe Norma Sueli Filgueira Patrício (in memoriam) e minha avó Dejevana Tavares de Oliveira (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Me. Edgar de Souza Dutra pelo apoio e aprendizado durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Faculdade De Tecnologia De Itaquera Professor Miguel Reale, e sua equipe acadêmica que me proporcionou a oportunidade de ingresso no âmbito da pesquisa, além do fornecimento de materiais e o ensino necessário para o meu crescimento profissional e para a minha formação pessoal.

Ao Mestre Silvestre da Silva Neto pela usinagem da peça de estudo.

A discente Maria Aline Marinheiro dos Santos Schiavelli, pelo apoio com as análises metalográficas.

A discente Ana Beatriz Tutschy Moreto pelo apoio com a metalografia e ensaio de dureza.

Ao discente Tiago Neves pelo apoio com as análises de custos de soldagem.

Aos discentes cursantes do terceiro semestre desta graduação, que me acompanharam durante os processos de soldagem e ensaios não destrutivos deste trabalho.

Aos amigos e familiares pelo incentivo e apoio emocional que me trouxe paz na correria de cada semestre: meus tios Manoel Filgueira da Cunha e Maria Geralda da Silva Cunha; minha prima Raquel Souza Filgueira; o meu companheiro Anneron N. Santana e amigos Dra. Profa. Maiaty S. Ferraz, Profa. Elaine Oliveira, Terezinha C. L. Acácio, Carmen Greice Renda, e Karla S. Carrara.

À Deus, sempre presente, que sempre coloca no meu caminho pessoas especiais que me ajudam a seguir sempre em frente. E a todos aqueles que me apoiaram de forma indireta.

RESUMO

A soldagem de revestimento geralmente é usada para baratear equipamentos e processos. Uma vez que se obtém o revestimento apenas na área de maior desgaste, pode-se utilizar materiais mais acessíveis para a mesma finalidade. O agronegócio possui muitas perdas em relação a manutenção de suas facas colheitadeiras onde são expostas ao desgaste do solo exigindo que suas manutenções sejam mais frequentes durante as safras. Por isso, este estudo tem o propósito de comparar duas técnicas de soldagem utilizando eletrodos de carboneto de cromo para o revestimento duro em aço comum SAE 1020, com duas maneiras para comparação: de um lado diretamente no metal de base e do outro com o amanteigamento utilizando o consumível E308L-16 com o processo de Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (*Shield Metal Arc Welding* – SMAW). Foram realizadas as análises com Ensaio Visual, Ensaio de Líquido Penetrante, análises das caracterizações Macroestruturais e Microestruturais, análise de Dureza Vickers e análise de Custos que validaram o amanteigamento como uma solução viável para esta pauta de estudo.

Palavras-chave: Produtividade; Soldagem SMAW; Revestimento Duro; SAE 1020; Faca Colheitadeira.

ABSTRACT

Clad welding is generally used to reduce the cost of equipment and processes. Since the coating is obtained only in the area of greatest wear, more affordable materials can be used for the same purpose. Agribusiness suffers many losses when it comes to the maintenance of its harvester knives, which are exposed to wear and tear from the soil, requiring more frequent maintenance during harvests. For this reason, the purpose of this study is to compare two welding techniques using chromium carbide electrodes for hardfacing common SAE 1020 steel, with two ways of comparison: one directly on the base metal and the other with buttering using the E308L-16 consumable with the Shield Metal Arc Welding (SMAW) process. Analyses were carried out using visual testing, liquid penetrant testing, macrostructural and microstructural characterization, Vickers hardness analysis and cost analysis, which validated buttery as a viable solution for this study.

Keywords: Productivity; SMAW Welding; Hardfacing; SAE 1020; Harvester Knife.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução histórica dos processos de soldagem	23
Figura 2: Esquema representativo do processo de Soldagem SMAW.	25
Figura 3: (a)(b) Porta eletrodos; (c)(d) cabos usados no sistema SMAW.	26
Figura 4: Esquema de alimentação do equipamento do Processo SMAW.	27
Figura 5: Representação esquemática do eletrodo revestido: (a) partes especificadas; (b) tipos diferentes de eletrodos.....	28
Figura 6: Máquina colheitadeira trabalhando durante safra	31
Figura 7: A colheitadeira Massey Ferguson Modelo F34, sendo: (a) desenho esquemático do equipamento; (b) corte do molinete destacando a instalação da faca; (c)(d) as demonstrações de facas da colheitadeira com revestimento duro compatível com Modelos Massey Ferguson MF34, MF38, MF9895.....	32
Figura 8: Modelo simples de Colheitadeira	33
Figura 9: Diferentes Vistas do Molinete (a)vista isométrica; (b)a vista frontal; (c) a vista da lateral esquerda.	33
Figura 10: Exemplos de facas com revestimento: (a) corte longitudinal, onde o arco AB representa a extensão do contato das facas com a cana em cada giro do picador; (b) um exemplo de faca picadora com revestimento duro utilizada no agronegócio; (c) detalhe de uma faca após aplicação do revestimento de dimensões de 24 x 180 x 580 mm.....	34
Figura 11: Detalhe de desgaste em facas: (a) Arame Tubular 1 - AT1; (b) Arame Tubular 2 - AT2; (c) Eletrodo Revestido 1 – ER1; e (d) Arame Revestido 2 - ER2. ...	35
Figura 12: (a) (b) (c) Alguns exemplos de facas colheitadeiras vendidas em 2024.	36
Figura 13: (a)(b)(c)(d)(e)(f)(g)(h)(i)(j)(k)(l) Modelos de facas revestidas de Carboneto de Tungstênio para diferentes aplicações	36
Figura 14: (a) (b) Chapas de aço carbono.....	37
Figura 15: Comparativo entre tipos de fresadoras convencionais: (a) a fresadora vertical; (b) fresadora horizontal.	39
Figura 16: Diferentes geometrias de fresas: (a) fresas cilíndricas; (b) fresas de topo; (c) fresas cônicas; (d) fresas de disco com três cortes; (e) a fresa de perfil.	40
Figura 17: Processos de fresamento: (a) o fresamento frontal; (b) fresamento tangencial.	41

Figura 18: Processo de Furação: (a) (b) geometria da furação; (c) representação das arestas de corte.....	42
Figura 19: Exemplo de metal de base, da representação da ZAC e de perda de energia térmica: (a) uma ampliação demonstrando o metal de adição e metal de base; (b) (c) dois exemplos com demonstração do metal de base, zona fundida e da zona afetada pelo calor; (d) exemplo de poça e de vários fatores que podem levar a perda de energia durante a operação de soldagem com eletrodo não consumível. .	44
Figura 20: Representação do rendimento térmico da energia de soldagem.....	45
Figura 21: Descontinuidades mais comuns nos processos SMAW. (a) Porosidade; (b) inclusões; (c) falta de fusão; (d) falta de penetração; (e) concavidade; (f) sobreposição; (g) decoesão lamelar; (h) trinca na raiz; (i) trinca na garganta; (j) trinca na margem; (k) trinca sob cordão; (l) mordedura.	48
Figura 22: Ensaio Visual Direto	50
Figura 23: (a); (b); (c) Utensílios e ferramentas para Inspeção Visual.....	50
Figura 24: Etapas do ensaio LP: (a) peça limpa e adequada para início do ensaio; (b) aplicação do líquido penetrante; (c) limpeza com o líquido e pano pela segunda vez neste processo; (d) a aplicação do produto em direção única; (e) a aplicação do revelador; (f) peça pronta para análise.....	51
Figura 25: Etapas da realização do ensaio por LP	52
Figura 26: Analogia para explicar a sistemática de qualificação de uma EPS	54
Figura 27: Soldador executando manutenção em maquinário pesado	56
Figura 28: Fluxograma dos métodos utilizados	62
Figura 29: (a) (b) Vista da chapa de aço carbono 1020.....	63
Figura 30: Projeto em projeção 2D de faca colheitadeira com simbologia de soldagem.	63
Figura 31: Usinagem do protótipo para estudo da faca colheitadeira: (a), (b), (c) e (f) registro por diversos ângulos do processo de fresamento; (e) registro de ajustagem do equipamento.	64
Figura 32: (a) Paquímetros e calibres de solda; (b) (c) (d) checagem das medidas da faca.....	65
Figura 33: (a) Desenho 3D da faca; (b) (c) vistas do protótipo usinado.	65
Figura 34: Cálculo do Carbono Equivalente do SAE 1020	66

Figura 35: Demonstrativo de aplicação das duas formas do revestimento duro: (a) com o tecimento longitudinal e transversal representado; (b) com a aplicação do amanteigamento e do revestimento duro.	67
Figura 36: Eletrodo E 10-UM-60-GRZ	68
Figura 37: Classificação do material de Revestimento Duro	69
Figura 38: Classificação do material de Amanteigamento	71
Figura 39: Diagrama de Schaeffler do Amanteigamento	72
Figura 40: (a) (b) Temperaturas da estufa; (c) (d) Estufa; (e) Eletrodos ressecando conforme procedimento	73
Figura 41: (a) (b) (c) Vistas da máquina de solda; (d) parâmetros da soldagem com revestimento duro; (e) parâmetros da soldagem do amanteigamento.	73
Figura 42: Soldagem do revestimento duro: (a)(b) preparação; (c) 1ª camada de solda; (d) anteparo cerâmica improvisado; (e) controle de temperatura interpasse; (f) 2ª camada de solda; (g) limpeza; (h) peça pronta.	74
Figura 43: Soldagem do amanteigamento: (a) 1ª camada de solda; (b) limpeza; (c) 2ª camada de solda; (d) limpeza; (e) peça pronta.	74
Figura 44: (a) (b) (c) (d) Registro parcial do ensaio visual realizado.....	75
Figura 45: Luxímetro: (a) o equipamento; (b) baixa luminosidade; (c) luminosidade adequada.....	76
Figura 46: (a) (b) (c) (d) (e) Demonstram o ensaio de líquido penetrante realizado	77
Figura 47: (a) (b) Vistas do durômetro utilizado; (c) (d) execução ensaio de dureza.	79
Figura 48: Pontos de medição do ensaio de dureza	79
Figura 49: (a) Serra Franho; (b)(c)(d) ajuste e tentativa de corte da peça.	80
Figura 50: (a) Cutt-off; (b) (c) corte da peça; (d) peça após o corte.....	80
Figura 51: (a) Itens utilizados; (b) resina; (c) catalizador; (d)(e) preparo; (f) embutimento CP	81
Figura 52: (a) Lixas utilizadas; (b) lixadeira manual; (d) lixadeira elétrica semiautomática; (c)(e) preparo do CP com as lixas	81
Figura 53: (a)(b) Politrizes elétricas semiautomáticas; (c) pastas de diamante; (d) polimento do CP; (e) (f) ataques químicos; (g) soprador térmico.	82
Figura 54: (a) Estereoscópio digital; (b) software utilizado para macrografia.....	82
Figura 55: (a) Microscópio digital; (b) software utilizado para micrografia.	83

Figura 56: Pesagem dos consumíveis (a) (b) antes do uso; (c) sobra da soldagem do carboneto de cromo; (d) (e) sobra da soldagem do amanteigamento.....	84
Figura 57: Pesagem da peça: (a) antes da soldagem; (b) após soldagem do revestimento duro; (c) após soldagem do amanteigamento.	85
Figura 58: (a) (b) (c) Evidência do Ensaio Visual realizado no carboneto de cromo.	86
Figura 59: (a) (b) Evidência do Ensaio Visual realizado no amanteigamento	87
Figura 60: (a) (b) (c) (d) Trincas encontradas no revestimento duro.....	88
Figura 61: Macrografias (a) (c) do revestimento duro; (b)(d) do amanteigamento ...	88
Figura 62: Resultados encontrados com <i>Image J</i> sendo (a) do Revestimento Duro e (b) do Amanteigamento.....	89
Figura 63: (a) ZAC do revestimento duro; (b) ZAC do amanteigamento (c) comparativo das áreas das ZAC's	90
Figura 64: Imagem com ampliação de 100 vezes para análise de Inclusões do Material de Base: (a) o metal de base do revestimento duro; (b) o material de base do amanteigamento.	90
Figura 65: Imagem com ampliação de 200 vezes para análise de Inclusões da Zona Fundida: (a) a zona fundida do revestimento duro; (b) a zona fundida do amanteigamento	91
Figura 66: Micrografia com aumento de 100 vezes da ZAC: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.	92
Figura 67: Micrografia com aumento de 200 vezes da ZAC: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.	92
Figura 68: Micrografia de 100 vezes do Metal de Base: (a) do revestimento duro; (b) o metal de base do amanteigamento.	93
Figura 69: Micrografia de 200 vezes do Metal de Base: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.	93
Figura 70: Micrografia de 100 vezes da Zona Fundida do 1º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.....	94
Figura 71: Micrografia de 200 vezes da Zona Fundida do 1º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.....	94
Figura 72: Micrografia de 100 vezes da Zona Fundida do 2º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.....	95

Figura 73: Micrografia de 200 vezes da Zona Fundida do 2º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.....	95
Figura 74: Gráfico comparativo dos ensaios de dureza Vickers.	97
Figura 75: Viabilidade Econômica	98
Figura 76: Custos do processo de soldagem do revestimento duro	99
Figura 77: Custos do Processo de Soldagem com Amanteigamento.	99
Figura 78: Composição de Custos: (a) Revestimento duro, (b) amanteigamento. .	100
Figura 79: Comparativo de Custos Totais	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Funções do revestimento do eletrodo na Soldagem	30
Tabela 2: Abreviaturas dos tipos de Ensaios Não Destrutivos	49
Tabela 3: Grupos de Líquido Penetrante	52
Tabela 4: Taxa de deposição típica para os principais processos de soldagem	58
Tabela 5: Tabela de Custos.....	61
Tabela 6: Composição Química SAE 1020.....	66
Tabela 7: Características Mecânicas SAE 1020 - Dureza (HB)	66
Tabela 8: Propriedades Mecânicas do SAE 1020.....	67
Tabela 9: Informações Técnicas do Eletrodo E 10-UM-60-GRZ	69
Tabela 10: Composição Química do Consumível de Revestimento Duro	70
Tabela 11: Propriedades Mecânicas do Consumível do Revestimento Duro	70
Tabela 12: Composição Química do Consumível de Amanteigamento	71
Tabela 13: Propriedades Mecânicas do Consumível do Amanteigamento	71
Tabela 14: Dados dos Processos de Soldagem	75
Tabela 15: Critérios de aceitação para Inspeção Visual.	76
Tabela 16: Tabela com critérios de aceitação para o ensaio de LP	78
Tabela 17: Tempo de Processo de Soldagem	83
Tabela 18: Dados de Soldagem do Revestimento	84
Tabela 19: Resultado da inspeção visual	86
Tabela 20: Análise do Ensaio de Líquido Penetrante	87
Tabela 21: Resultados da análise de dureza do revestimento duro.....	96
Tabela 22: Resultados da análise de dureza do amanteigamento.....	96
Tabela 23: Média dos resultados de dureza encontrados.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASPT	Acompanhamento de Soldagem da Peça Teste
AT1	Arame Tubular 1
AT2	Arame Tubular 2
AWS	<i>American Welding Society</i> , Sociedade Americana de Soldagem
CC	Custo dos Consumíveis
CD	Custo da Depreciação
CE	Custo da Energia Elétrica
CMC	Custo de (outros) Materiais de Consumo
CM	Custo da Manutenção
CMO	Custo da Mão de Obra
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Corpo de Prova
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPS	Especificação do Procedimento de Soldagem
ER1	Eletrodo Revestido 1
ER2	Eletrodo Revestido 2
FBTS	Fundação Brasileira de Soldagem

FO	Fator de Operação
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LP	Líquido Penetrante
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura de Alta ou Baixa Resolução
MVS	Microscopia de Varredura por Sonda
OCP	Organismo Certificador de Produtos
PECEGE	Instituto de Pesquisa e Educação Continuada em Economia e Gestão
PIB	Produto Interno Bruto
RQPS	Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SMAW	<i>Shield Metal Arc Welding</i> , Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido
TAA	Tempo de Arco Aberto
TTS	Tempo Total de Soldagem
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Justificativa	20
1.2.1 Objetivos Específicos	22
2 REVISÃO DA LITERATURA TÉCNICO-CIENTÍFICA	22
2.1 União de Materiais	22
2.1.1 Soldagem	23
2.1.2 Soldagem SMAW	24
2.1.3 Equipamentos do Processo SMAW	25
2.1.4 Tipos de Eletrodos Revestidos	28
2.1.5 Tipos de Revestimentos	29
2.2 Equipamentos Agrícolas	30
2.2.1 Ramo de Atuação	32
2.2.2 Implementos Cortantes (Facas)	34
2.2.3 Comércio dos Implementos Cortantes (Facas).....	35
2.3 Aço Carbono	37
2.4 Usinagem de Materiais	38
2.4.1 Máquina Fresadora	38
2.4.2 Ferramenta Fresa	40
2.4.3 Operação de Fresamento	40
2.4.4 Furação	41
2.5 Metalurgia da Soldagem	42
2.5.1 Transformações na Junta Soldada.....	42
2.5.2 Energia Imposta (Heat Input)	44
2.5.3 Soldabilidade.....	45
2.5.3.1 Cálculo de Carbono Equivalente	46
2.5.3.2 Diagrama de Schaeffler.....	46
2.6 Qualidade	47
2.6.1 Descontinuidades.....	47
2.6.2 Ensaio Não Destrutivos	49
2.6.2.1 Ensaio Visuais	49
2.6.2.2 Ensaio por Líquido Penetrante	51
2.6.3 Ensaio Destrutivos.....	53

2.6.3.1 Ensaio de Dureza.....	53
2.6.4 Análises Macroestruturais e Microestruturais	53
2.7 Norma AWS D1.1.....	53
2.7.1 RQPS e EPS.....	54
2.8 Soldagem de Revestimento.....	55
2.8.1 Amanteigamento	56
2.9 Custos de Soldagem.....	57
2.9.1 Rendimento.....	58
2.9.2 Taxa de Deposição	58
2.9.3 Fator de Trabalho ou de Operação	59
2.9.4 Custos Totais	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.2 Metal de Base	63
3.2.1 Composição Química e Propriedades Mecânicas	65
3.3 Metal de Adição.....	67
3.3.1 Consumível de Revestimento Duro	68
3.3.2 Composição Química e Propriedades Mecânicas do Revestimento Duro	70
3.3.3 Consumível do Amanteigamento	70
3.3.4 Composição Química e Propriedades Mecânicas do Amanteigamento.....	71
3.4 Variáveis de Controle.....	72
3.5 Soldagem.....	72
3.6 Ensaio Não Destrutivos	75
3.6.1 Ensaio Visual	75
3.6.2 Ensaio Líquido Penetrante	77
3.7 Ensaio Destrutivos.....	78
3.7.1 Ensaio de Dureza Vickers	78
3.8 Caracterizações Macroestruturais e Microestruturais	80
3.8.1 Preparação dos Corpos de Prova	80
3.8.2 Macrografias	82
3.8.3 Micrografias	83
3.9 Custos de Soldagem.....	83
4 RESULTADOS	86
4.1 Análise do Ensaio Visual.....	86
4.2 Análise do Ensaio de Líquido Penetrante	87

4.3 Análises das caracterizações Macroestruturais e Microestruturais	88
4.3.1 Macrografia	88
4.3.2 Inclusões	90
4.3.3 Micrografia	91
4.4 Análise de Dureza Vickers	95
4.5 Análise de Custos	98
5 CONCLUSÃO	102
REFERÊNCIAS	104
APÊNDICE A – A ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DO AMANTEIGAMENTO	111
APÊNDICE B – A ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DO CARBONETO DE CROMO	112

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é um dos setores que mais crescem no Brasil. Seja como vendedor externo ou interno, o auge de sua produção é no período da safra do produto plantado. “Segundo os dados da Companhia Nacional de Abastecimento – Conab, a safra 2023/24 chegou a 713,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, a maior da série histórica, com área colhida de 8,33 milhões de hectares ou 85,580 toneladas por hectare.” (PRODUÇÃO, 2024). Sendo assim, os produtores programam suas colheitas e vendas em períodos específicos do ano.

Em 2022, 18% do território agricultável brasileiro é destinado à cana-de-açúcar e a seus subprodutos como açúcar, álcool e etanol. As maiores produções são do Sudeste, Centro-Oeste e Norte do país. Segundo dados da Conab, o estado de São Paulo corresponde à 53% da produção nacional, dos quais 34% foram destinados a produção de açúcar, com 29,79 milhões de toneladas e 19% destinados ao etanol, seguido por Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul (RICCI et al., 2024)

Informa Cherubin (2018) que as paradas para manutenção de equipamentos, contratação de mão-de-obra e compra de insumos e produtos pertinentes a produção, podem ser programadas para que não se tenham perdas produtivas durante a safra. Porém, existe um problema que é de comum acordo entre produtores: redução da produção devido a paradas para manutenções emergenciais, com o objetivo de substituir peças perdidas por desgaste constante. Algumas peças maiores até podem ter a espera do período entressafra, mas as peças que têm contato direto com o vegetal ou com a areia e o solo, precisam de manutenção recorrente e não se podem aguardar até a parada do equipamento por término da safra.

A aplicação de revestimento nas peças que sofrem este problema tem sido um meio utilizado com o intuito de diminuir a necessidade de troca por desgaste do material. As colheitadeiras costumam ter suas facas picadoras ou martelos desfibradores feitos de aço carbono 1020 e revestidos por revestimento duro com intuito de aumentar sua durabilidade ao desgaste.

Esse desgaste acentuado pode ocorrer por diversos fatores, desde a diversidade do tipo de vegetal a ser colhido, a abrasividade do solo, o impacto direto com possíveis pedras ou galhos não previstos no trajeto da máquina ou até o método de colheita e manuseio do equipamento.

Durante as paradas para manutenção, toda a produção tem que ser interrompida, geralmente por metade ou até um turno inteiro de trabalho. Além da perda material, se tem a perda de produção, de mão de obra das pessoas envolvidas no processo, materiais e consumíveis utilizados para a recuperação dele.

Por esse motivo, estudam-se diversos processos e consumíveis para revestir esse material, com intuito de obter-se sempre o melhor custo-benefício. Neste estudo, foram utilizados os conhecimentos acadêmicos adquiridos durante a graduação, e o experimento prático e testes disponíveis para análise desse revestimento aplicado. Assim sendo, aplica-se de forma direta, parte dos conhecimentos adquiridos neste curso.

1.1 Justificativa

Segundo Manutenção (2021), o Instituto de Pesquisa e Educação Continuada em Economia e Gestão – PECEGE estima que na safra de 2021/2022 de cana-de-açúcar devem ter sido gastos com manutenção industrial, em média quatro reais por tonelada de cana-de-açúcar moída, ou 27% dos custos totais de operação industrial, calculados em quinze reais por tonelada.

Buchanan, Shipway e McCartney (2007) frisam que nas facas, martelos desfibradores e demais componentes dos equipamentos do setor sucroalcooleiro, quando utilizados no preparo da cana para moenda, predominava a ocorrência de desgaste abrasivo, provocado pelo deslizamento de vários materiais na superfície da peça, como bagaço de cana, areia, terra entre outros materiais estranhos, bem como, pela corrosão devido à acidez do caldo da cana-de-açúcar.

Estudos baseados em melhorar a qualidade das peças utilizadas nos equipamentos usados em safras de cana-de-açúcar, sempre serão bem-vindos, uma vez que manutenções dentro das safras procuram ser evitadas, pois requerem atenção imediata, podendo gerar prejuízos não programados.

“A aplicação de revestimentos duros em facas picotadoras e martelos desfibradores construídos em aço é executada para melhorar a resistência ao desgaste assim como para recuperação dos componentes.” (BUCHELY et al., 2005).

Alguns autores estudaram os impactos do corte nas colheitadeiras avaliando a quantidade de lâminas, perda de caldo de cana e danos à cana. Entre eles Barnes et al. (2009); *El Shal, A.M.; Mazrou, Y.S.; El Didamony, M.I. (2022)*. Outros autores como

Zhou et al. (2024) estudaram por elementos finitos os picotadores das colheitadeiras de cana-de-açúcar para melhorar seu desempenho. Chegaram à conclusão de que o corte é afetado pela espessura da lâmina, ângulo de chanfro, relação de velocidade de rotação entre o rolo transportador e o rolo de corte.

Segundo Lima & Ferraresi (2006), o picador é constituído por um ou dois jogos de facas para picar em pedaços menores a cana que será enviada ao desfibrador. É um equipamento rotativo com velocidade periférica de 60 m/s e aumenta a densidade da cana, através das facas oscilantes. Os revestimentos duros nas facas entram em contato com a cana e reduzem o desgaste acentuado aos elementos agressivos.

De acordo com Lima e Winck (2006) que para que as facas picadoras e os martelos desfibradores sejam substituídas pelo desgaste, existem a realização de paradas programadas mensais por 8 a 12 horas dessas indústrias; que geram além da perda de produção, custos com profissionais, materiais, equipamentos, consumíveis e ferramentas.

Informa Lima (2008) que outros trabalhos já foram desenvolvidos investigando a resistência ao desgaste de depósitos de soldas de revestimentos duros, descrevendo como alguns dos autores que se dedicaram a este tema: Bálsamo (1995), Martins Filho (1995), Hernández (1997), Ribeiro (2004), Buchely et al (2005), Buchanan, Shipway e McCartney (2007), Corrêa et al (2007), Carceller (2007).

Com esse propósito, este estudo será focado nas facas das colheitadeiras, que por sofrerem desgaste recorrente, são sempre trocadas durante a safra, gerando atrasados na colheita e custos altos com manutenção.

1.2 Objetivo Geral

Avaliação da influência da técnica de amanteigamento na soldagem de revestimento (*Harding Facing*) sobre o material SAE 1020 utilizando um eletrodo de carboneto de cromo no processo *Shield Metal Arc Welding* – SMAW para aplicação no ramo de colheitadeiras para prevenção de trincas ou outras discontinuidades inerentes à aplicação do revestimento duro quando aplicadas diretamente sobre o SAE 1020.

1.2.1 Objetivos Específicos

Com a necessidade de mercado, a pesquisa apresentada tem como objetivo demonstrar sob análises embasadas em cunho acadêmico em paralelo com experimentos em laboratório, comprometendo-se a:

- Realizar a soldagem de revestimento do consumível E 10-UM-60-GRZ e o amanteigamento com o consumível E308L-16 sobre o material SAE1020;
- Comparar as duas técnicas de revestimento de soldagem através dos ensaios não destrutivos e destrutivos;
- Quantificar os custos relacionados as diferentes técnicas à produção da faca.

2 REVISÃO DA LITERATURA TÉCNICO-CIENTÍFICA

A revisão bibliográfica foi desenvolvida através de embasamento teórico e técnico das pesquisas feitas em artigos, normas, livros e outros materiais pertinentes para a elaboração da análise do tema deste estudo.

2.1 União de Materiais

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2016, p. 25),” os métodos de união dos metais podem ser aqueles baseados na ação de forças macroscópicas ou microscópicas. No primeiro caso, terão como exemplos a parafusagem e a rebiteagem e segundo, terão como exemplo a brasagem, a soldagem, e a colagem”.

Ainda com Marques, Modenesi e Bracarense (2016, p.150), ele ressalta a importância da avaliação da resistência de corrosão da solda, que podem ocorrer de forma intergranular, corrosão sob tensão e corrosão preferencial da solda. Ressaltando que a perda de resistência a corrosão pode ocorrer em aplicações que utilizam aços inoxidáveis e algumas ligas não ferrosas, ou até em aços carbono. Além da avaliação a resistência a corrosão, não se pode deixar de incluir os cuidados com as propriedades mecânicas como: resistência a tração, limite de escoamento, ductilidade, dureza e resistência ao impacto.

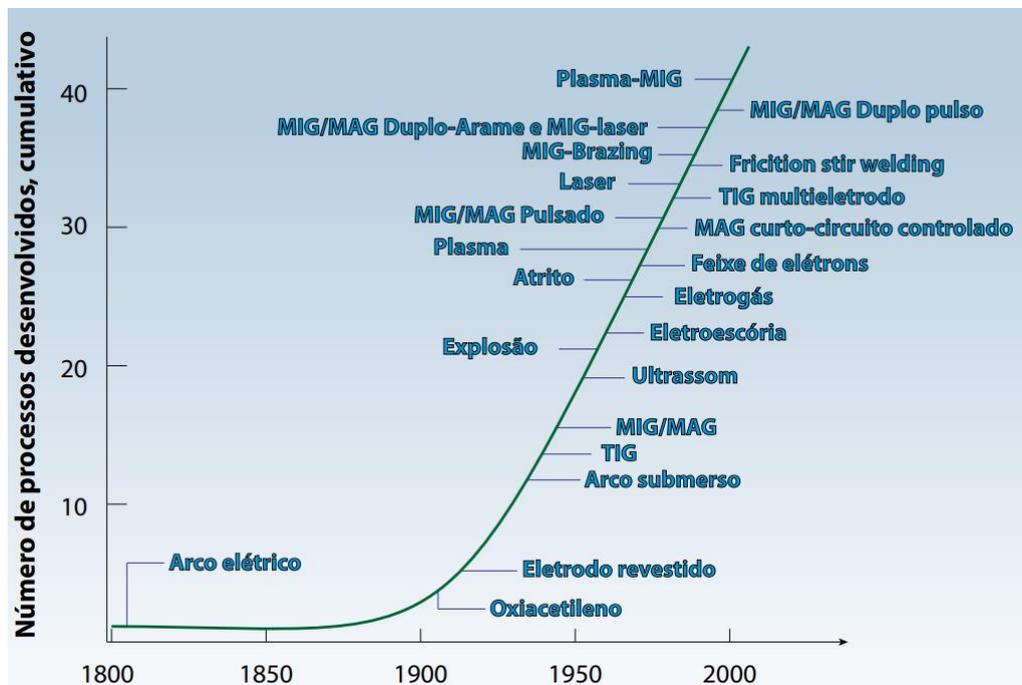
2.1.1 Soldagem

De acordo com Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 55), se for analisado na história dos processos de soldagem, descobrirá que o arco elétrico foi descoberto no começo do século XIX, sendo usado apenas no início do século XX, com o processo a arco com utilização de eletrodos revestidos. No decorrer das décadas, teve a criação de outros processos e melhorias contínuas inerente a necessidade de alavancar produtividade e efetividade industrial. A variável fundamental para que as juntas soldadas sejam de qualidade e atendam adequadamente os requisitos de projeto é escolher adequadamente o processo de soldagem a ser utilizado. Por isso é importante se conhecer bem o processo escolhido.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2004, p.01), a solda é o resultado do processo de união entre duas partes metálicas, com uso de fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. Afirma ainda que o processo de soldagem teve seu grande impulso durante a Segunda Guerra Mundial, onde foram fabricados navios e aviões soldados para as batalhas.

Na Figura 1, se tem o demonstrativo cronológico do surgimento e desenvolvimento dos diferentes tipos de soldagem na história.

Figura 1: Evolução histórica dos processos de soldagem



Fonte: Rodrigues e Cersosimo (2022, P.55)

Reforça Marques, Modenesi e Bracarense (2016, p.25-26), que o processo de união de metais mais importante e utilizado industrialmente é a soldagem. Juntamente com a brasagem, possuem grande importância em diversos ramos na indústria, desde fabricação de navios a indústria microeletrônica. Ainda define que a soldagem, une os metais por fusão, assegurando que nas juntas soldadas se tenha continuidade em suas propriedades químicas e físicas.

Ainda com Brandão (2019, p. 84), teve que a soldagem é uma união permanente, de modo que através de aquecimento localizado em determinada temperatura, não se tenha interface entre eles, tendo ou não adicionado metal de adição com ou sem aplicação de pressão, preservando-se as propriedades originais dos metais de base dessa soldagem.

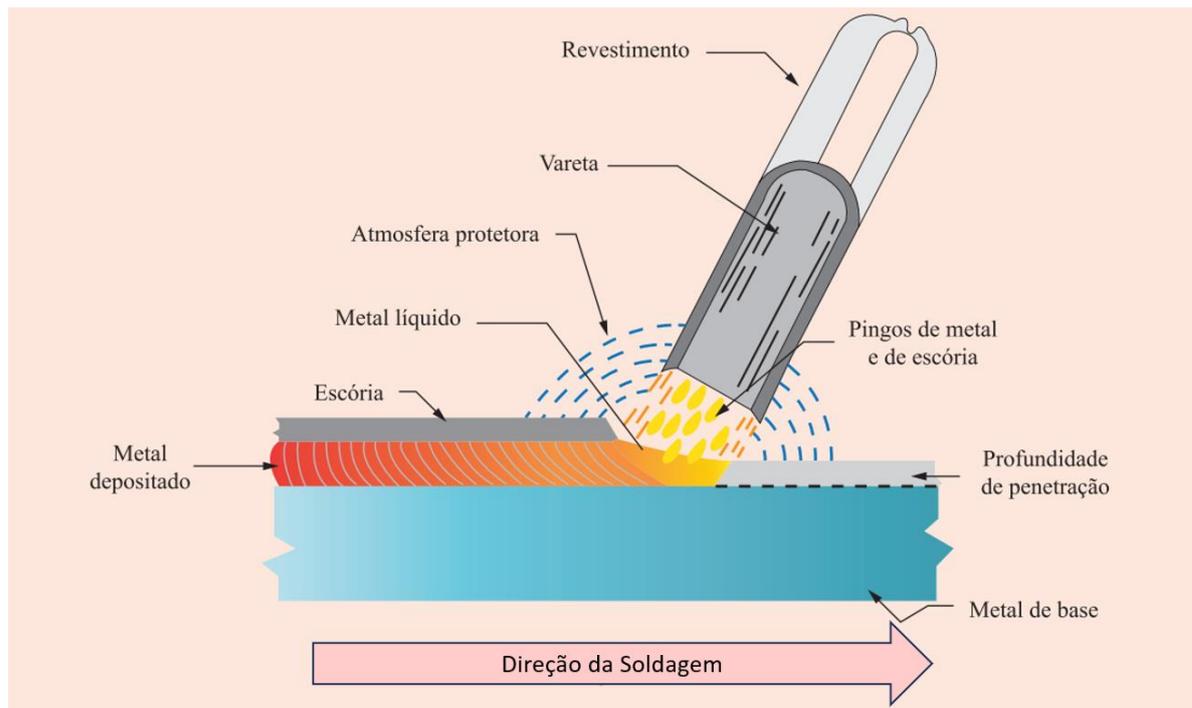
2.1.2 Soldagem SMAW

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2014, p.31); a soldagem por eletrodo revestido, ou seja, a soldagem com processo SMAW, surgiu no início do século, de forma simples, pobre e com arames nus para cercas, ligados a rede elétrica. Possuíam instabilidade no arco e depósitos de solda contaminados. E através de algumas experiências observaram que arames cobertos por ferrugem, cal ou ácido possuíam melhoras na estabilidade do arco, e com asbestos melhora em sua penetração de soldagem. Desde então, são feitas melhorias em diferentes décadas de seus revestimentos.

“A soldagem com eletrodos revestidos é definida como um processo de soldagem com arco, onde a união é produzida pelo calor do arco criando entre um eletrodo revestido e a peça a soldar” (WAINER, BRANDI E MELLO, 2014).

Na Figura 2, se tem a representação simples do esquema básico do funcionamento do processo de soldagem com eletrodo revestido.

Figura 2: Esquema representativo do processo de Soldagem SMAW.



Fonte: Adaptado de Silva (2014, p.54)

Reforça Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 57), que o processo SMAW é o processo mais importante e tradicional, além de mais antigo, é o processo que possui uma versatilidade significativa para aplicação industrial, sendo aplicado com maior segurança pelos soldadores e pela indústria em geral. Este processo é obtido através do arco elétrico na extremidade de um eletrodo metálico revestido e o metal de base. É um processo de fácil aprendizagem, de baixo custo e versátil. Porém, possui baixa produtividade pois existe a necessidade de troca constante de consumível e possui perdas devido o consumível não ser integralmente utilizado.

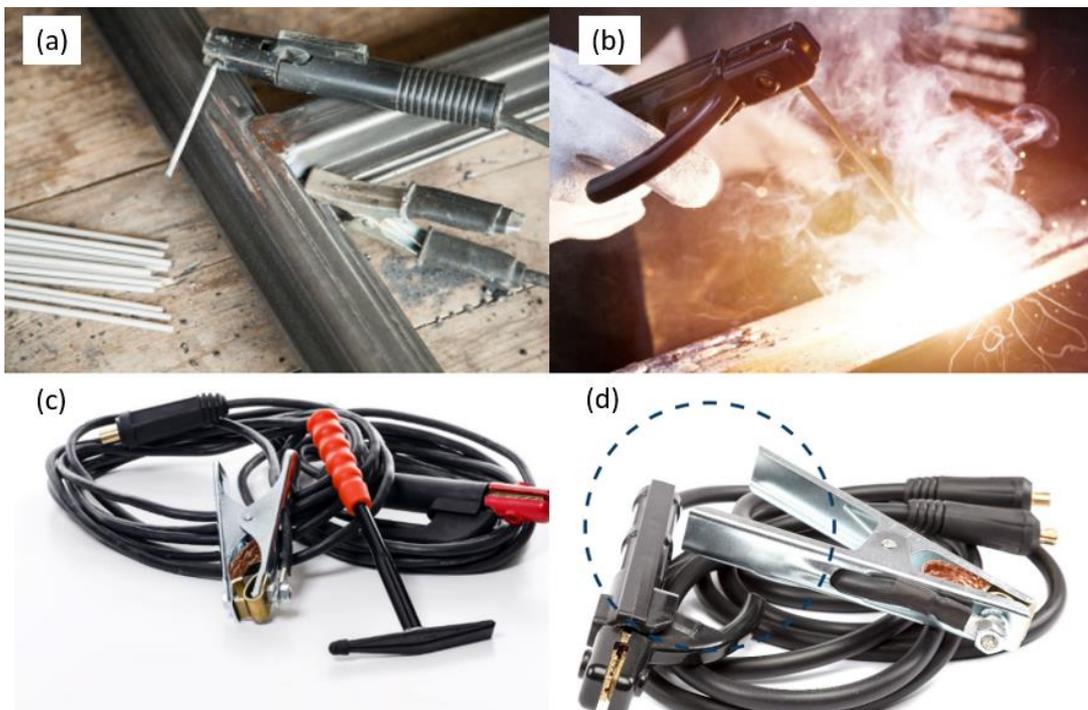
2.1.3 Equipamentos do Processo SMAW

De acordo com Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 57), que os equipamentos do processo SMAW são: uma fonte de energia; os cabos para a ligação elétrica; os porta-eletrodos, conhecidos como garra; as ferramentas utilizadas, tais como picadeira e escova de aço; e os Equipamentos de Proteção Individual – EPI, ou seja, os equipamentos que são utilizados para a proteção do soldador, tais como máscaras, óculos, avental, luvas, em atendimento a segunda norma da Petrobrás N-2349.

Ainda com Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 63), os porta eletrodos, ou garras, devem atender a faixa de especificação em função da faixa de corrente elétrica a ser conduzida pela variação do diâmetro da alma do eletrodo que for ser utilizado. Para ser evitado problemas de má fixação, superaquecimento ou problemas ergonômicos é importante que ele esteja sempre em bom estado.

Na figura 4 se tem exemplos de porta eletrodos representados pela letra (a) e (b). Reforça Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 63), que os cabos de interligação e garras devem ser flexíveis e de fácil manipulação pois são utilizados para conectar e transportar a corrente elétrica da fonte de energia ao grampo e ao porta-eletrodo. São feitos de vários fios de cobre ou de alumínio e enrolados e revestidos por material dielétrico, borracha, ou seja, um revestimento isolante e flexível. É importante que os cabos estejam desenrolados durante o processo de soldagem para não se ter queda de tensão e nem o aumento de resistência pelo efeito Joule. Já as garras ou grampos conectam os cabos à peça que está sendo trabalhada. Deve ainda lembrar que o diâmetro dos cabos deve ser dimensionado de acordo com a corrente de soldagem, ciclo de trabalho do equipamento, comprimento total dos cabos do circuito e da fadiga do operador. São representados pela letra (c) e (d), ainda na Figura 3.

Figura 3: (a)(b) Porta eletrodos; (c)(d) cabos usados no sistema SMAW.



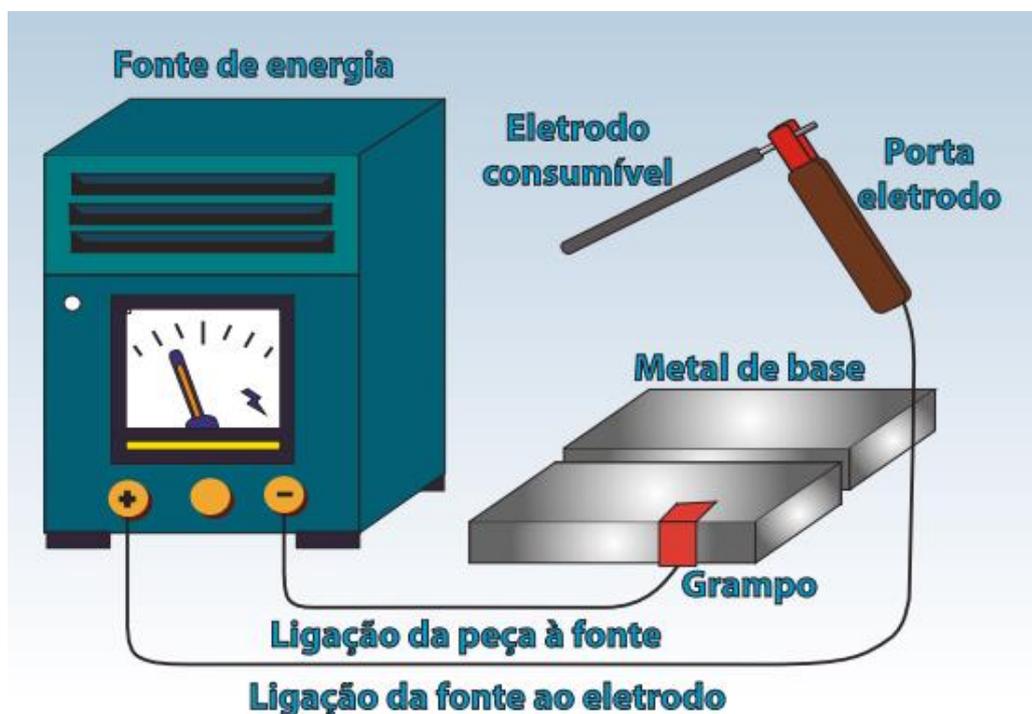
Fonte: Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 63)

Wainer, Brandi e Mello (2014, p.31); informam que dependendo do tipo de revestimento do eletrodo pode-se operar com corrente contínua ou alternada. Sendo que na corrente contínua possuímos melhor estabilidade no arco e qualidade de depósitos, porém se tem suscetibilidade ao sopro magnético. Já com uso de corrente alternada, resolve-se o problema de suscetibilidade ao sopro magnético, e se tem como resultados menor estabilidade de arco. Tem também menor ignição e queda de tensão ao longo do cabo, o que auxilia a soldagem quando precisa ser realizada a distância.

Wainer, Brandi e Mello (2014, p.31); reforçam que mesmo com esse recurso, devem avaliar o dimensionamento do equipamento para obter melhor rendimento durante a soldagem, sem ter problemas com queda de produtividade. Soldadores experientes conseguem fazer esse dimensionamento com destreza. Da mesma forma que não executam sua soldagem com material inadequado para uso, pois priorizam a qualidade de suas soldas.

Na Figura 4, se tem a representação básica de alimentação do equipamento de Soldagem do Processo SMAW. Feito de forma didática para estudo acadêmico.

Figura 4: Esquema de alimentação do equipamento do Processo SMAW.



Fonte: Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 59)

2.1.4 Tipos de Eletrodos Revestidos

Afirmam Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 68), que o único material consumível do processo de soldagem SMAW é o eletrodo revestido. Ele é constituído de vareta metálica, alma, com diâmetro entre 1,5 e 8 (mm) e comprimento entre 23 e 45 (cm), recoberta por uma camada de fluxo que chamamos de revestimento.

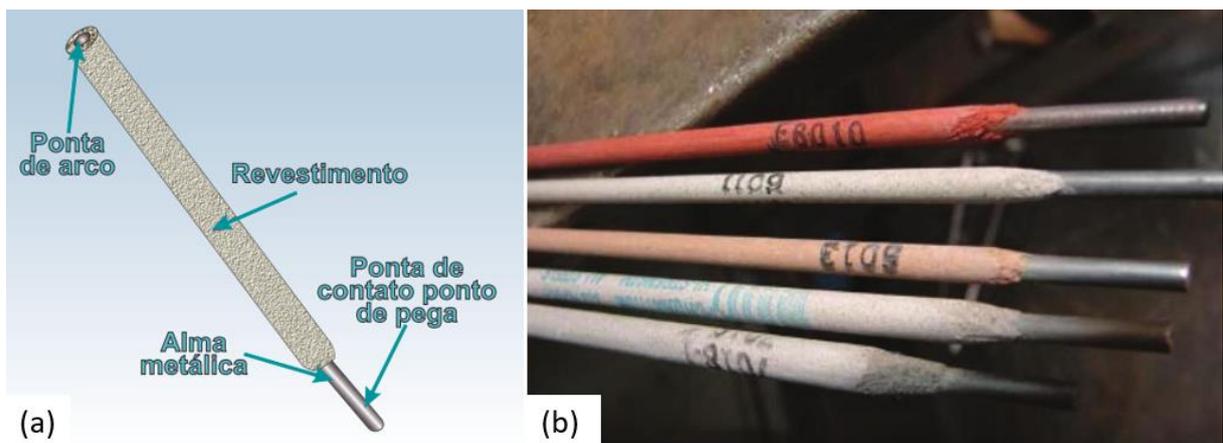
Segundo Wainer, Brandi e Mello (2014, p.40); os eletrodos são obtidos através de extrusão, sob pressão de um revestimento sobre a alma, formando uma vareta com dimensão definida. Podem ser revestidos e secos de diferentes formas e feitos sob escala, um a um.

Possuem depósitos de acordo com seu tipo. Para aços de baixo carbono, de pequena responsabilidade, a alma pode ser obtida de aço semi ou não-acalmado, podem ter quantidade reduzida de desoxidante na alma, sílico e alumínio. Para depósitos de alta responsabilidade, a alma deve possuir melhor qualidade, como teores de enxofre e fósforo abaixo de 0,04%.

Reforçam com Wainer, Brandi e Mello (2014, p.40); que podem ter incorporados elementos de liga através de sua alma, por revestimento neutro, ou diretamente pelo revestimento, geralmente em eletrodos sintéticos que são usados para depósitos de alta dureza.

A Figura 5 demonstra o eletrodo com suas partes especificadas, representada pela letra (a), e alguns tipos diferentes de eletrodos, representados pela letra (b).

Figura 5: Representação esquemática do eletrodo revestido: (a) partes especificadas; (b) tipos diferentes de eletrodos.



Fonte: (a) Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 68); (b) Silva (2014, p.62)

De acordo com a Norma N-133, no item 5.7.4.1 (PETROBRÁS, 2017, p.73), o processo SMAW não permite o uso de eletrodos do tipo sintético; nem o manuseio de consumíveis para SMAW como eletrodos que possuam baixo hidrogênio, para que não se tenham problemas com trincas por hidrogênio na fase ferrítica.

“Existem diferentes tipos de eletrodos com diferentes características operacionais, aplicáveis a diferentes materiais e que produzem soldas com diferentes características.” (RODRIGUES e CERSOSIMO, 2022, p. 69)

Ainda com Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 69), deve atentar-se as especificações dos códigos de projeto para que não utilize consumíveis com propriedades diferentes do que necessita, para isso, utiliza-se no Brasil consumíveis certificados pelo Organismo Certificador de Produtos – OCP conforme a N-1859 e quando aplicados no exterior, além da certificação do OCP, deve ser acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO ou por algum OCP estrangeiro.

No Brasil, se tem a Fundação Brasileira de Soldagem – FBTS, que atendem as normas internacionais como a norma AWS que devido a sua simplicidade, é a especificação mais aceita em quase todo mundo.

2.1.5 Tipos de Revestimentos

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2014, p.39); os revestimentos são misturas de minerais ou orgânicos com propriedades específicas. Podendo ou não ter outros compostos adicionados a si.

Sobre os estudos de Wainer, Brandi e Mello (2014, p.39), nota-se que os revestimentos são separados em grupos de acordo com a estabilização do arco; formação de gases protetores da poça de fusão; formação de escoria e atuação como agentes fluxantes; adição de componentes e ligas metálicas do depósito; como também em grupos que possam melhorar o processamento na fabricação, melhorando constituintes ou extrudabilidade por exemplo, ou as propriedades do próprio revestimento, como aderência, ductilidade etc.

Para aços baixa e média liga, são divididos em celulósico, rutilico, ácido e básico.

Na Tabela 1 encontra-se um resumo dos tipos e funções dos revestimentos.

Tabela 1: Funções do revestimento do eletrodo na Soldagem

FUNÇÃO	TIPO DE AÇÃO	COMO OCORRE A AÇÃO
Proteção	Criar atmosfera gasosa	O gás que resulta da queima do revestimento, forma uma atmosfera protetora sobre a poça de fusão.
	Criar barreira física	O revestimento forma uma escória protetora que flutua sobre a poça de fusão, protegendo-a de oxidação pelo ar atmosférico.
	Sustentar o metal fundido	A escória auxilia a sustentação do metal fundido na poça de fusão (sem escorrer) durante a soldagem em posições diferentes da plana.
Elétrica	Isolamento	O revestimento não é condutor, evitando aberturas do arco elétrico em seu manuseio. A abertura do arco ocorre somente na ponta descoberta.
	Ionização	Elementos contidos no revestimento (silicatos de sódio e potássio) durante a queima auxiliam na ionização da atmosfera do arco elétrico, facilitando a condução da corrente através do arco, contribuindo para a sua estabilização.
Física	Controle do resfriamento	A escória formada sobre a poça de fusão age como uma barreira física, fazendo que a velocidade do resfriamento seja reduzida, o que beneficia a junta soldada.
Química	Adição de elementos	O revestimento contém elementos que podem alterar as propriedades da solda ou o rendimento do eletrodo.
	Limpeza da poça de fusão	O revestimento possui elementos que se unem as impurezas dentro da poça de fusão promovendo sua limpeza.

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2012, p.158)

2.2 Equipamentos Agrícolas

De acordo com o site Colheitadeira (2023), a patente da colheitadeira aconteceu em 1894, por Hiram Moore. Elas eram grandes e puxadas por tração animal. Com o avanço da tecnologia começaram a ser puxadas por tratores. Evoluíram de motores a gás, para motores a diesel e atualmente são autopropelidas e usam motores a diesel como fonte de energia. A empresa americana *International Harvester* foi revolucionária ao desenvolver o sistema de ventiladores para separação dos grãos e palhas removidos do solo.

Informa ainda Colheitadeira (2023), que com o passar dos anos, a evolução eletrônica foi responsável por melhores rendimentos de grãos e otimização de velocidade de colheita entre outros parâmetros significantes para o agronegócio. Na Figura 6, se tem um exemplo de máquina colheitadeira utilizada no agronegócio.

Figura 6: Máquina colheitadeira trabalhando durante safra



Fonte: COLHEITADEIRA (2023). Acesso em 13 nov. 2023.

Disponível em: <https://www.slcmaquinas.com.br/page/pt/colheitadeiras/s%C3%A9rie-s>

Segundo Stachowiak G. B. e Stachowiak G. W. (2001) apud Luz (2019) é importante que ao projetar uma máquina agrícola sejam estudadas todas as variáveis operacionais do equipamento, para que o desgaste causado por partículas abrasivas não acarrete grandes problemas. O estudo de desgaste com enfoque em máquinas agrícolas, influencia nos custos e na produtividade dos alimentos do agronegócio.

“O ramo do agronegócio tem uma expressiva participação na economia do país, com aproximadamente 50% das exportações e 23% do Produto Interno Bruto brasileiro – PIB” (LUZ, 2019)

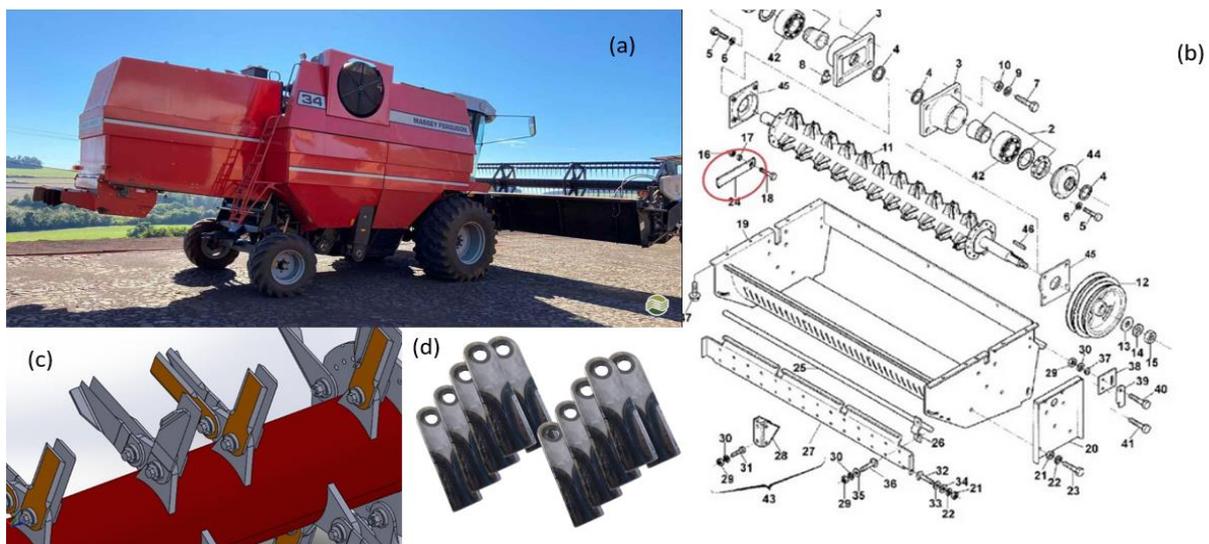
Reforça Luz (2019) que existem grandes prejuízos no setor do agronegócio decorrente de quebra precoce de equipamentos agrícolas devido à grande atrito sofrido durante seu uso. E que essas ocorrências dentro do período de safra podem acarretar grandes prejuízos por perda de produtividade e necessidade de troca ou substituição imediata gerando altos custos ao agricultor que acaba desembolsando altos valores com a finalidade de não se perder a colheita. Os estudos englobando a engenharia mecânica do equipamento auxiliam na economia local, prevendo ou até evitando essas ocorrências.

2.2.1 Ramo de Atuação

De acordo com LIMA (2008, p.03), o setor sucroalcooleiro, utiliza aço carbono 1020 em suas facas e martelos desfibradores com revestimento duro, pois estas peças são expostas a diversos elementos tais como diversidade do tipo de cana a ser colhida; abrasividade do solo, umidade, formas não uniformes de colheita entre outros. Se não fossem revestidas não suportariam o período da colheita, e mesmo reforçadas ainda exigem periodicidade maior de manutenção antes da entressafra.

Na Figura 7 apresenta-se a aplicação do produto fornecido ao agronegócio, com um exemplo de colheitadeira que utiliza as facas em seus molinetes. A colheitadeira Massey Ferguson Modelo F34.

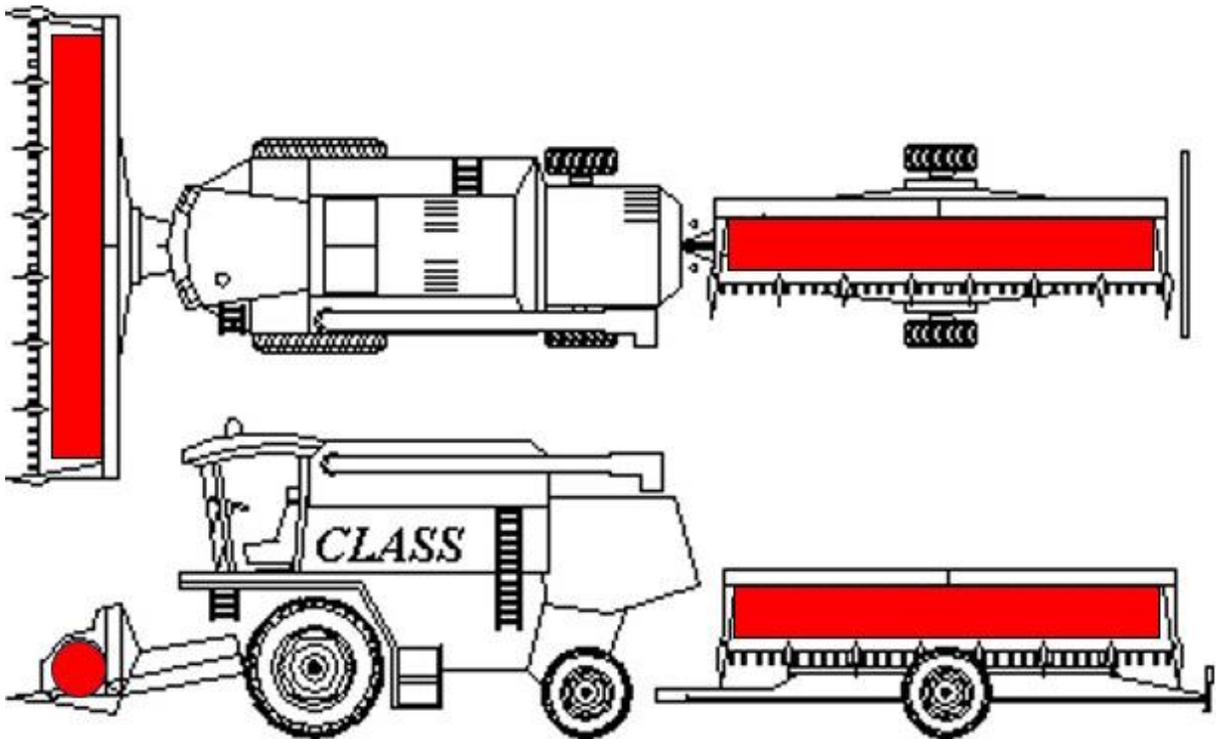
Figura 7: A colheitadeira Massey Ferguson Modelo F34, sendo: (a) desenho esquemático do equipamento; (b) corte do molinete destacando a instalação da faca; (c)(d) as demonstrações de facas da colheitadeira com revestimento duro compatível com Modelos Massey Ferguson MF34, MF38, MF9895.



Fonte: Autora (2024) (a) adaptação da figura disponível em: <<https://www.tratoresecolheitadeiras.com.br/veiculo/ijui/rs/colheitadeira/massey-ferguson/mf-34/2004/saca-palha/hydro/cabine-cabinado/paulo-mokan-compra-e-venda-de-maquinas-usadas/957933>>; (b)(c)(d) adaptações das figuras disponíveis em: <<https://www.agrorurale.com.br/faca-do-picador-c-fio-dos-2-lados-053033t1->>. Acesso em 09 nov. 2023.

Na Figura 8, se tem modelo simplificado de colheitadeira, adaptado de um projeto pronto encontrado comumente no agronegócio.

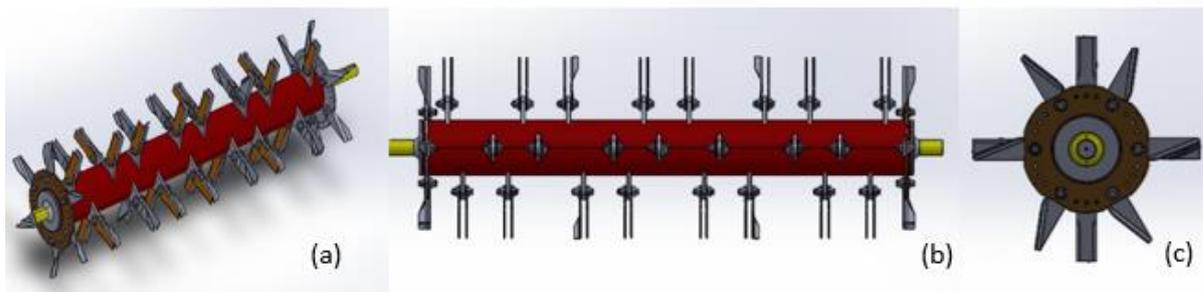
Figura 8: Modelo simples de Colheitadeira



Fonte: Adaptado de CROPPER (2023). Disponível em: <https://designscad.com/downloads/cropper-dwg-elevation-for-autocad/>. Acesso em: 02 out. 2023.

Na Figura 9, observa-se as diferentes vistas do molinete.

Figura 9: Diferentes Vistas do Molinete (a) vista isométrica; (b) a vista frontal; (c) a vista da lateral esquerda.



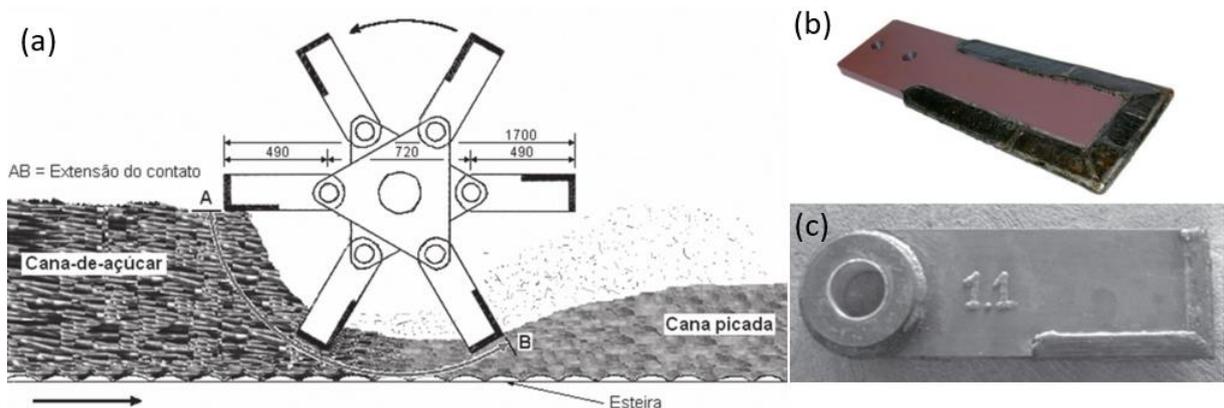
Fonte: Autora (2024).

2.2.2 Implementos Cortantes (Facas)

Segundo Tecnologia & Benefícios (2023), o funcionamento das colheitadeiras varia de design e funcionalidades pois são de acordo com a cultura a ser utilizada. Geralmente possuem cabeçotes removíveis, que possuem uma barra de corte e um rolo giratório com dentes ou facas metálicas (ou de outro material), com o objetivo de que a cultura cortada caia dentro da colheitadeira.

Reforça Tecnologia & Benefícios (2023), que esses dentes ou facas que são os implementos cortantes do equipamento; enquanto a cultura, pode ser de cana-de-açúcar, de soja, ou quaisquer tipos adaptáveis ao maquinário, onde são cortadas e transportadas para a garganta do alimentador. Dentro da colheitadeira que ocorre a separação dos grãos e palhas para continuidade do processo de comercialização. Na Figura 10, se tem a apresentação do detalhe do picador.

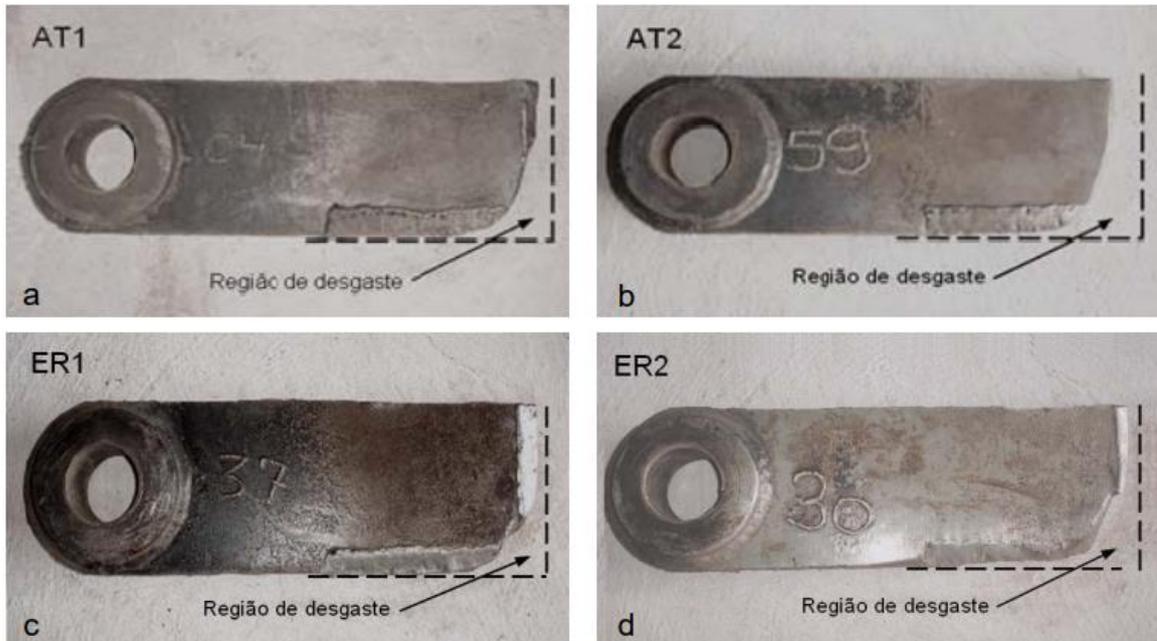
Figura 10: Exemplos de facas com revestimento: (a) corte longitudinal, onde o arco AB representa a extensão do contato das facas com a cana em cada giro do picador; (b) um exemplo de faca picadora com revestimento duro utilizada no agronegócio; (c) detalhe de uma faca após aplicação do revestimento de dimensões de 24 x 180 x 580 mm.



Fonte: (a) (c) LIMA e FERRARESI (2010); (b) ANDRADE, MENDES, VENTURA (2021) apud FABRICAÇÃO (2023)

De acordo com Lima (2008, p.100), a Figura 11 possui um comparativo entre quatro facas desgastadas pelo ciclo de trabalho.

Figura 11: Detalhe de desgaste em facas: (a) Arame Tubular 1 - AT1; (b) Arame Tubular 2 - AT2; (c) Eletrodo Revestido 1 – ER1; e (d) Arame Revestido 2 - ER2.



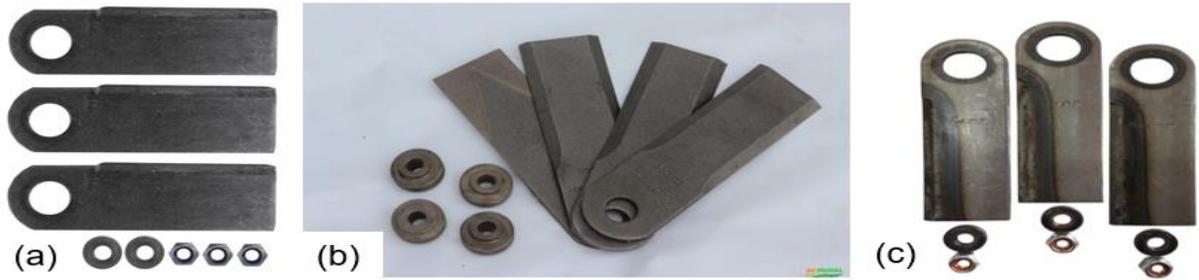
Fonte: Lima (2008, p.100)

Com uma linha tracejada em cada uma das facas pertencentes à Figura 11, destaca-se a região crítica de desgaste e o perfil original. Observa-se que a faca que possui menor desgaste é onde foi revestido por eletrodo revestido, sendo representado pela letra (c). E a maior perda onde foi revestido por arame tubular, representado pela letra (b). Sendo que neste caso, a perda foi total, expondo totalmente o metal de base.

2.2.3 Comércio dos Implementos Cortantes (Facas)

Atualmente existem duas variedades de comércio dessas facas. O primeiro exemplo, é o mais comum, de material mais simples focando no baixo custo. Nota-se que essas ofertas estão presentes em sites de vendas, ou empresas menores nos sites encontrados em sites de pesquisa. Em sites como MERCADO Livre (2024) temos apenas a oferta da faca, dizendo tamanho e preço, sem especificação técnica do material. Em melhores opções tem-se a garantia do produto e para maiores especificações devem-se entrar em contato com o vendedor e aguardar pelo retorno posterior de suas especificações técnicas. Na Figura 12 temos alguns exemplos de facas que são comercializadas.

Figura 12: (a) (b) (c) Alguns exemplos de facas colheitadeiras vendidas em 2024.



Fonte: Imagens da Internet (a) https://http2.mlstatic.com/d_nq_np_2x_994567-mlb54291132891_032023-f.webp; (b) <https://imagens.mfrural.com.br/mfrural-produtos-us/288634-341822-1867626-kit-faca-p-picador-de-palha-colheitadeira-mf-9790.jpg> (c) <https://img.lojadomecanico.com.br/imagens/72/893/266647724/kitfacadop-idany-6395013985.jpg> Acesso em 22 nov. 24

Na segunda variedade de comércio, existem empresas que focam em qualidade técnica e para venderem suas facas para colheitadeiras reforçam seu foco na tecnologia anti-desgaste ou anti-desplacamentos para ofertarem seus produtos. Um, dos exemplos temos a Agricorte (2024), que afirma que suas facas são a melhor opção de investimentos, tendo ótima qualidade e para reforçarem isso oferecem em seu site um simulador de benefícios para optarem pelas suas facas, que são revestidas de Carboneto de Tungstênio. Possuem valores elevados e a sua justificativa é a menor periodicidade em substituições dentro das safras, diminuindo assim, o gargalo produtivo. Na Figura 13 notam-se modelos de facas que ela comercializa.

Figura 13: (a)(b)(c)(d)(e)(f)(g)(h)(i)(j)(k)(l) Modelos de facas revestidas de Carboneto de Tungstênio para diferentes aplicações

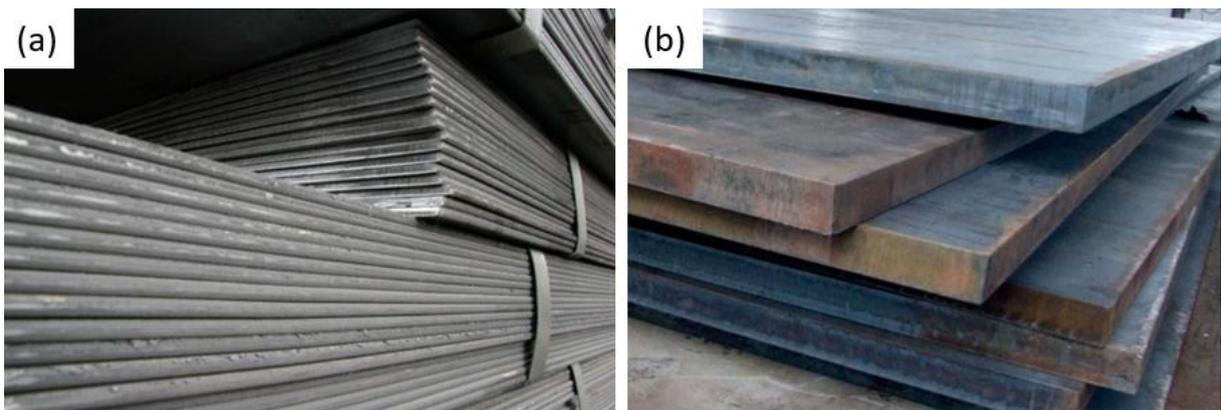


Fonte: AGRICORTE (2024) <https://www.agricorte.com.br/wp-content/uploads/2021/03/05.jpg>; Acesso em 22 nov. 24

2.3 Aço Carbono

De acordo com o site O USO (2023), o ferro e o aço são os materiais mais usados pelas empresas devido às suas propriedades de alta durabilidade e resistência. Muito comum nos setores de construção civil e no setor industrial. Na Figura 14, se tem imagens de chapas de Aço 1020, conforme é apresentada para venda ao consumidor.

Figura 14: (a) (b) Chapas de aço carbono



Fonte: Imagens da Internet. Disponíveis em:
<https://www.pkmacos.com.br/imagens/produtos/chapas.webp>; Acesso em 23 out. 24

De acordo com a Norma N-133, (PETROBRÁS, 2017, p.34), os aços carbonos possuem boa soldabilidade quando o teor de carbono é menor que 0,20 % e carbono equivalente (CEIIW) inferior a 0,44 %, porém quando a composição química é enriquecida em elementos de liga e/ou na soldagem de chapas grossas, podem ser suscetíveis à trinca induzida pelo hidrogênio (trinca a frio).

Reforça Norma N-133, (PETROBRÁS, 2017, p.34), que uma forma de resolver o problema é favorecer a liberação do hidrogênio com o pré-aquecimento, vendo que em alguns casos não se consegue evitar a formação de microestruturas suscetíveis à trinca a frio. Quando envolver a soldagem de juntas de grande espessura e restrição deve-se avaliar a necessidade do pós-aquecimento como medida de controle.

Ainda com a Norma N-133, (PETROBRÁS, 2017, p.56), o aço carbono necessita de uma abertura de raiz maior, para evitar a falta de fusão proveniente do fechamento de raiz que este material tende a ter. Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam coeficiente de expansão térmica aproximadamente 50 % superior ao aço carbono e

menor condutividade térmica. Esses fatores geram altas tensões residuais e maior tendência à distorção (empenamento) na junta soldada.

2.4 Usinagem de Materiais

De acordo com Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 8), a usinagem convencional possui três conceitos importantes sobre usinagem, cavaco e aresta de corte. Usinagem é o processo de fabricação onde se confere à peça forma, dimensão e acabamento através de remoção de material, sendo que cavacos são as porções dos materiais removidos da peça pela ferramenta do processo de usinagem, com características de forma geométrica irregular e aresta de corte é a superfície por onde desliza o cavaco, sendo a superfície de saída que se destina a realizar o corte da peça em processo de usinagem. O corte é realizado principalmente pela combinação entre a geometria e material da ferramenta, assim como os parâmetros de usinagem.

2.4.1 Máquina Fresadora

Segundo Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 79), a fresadora define-se como máquina-ferramenta responsável para executar a operação de fresamento, que consiste em ter a ferramenta girando e a peça em movimento de translação em relação a ferramenta. Cada fresadora realiza sua operação de acordo com sua configuração; podendo ser com movimentos de avanço movimentando a peça, a ferramenta ou ambas as possibilidades. Sua classificação diz respeito à posição do eixo de rotação da ferramenta em relação ao chão de fábrica, podendo ser nomeadas de fresadoras horizontais ou fresadoras Universais: que possuem os dois cabeçotes (vertical e horizontal).

De acordo com Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 35), as máquinas fresadoras podem se classificar de acordo com a configuração das máquinas-ferramentas, sendo nomeadas como fresadora vertical, quando o mecanismo do eixo de rotação se localiza na posição vertical, perpendicular ao chão da fábrica; ou ainda como fresadora horizontal, quando o mecanismo do eixo de rotação se localiza paralelo a máquina. Atualmente é mais comum encontrarmos máquinas de comando numérico com possibilidade de posicionamento diverso, tendo-se mais flexibilidade.

Ainda com Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 79), as fresadoras podem realizar operações além do fresamento. Sendo que as fresadoras verticais, podem realizar operações de usinagem com ferramenta de revolução de avanço na direção vertical, como furação, alargamentos, escariamentos. E na fresadora horizontal, se tem como exemplo a usinagem realizadas com auxílio de um aparelho divisor, que é um acessório de fixação, usado para usinar perfis de engrenagens de dentes retos, girando a peça de um passo angular fixo. Sendo também possível a realização de faceamento com fresa tangencial, canais com fresa de disco e perfilamento com fresa de perfil.

Reforçam Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 79), que a peça bruta é um disco cilíndrico que obtém cada dente da engrenagem usinado de uma posição angular do cabeçote divisor. Nomeiam-se fresadoras universais a fresadora que possui flexibilidade de posicionamento do eixo de rotação tanto na vertical quanto na horizontal, variando apenas de acordo com a montagem dos elementos de máquinas. E ainda se tem como um dos tipos existentes, a geradora de engrenagens que possuem cinemática específica para a operação de fresamento de engrenagens helicoidais que fornece os movimentos necessários para este tipo de fresamento.

Na Figura 15, se tem a comparação entre fresadoras convencionais que utilizam usinagem realizada por operador.

Figura 15: Comparativo entre tipos de fresadoras convencionais: (a) a fresadora vertical; (b) fresadora horizontal.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO, MOUGO e CAMPOS (2020, p. 81)

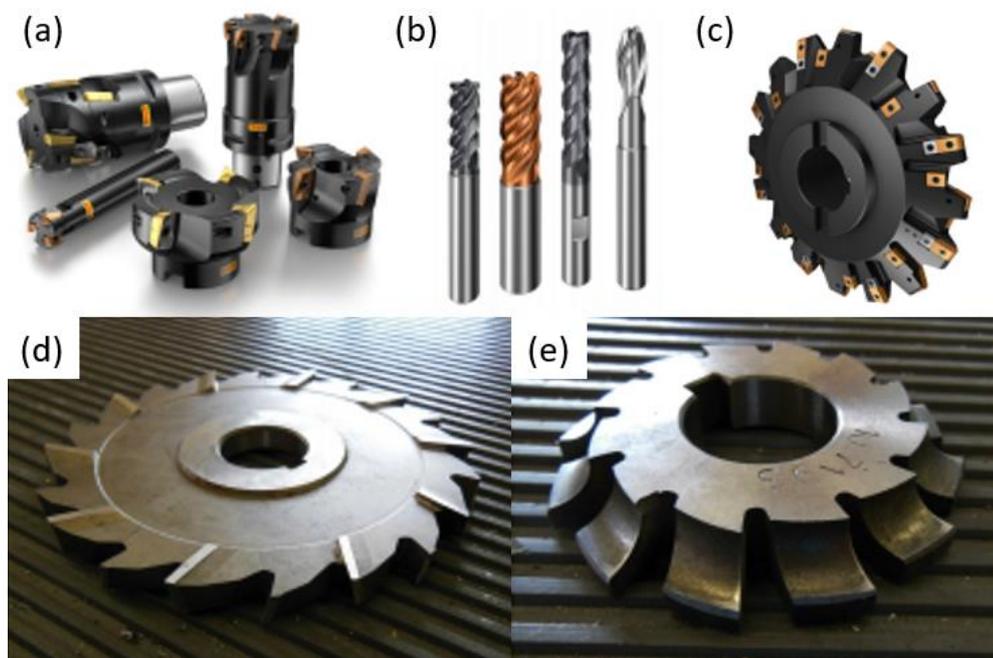
2.4.2 Ferramenta Fresa

De acordo com Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 37), existem uma variedade de geometrias de fresas, cada qual com sua nomenclatura específica. Variam de formas geométricas e perfis, tendo diferentes relações entre comprimento e diâmetro.

Continuando com a abordagem Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 37), como exemplos se têm as fresas cilíndricas, cônicas, esféricas, fresas de discos, sendo cada uma com uma geometria diferente.

Na Figura 16, se têm exemplos de diferentes geometrias de fresas utilizadas na usinagem convencional.

Figura 16: Diferentes geometrias de fresas: (a) fresas cilíndricas; (b) fresas de topo; (c) fresas cônicas; (d) fresas de disco com três cortes; (e) a fresa de perfil.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO, MOUGO e CAMPOS (2020, p. 38)

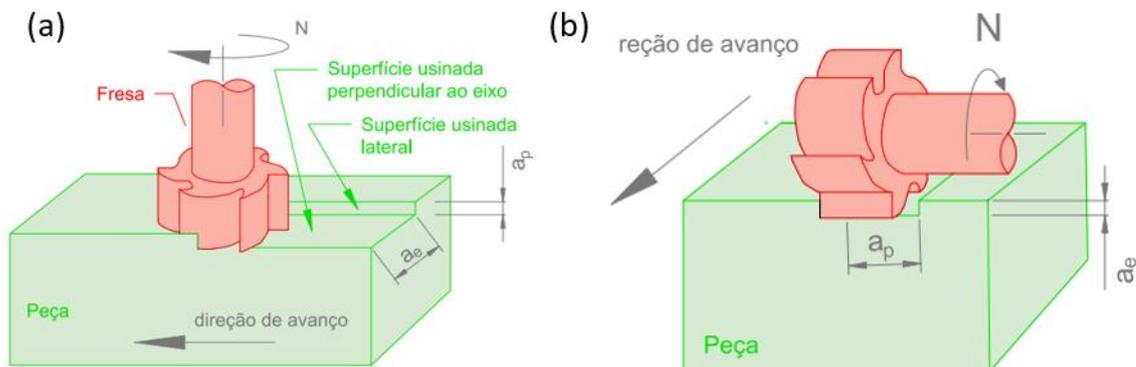
2.4.3 Operação de Fresamento

Segundo Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 34), as operações de fresamento ocorrem com ferramentas rotativas e multicortante, tendo suas principais arestas de corte distribuídas na superfície cilíndrica do eixo de rotação da ferramenta. Sua componente de velocidade de avanço na direção axial é nula ou muito menor que nas outras componentes.

Ainda com Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 34), a fresa produz duas superfícies usinadas, sendo a superfície perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta e as superfícies laterais paralelas ao eixo. As máquinas fresadoras podem realizar fresamento frontal ou vertical, onde o eixo de rotação é perpendicular à mesa da máquina-ferramenta; ou ainda podem realizar fresamento tangencial, periférico ou paralelo, onde o eixo de rotação da fresa é paralelo à mesa da máquina ferramenta.

Na Figura 17, se tem a representação das duas classificações principais desse processo.

Figura 17: Processos de fresamento: (a) o fresamento frontal; (b) fresamento tangencial.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO, MOUGO e CAMPOS (2020, p. 36)

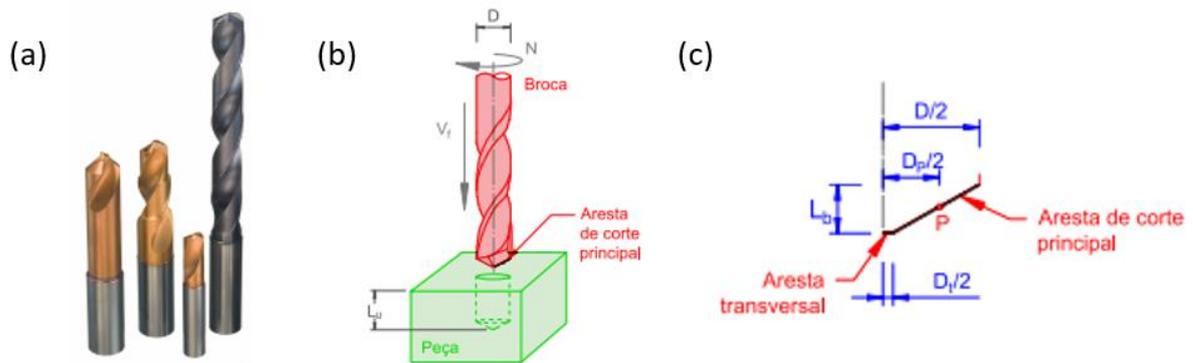
2.4.4 Furação

De acordo com Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 41), o processo de furação utiliza uma ferramenta multicortante rotativa denominada broca. Existe ainda uma diferenciação dos tipos de furos em uma furação. Sendo que quando não se utiliza anteriormente com uma broca de menor furo, denomina-se furação em cheio, e quando a broca utiliza a peça com seu diâmetro atravessando a peça à outra superfície, denomina-se furo passante e furo cego quando a situação é inversa.

Ainda com Araújo, Mougo e Campos (2020, p. 43), existem outros conceitos definidos no procedimento de furação, sendo eles a pré-furação que é realizada com o objetivo de uso de menos forças com remoção lenta de cavacos, sendo realizada com frequência de furações com aumento progressivo do diâmetro das brocas. Se têm ainda nomeações para diferentes tipos de brocas, sendo elas a broca de centro, que

é a broca utilizada para se fazer um pequeno furo para preparação de entrada de uma broca; a broca canhão para furação profunda. Na Figura 18, se têm brocas helicoidais.

Figura 18: Processo de Furação: (a) (b) geometria da furação; (c) representação das arestas de corte.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO, MOUGO e CAMPOS (2020, p. 42)

2.5 Metalurgia da Soldagem

Segundo Brandão (2019, p. 351), durante a soldagem os materiais metálicos são submetidos a alguma forma de energia, podendo ela estar na forma térmica, por fusão, ou na forma mecânica, no estado sólido. Então, por ação e reação, esses materiais respondem fisicamente, mecanicamente ou metalurgicamente podendo induzir variações nas propriedades originais dos materiais.

Reforça Brandão (2019, p. 351), que essas alterações são decorrentes de alterações na microestrutura do metal-base adjacentes à solda; ou ainda a instabilidade dimensional por distorção, fragilização, empenamento, trincamento ou colapso da junta em função das tensões térmicas, contrações e/ou deformações mecânicas presentes na junta soldada. Conclui-se que as características e propriedades de uma junta soldada, é o somatório da microestrutura e estado de tensões que se resultam das ações impostas durante a soldagem do material.

2.5.1 Transformações na Junta Soldada

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2014, p.359); o calor apesar de essencial para execução de uniões soldadas podem ser grande fonte de problemas devido sua

influência direta nos fenômenos mecânicos e transformações metalúrgicas que ocorrem na zona da solda. Esses efeitos resultam dos ciclos térmicos e temperaturas que submetem a zona de solda, o que exigem estudos e controle das variáveis que afetam o processo de soldagem.

Os fatores mais relevantes que devem ser considerados durante a transferência de calor das juntas soldadas são o aporte de energia à junta soldada; o rendimento térmico do arco elétrico; o ciclo térmico e o tempo de permanência durante a soldagem; e a velocidade de resfriamento da zona de solda (WAINER, BRANDI e MELLO (2014, p.359).

Alegam Rodrigues e Cersosimo (p. 201, 2022), que a região de Zona Fundida – ZF, é a região que possui propriedades mecânicas, como resistência mecânica e tenacidade, superiores ao metal de base como requisito das principais normas de qualificação de procedimento, afirmando que podem ser compostas pelo material depositado ou apenas pelo material de base fundido, sendo efetivamente a região fundida na junta soldada.

Afirmam Rodrigues e Cersosimo (p. 201, 2022), que a Zona Afetada pelo Calor – ZAC é a região que se encontra entre a zona de ligação e o metal de base que não sofreram modificações significativas na microestrutura que possa trazer alguma mudança significativa nas propriedades mecânicas e/ou a resistência a corrosão.

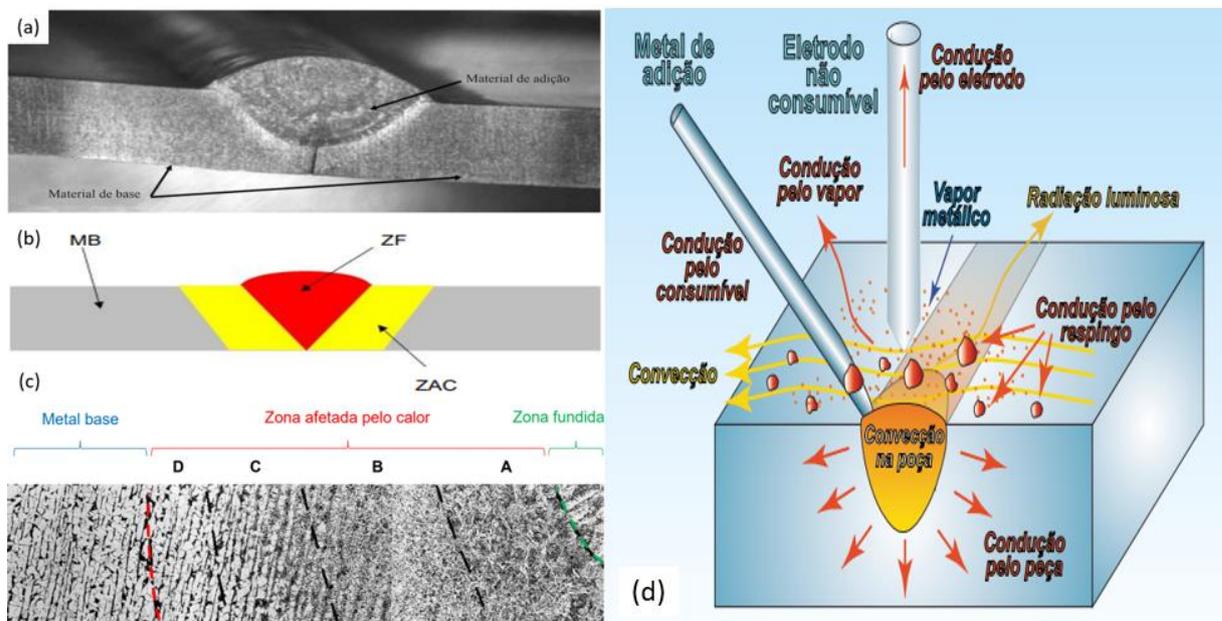
Ainda com Rodrigues e Cersosimo (p. 201, 2022), dizem que devido ao ciclo térmico, a microestrutura sofre modificações em relação ao material de base não afetado, que podem alterar suas propriedades mecânicas, mas ao controlar os parâmetros de soldagem conseguimos evitar mudanças significativas neste processo, evitando influências que possam comprometer o desempenho dessas juntas soldadas. O Aspecto térmico de soldagem traz como fundamento a união por soldagem a arco elétrico que se baseia na fusão do metal de adição, formando-se uma poça de fusão muito localizada.

Em consenso Rodrigues e Cersosimo (p. 201, 2022), dizem que se pode controlar o aporte de calor, também conhecido como energia de soldagem, que se resume na quantidade de energia transferida à junta por unidade de comprimento. Em contrapartida, a unidade de soldagem pode ser alterada se depositarmos o cordão de forma retilínea ou trançado, com tecimento. Estes valores devem ser considerados ao controlar-se os parâmetros de soldagem, para não burlar a norma que for adotada.

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (2014, p.369), a velocidade de resfriamento é um fator que depende do aporte de energia e, portanto, indiretamente, da velocidade do eletrodo e da temperatura inicial (pré-aquecimento da junta).

Nota-se na Figura 19, se tem exemplos de metal de base e de poça que podem levar a perda de energia durante a soldagem.

Figura 19: Exemplo de metal de base, da representação da ZAC e de perda de energia térmica: (a) uma ampliação demonstrando o metal de adição e metal de base; (b) (c) dois exemplos com demonstração do metal de base, zona fundida e da zona afetada pelo calor; (d) exemplo de poça e de vários fatores que podem levar a perda de energia durante a operação de soldagem com eletrodo não consumível.



Fonte: Adaptado de (a) Silva (2014, p.06); (b) (c) MODENESI (2020, p. 30) apud DUTRA (2020), (d) RODRIGUES e CERSOSIMO (2022, p. 205)

2.5.2 Energia Imposta (Heat Input)

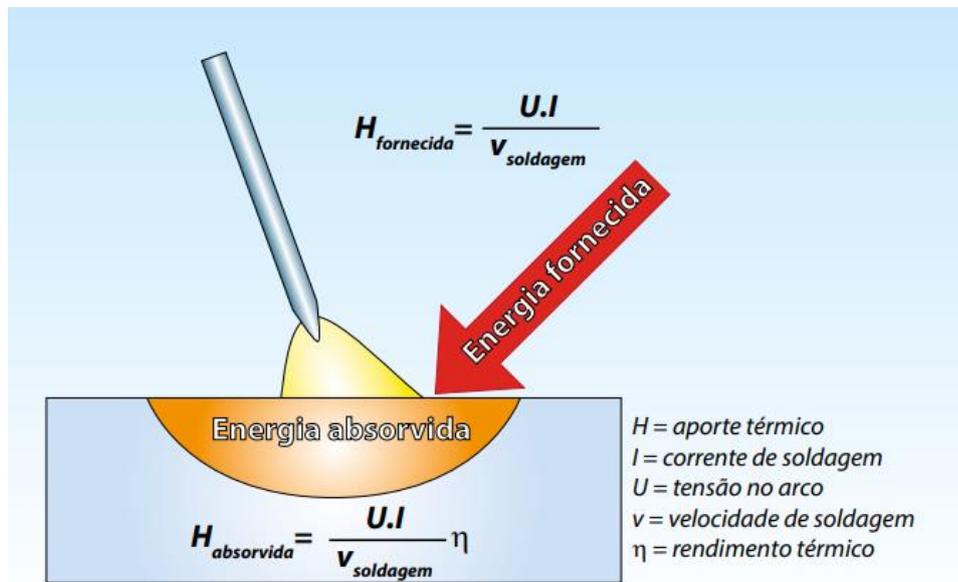
Segundo Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 223), a energia imposta também possuem outros nomes, tais como aporte térmico, energia de soldagem, calor imposto ou ainda *heat input*. Declara também que é importante entendermos que este parâmetro, além de importante é bem complexo, pois muitos itens podem afetá-lo. Inclusive seu próprio efeito pode não ser o esperado, a depender de como se consegue o aumento deste aporte térmico.

Ainda com Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 223), afirmam que o procedimento de soldagem influencia o ciclo térmico e a repartição térmica de igual importância.

Sendo assim, suas diversas variáveis podem ser reunidas em um único parâmetro: a energia de soldagem. Exemplificam afirmando que esta energia, nada mais é que a quantidade de Joules por comprimento de solda, sendo em soldagem SMAW, realizada com energias entre 0,5 kJ/mm e 4 kJ/mm.

De acordo com ASME IX (2019) existe uma relação entre as variáveis da equação, sendo que quanto mais alta for a energia imposta aplicada na junta soldada, maior será a poça de fusão e mais larga a Zona Afetada pelo Calor. Na Figura 20, se tem a representação esquemática do rendimento da energia de soldagem, incluindo a equação da energia imposta (Heat Input).

Figura 20: Representação do rendimento térmico da energia de soldagem



Fonte: Rodrigues e Cersosimo (p. 203, 2022)

2.5.3 Soldabilidade

Segundo Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 597), as normas técnicas de soldagem apresentam requisitos para execução das juntas soldadas decorrentes das características de soldabilidade de cada material aplicado em cada componente. Através desses requisitos, se executam juntas soldadas íntegras e isentas de defeitos aplicável a uma condição específica de serviço projetada.

“O material metálico é considerado possível de ser soldado com determinados processos e para determinados fins, quando a soldagem fornecer a integridade com

um processo, cujas juntas soldadas atendam os requisitos técnicos, tanto quanto às suas próprias qualidades quanto à sua influência na estrutura que formam.” (ISO 581:1980 apud RODRIGUES e CERSOSIMO 2022, p. 597)

2.5.3.1 Cálculo de Carbono Equivalente

De acordo com Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 683), a composição química e a velocidade de resfriamento de um material, pode existir o risco de trinca a frio dependendo da dureza da Zona Afetada pelo Calor – ZAC, que são responsáveis pela formação de microestruturas de elevada dureza e susceptíveis ao trincamento. Através do cálculo do carbono equivalente podem ser encontrados a possibilidade de formação de microestruturas frágeis em diferentes elementos de liga, ou seja, a temperabilidade do material.

Informa Silva (2014, p. 268), que os principais riscos para a fissuração pelo Hidrogênio são: a composição química do material de base; o teor de hidrogênio levado até a junta pelo material de adição; a espessura do material de base; o grau de tensões instalados no conjunto e o calor fornecido à junta do processo.

Reforça Silva (2014; p. 268); que os aços de baixa liga com alto teor de carbono são mais suscetíveis ao trincamento a frio, e ainda se referindo aos aços, que quanto maior o índice de Carbono Equivalente, maior será a tendência ao trincamento a frio. Informa que podem ser previstos esse comportamento através do cálculo de Carbono Equivalente se utilizando a Equação 1.

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (1)$$

2.5.3.2 Diagrama de Schaeffler

Segundo Modenesi (2001, p.77); o diagrama de Schaeffler é um dos recursos para prever a microestrutura da solda e possíveis problemas de soldagem em aços inoxidáveis ou outros tipos de aços.

Modenesi (2001, p.77) informa que este diagrama mostra áreas de possíveis desenvolvimentos típicos de soldagem, como fissuração na solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C; fases que estão as microestruturas, transição de

austenita para ferrita, crescimento de grão na Zona Afetada pelo Calor – ZAC e fragilização a alta temperatura, fragilização e fissuração por formação de martensita.

Modenesi (2001, p.77) reforça ainda que este diagrama geralmente é usado para prever casos de soldagem em metais dissimilares ou consumíveis de composição diferente do metal de base, podendo assim prever os possíveis problemas dessa situação e prevenir assim os possíveis problemas de cada caso estudado.

2.6 Qualidade

Segundo Brandão (2019, p. 264), os ensaios servem para assegurar que o bem-produzido não trará prejuízos decorrentes a acidentes pessoais ou materiais, tendo assim o compromisso entre o fabricante e o usuário que o item estará de acordo com as normativas inerentes ao uso do bem fabricado estando em conformidade com os requisitos técnicos especificados.

A fabricação ou manutenção de componentes ou estruturas soldadas conta com ensaios e inspeções que são atividades de apoio importantes para avaliar a qualidade do produto durante e após processamentos pelos quais ele é submetido. A palavra qualidade tem um significado bastante amplo, sendo definida como “medida de atendimento a expectativas, dada por um conjunto de características intrínsecas de um produto ou serviço” (ABNT, 2000; apud BRANDÃO 2019, p. 264).

“Convém que a verificação, tipicamente por inspeções ou ensaios, seja considerada nos pontos apropriados do processo para verificar a conformidade. Os locais e a frequência dependerão da importância das características e da facilidade de verificação durante o processamento” (ABNT, 1994 apud BRANDÃO 2019, p. 268)

2.6.1 Descontinuidades

“Todo defeito é uma descontinuidade, mas nem toda descontinuidade é um defeito” (LEITE, 1984).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2016, p.136), consideram que o conceito de descontinuidade é uma interrupção ou uma violação da estrutura típica ou esperada de uma junta soldada. Sendo assim um defeito que exige correções. Por

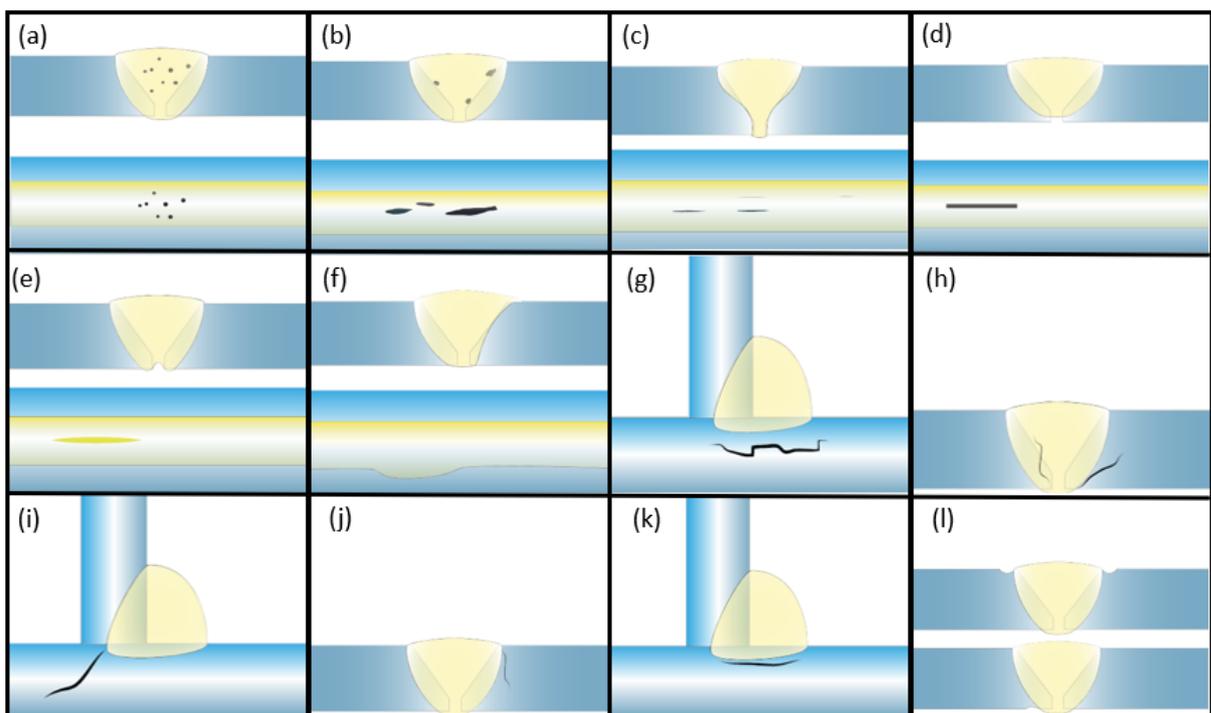
isso, os defeitos nas juntas soldadas devem ser evitados devido ao alto custo que possam acarretar.

“Descontinuidades são interrupções aceitáveis na estrutura avaliada que não altera seu desempenho em serviço”. Já defeito é toda descontinuidade que altera o equilíbrio qualidade-segurança-economia de uma peça ou material, que em seu efeito acumulado torna o item incapaz de satisfazer aos mínimos requisitos de aceitação de uma norma ou especificação aplicável (BRANDÃO, 2019, p. 266).

De acordo com Silva (2014, p.68), se o soldador posicionar o eletrodo de forma incorreta durante a soldagem, pode provocar as seguintes descontinuidades: aprisionamento de escória, porosidades e mordeduras.

Ainda de acordo com os estudos de Silva (2014, p.68), ele reforça que para que o posicionamento correto do eletrodo ocorra, devem ser considerados, o diâmetro do eletrodo, a posição de soldagem do operador e a geometria da junta que irá ser soldada. De acordo com Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 84), se têm as principais descontinuidades no processo SMAW, conforme representadas na Figura 21.

Figura 21: Descontinuidades mais comuns nos processos SMAW. (a) Porosidade; (b) inclusões; (c) falta de fusão; (d) falta de penetração; (e) concavidade; (f) sobreposição; (g) decoesão lamelar; (h) trinca na raiz; (i) trinca na garganta; (j) trinca na margem; (k) trinca sob cordão; (l) mordedura.



Fonte: Adaptado de Rodrigues e Cersosimo (2022, p. 84)

2.6.2 Ensaio Não Destrutivos

De acordo com Teixeira et al. (2012, p.321), os ensaios não destrutivos é todo ensaio que não destrói a peça e nem tem sua integridade estrutural prejudicada. Na área de soldagem, os ensaios não destrutivos mais comuns são: Visual, Líquido Penetrante, Radiografia, Partícula Magnética e o de Ultrassom.

“O controle de qualidade pode ser feito por: inspeção visual, dimensional ou metrológica de aceitabilidade: verificação a vista desarmada, com câmeras e/ou instrumentos de medição apropriada para avaliar as características de forma, dimensões, acabamento superficial” (BRANDÃO, 2019, p. 271).

Segundo Brandão (2019, p. 97), a inspeção não destrutiva mantém sua integridade física e estrutural, não interferindo nem prejudicando no uso ou processamento futuro do item inspecionado. Na Tabela 2, demonstra-se um comparativo de abreviaturas dos Ensaio não Destrutivos usados pela AWS e Petrobrás.

Tabela 2: Abreviaturas dos tipos de Ensaio Não Destrutivos

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	AWS	PETROBRÁS
Radiografia	RT	RAD
	UT	US
	MT	PM
Líquido Penetrante	PT	LP
	LT	ES
Visual / Dimensional	VT	EV

Fonte: Adaptado de BRANDÃO (2019, p. 299)

2.6.2.1 Ensaio Visuais

De acordo com Teixeira et al. (2012, p. 321), o ensaio visual é o mais utilizado, pois além de ser simples, tem custo baixo, não requer instrumentos caros e detecta grande parte das descontinuidades que possam ter na superfície analisada. Pode ser realizado de forma direta ou indireta como espelhos ou lentes de aumento.

Reforça o Teixeira et al. (2012, p. 321), que no ensaio visual direto, a superfície examinada deve estar à distância máxima de 600 mm dos olhos do observador e formar com estes um ângulo mínimo de 30°, conforme pode-se ver na Figura 22.

2.6.2.2 Ensaio por Líquido Penetrante

Segundo Brandão (2019, p. 306), o princípio do ensaio por líquido penetrante é fazer penetrar um líquido numa abertura não visível por ação da capilaridade e retirá-lo por meio de um revelador. Supondo que a descontinuidade não seja visível a olho nu, o ensaio apresenta as etapas de limpeza inicial, aplicação do penetrante, remoção do excesso, aplicação do revelador e inspeção visual.

Na Figura 24, podem-se ver as etapas do ensaio por líquido penetrante - LP.

Figura 24: Etapas do ensaio LP: (a) peça limpa e adequada para início do ensaio; (b) aplicação do líquido penetrante; (c) limpeza com o líquido e pano pela segunda vez neste processo; (d) a aplicação do produto em direção única; (e) a aplicação do revelador; (f) peça pronta para análise.



Fonte: Adaptado de Silva (2014, p. 278)

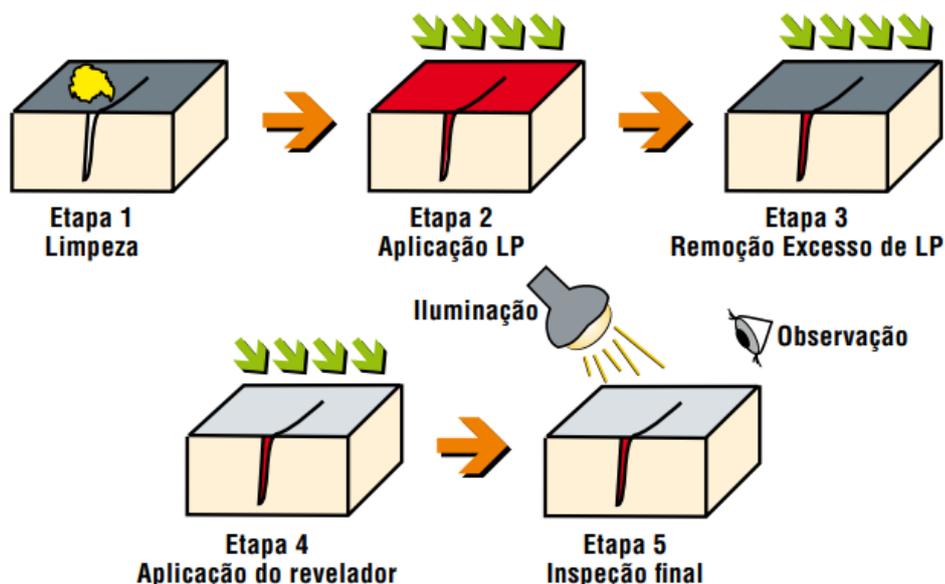
De acordo com o Teixeira et al. (2012, p. 324), O ensaio por LP é bem fácil, simples e rápido de ser executado. Divide-se em dois grupos principais, que podem ser subdivididos em grupos. Na Tabela 3, se tem detalhes dessa divisão.

Tabela 3: Grupos de Líquido Penetrante

GRUPOS DE LÍQUIDOS PENETRANTES		
TIPO I PENETRANTE FLUORESCENTE	Técnica A	Lavável a água
	Técnica B	Pós-emulsificável, lipofílico
	Técnica C	Removível com solvente
	Técnica D	Pós-emulsificável, hidrofílico
TIPO II PENETRANTE COLORIDO	Técnica A	Lavável a água
	Técnica C	Removível a solvente

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2012, p.324)

Ainda com Teixeira et al. (2012, p.324), se tem que o revelador deixa as descontinuidades mais visíveis, pois absorve o líquido penetrante que foi retido nelas. Podem ser classificados em reveladores a seco, à base de solvente, em suspensão aquosa ou solúvel em água. As descontinuidades mais comuns de serem detectadas neste ensaio são: trincas, poros e dobras. Apesar de ser simples, o ensaio de LP precisa ter uma limpeza minuciosa e não pode ser aplicado em materiais de superfície muito grosseira e nem poroso. Também deve ser seguido o procedimento, que de forma resumida é composto pela Figura 25.

Figura 25: Etapas da realização do ensaio por LP

Fonte: TEIXEIRA et al. (2012, p.326)

2.6.3 Ensaaios Destrutivos

“Inspeção por ensaios físicos, mecânicos, metalográficos e químicos de conformidade: caracteriza-se pelo não aproveitamento do item após inspeção, já que ocorrem alterações nas suas características originais, apesar de alguns ensaios também se caracterizarem como não destrutivos.” (BRANDÃO, 2019, p.271)

2.6.3.1 Ensaio de Dureza

Segundo Brandão (2019, p. 278), conceito de dureza é a resistência à penetração de um material duro no outro ou resistência à deformação plástica permanente, por meio de ensaios quantitativos por penetração (Brinell, Rockwell ou Vickers) choque ou ressalto (Shore) ou por escala (de Mohs).

2.6.4 Análises Macroestruturais e Microestruturais

Segundo Brandão (2019,), temos alguns conceitos definidos tais como

- Micrografia: é a identificação das microestruturas, presença de precipitados e inclusões, extensão da região vizinha à solda por microscopia ótica de reflexão, microscopia eletrônica de varredura ou de transmissão, microscopia força atômica. -

- Macrografia: é observar a textura de conformação mecânica, defeitos ou descontinuidades grosseiras, penetração ou perfil de soldas, disposição dos passes em soldas por fusão a vista desarmada, lupa com 10x de aumento ou por meio de um estereoscópio.

- Fractografia: é a observação da superfície e topografia de fratura, trincas, com identificação das microestruturas, precipitados e inclusões presentes, grau de rugosidade ou desgaste através de Microscopia Eletrônica de Varredura de alta ou baixa resolução – MEV, Microscopia Eletrônica de Transmissão – MET e Microscopia de Varredura por Sonda – MVS.

2.7 Norma AWS D1.1

Segundo Brandão (2019, p. 227), as normas têm como objetivo preservar o componente ou equipamento produzido quanto à sua integridade e vida útil que foi

estimada, facilitando, ou poupando ou ainda reduzindo trabalho e material utilizado. Dessa forma, o cumprimento das normas, obtém-se proteção aos grupos de pessoas ou ao meio ambiente em que o equipamento for utilizado.

“A norma técnica AWS D1.6, é em função do projeto e qualificação dos procedimentos de soldagem em função de estruturas metálicas, aço inox.” (BRANDÃO, 2019, p. 230)

2.7.1 RQPS e EPS

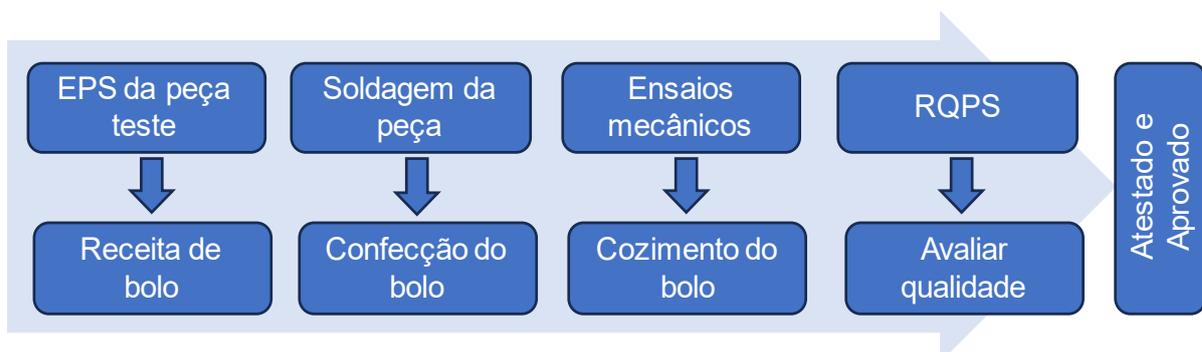
“A Especificação do Procedimento de Soldagem – EPS, é qualificada segundo sistemática e critérios de aceitação definidos por um código ou norma técnica de soldagem, usada com referência ou compulsória, segundo os requisitos de projeto/cliente.” (BRANDÃO, 2019, p. 234)

Segundo Brandão (2019, p. 236), relata-se todos os dados relacionados a soldagem, desde cada disposição dos passes nas juntas, os parâmetros utilizados na soldagem, e todos os dados que serão utilizados nessa peça no documento nomeado “Acompanhamento de Soldagem de Peça Teste – ASPT”. Após isto, registram-se no “Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem – RQPS”, conforme seu ASPT, os ensaios mecânicos e não destrutivos, de acordo com os requisitos do projeto/cliente e critérios de aceitação do código ou norma de soldagem de referência.

“O RQPS contém o procedimento de soldagem real usado numa peça teste, com os resultados dos ensaios, testes e dados de inspeção usados para qualificar ou validar uma EPS.” (BRANDÃO, 2019, p. 237).

Na Figura 26, se tem a sistemática de uma qualificação de uma EPS.

Figura 26: Analogia para explicar a sistemática de qualificação de uma EPS



Fonte: Adaptado de Brandão (2019, p. 237)

2.8 Soldagem de Revestimento

Segundo Huthings (1992) apud Lima (2008, p. 18), a definição de revestimento duro é o depósito por soldagem de uma liga homogênea, na superfície de um material mole, que pode ser de um aço médio ou baixo carbono, com o objetivo de aumentar a sua dureza e resistência ao desgaste, sem alterar de forma significativa a ductilidade e tenacidade do substrato. Conde (1986) apud Lima (2008, p. 18), afirma que este revestimento tem o objetivo de reduzir o desgaste por abrasão, erosão, impacto ou cavitação.

Segundo o artigo Métodos (2023), o revestimento é uma maneira eficaz de prolongar a vida útil dos componentes sujeitos a desgaste e abrasão, melhorando o desempenho e a produtividade do equipamento, uma vez que reduz as paradas e os custos com manutenção. O processo de revestimento duro é uma aplicação de uma camada de metal resistente a abrasão em uma superfície sujeita a desgaste devido contato com materiais abrasivos.

Afirma ainda Métodos (2023), que existem uma boa variedade de métodos de revestimento duro disponíveis, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens. Geralmente este revestimento é feito pelo processo de soldagem, mas pode ser realizado também por pulverização térmica. É comum que sejam de ligas diferentes tais como aço de alto carbono, aço inoxidável, ligas de cobalto, ou ainda à base de cromo e níquel. É necessário quando um componente está sujeito a desgaste e abrasão, o que reduz sua vida útil e causa aumento nos custos de manutenção ou paralisação do equipamento.

Reforça Métodos (2023), que ambientes de alto desgaste, materiais abrasivos, ambientes de alta temperatura, ambientes corrosivos, cargas de alto impacto ou choque, exigem o uso do revestimento duro para a proteção de seus componentes. A necessidade de revestimento pode ocorrer em diversas aplicações industriais, tais como mineração, construção, agricultura e manufatura.

Conclui Métodos (2023), que o método de revestimento duro por soldagem SMAW é o mais versátil dentre eles, pois possui portabilidade, acessibilidade, é econômico, possui fácil operação e permite a soldagem em diversas posições o que é viável para atender a necessidade das possíveis manutenções destes equipamentos. Na Figura 27, se tem um soldador realizando manutenção de uma máquina pesada no próprio ambiente em que ela trabalha.

Figura 27: Soldador executando manutenção em maquinário pesado



Fonte: Disponível em: <<https://www.codinter.com/br/wp-content/uploads/sites/7/2023/04/BLOG-042223-PT-Metodos-de-revestimento-duro-quais-sao-os-mais-comuns.jpg>>. Acesso em: 24 out. 2024.

2.8.1 Amanteigamento

Justificam Scotti e Ferraresi (1993) apud Fratari, Schwartzman e Scotti (2009, p. 2); que a técnica de amanteigamento é um caso particular de revestimentos por soldagem, sendo necessária por algumas razões. Citam como exemplo, a exigência de uma camada de ferro quase puro antes da deposição de níquel em soldagem por técnica a frio em alguns ferros fundidos, devido ao impedimento de adesão do níquel diretamente pelo grafite.

Segundo Filho (2007) apud Fratari, Schwartzman e Scotti (2009, p. 1); o objetivo da soldagem do revestimento é de se obter propriedades que não são encontradas no material de base, obtida com o depósito de material de adição dissimilar sobre uma determinada superfície metálica. Geralmente, foca-se em aumentar a resistência à abrasão e/ou corrosão do metal de base.

Resumem Linnert (1995) apud Fratari, Schwartzman e Scotti (2009, p. 1): que as razões para se revestir uma superfície são: (a) reconstruir o material de base para reparos ou ajustes de dimensões de uma peça; (b) obter uma camada de transição quando a junta posterior for realizada sobre a camada amanteigada através do amanteigamento de superfície de um metal de base, com camadas de material dissimilar; (c) aumentar a resistência ao desgaste resultante do endurecimento superficial com uma camada de composição; (d) obtenção de diferentes propriedades

químicas, físicas e/ou metalúrgicas, tais como resistência à corrosão, propriedades magnéticas e elétricas do metal de base, através do revestimento do metal de base com a deposição de uma camada com composição química dissimilar;

Reforçam Fratari, Schwartzman e Scotti (2009, p. 2); que em revestimentos duros existe a possibilidade do acúmulo de tensões devido a interface sobreposta por um material de alta resistência e baixa ductilidade; assim sendo, o amanteigamento deve possuir algumas características em relação ao substrato: (a) compatibilidade química com o material de base; (b) diluição do amanteigamento não resulte em trincas; (c) alta ductilidade, quando o objetivo é a redução de tensões que seriam adquiridas na realização dos passes entre os dois componentes; (d) baixa diluição para redução de custos, sendo adquirida na seleção correta dos parâmetros inerentes ao processo; (d) impedimento de trincas na Zona Afetada pelo Calor – ZAC do substrato, através do controle dos parâmetros de soldagem, podendo ter a realização do *tempering bead*, revenimento da região grosseira.

2.9 Custos de Soldagem

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2014, p.39); deve-se basear na preparação e na execução da soldagem para realizar os cálculos de custo de soldagem.

Salienta Wainer, Brandi e Mello (2014, p.39); que a importância de requisitos exigidos no projeto, desde requisitos da junta a soldar, suas propriedades químicas e mecânicas, compatibilidade do metal de adição, disponibilidade de fornecedores para compra, possíveis equipamentos ou acessórios a serem utilizados no processo, ainda como a parte operacional, se existe a necessidade de treinamentos, qualificação de soldadores, ou algum item produtivo inerente ao processo, com o propósito de tais detalhes não virem a prejudicar prazos de produção ou possíveis não retorno de investimento prestado.

Ressalta ainda Wainer, Brandi e Mello (2014, p.39); que estes cálculos são importantes para elaboração de orçamento para concorrência, estimativa de comparação de processos de fabricação ou de soldagem, lembrando que os cálculos devem ser feitos de forma que sejam específicos o que foi gasto em material depositado, não incluindo, mas especificado a parte itens de operação de soldagem, por meio de custo de homem-hora de caldeireiro ou centro de custo como pré ou pós aquecimento, calibragens, ensaios destrutivos ou não destrutivos ou retrabalhos.

2.9.1 Rendimento

Para os cálculos dos valores de rendimento de soldagem, necessitou-se dos valores da Eficiência de Deposição dessa solda. Segundo Brito e Paranhos (2005, p.38), a eficiência de deposição pode ser de acordo com a equação abaixo.

$$\text{Eficiência de Deposição} = \frac{\text{Peso de Metal Depositado (g)}}{\text{Peso do Material Consumido (g)}} \quad (2)$$

2.9.2 Taxa de Deposição

De acordo com Brito e Paranhos (2005, p. 12), a taxa de deposição é definida como o peso do metal depositado por unidade do tempo, sendo um dos fatores que determina uma maior ou menor produtividade. Mesmo assim, não deve ser o único fator a determinar a escolha do processo de soldagem. Devem ser considerados: a taxa de deposição, a eficiência da taxa de deposição, a posição de soldagem, a qualidade da solda, a penetração requerida, e a disponibilidade dos equipamentos e pessoal qualificado.

Alegam Brito e Paranhos (2005, p. 12), que as principais variáveis que influenciam na taxa de deposição para um determinado processo de soldagem são a intensidade da corrente; a densidade da corrente no eletrodo; o tipo de corrente e polaridade; o diâmetro do eletrodo; a extensão do eletrodo e a posição de soldagem. Reforçam que em termos de taxa de deposição, a ordem de preferência de escolha de processo de soldagem é o processo mecanizado; o processo semiautomático; e o processo manual respectivamente. Na Tabela 4, se tem a comparação das taxas de deposição típicas para vários tipos de processos de soldagem a arco elétrico.

Tabela 4: Taxa de deposição típica para os principais processos de soldagem

TAXA DE DEPOSIÇÃO TÍPICA	
Processo de Soldagem	(Kg/h)
Eletrodo Revestido	1,0 a 3,0
MIG-MAG	2,0 a 6,0
Arame Tubular	3,0 a 8,0
Arco Submerso (1 arame)	5,0 a 12,0
<i>Twin-Arc</i> : Arco Submerso ou MIG-MAG	10,0 a 25,0
<i>Tandem-Arc</i> : Arco Submerso ou MIG-MAG)	12,0 a 30,0

Fonte: Adaptado de BRITO e PARANHOS (2005, p. 13)

Brito e Paranhos (2005, p.13), informam que a taxa de deposição pode ser calculada de acordo com diferença do peso final de uma peça após a soldagem e seu peso conhecido antes da soldagem. Sendo assim, determina as seguintes variáveis das equações que usaremos para esse cálculo. Sendo, Peso de Metal Depositado – PMD; Peso Final da Chapa – PF; Peso Inicial da Chapa – PI; Taxa de Deposição – TD; sendo o último em função do diâmetro do eletrodo e da intensidade da corrente empregada. As Equações 3, 4 e 5, determinam este cálculo de forma mais sucinta.

$$TD (kg/h) = \left(\frac{PF (kg) - PI (kg)}{TTA (h)} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$PMD (kg) = PF (kg) - PI (kg) \quad (4)$$

$$TD (kg/h) = \left(\frac{PMD (kg) \times 60}{TTA (h)} \right) \quad (5)$$

Brito e Paranhos (2005, p.14), acrescentam ainda uma equação para método mais rápido de cálculo de deposição para eletrodo fundido por hora, sendo a Tensão do Arco – E e a Intensidade da corrente – I. A Equação 6 descreve este método.

$$TD (kg/h) = \left(\frac{E (V) \times I (A)}{2000} \right) \quad (6)$$

2.9.3 Fator de Trabalho ou de Operação

Segundo Brito e Paranhos (2005, p. 8), quando o arco elétrico não está estabelecido, não está progredindo o processo de fabricação por soldagem. Ainda que o tempo despedido em montagem, ponteamento, movimentação da peça do posicionador ou ainda a limpeza de junta, sejam necessários, não são produtivas para o ponto de vista de progressão da soldagem. Pois qualquer outra atividade que não seja a solda em si, não se pode contabilizar como tempo em que o soldador esteja realmente soldando.

Sendo assim, Brito e Paranhos (2005, p. 8), informam que a equação de fator de operação determina o rendimento da operação de soldagem. Sendo um fator

básico em fórmulas de custo de soldagem, e que para poder ter avaliações corretas, devem ser determinados com precisão.

Sendo assim, Brito e Paranhos (2005, p. 8), descreve a Equação 7, onde se tem descrito o Fator de Operação – TO, o Tempo de Arco Aberto – TAA, e o Tempo Total de Soldagem – TTS.

$$FO (\%) = \left(\frac{TAA (s)}{TTS (s)} \right) \times 100 \quad (7)$$

Ainda com Brito e Paranhos (2005, p. 8), se tem as outras equações necessárias a este cálculo. Sendo complementar o Tempo de Parada – TP, o Comprimento da Solda – CS, e a Velocidade de Soldagem – VS. Nas Equações 8, 9 e 10; se tem a sua descrição para fim de cálculo.

$$TTS (s) = TAA (s) + TP (s) \quad (8)$$

$$FO (\%) = \left(\frac{TAA (s)}{TAA (s) + TP (s)} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$TAA (min) = \left(\frac{CS (cm)}{VS (cm/min)} \right) \times 100 \quad (10)$$

2.9.4 Custos Totais

Marques, Modenesi e Bracarense (2016, p.206), descreve que se pode calcular o custo total de maneira simples, desmembrando o processo em diversas parcelas e somando entre si, como mostrado a seguir na equação 11:

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC (R\$) \quad (11)$$

“Onde CMO é o custo da mão de obra, CC é o custo dos consumíveis, CE é o custo da energia elétrica, CM é o custo da manutenção, CD é o custo da depreciação e CMC é o custo dos outros materiais de consumo.” (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2016, p. 207)

Na Tabela 5, se tem o resumo de equações que foram utilizadas para efetuar os cálculos de custos envolvendo o processo SMAW.

Tabela 5: Tabela de Custos

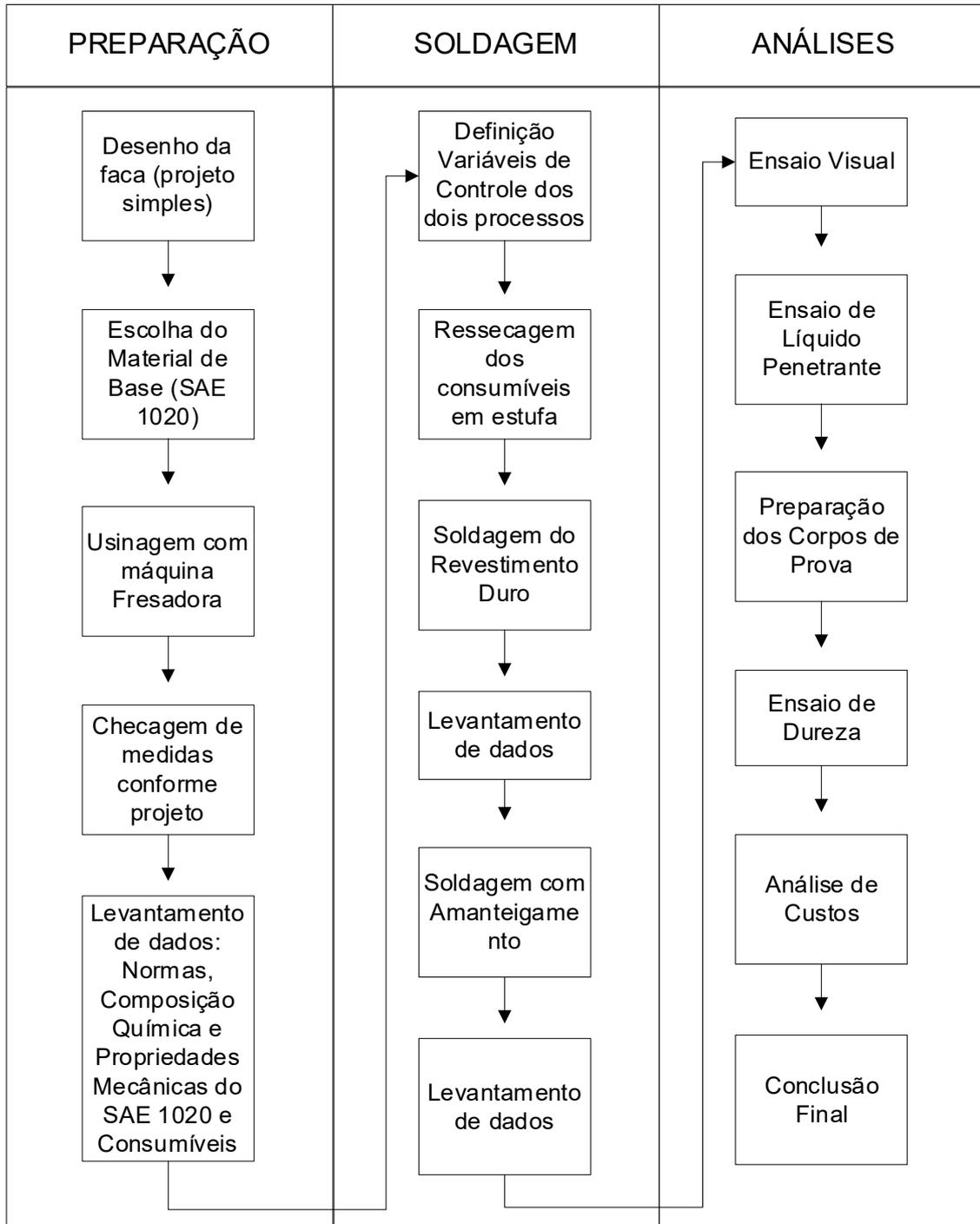
EQUAÇÃO DO CUSTO	VAR	DESCRIÇÃO	UNID
Metal de adição	Ms	Massa de metal depositado	Kg
$C_e = \frac{m_s}{\varphi} C_{eU}$ Eq. (12)	φ	Eficiência de deposição conforme pesagem dos corpos de prova	Kg
	C_{eU}	Preço por peso do eletrodo	R\$/Kg
	Energia elétrica a ser consumida	C_{eU}	Preço da energia elétrica;
$C_{el} = \frac{P t_{ARC}}{\varphi_{el}} (C_{eU})$ Eq. (13)	P	Potência elétrica média despreendida durante a soldagem	Kw
	t_{ARC}	Tempo de arco aberto	h
	φ_{el}	Eficiência elétrica da fonte de soldagem (Fonte Yaskawa V-1000 = 95 %).	%
	Mão de obra, processo robotizado e custos fixos	t_{ARC}	Tempo de arco aberto
$Cl = \frac{t_{ARC}}{\varphi} (L + O)$ Eq. (14)	φ	Fator de operação	%
	L	Custos por unidade de tempo com mão de obra	R\$
	O	Gastos fixos	R\$

Fonte: Adaptado de DUTRA (2020, p.49)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor visualização dos métodos empregados, foi realizada uma simplificação com o fluxograma da Figura 28.

Figura 28: Fluxograma dos métodos utilizados

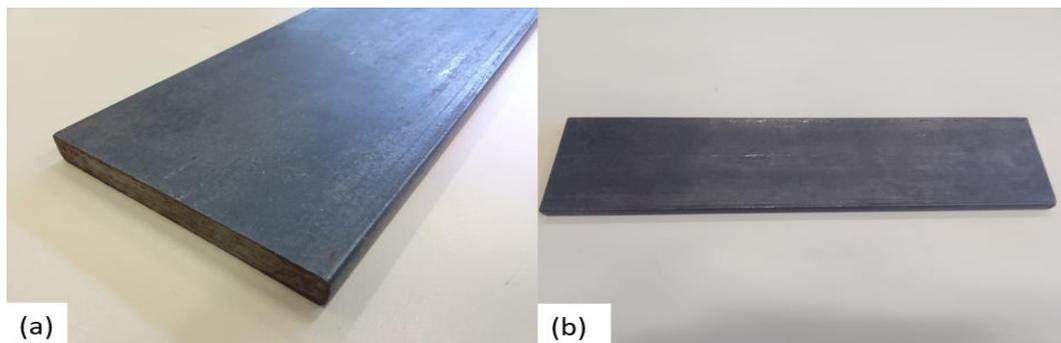


Fonte: Autora (2024)

3.2 Metal de Base

A faca foi construída em aço carbono 1020, com as medidas finais de 303,5 x 75 x 10 (mm) e com furo de 20 mm e o chanfro com ângulo de 20°. O procedimento utilizado foi usinagem, sobre a máquina Fresadora, ferramenta fresa e operação de fresamento. Na Figura 29, tem-se a peça de aço carbono 1020 que foi utilizada neste estudo.

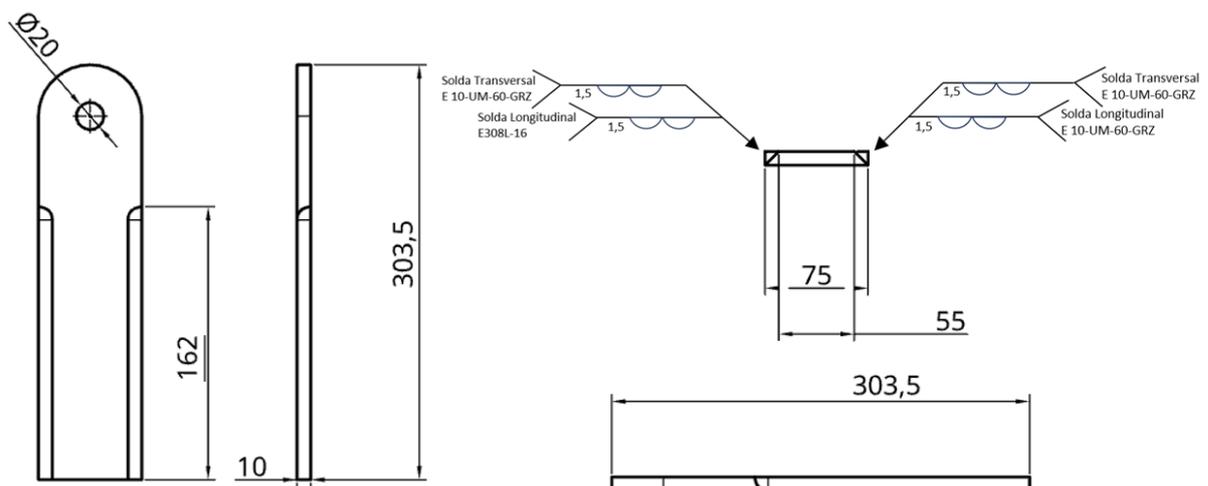
Figura 29: (a) (b) Vista da chapa de aço carbono 1020



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 30, existe a demonstração do desenho de produto com base nos modelos mais comuns verificados nas literaturas como base para o estudo. Projeto em projeção 2D de faca colheitadeira e Simbologia de Soldagem de Revestimento conforme AWS 2.4 (1998).

Figura 30: Projeto em projeção 2D de faca colheitadeira com simbologia de soldagem.



Fonte: Autora (2024)

Sua usinagem foi realizada com a máquina fresadora, sem sistema de coordenadas, de modelo analógico, sendo utilizada uma fresa de topo de 4 cortes, diâmetro de 25 mm.

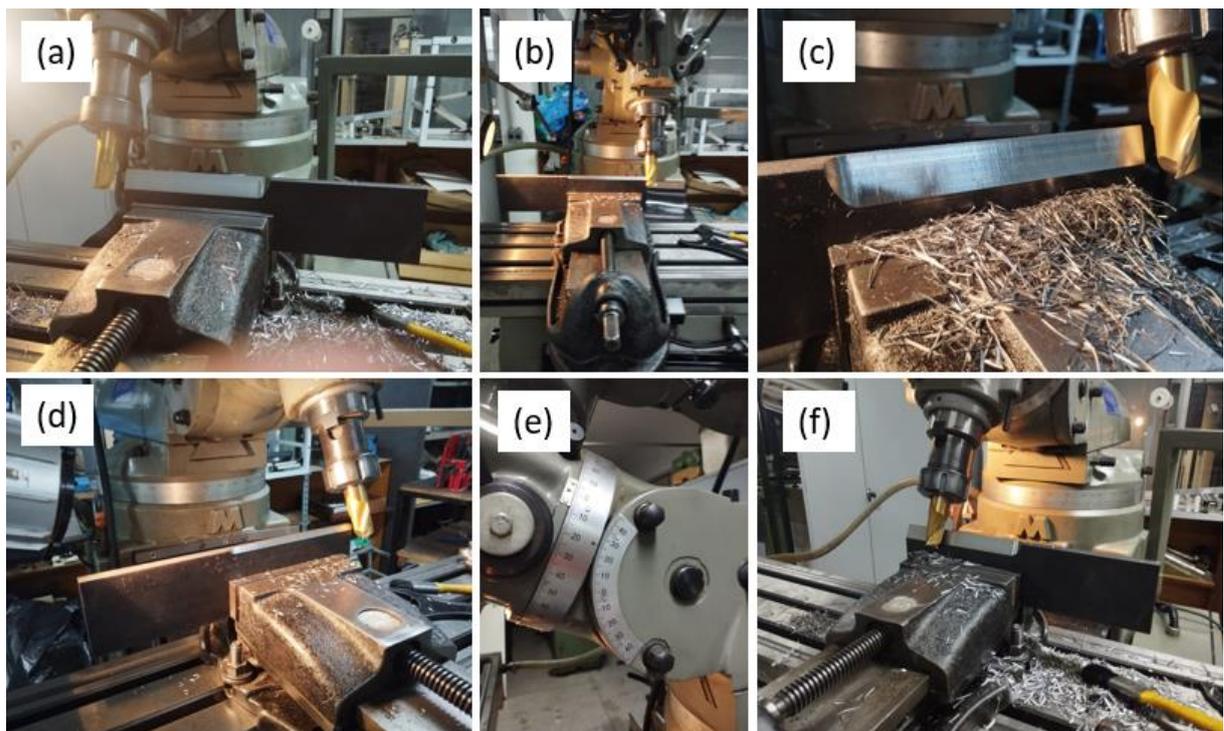
O material utilizado na usinagem foi HSS (aço rápido) com recobrimento de Durotin. O furo ficou com diâmetro de 20 mm (furo com pré-furo) e o chanfro com ângulo de 20°.

Para a execução dos furos, foram utilizadas brocas de HSS helicoidais de hastes paralelas, sendo as mesmas com dimensões de: 20 mm, 18 mm, 12 mm, 5 mm e broca de centrar.

O corte foi realizado com serra de fita vertical (aço rápido) da marca Ronemak e ajustagem em bancada para acabamento do raio.

Na Figura 31, consegue-se observar o processo de usinagem do protótipo da faca colheitadeira.

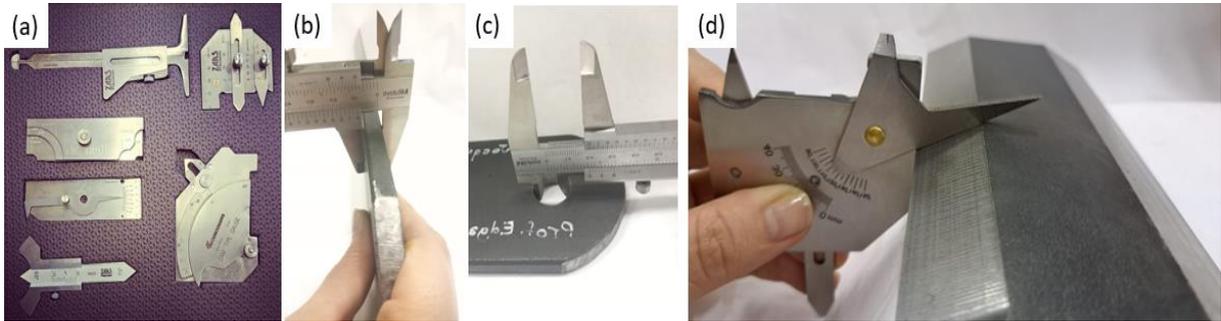
Figura 31: Usinagem do protótipo para estudo da faca colheitadeira: (a), (b), (c) e (f) registro por diversos ângulos do processo de fresamento; (e) registro de ajustagem do equipamento.



Fonte: Autora (2024)

Após a usinagem do protótipo da faca colheitadeira, foi realizada a conferência das medidas, conforme visto na Figura 32.

Figura 32: (a) Paquímetros e calibres de solda; (b) (c) (d) checagem das medidas da faca



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 33, se tem a demonstração do projeto 3D e do protótipo usinado da faca colheitadeira que recebeu o revestimento para este estudo.

Figura 33: (a) Desenho 3D da faca; (b) (c) vistas do protótipo usinado.



Fonte: Autora (2024)

3.2.1 Composição Química e Propriedades Mecânicas

Na Tabela 6, se tem um resumo da composição química, adaptado do catálogo disponível pelo fornecedor da Gerdau.

Tabela 6: Composição Química SAE 1020

SAE 1020 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)			
Carbono	Manganês	Fósforo (máx.)	Enxofre
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,03	0,05

Fonte: Adaptado de GERDAU (2023, p.33)

De acordo com o cálculo da Equação 1 do item 2.5.3.1, temos 0,33% de Carbono Equivalente do Material de base. Sendo assim, por possuir um valor menor que 0,4% de Carbono, possui baixa susceptibilidade ao trincamento a frio, não necessitando nem de pré-aquecimento, nem de pós- aquecimento. Temos este cálculo descrito na Figura 34.

Figura 34: Cálculo do Carbono Equivalente do SAE 1020

(Fórmula)								
Carbono equivalente (%) = $C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$								
Classificação do Material	Composição Química							
Digitar a % do elemento	Elemento	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu
	%	0,23	0,6	0	0	0	0	0
(Cálculo)								
Carbono equivalente (%) = $0,23 + \frac{0,6}{6} + \frac{0 + 0 + 0}{5} + \frac{0 + 0}{15} = 0,33$								

Fonte: Adaptado da Asme IX - QW 403.26 (2019)

Na Tabela 7, se tem um resumo das características mecânicas, adaptado do catálogo disponível pelo fornecedor da Gerdau.

Tabela 7: Características Mecânicas SAE 1020 - Dureza (HB)

SAE 1020 - DUREZAS (%)		
Laminado / Normalizado	Recozido	Esferoidizado
120-170	Máximo 145	Máximo 75 (HRB)

Fonte: Adaptado de GERDAU (2023, p.80)

Na Tabela 8, se tem um resumo das propriedades mecânicas, adaptado do catálogo disponível pelo fornecedor da Gerdau.

Tabela 8: Propriedades Mecânicas do SAE 1020

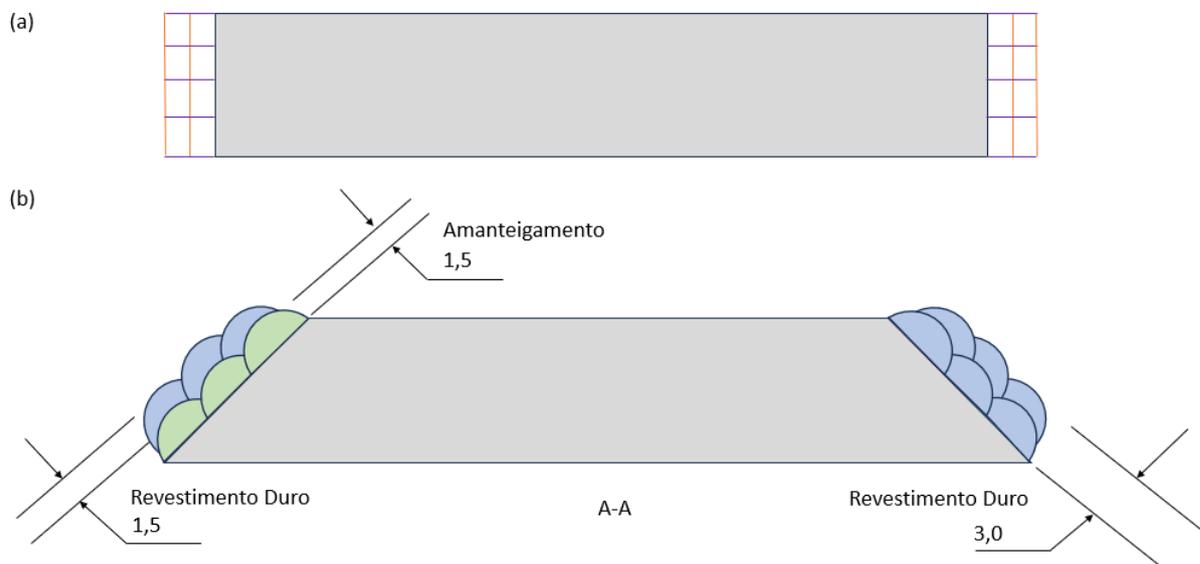
SAE 1020 – PROPRIEDADES MECÂNICAS			
	Laminado	Normalizado	Recozido
Temperatura de austenitização (°C)	-	870	870
Resistência a Tração (Mpa)	450	440	395
Limite de Escoamento (Mpa)	330	345	295
Alongamento (%)	36	35,8	36,5
Redução de área (%)	59	68	66
Dureza (HB)	143	131	111
Impacto (J)	87	118	123

Fonte: Adaptado de GERDAU (2023, p.80)

3.3 Metal de Adição

O revestimento foi aplicado no chanfro, local que entra em contato com o vegetal a ser cortado durante a colheita. Na Figura 34 temos a representação de como foi realizado o revestimento do objeto de estudo.

Figura 35: Demonstrativo de aplicação das duas formas do revestimento duro: (a) com o tecimento longitudinal e transversal representado; (b) com a aplicação do amanteigamento e do revestimento duro.



Fonte: Simbologia adaptada de AWS 2.4 (1998)

3.3.1 Consumível de Revestimento Duro

Para o revestimento duro, foi utilizado o Eletrodo E 10-UM-60-GRZ, do qual revestiu a peça de duas maneiras para comparação: de um lado diretamente no metal de base e do outro com o amanteigamento.

“Revestimento rico em carbonetos de cromo altamente resistente ao desgaste abrasivo de metais e minérios, especialmente desenvolvido para revestimento de partes móveis na indústria de mineração; aplicável em transportadores helicoidais, facas trituradoras, partes de escavadoras, britadores e moinhos, misturadores, perfuratrizes etc.” (ELETRODOS, 2024, p.61)

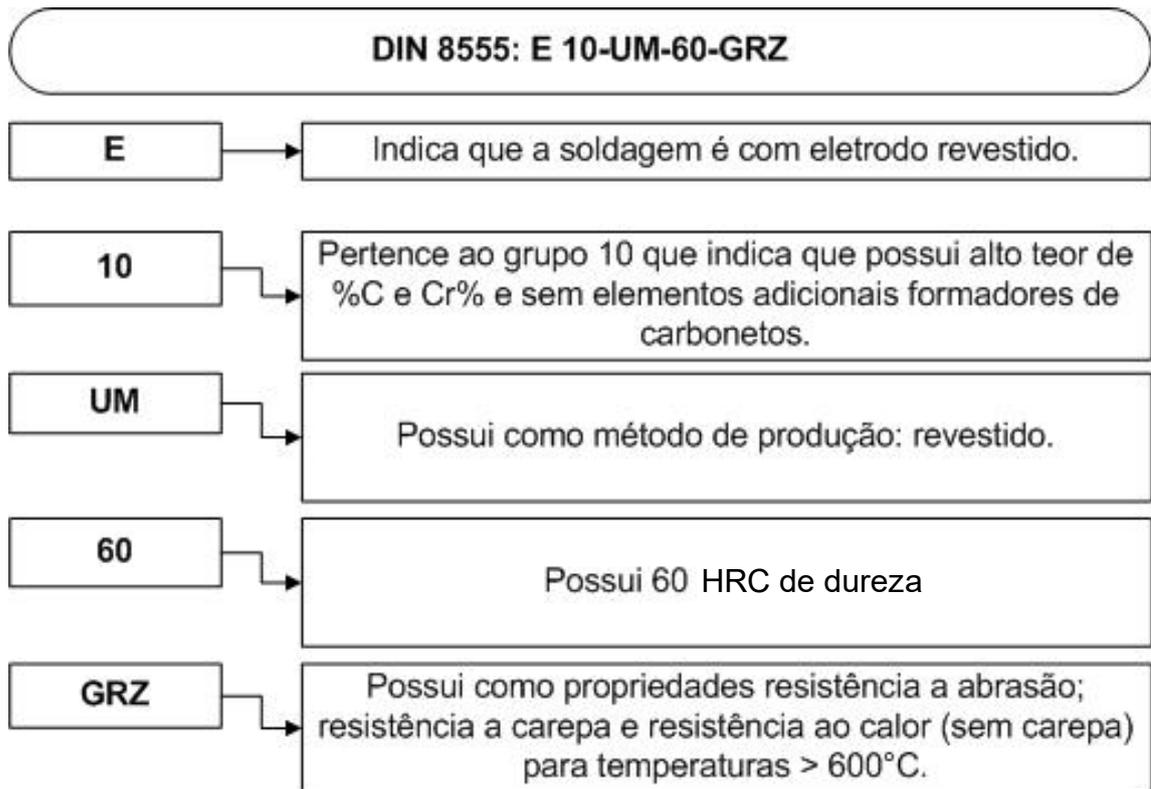
Na Figura 36, se tem exemplos de como estes consumíveis são apresentados ao consumidor.

Figura 36: Eletrodo E 10-UM-60-GRZ



Fonte: AUTORA (2024). ADAPTADO DE (a) <<http://www.mjvsoldas.com.br/produto/esab-eletrodo-esab-ok-8478>>. Acesso em: 02 out. 2024; (b) Disponível em: <<https://www.alumaq.com.br/produto/ok-84-78/>>. Acesso em: 02 out. 2024; (c) ELETRODOS (2024)

De acordo com a norma alemã DIN 8555 (1983), em tradução livre, se tem na Figura 37, a classificação dos materiais de revestimento. Conforme descrição, se tem a identificação das características do revestimento duro que foi depositado.

Figura 37: Classificação do material de Revestimento Duro

Fonte: Adaptado de DIN 8555 (1983)

Na Tabela 9, se tem resumo de informações técnicas do eletrodo E 10-UM-60-GRZ, adaptado do catálogo disponível pelo fornecedor ESAB.

Tabela 9: Informações Técnicas do Eletrodo E 10-UM-60-GRZ

E 10-UM-60-GRZ - INFORMAÇÕES TÉCNICAS	
Classificações do Metal Solda	DIN 8555: E 10-UM-60-GRZ
Tipo de Liga	Revestimento Duro
Tipo de Corrente	CA ≥ 60 V ou CC+
Diâmetro	4 mm
Corrente	120-200 A
Tensão	20-28 V
Informação para a compra ESAB	OK 84.78 [4,00X450mm] - LT 20Kg (Código 0302830)

Fonte: Adaptado de ELETRODOS (2024, p.61)

3.3.2 Composição Química e Propriedades Mecânicas do Revestimento Duro

Na Tabela 10, está sendo demonstrado o resumo da composição química do eletrodo E 10-UM-60-GRZ, adaptado do catálogo disponível pelo fornecedor ESAB, observado os altos teores de carbono e cromo.

Tabela 10: Composição Química do Consumível de Revestimento Duro

E 10-UM-60-GRZ - COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)			
Carbono	Manganês	Cromo	Silício
4,00	0,40	25,00	2,40

Fonte: Adaptado de ELETRODOS (2024, p.61)

Na Tabela 11, observa-se o resumo das propriedades mecânicas do revestimento duro, adaptado do catálogo disponível pelo fornecedor ESAB, enfatizando a elevada dureza de 60 HRC do consumível.

Tabela 11: Propriedades Mecânicas do Consumível do Revestimento Duro

E 10-UM-60-GRZ - PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Condição	Dureza
Como soldado: Temperável ao ar resistente ao calor até 700°C	60 HRC (697 HV)

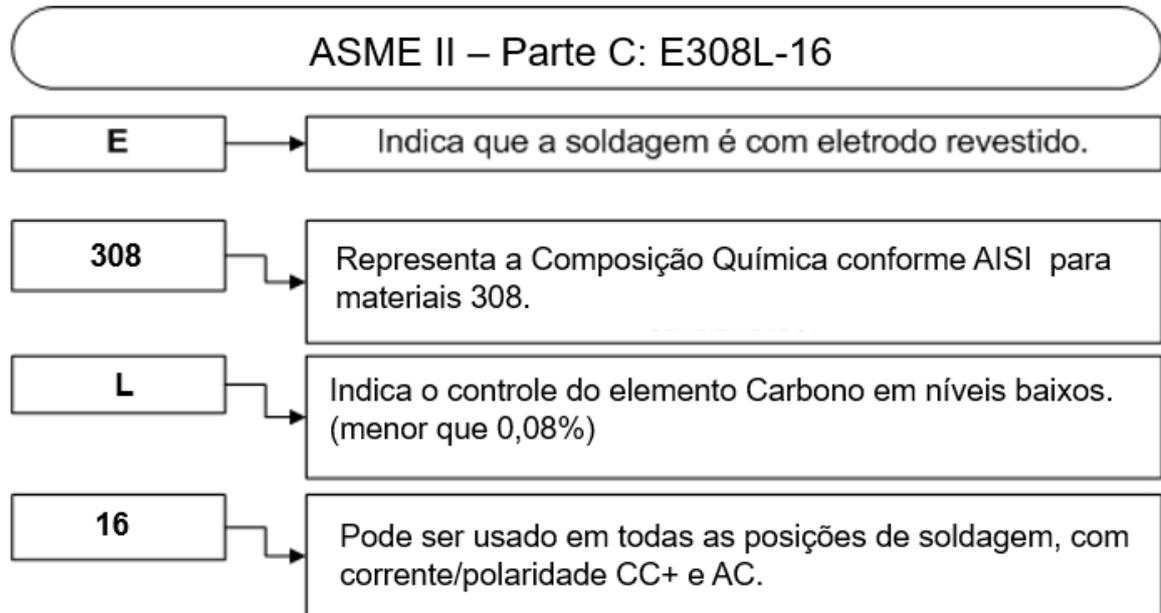
Fonte: Adaptado de ELETRODOS (2024, p.61)

3.3.3 Consumível do Amanteigamento

O amanteigamento foi realizado com o Eletrodo E308L-16; por ser um aço austenítico com baixo teor de Carbono.

De acordo com a norma ASME II, Parte C (2019, p.112), em tradução livre, se tem na Figura 38, a classificação dos materiais de amanteigamento.

Conforme descrição, se tem a identificação das características do metal que foi depositado no amanteigamento.

Figura 38: Classificação do material de Amanteigamento

Fonte: Adaptado de ASME II, Parte C (2019)

3.3.4 Composição Química e Propriedades Mecânicas do Amanteigamento

De acordo com ASME II (2019, p.110), abaixo observa-se a Composição Química do Eletrodo E308L-16, em tradução livre, representada pela Tabela 12.

Tabela 12: Composição Química do Consumível de Amanteigamento

E308L-16 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
0,04	18,0 - 21,0	9,0 - 11,0	0,75	0,5 - 2,0	1,00	0,04	0,03	0,75

Fonte: Adaptado da ASME II (2019, p. 110)

Na Tabela 13, observa-se o resumo das propriedades mecânicas do consumível que foi utilizado para amanteigamento, em tradução livre, da ASME II, Parte C.

Tabela 13: Propriedades Mecânicas do Consumível do Amanteigamento

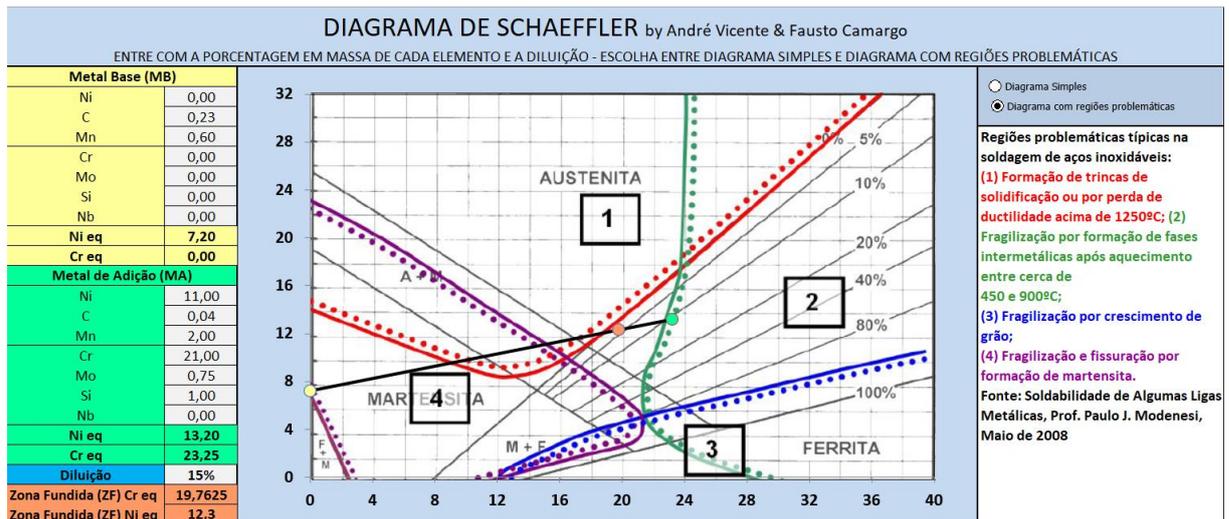
E308L-16 - PROPRIEDADES MECÂNICAS		
Resistência a Tração	Alongamento	Tratamento Térmico
75 ksi / 520 Mpa	30% (min)	Não possui

Fonte: Adaptado da ASME II (2019, p. 119)

3.3.5 Cálculo de Soldabilidade do Revestimento Duro com Amanteigamento

De acordo com o cálculo no Diagrama de Schaeffler, o amanteigamento possui sua diluição de forma segura, pois seu Cromo Equivalente e Níquel Equivalente possuem 19,76% e 12,3% respectivamente, estando fora das regiões problemáticas do respectivo diagrama. Está representado pela Figura 39.

Figura 39: Diagrama de Schaeffler do Amanteigamento



Fonte: Adaptado de MODENESI (2001, p. 20)

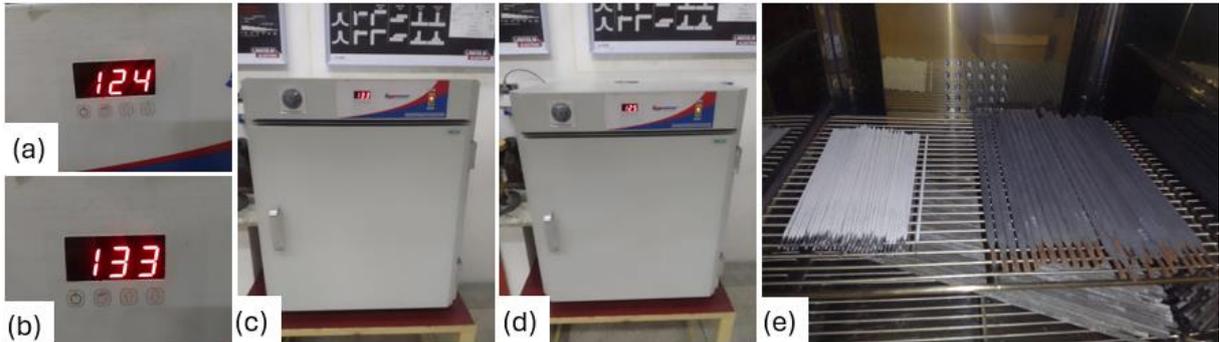
3.4 Variáveis de Controle

De acordo com Silva (2014, p. 63) as variáveis mais importantes de controle de um processo são: Tipo e diâmetro do eletrodo, Tipo e intensidade da corrente elétrica, tensão (diferença de potencial) em vazio da fonte de alimentação, comprimento do arco, velocidade de soldagem.

3.5 Soldagem

Na Figura 40, existe o registro fotográfico do acompanhamento da ressecagem dos consumíveis que foram utilizados no processo de soldagem deste estudo.

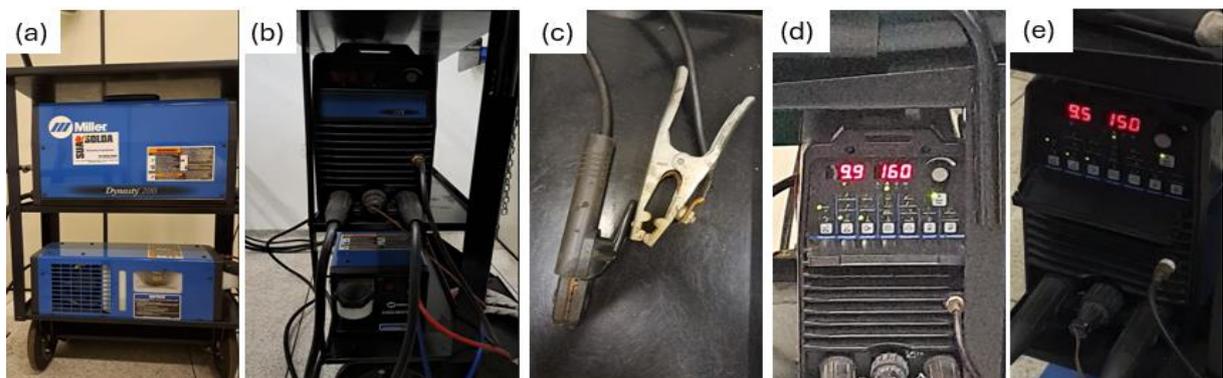
Figura 40: (a) (b) Temperaturas da estufa; (c) (d) Estufa; (e) Eletrodos ressecando conforme procedimento



Fonte: Autora (2024)

O revestimento foi soldado em uma das faces da faca pela fonte de energia Dynasty 200 SD e DX, incluindo unidade de refrigeração. O equipamento possui uma faixa de corrente de 1 A à 200 A com fator de trabalho de 60 % operando com 130 A, onde segundo a própria fabricante, o fator de trabalho (F.T.) é a percentagem de 10 minutos durante a qual a fonte pode soldar na sua carga nominal sem sobreaquecer, conforme visto na Figura 41.

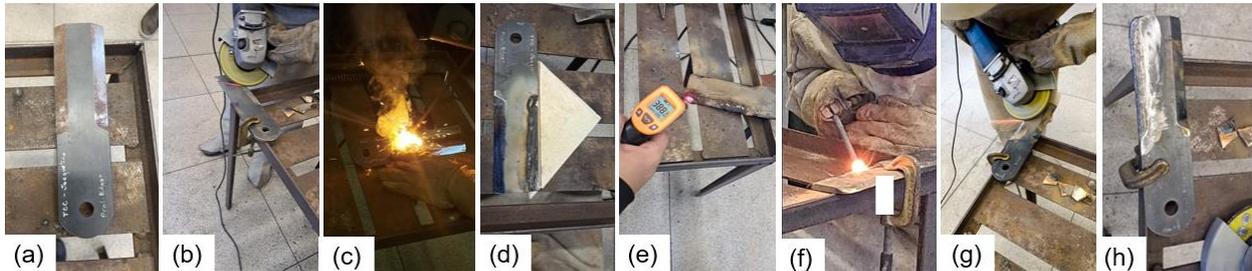
Figura 41: (a) (b) (c) Vistas da máquina de solda; (d) parâmetros da soldagem com revestimento duro; (e) parâmetros da soldagem do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Embora não se tenha encontrado nenhum estudo ou evidência de soldagem com camadas do revestimento em sentidos diferentes em facas colheitadeiras, foi planejado e realizado a soldagem da primeira camada de solda dos revestimentos no sentido longitudinal e a segunda no sentido transversal, com o objetivo de evitar trincas longitudinais através do balanceamento de tensões residuais. Na Figura 42, temos a soldagem do carboneto de cromo (revestimento duro).

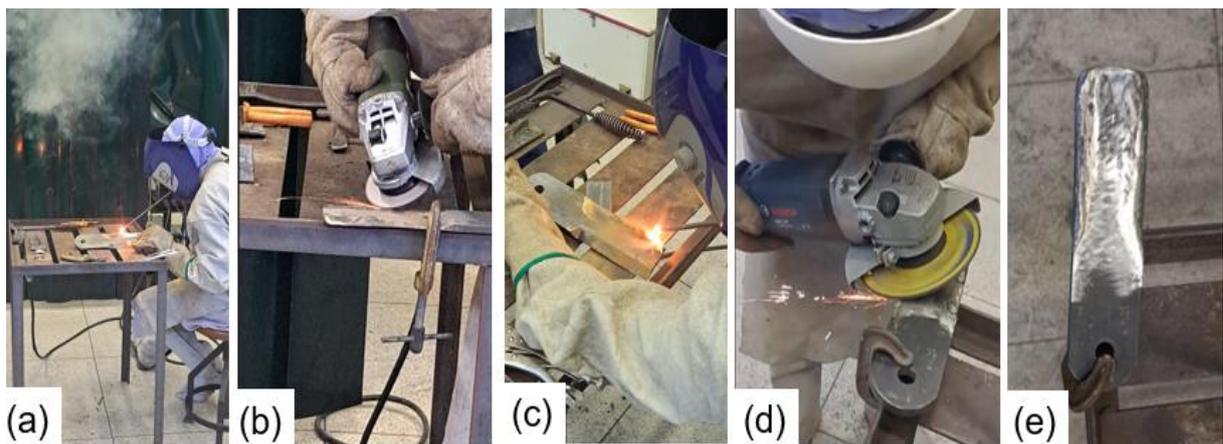
Figura 42: Soldagem do revestimento duro: (a)(b) preparação; (c) 1ª camada de solda; (d) anteparo cerâmica improvisado; (e) controle de temperatura interpasse; (f) 2ª camada de solda; (g) limpeza; (h) peça pronta.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 43, demonstra-se a soldagem do amanteigamento, este por sua vez não necessitou de controle de temperatura interpasse nem do anteparo de cerâmica para limitar o volume de metal depositado.

Figura 43: Soldagem do amanteigamento: (a) 1ª camada de solda; (b) limpeza; (c) 2ª camada de solda; (d) limpeza; (e) peça pronta.



Fonte: Autora (2024)

O processo de soldagem atendeu os requisitos descritos das EPS referentes a cada processo e estão nos apêndices A e B deste documento. Na Tabela 14, existem os dados levantados durante o processo de Soldagem da peça estudada.

Tabela 14: Dados dos Processos de Soldagem

DADOS DE PROCESSO DE SOLDAGEM		
	Revestimento Duro	Amanteigamento
Tensão do Arco	9,9 V	9,5 V
Intensidade da Corrente	160 A	150 A
Temperatura de Interpasse 1° cordão [em °C]	470	217
Temperatura de Interpasse 2° cordão [em °C]	402	298

Fonte: Autora (2024)

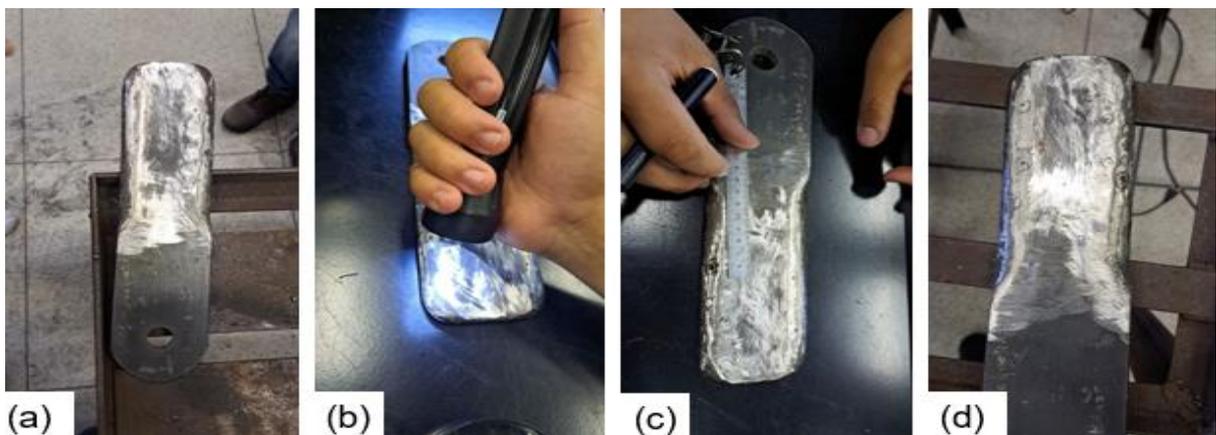
3.6 Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos realizados neste projeto, foram o Ensaio Visual e o Ensaio de Líquido Penetrante.

3.6.1 Ensaio Visual

O ensaio visual foi realizado após a soldagem do revestimento, assim que a peça atingiu a temperatura adequada para a inspeção. (Figura 44)

Figura 44: (a) (b) (c) (d) Registro parcial do ensaio visual realizado.



Fonte: Autora (2024)

Para atender o quesito de luminosidade para a inspeção visual, foi utilizado um luxímetro da marca Lux Meter com luminosidade mínima de 1.000 lux conforme Teixeira et al. (2012). A Figura 45 traz o luxímetro utilizado.

Figura 45: Luxímetro: (a) o equipamento; (b) baixa luminosidade; (c) luminosidade adequada.



Fonte: Autora (2024)

Os critérios adotados nestas análises, foram conforme Tabela 15 com tradução livre da Tabela 8.1 do AWS D1.1/D1.1 M:2020, adaptada com apenas os itens aplicados a este estudo e considerando a coluna da tabela referente as conexões não tubulares carregadas ciclicamente.

Tabela 15: Critérios de aceitação para Inspeção Visual.

CATEGORIA DA DESCONTINUIDADE E CRITÉRIOS DA INSPEÇÃO
(1) Proibição de Trincas: São inaceitáveis.
(2) Fusão entre metal base e solda: Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base.
(3) Cratera: Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas aos seus comprimentos efetivos.
(4) Perfil das soldas: Devem atender o item 7.23 da AWS D1.1.
(5) Período de Inspeção: Após resfriamento completo em temperatura ambiente.
(6) Soldas Subdimensionadas: A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): Dimensão nominal específica da solda(mm) Redução permitida de L (mm): [$5 < 2$]; [$6 < 2,5$]; [$8 < 3$]. Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda.
(7) Mordedura: Mordeduras não devem ser maiores que 1 mm em profundidade.
(8) Porosidade: (B) A frequência em soldas de filete não deve exceder uma em cada 100 mm de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 2,5 mm.
(8) Porosidade: (C) Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 100 mm de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder 2,5 mm.

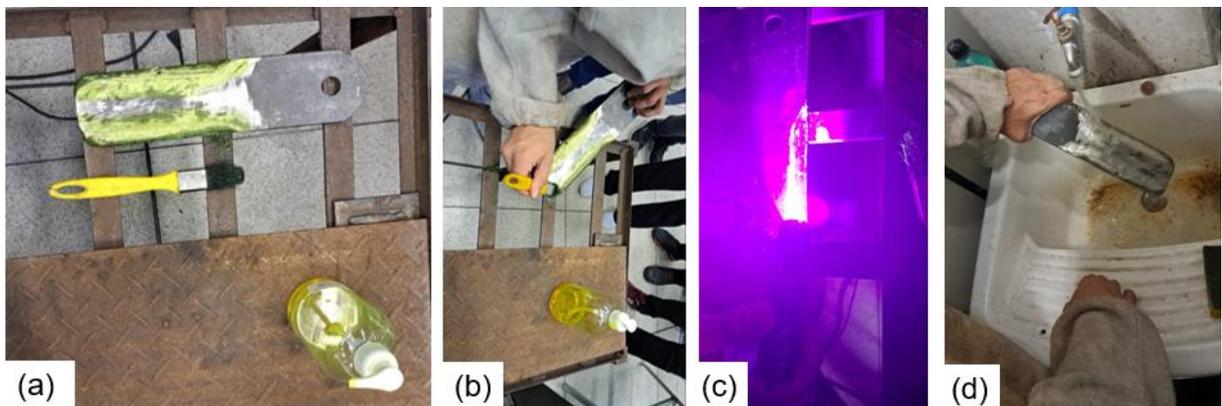
Fonte: Adaptado de AWS D.1/D1.1 (2020)

3.6.2 Ensaio Líquido Penetrante

De acordo com Teixeira et al. (2012). O ensaio por líquido penetrante é um dos métodos mais utilizados para a detecção de descontinuidades superficiais que estejam abertas para a superfície em materiais não porosos. É um ensaio relativamente simples, rápido e de fácil execução, sendo que o penetrante utilizado para a realização do ensaio, divide-se em dois grupos principais: o penetrante colorido e o penetrante fluorescente.

Foi realizado o ensaio de líquido penetrante fluorescente com o produto ZL-425, de lote: 2401002602, e validade: 01/2029. Na Figura 46, temos algumas imagens do ensaio realizado.

Figura 46: (a) (b) (c) (d) (e) Demonstram o ensaio de líquido penetrante realizado



Fonte: Autora (2024)

De acordo com Andreucci (2019, p. 32), o código AWS não faz nenhuma distinção entre os métodos (visual, partículas magnéticas ou líquidos penetrantes), e depende da condição de carga da estrutura em questão a ser inspecionada, o que dificulta a interpretação da análise. Sendo, ele deduz que a AWS é omissa em relação a este assunto.

Portanto, Andreucci (2019, p. 32), indica que o critério de aceitação conforme AWS D1.1, que é o mesmo para inspeção visual.

O Código AWS D1.1 (2020) requer que a aplicação do ensaio seja feita de acordo com ASTM E-165 somente para localizar as cavidades, no entanto, no momento da avaliação das indicações, o inspetor deve limpar as indicações detectadas e avaliar conforme as Tabelas 6.1 do AWS D1.1.

Os critérios adotados nestas análises, foram conforme Tabela 16 com tradução livre da tabela 6.1 do AWS D1.1: 2015 (conforme item 6.9 do AWS D1.1), adaptada com apenas os itens aplicados a este estudo e considerando a coluna da tabela referente as conexões não tubulares carregadas ciclicamente.

Tabela 16: Tabela com critérios de aceitação para o ensaio de LP

CATEGORIA DA DESCONTINUIDADE E CRITÉRIOS DA INSPEÇÃO
(1) Proibição de Trincas: São inaceitáveis.
(2) Fusão entre metal base e solda: Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base.
(3) Cratera: Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas aos seus comprimentos efetivos.
(4) Perfil das soldas: Devem atender ao item 5.23 da AWS D1.1.
(5) Período de Inspeção: Após resfriamento completo em temperatura ambiente.
(6) Soldas Subdimensionadas: A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): Dimensão nominal específica da solda(mm) Redução permitida de L (mm): [$< 5 < 2$]; [$6 < 2,5$]; [$> 8 < 3$]. Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda.
(7) Mordedura: Mordeduras não devem ser maiores que 1 mm em profundidade.
(8) Porosidade: (B) A frequência em soldas de filete não deve exceder uma em cada 100 mm de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 2,5 mm.
(8) Porosidade: (C) Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 100 mm de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder 2,5 mm.

Fonte: Adaptado de ANDREUCCI (2019, p. 33)

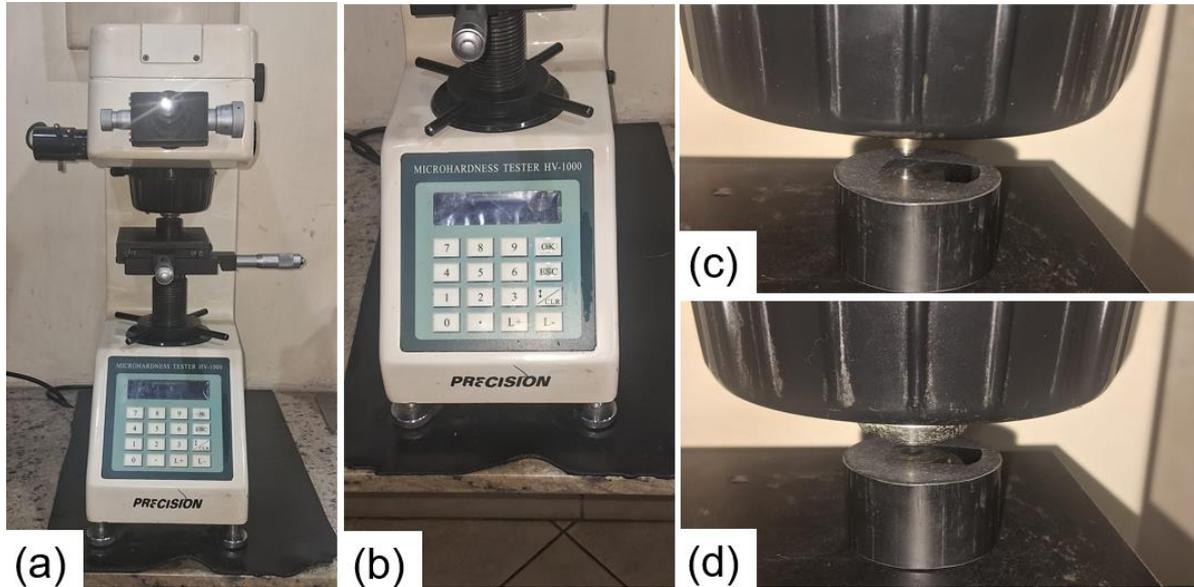
3.7 Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos que foi realizado foi para comparar o metal de base e o revestimento duro aplicado. Foi realizado ensaio para avaliar a dureza. Também foram realizadas análises macrográficas e micrográficas para esta comparação.

3.7.1 Ensaio de Dureza Vickers

O ensaio de dureza foi realizado com Durômetro Precision, modelo: Microhardness Tester HV-1000. (Figura 47).

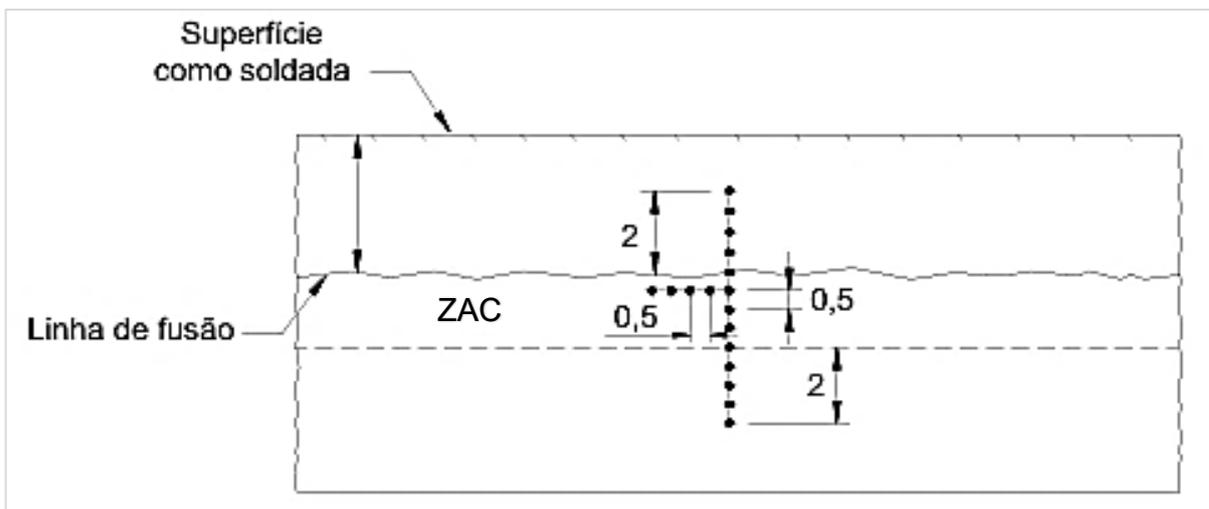
Figura 47: (a) (b) Vistas do durômetro utilizado; (c) (d) execução ensaio de dureza.



Fonte: Autora (2024)

O ensaio de dureza foi realizado atendendo ao Item B.2.3.4.4 da Petrobrás (2017), em que afirma que os pontos de análise de dureza para atender ao requisito de qualificação do procedimento de soldagem em chapa com revestimento depositado por soldagem “Weld Overlay” devem ser posicionados conforme Figura 48.

Figura 48: Pontos de medição do ensaio de dureza



Fonte: Adaptado da N133 - PETROBRÁS (2023)

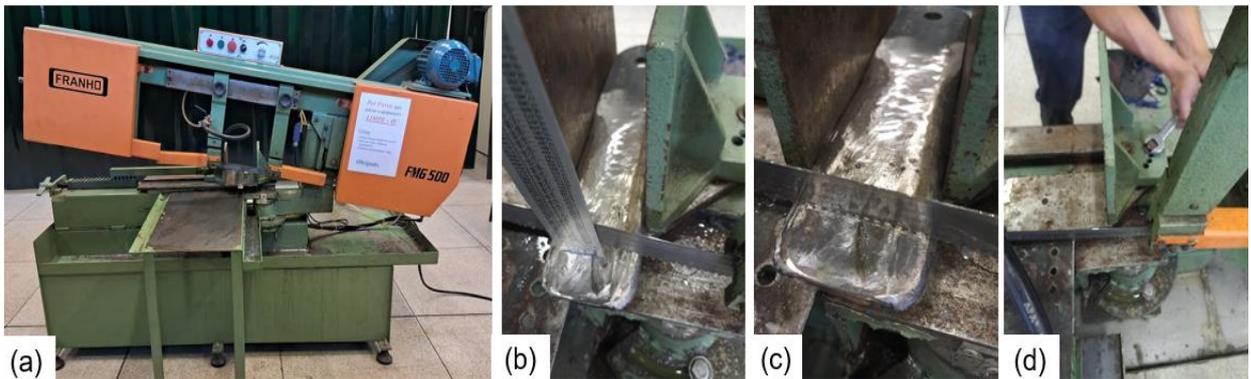
3.8 Caracterizações Macroestruturais e Microestruturais

As análises macrográficas e micrográficas tem como objetivo analisar a diferença estrutural entre a soldagem do revestimento duro e da soldagem do amanteigamento.

3.8.1 Preparação dos Corpos de Prova

Após a soldagem do revestimento, foi realizada a marcação de corte com a serra Franho FMG 500, visando preparar o corte posterior (Figura 49).

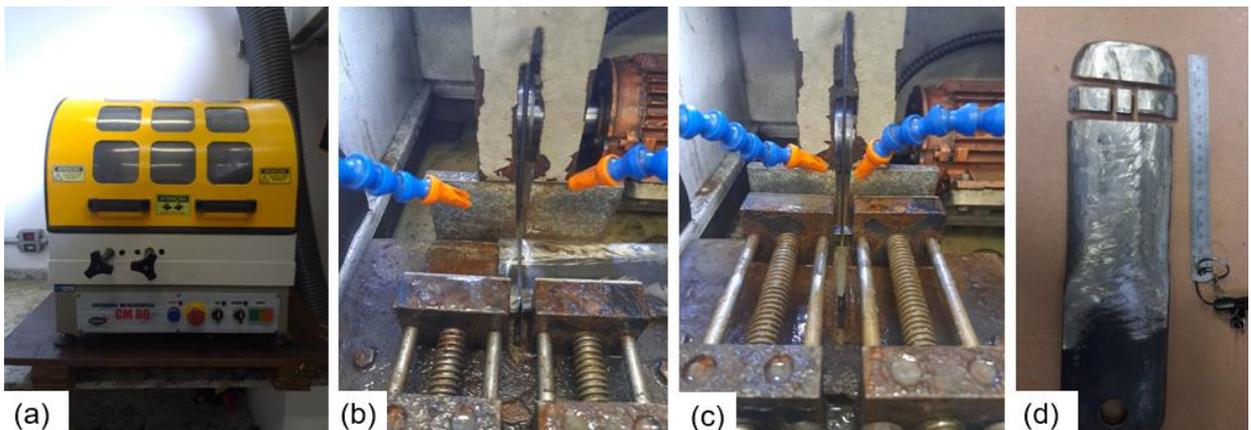
Figura 49: (a) Serra Franho; (b)(c)(d) ajuste e tentativa de corte da peça.



Fonte: Autora (2024)

O protótipo da faca da colheitadeira foi cortado pela Cortadora Metalográfica CUT-OFF para preparação dos corpos de provas para análises. Na Figura 50, pode-se observar o uso da Cortadora Metalográfica e o seu resultado.

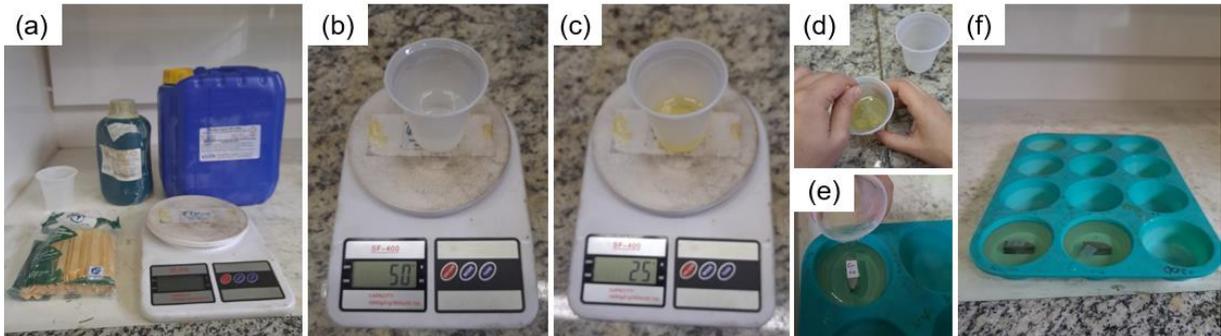
Figura 50: (a) Cutt-off; (b) (c) corte da peça; (d) peça após o corte.



Fonte: Autora (2024)

Para maior segurança na preparação dos Corpos de Prova - CP, eles foram embutidos em resina, dos quais foram utilizados 25 gramas de catalisador e 50 gramas de resina. Foram enformados com a mistura das duas soluções e desenformados depois de 72 horas de repouso. (Figura 51).

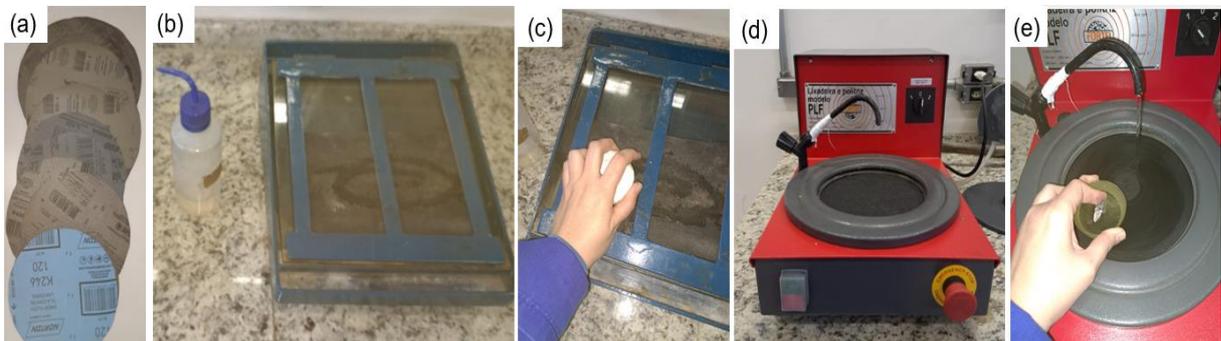
Figura 51: (a) Itens utilizados; (b) resina; (c) catalisador; (d)(e) preparo; (f) embutimento CP



Fonte: Autora (2024)

Após o embutimento, os corpos de prova foram preparados seguindo primeiro, as lixadeiras manuais e, em seguida as lixadeiras elétricas semiautomáticas obedecendo a ordem de granulometria das lixas das mais grossas para as mais finas. (Figura 52)

Figura 52: (a) Lixas utilizadas; (b) lixadeira manual; (d) lixadeira elétrica semiautomática; (c)(e) preparo do CP com as lixas

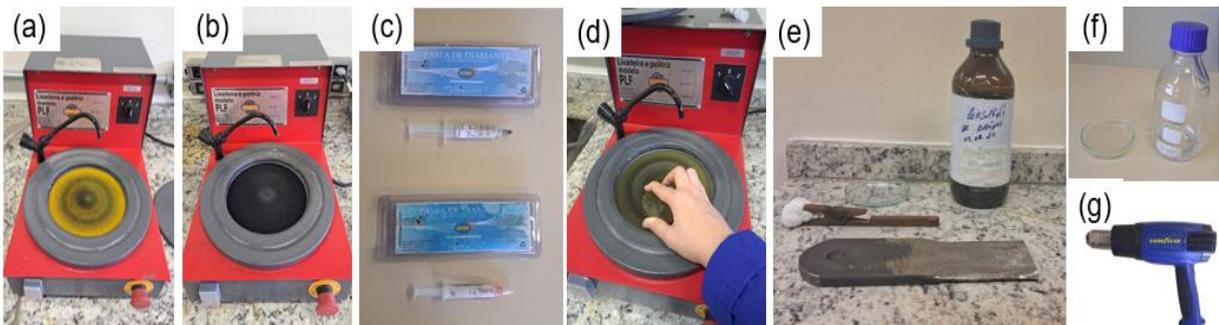


Fonte: Autora (2024)

Os corpos de prova foram encaminhados para as politrizes semiautomáticas para polimento com pasta de diamante de 3 microns e 1 micron respectivamente. Em seguida foram realizados dois ataques químicos: com Nital 3% (HNO_3 - ácido nítrico + Etanol - álcool etílico) para evidenciar os contornos de grãos e com Kalling (cloreto

cúprico + metanol + H₂O + HCL), devido sua matriz austenítica, foi utilizado com objetivo de escurecer a ferrita e a martensita e evidenciar a austenita (elas aparecem de cor clara com esta solução). Também foi utilizado o soprador térmico modelo GY-HG-48300-1, da marca *Good Year*, para secagem para análise (Figura 53).

Figura 53: (a)(b) Politrizes elétricas semiautomáticas; (c) pastas de diamante; (d) polimento do CP; (e) (f) ataques químicos; (g) soprador térmico.

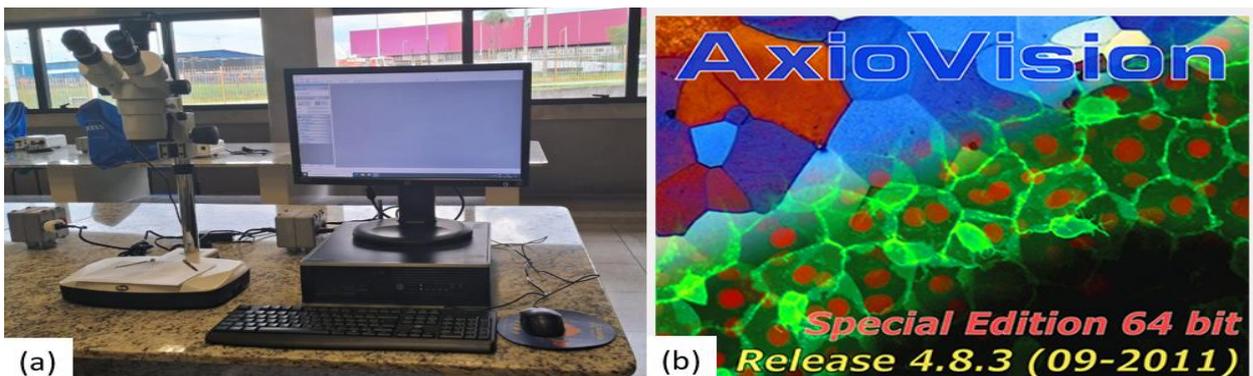


Fonte: Autora (2024)

3.8.2 Macrografias

As análises macrográficas foram realizadas no Laboratório de Microscopia da FATEC Itaquera, utilizando o estereoscópio ZEISS, onde as análises dimensionais foram efetuadas no software Top View 64 bit. *Release* 4.8.3. Conforme demonstrado na Figura 54, observa-se o estereoscópio digital e software que foram utilizados.

Figura 54: (a) Estereoscópio digital; (b) software utilizado para macrografia.

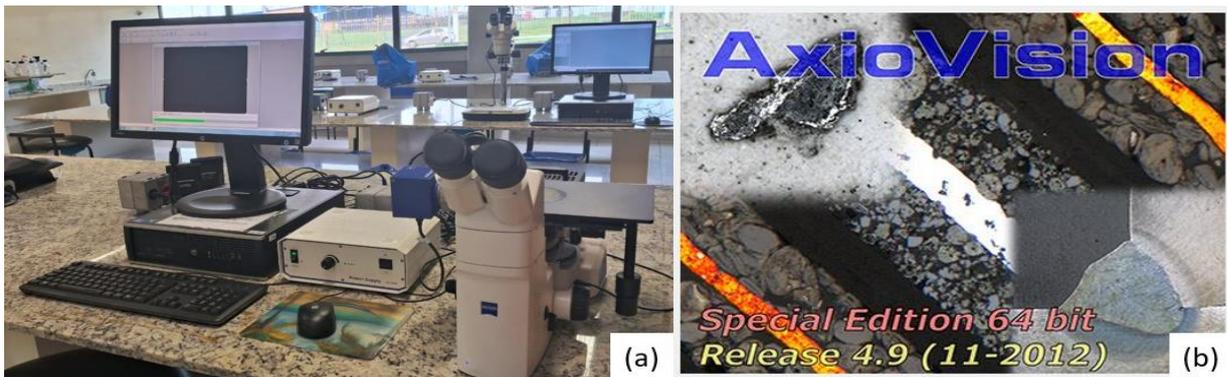


Fonte: Autora (2024)

3.8.3 Micrografias

As análises micrográficas foram realizadas no Laboratório de Microscopia com o microscópio digital ZEISS com aumento de 1000 vezes, através do software Axion Vision Release 4.9. Conforme demonstrado na Figura 55, se tem o microscópio digital e o software utilizado.

Figura 55: (a) Microscópio digital; (b) software utilizado para micrografia.



Fonte: Autora (2024)

3.9 Custos de Soldagem

Para a análise de custos de soldagem, foi necessário o levantamento de alguns dados que foram registrados a seguir. Na Tabela 17, demonstra-se os tempos de cada etapa do processo de soldagem realizado neste estudo.

Tabela 17: Tempo de Processo de Soldagem

TEMPO DE PROCESSO DE SOLDAGEM		
	Revestimento Duro	Amanteigamento
Tempo de Execução	00:49:59 \cong 0,83h	00:29:25 \cong 0,49 h
Tempo de Arco Aberto	00:06:28 \cong 0,10h	00:07:24 \cong 0,12 h
Tempo de Acabamento (feito apenas por didática)	00:20:10 \cong 0,34h	00:13:32 \cong 0,23 h
Tempo Total do Processo por Etapa	01:16:37 \cong 1,27h	00:50:21 \cong 0,84 h

Fonte: Autora (2024)

Na Tabela 18, analisou-se os dados levantados durante a soldagem do revestimento da peça de estudo.

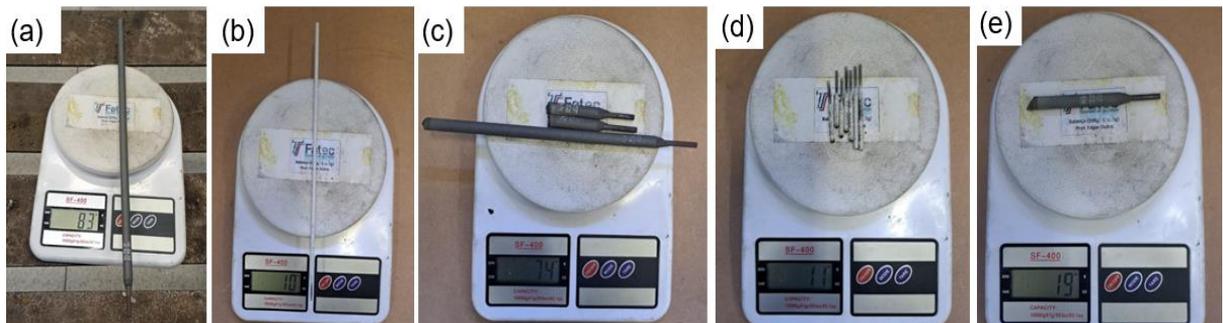
Tabela 18: Dados de Soldagem do Revestimento

DADOS DE SOLDAGEM DO REVESTIMENTO		
	Revestimento Duro	Amanteigamento
Peso inicial da peça [g]	1442	1487
Peso de um eletrodo E308L-16 (Amanteigamento) [g]	NA	10
Quantidade de eletrodos utilizados [unidades]	NA	7
Peso de sobra dos eletrodos utilizados [g]	NA	11
Peso total de consumível consumido (Amanteigamento.) [g]	NA	59
Peso de um eletrodo E 10-UM-60-GRZ [g]	83	83
Quantidade de eletrodos utilizados [unidades]	3	1
Peso de sobra dos eletrodos utilizados [g]	74	19
Peso total de consumível consumido (Carboneto de Cromo) [g]	175	64
Peso de Metal Depositado [g]	45	29
Peso final da peça [g]	1487	1516

Fonte: Autora (2024)

Na Figura 56, temos as evidências de pesagem dos consumíveis utilizados no processo, sendo o registro do peso do eletrodo antes do uso e as sobras após a soldagem.

Figura 56: Pesagem dos consumíveis (a) (b) antes do uso; (c) sobra da soldagem do carboneto de cromo; (d) (e) sobra da soldagem do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 57, existem as evidências de pesagem da peça antes de receber o revestimento soldado e após cada tipo de revestimento aplicado.

Figura 57: Pesagem da peça: (a) antes da soldagem; (b) após soldagem do revestimento duro; (c) após soldagem do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

4 RESULTADOS

4.1 Análise do Ensaio Visual

Os resultados da inspeção visual foram descritos na Tabela 19, adaptada com apenas os itens aplicados a este estudo.

Tabela 19: Resultado da inspeção visual

CATEGORIA DA DESCONTINUIDADE E CRITÉRIOS DA INSPEÇÃO VISUAL	CARBONETO DE CROMO	AMANTEIGAMENTO
(1) Proibição de Trincas	NC	C
(2) Fusão entre metal base e solda	C	C
(3) Crateras	NC	C
(4) Perfil das soldas	C	C
(5) Período de Inspeção	C	C
(6) Soldas Subdimensionadas	C	C
(7) Mordedura	C	C
(8) Porosidade: Item (B)	NC	C
(8) Porosidade: Item (C)	NC	C

- De acordo com a normativa: "C" indicam os itens conformes, e "NC" não conformes.

Fonte: Adaptado de AWS D.1/D1.1 (2020)

Na Figura 58 temos a evidência de reprovação da soldagem do carboneto de cromo de acordo com a AWS D.1.

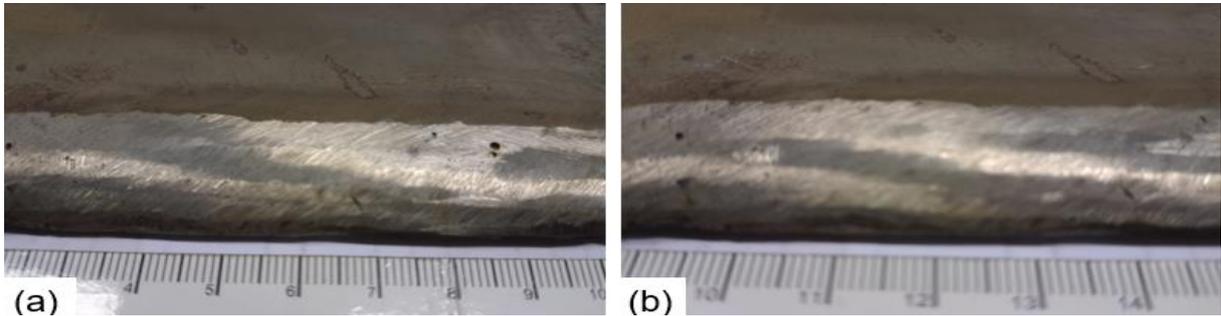
Figura 58: (a) (b) (c) Evidência do Ensaio Visual realizado no carboneto de cromo.



Fonte: Autora (2024)

O processo de soldagem com amanteigamento, embora tenha apresentado descontinuidades, estava dentro dos limites permitidos pela normativa. (Figura 59).

Figura 59: (a) (b) Evidência do Ensaio Visual realizado no amanteigamento



Fonte: Autora (2024)

4.2 Análise do Ensaio de Líquido Penetrante

Os resultados da análise do ensaio de líquido penetrante foram descritos na Tabela 20, adaptada com apenas os itens aplicados a este estudo.

Tabela 20: Análise do Ensaio de Líquido Penetrante

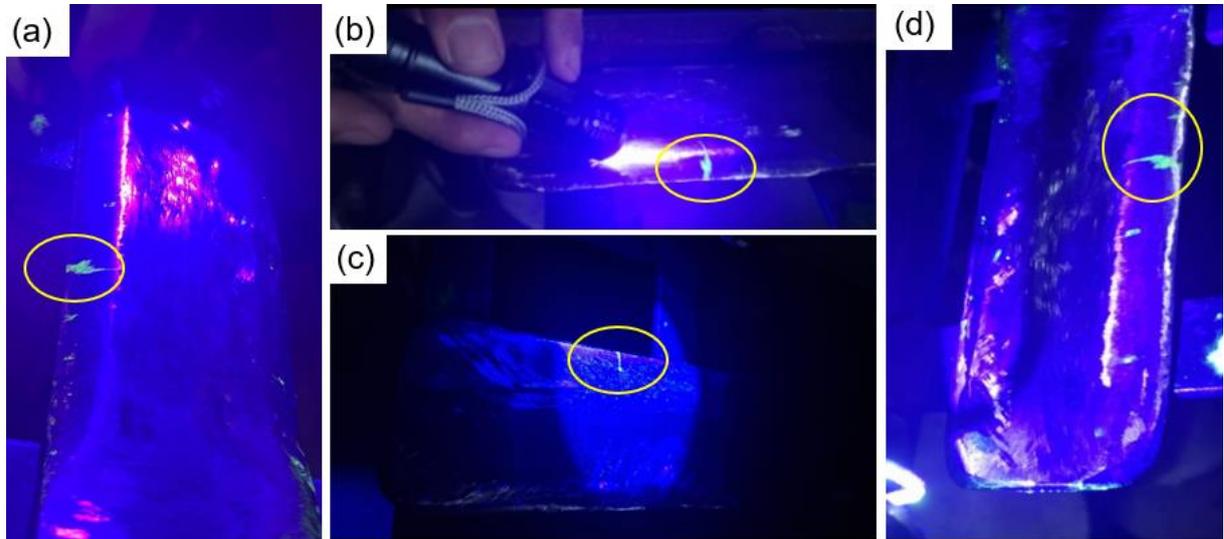
CATEGORIA DA DESCONTINUIDADE E CRITÉRIOS DA ENSAIO DE LP	CARBONETO DE CROMO	AMANTEIGAMENTO
(1) Proibição de Trincas	NC	C
(2) Fusão entre metal base e solda	C	C
(3) Crateras	NC	C
(4) Perfil das soldas	C	C
(5) Período de Inspeção	C	C
(6) Soldas Subdimensionadas	C	C
(7) Mordedura	C	C
(8) Porosidade: Item (B)	NC	C
(8) Porosidade: Item (C)	NC	C

- De acordo com a normativa: "C" indicam os itens conformes, e "NC" não conformes.

Fonte: Adaptado de ANDREUCCI (2019, p. 33)

Na Figura 60, existe a evidência de trincas transversais no carboneto de cromo encontradas no ensaio de LP fluorescente.

Figura 60: (a) (b) (c) (d) Trincas encontradas no revestimento duro



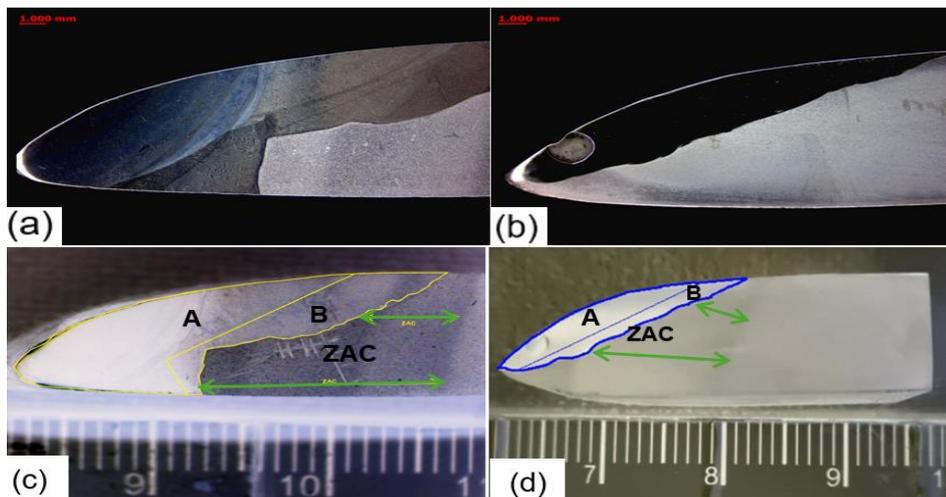
Fonte: Autora (2024)

4.3 Análises das caracterizações Macroestruturais e Microestruturais

4.3.1 Macrografia

Na Figura 61, tem-se a macrografia com aumento de 7 vezes, e as demarcações da Zona Fundida e da ZAC destes corpos de prova.

Figura 61: Macrografias (a) (c) do revestimento duro; (b)(d) do amanteigamento



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 62, são demonstrados os resultados encontrados com *Image J* sendo que as áreas representadas pela Linha 1, como valores de área total, o da Linha 2, valores de “B” e da Linha 3 os valores de “A”.

Figura 62: Resultados encontrados com *Image J* sendo (a) do Revestimento Duro e (b) do Amanteigamento

Results (a)					Results (b)				
File	Edit	Font	Results		File	Edit	Font	Results	
	Area	Mean	Min	Max		Area	Mean	Min	Max
1	103.338	174.278	0	236	1	46.344	51.203	27	168
2	33.046	134.866	65	255	2	20.433	49.732	31	92
3	70.602	193.481	0	255	3	27.165	51.999	27	184

Fonte: Autora (2024)

Baseados nestes valores, pode ser a área calculada da diluição, sendo que para a diluição do Revestimento Duro, observa-se:

$$\delta_{\text{Revestimento duro}} = \frac{B}{A+B} \rightarrow \delta_{Rd} = \frac{33,046}{70,602+33,046} \rightarrow \delta_{Rd} = 0,319 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

E para o Amanteigamento, a área de diluição foi :

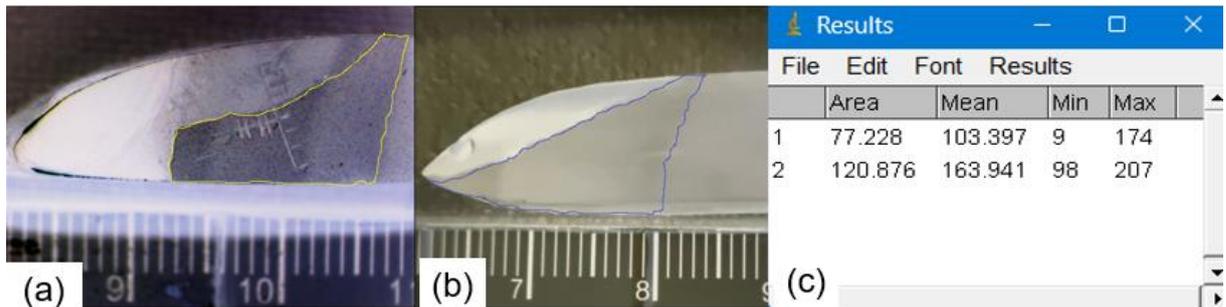
$$\delta_{\text{Amanteigamento}} = \frac{B}{A+B} \rightarrow \delta_A = \frac{20,433}{27,165+20,433} \rightarrow \delta_{Rd} = 0,429 \text{ mm}^2 \quad (16)$$

Foi observado que a soldagem apenas com o revestimento duro, teve menor diluição que a soldagem com o amanteigamento, no entanto, com grande volume de carboneto de cromo depositado, o que pode ter causado a trinca presente nos resultados deste estudo.

Na Figura 63, é notado o comparativo das ZAC's encontradas com *Image J*, onde podem ser evidenciados que a ZAC do amanteigamento foi maior que a ZAC do revestimento duro em 36,10%.

$$\text{Diferença Percentual} = \frac{120,876-77,228}{120,876} \cdot 100 \rightarrow DP = 36,10 \% \quad (17)$$

Figura 63: (a) ZAC do revestimento duro; (b) ZAC do amanteigamento (c) comparativo das áreas das ZAC's

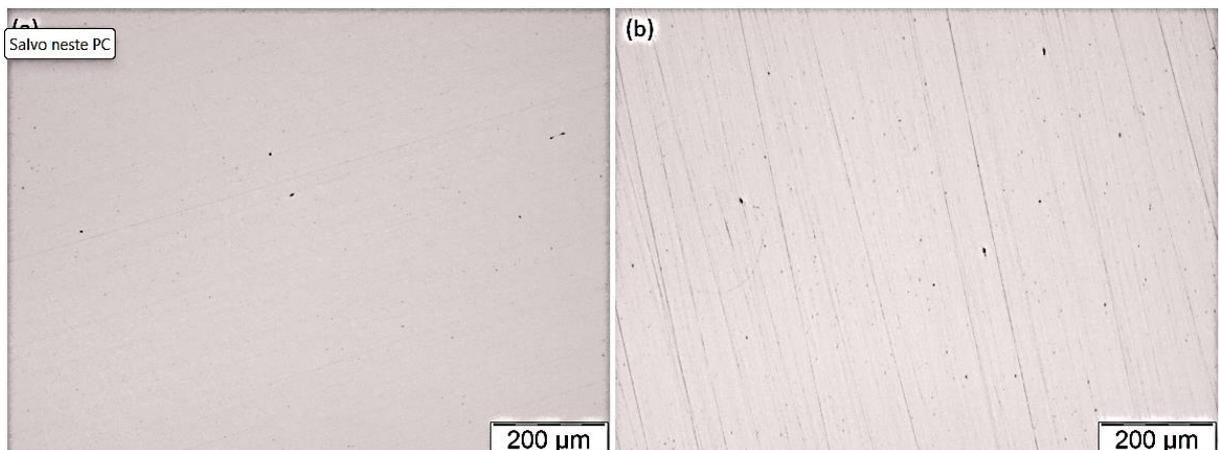


Fonte: Autora (2024)

4.3.2 Inclusões

Na Figura 64, temos a análise de inclusões com aumento de 100 vezes do metal de base. Constatando que o revestimento duro apresentou poucas inclusões em sua superfície polida e na amostra do material de base do amanteigamento, encontrou-se a superfície com inclusões e riscos do polimento.

Figura 64: Imagem com ampliação de 100 vezes para análise de Inclusões do Material de Base: (a) o metal de base do revestimento duro; (b) o material de base do amanteigamento.

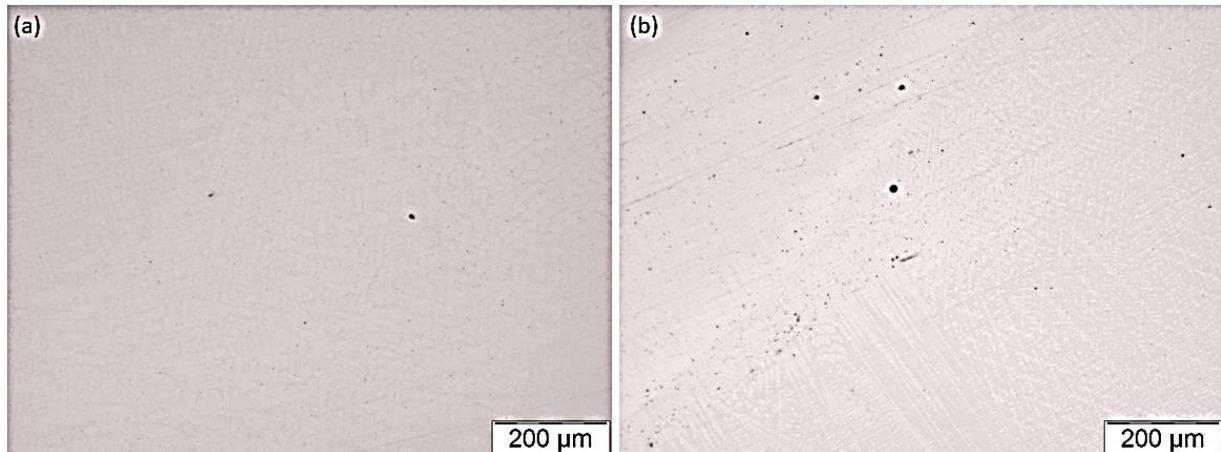


Fonte: Autora (2024)

Na Figura 65, efetuou-se a análise de inclusões com aumento de 200 vezes da zona fundida, sendo que na amostra do revestimento duro a superfície polida sem ataque, apresentou-se com poucas inclusões e a superfície polida sem ataque do

amanteigamento apresentou-se com algumas marcas do polimento e inclusões globulares, com características de óxidos.

Figura 65: Imagem com ampliação de 200 vezes para análise de Inclusões da Zona Fundida: (a) a zona fundida do revestimento duro; (b) a zona fundida do amanteigamento



Fonte: Autora (2024)

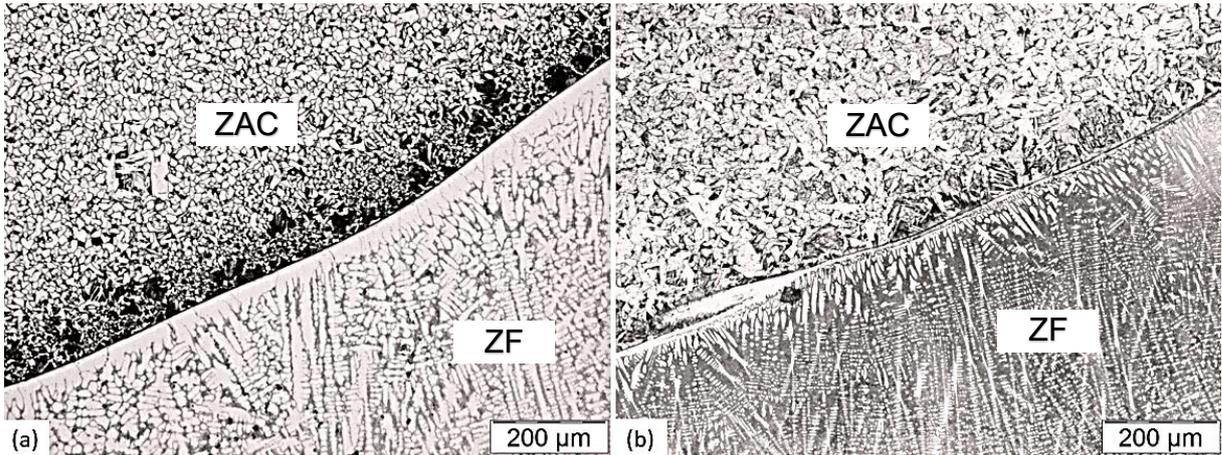
4.3.3 Micrografia

Na micrografia da interface da solda, no processo de soldagem com carboneto de cromo (a) nota-se que a existência de uma maior concentração de perlita na linha de ligação, com ferrita e perlita em sua parte inferior, e um maior refinamento de grãos de ferrita primária na microestrutura da ZAC, se comparada à técnica de amanteigamento. Foi notada a presença de dendritas de austenítica e ferrita vermicular do consumível à base de carboneto de cromo, conforme demonstrado na Figura 66-a.

No amanteigamento (Figura 66-b), observou-se uma ZAC com ferrita de segunda fase e perlita, com crescimento de grão. Esta alteração no tamanho de grãos reflete-se em aumento da resistência mecânica no carboneto de cromo e diminuição da resistência mecânica no amanteigamento. No que diz respeito à zona fundida, verificou-se a presença de dendritas de austenita numa matriz ferrítica, refletindo a maior diluição do eletrodo E308L com o material SAE 1020.

Na Figura 66, existem as micrografias da interface da solda e ZAC com aumento de 100 vezes.

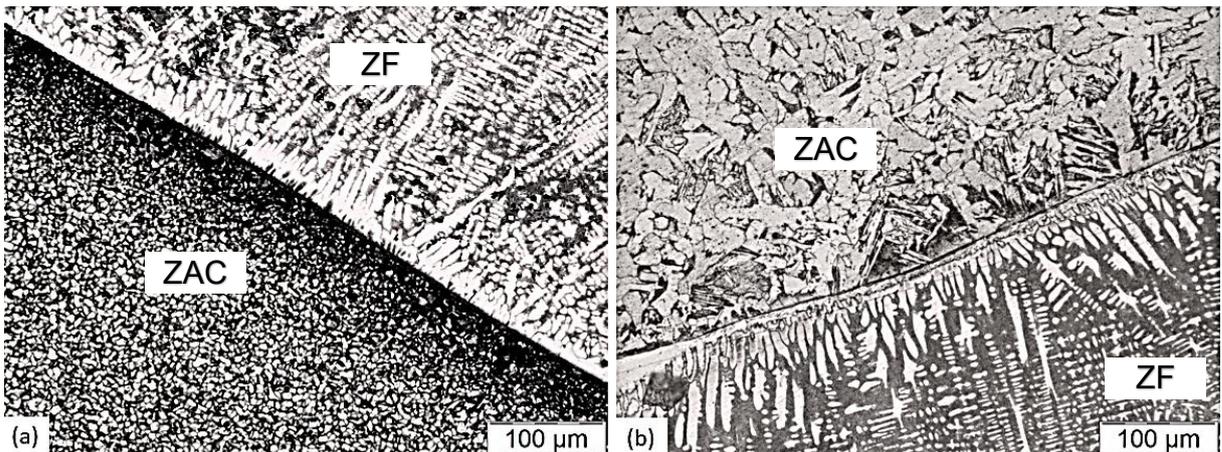
Figura 66: Micrografia com aumento de 100 vezes da ZAC: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 67, temos a micrografia da ZAC com aumento de 200 vezes, demonstrado as diferenças significativas entre as ZAC's dos dois métodos aplicados, bem como suas zonas fundidas.

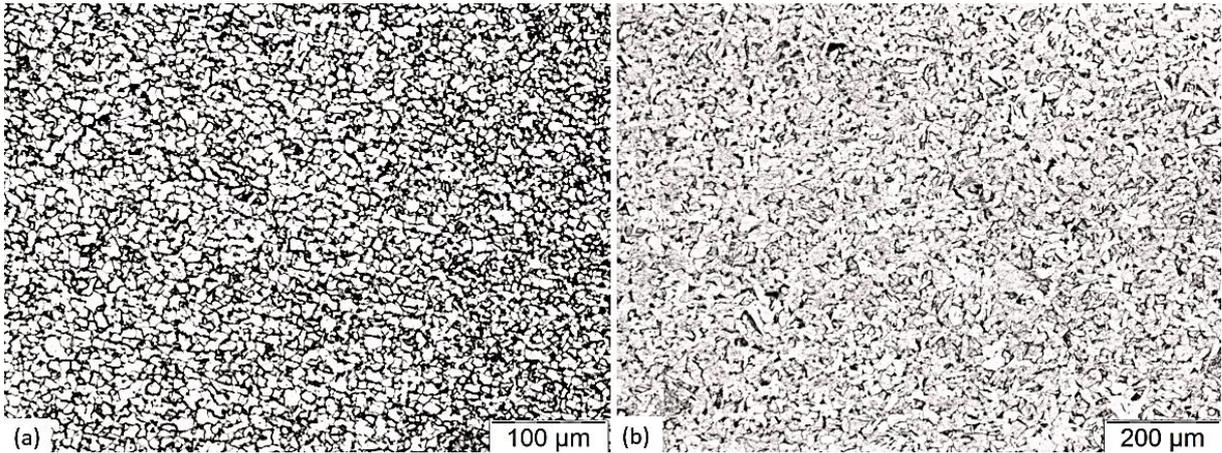
Figura 67: Micrografia com aumento de 200 vezes da ZAC: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na micrografia do Metal de Base, no processo de soldagem com carboneto de cromo (a) nota-se que base a microestrutura apresentou ferrita e perlita. No amanteigamento (b), observa-se as mesmas microestruturas, com algumas inclusões não metálicas. Na Figura 68, são demonstradas as micrografias do metal de base de ambos os métodos, com aumento de 100 vezes.

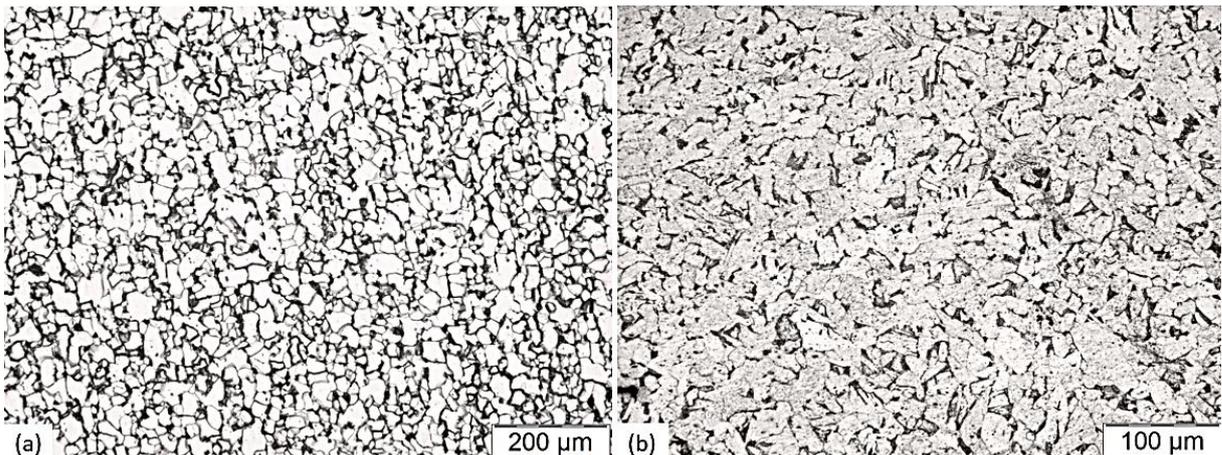
Figura 68: Micrografia de 100 vezes do Metal de Base: (a) do revestimento duro; (b) o metal de base do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 69, as micrografias do metal de base com aumento de 200 vezes, não tiveram diferenças significativas, apresentando ferrita primária e perlita.

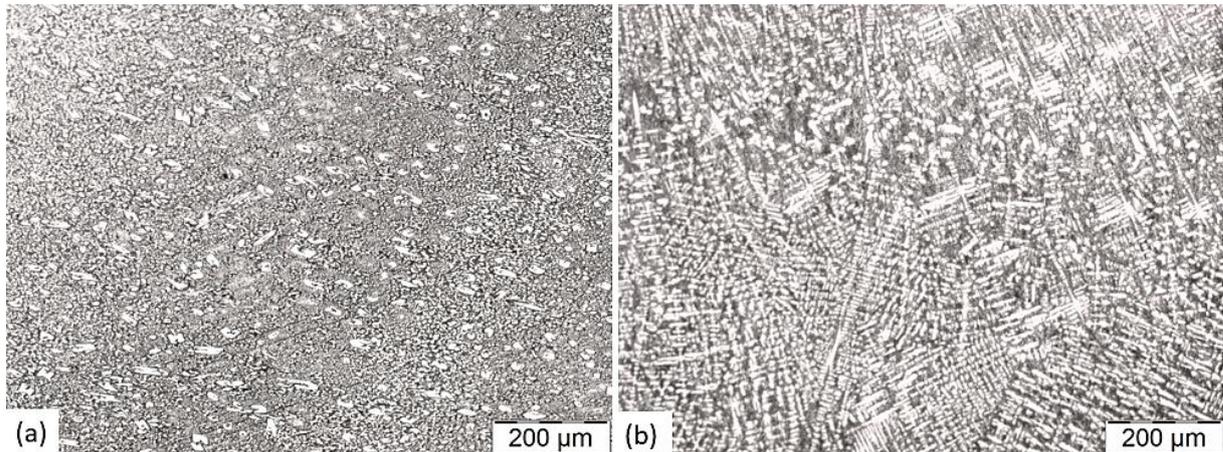
Figura 69: Micrografia de 200 vezes do Metal de Base: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na micrografia da Zona Fundida, no 1º passe de solda: nota-se que processo de soldagem com carboneto de cromo (a) tem mais carbonetos esferioidizados dispersos numa matriz martensítica. E no amanteigamento (b), observa-se dendritas de austenita numa matriz ferrítica, devido ao uso do E308L-16. Na Figura 70, demonstra-se a zona fundida do 1º passe de solda com aumento de 100 vezes.

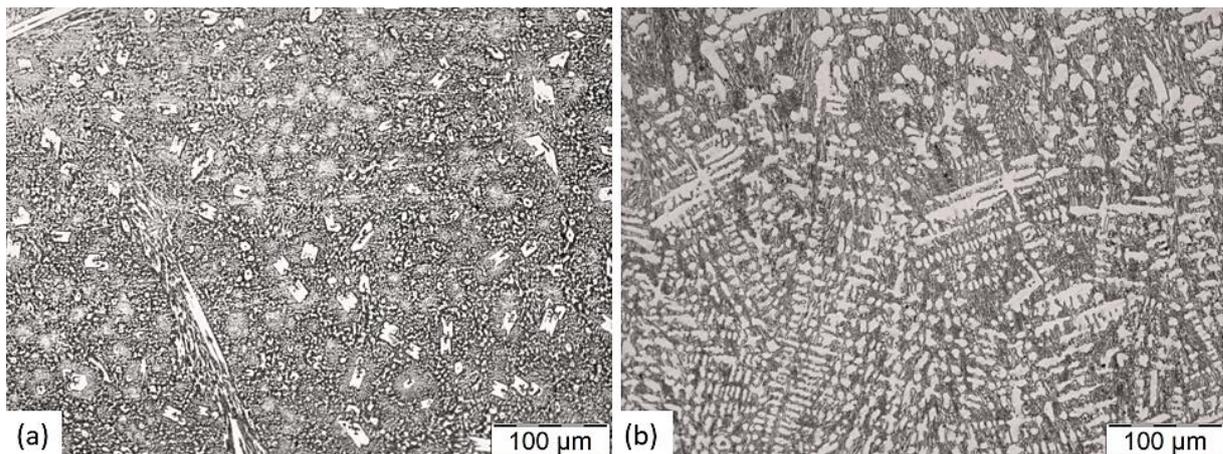
Figura 70: Micrografia de 100 vezes da Zona Fundida do 1º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 71, a zona fundida do 1º passe de solda com aumento de 200 vezes, demonstra a grande diferença entre as microestruturas.

Figura 71: Micrografia de 200 vezes da Zona Fundida do 1º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.

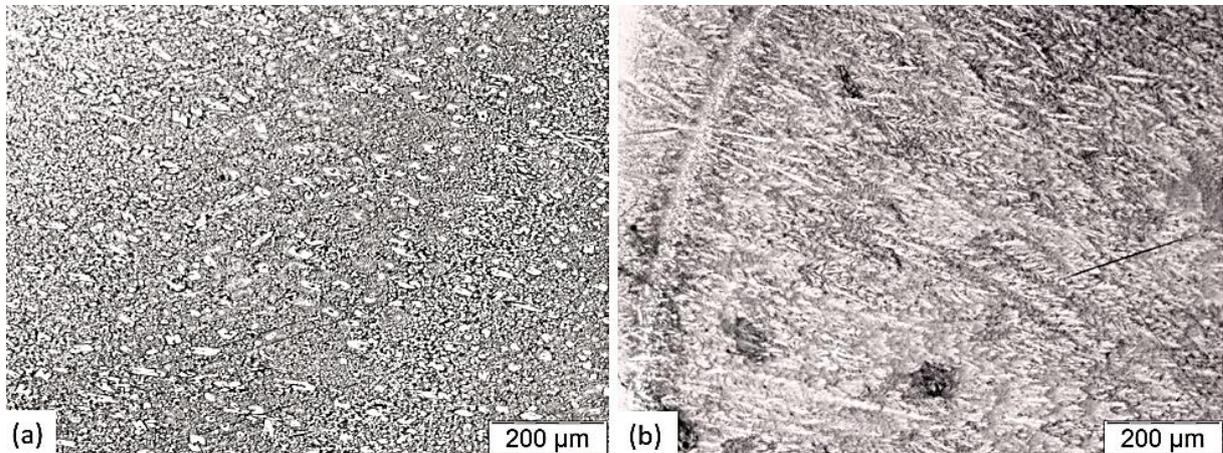


Fonte: Autora (2024)

Na micrografia da Zona Fundida, no 2º passe de solda: nota-se que processo de soldagem com carboneto de cromo (a) obtêm-se martensita revenida, bainita e alguns carbonetos dispersos. No amanteigamento (b) temos uma região carbonetada e martensítica. Portanto, o carboneto de cromo possui (devido a presença de bainita) dureza menor e maior ductilidade que o amanteigamento (devido a presença de

martensita). Na Figura 72, analisa-se a zona fundida do 2º passe de solda com aumento de 100 vezes.

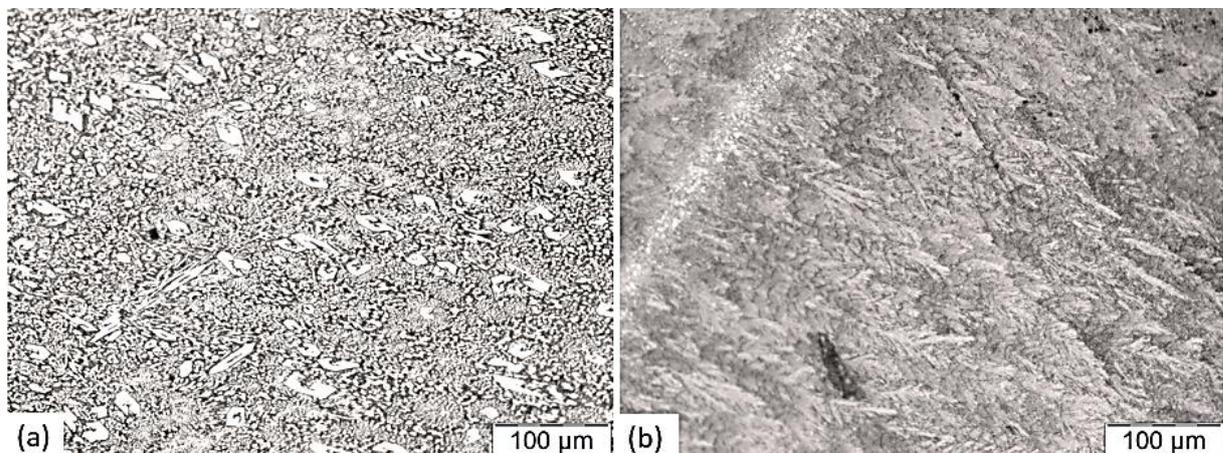
Figura 72: Micrografia de 100 vezes da Zona Fundida do 2º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 73, observou-se a zona fundida do 2º passe de solda com aumento de 200 vezes e as diferenças microestruturais.

Figura 73: Micrografia de 200 vezes da Zona Fundida do 2º passe de solda: (a) do revestimento duro; (b) do amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

4.4 Análise de Dureza Vickers

Para este estudo, foram analisados 15 pontos de dureza no corpo de prova, em diferentes áreas conforme demonstradas nas Tabelas abaixo.

Na Tabela 21, obteve-se os resultados da análise de dureza do carboneto de cromo (revestimento duro).

Tabela 21: Resultados da análise de dureza do revestimento duro

REVESTIMENTO DURO - DUREZA (HV 0,3)		
Ponto	Ponto	Dureza
1	Metal de Base - MB	152
2	Metal de Base - MB	132
3	Metal de Base - MB	142
4	Metal de Base - MB	138
5	Metal de Base - MB	140
6	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	152
7	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	152
8	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	145
9	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	152
10	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	149
11	Zona Fundida - ZF	598
12	Zona Fundida - ZF	579
13	Zona Fundida - ZF	618
14	Zona Fundida - ZF	558
15	Zona Fundida - ZF	608

Fonte: Autora (2024)

Na Tabela 22, temos os resultados da análise de dureza do amanteigamento.

Tabela 22: Resultados da análise de dureza do amanteigamento

AMANTEIGAMENTO - DUREZA (HV 0,3)		
Ponto	Ponto	Dureza
1	Metal de Base - MB	165
2	Metal de Base - MB	187
3	Metal de Base - MB	157
4	Metal de Base - MB	163
5	Metal de Base - MB	160
6	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	167
7	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	160
8	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	174
9	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	171
10	Zona Afetada pelo Calor - ZAC	152
11	Zona Fundida - ZF	543
12	Zona Fundida - ZF	639
13	Zona Fundida - ZF	629
14	Zona Fundida - ZF	570
15	Zona Fundida - ZF	570

Fonte: Autora (2024)

Na Tabela 23, temos a média dos resultados encontrados.

Tabela 23: Média dos resultados de dureza encontrados

RESULTADOS				
Média (HV)	MB	ZAC	ZF	Média
Revestimento Duro (E 10-UM-60-GRZ)	345	369	150	288
Amanteigamento (E 308L + E 10-UM-60-GRZ)	379	382	164	308

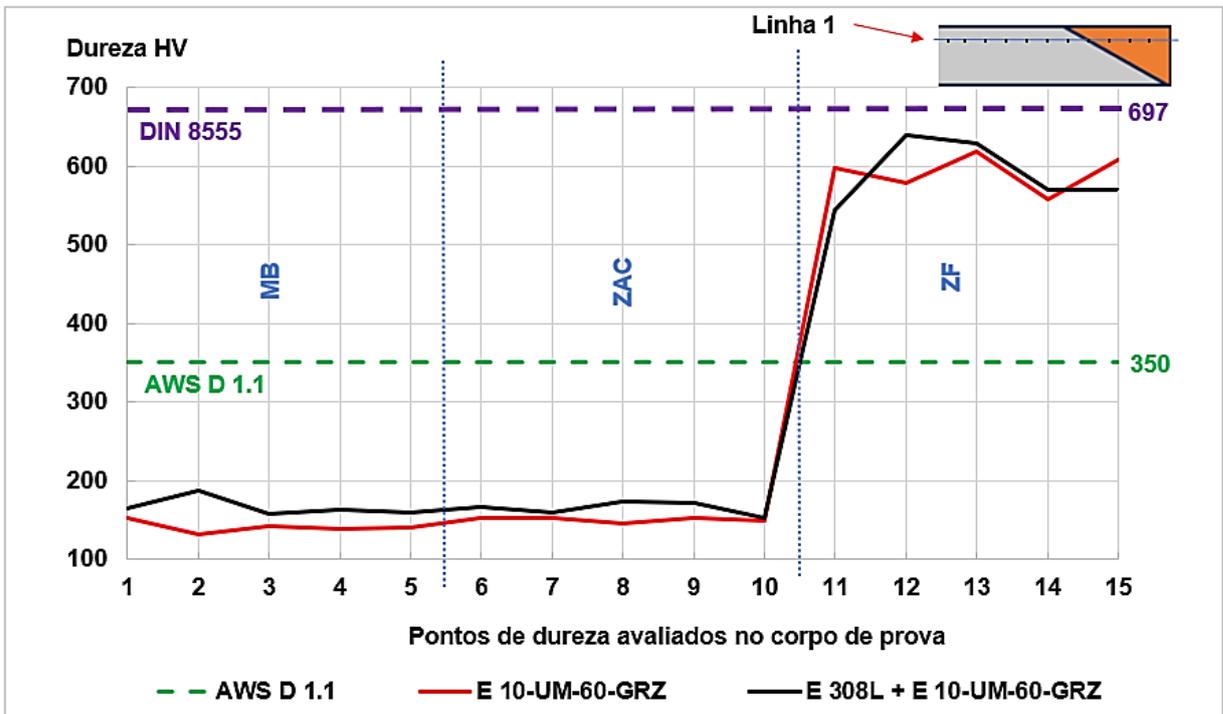
Fonte: Autora (2024)

De acordo com a AWS D 1.1, os limites de dureza da ZAC não podem exceder 350 Vickers (HV) e ambos os processos não excederam os limites de tolerância estabelecidos pela norma utilizada.

Na Zona Fundida, a dureza do cordão de solda estabelecida pela norma alemã DIN 8555 (1983), é de 60 Rockwell C (HRC), ou seja, 697 Vickers (VH). Os resultados do ensaio de dureza trouxeram valores próximos ao valor estabelecido pela normativa.

Para melhor comparação dos dados citados, foi elaborado um gráfico de dureza de acordo com os dados obtidos, conforme apresentado na Figura 74.

Figura 74: Gráfico comparativo dos ensaios de dureza Vickers.



Fonte: Autora (2024)

4.5 Análise de Custos

Além dos valores levantados em laboratório durante a soldagem, descritos no Item 3.9, necessitou-se dos valores de rendimento de soldagem e dos valores da Eficiência de Deposição (rendimento) dessa solda. Segundo Brito e Paranhos (2005, p.38), a eficiência de deposição pode ser de acordo com a equação (2) abaixo.

$$ED_{\text{Revestimento Duro}} = \frac{\text{Metal Depositado (g)}}{\text{Material Consumido (g)}} \rightarrow ED_{RD} = \frac{45 \text{ g}}{175 \text{ g}} \rightarrow ED_{RD} = 0,257$$

$$ED_{\text{Amanteigamento}} = \frac{\text{Metal Depositado (g)}}{\text{Material Consumido (g)}} \rightarrow ED_A = \frac{29 \text{ g}}{64 + 59 \text{ g}} \rightarrow ED_A = 0,235$$

Com o levantamento de todos os dados em mãos, e incluindo os valores de custos médio de mão de obra e energia elétrica, podem ser avaliados a viabilidade econômica conforme demonstrado na Figura 75.

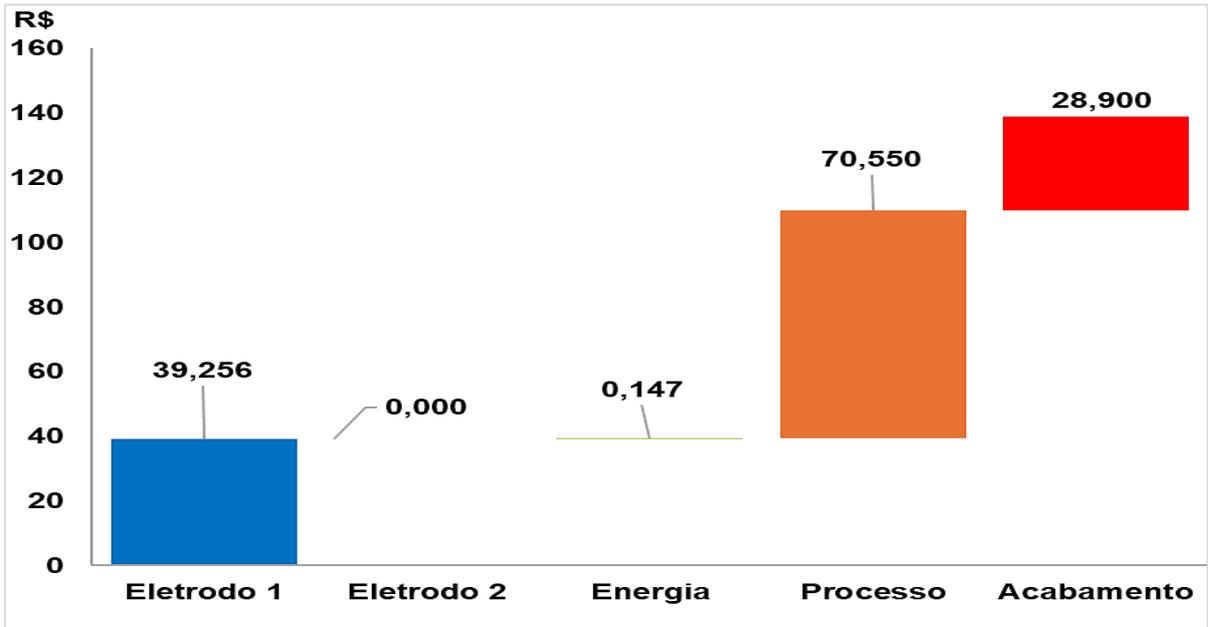
Figura 75: Viabilidade Econômica

TIPO	DESCRIÇÃO	VERIFICAÇÕES DO PROCESSO CONFORME CUSTO DO RENDIMENTO DO PROCESSO						Custo
Carboneto de Cromo (E 10-UM-60-GRZ)	C1 - Eletrodo de revestimento (R\$/Kg)	Custo (R\$/Kg)	Material (Kg)	Rendimento (%)				R\$ 39,256
		57,65	0,175	25,7				
	C2 - Eletrodo de amanteigamento (R\$/Kg)	Custo (R\$/Kg)	Material (Kg)	Rendimento (%)				
		0	0	0				
	C3 - Energia (R\$)	Custo (KWh)	T. de Arco (hs)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (KW)	Eficiência (%)	R\$ 0,147
0,88		0,1	9,9	160	1,584	95		
C4 - Processo (R\$)	L+O (R\$/h)	Tempo (hs)	φ (%)	T. de Arco (hs)			R\$ 70,550	
	R\$ 85,00	0,83	12%	0,1				
C5 - Acabamento (R\$)	L+O (R\$/h)	Tempo (hs)					R\$ 28,900	
	R\$ 85,00	0,34						
Amanteigamento (E 308L + E 10-UM-60-GRZ)	C1 - Eletrodo de revestimento (R\$/Kg)	Custo (R\$/Kg)	Material (Kg)	Rendimento (%)				R\$ 15,700
		57,65	0,064	23,5				
	C2 - Eletrodo de amanteigamento (R\$/Kg)	Custo (R\$/Kg)	Material (Kg)	Rendimento (%)				R\$ 25,295
		100,75	0,059	23,5				
	C3 - Energia (R\$)	Custo (KWh)	T. de Arco (hs)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (KW)	Eficiência (%)	R\$ 0,158
0,88		0,12	9,5	150	1,425	95		
C4 - Processo (R\$)	L+O (R\$/h)	Tempo (hs)	φ (%)	T. de Arco (hs)			R\$ 21,250	
	R\$ 85,00	0,25	48%	0,12				
C5 - Acabamento (R\$)	L+O (R\$/h)	Tempo (hs)					R\$ 8,500	
	R\$ 85,00	0,1						

Fonte: Adaptado de Brito e Paranhos (2005); Modenesi (2001) e Dutra (2020)

Para melhor análise dos custos despendidos, podem ser analisados os gráficos abaixo. A Figura 76 observa-se a representação gráfica dos custos do processo de soldagem com carboneto de cromo (revestimento duro).

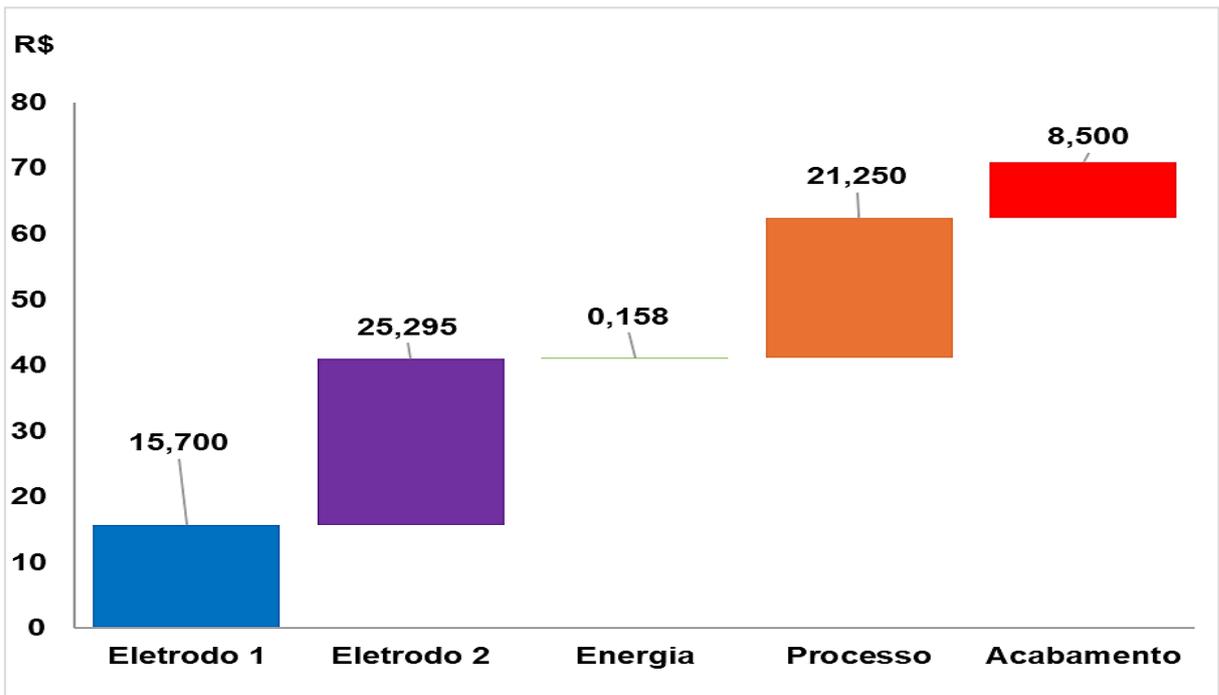
Figura 76: Custos do processo de soldagem do revestimento duro



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 77, temos a representação gráfica dos custos de processo de soldagem com amanteigamento.

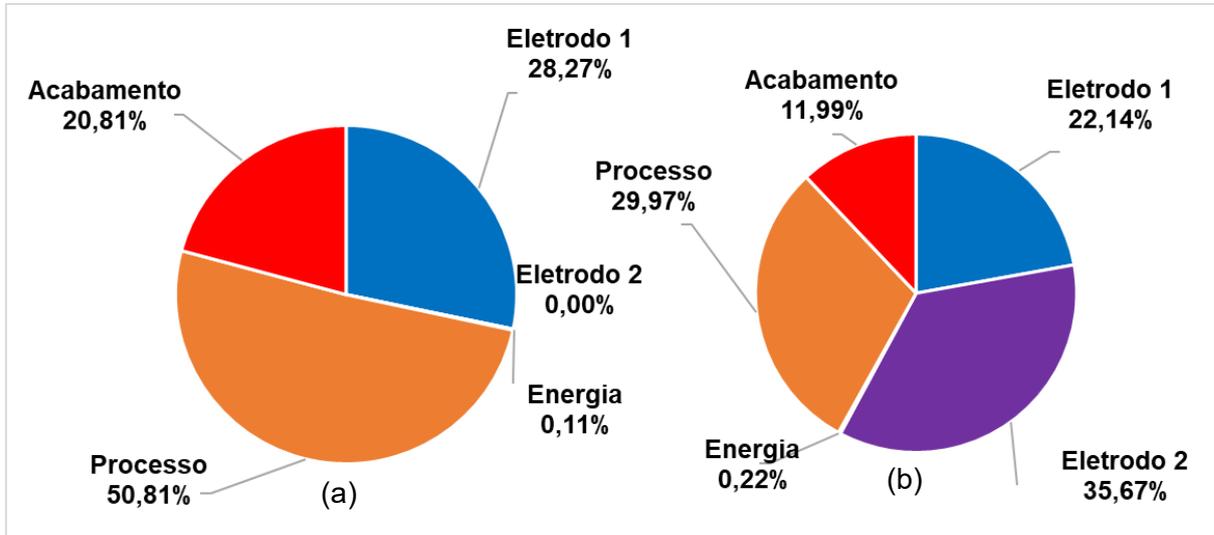
Figura 77: Custos do Processo de Soldagem com Amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 78, existe a representação da composição de custos e o comparativo por etapa dos dois processos que foram estudados.

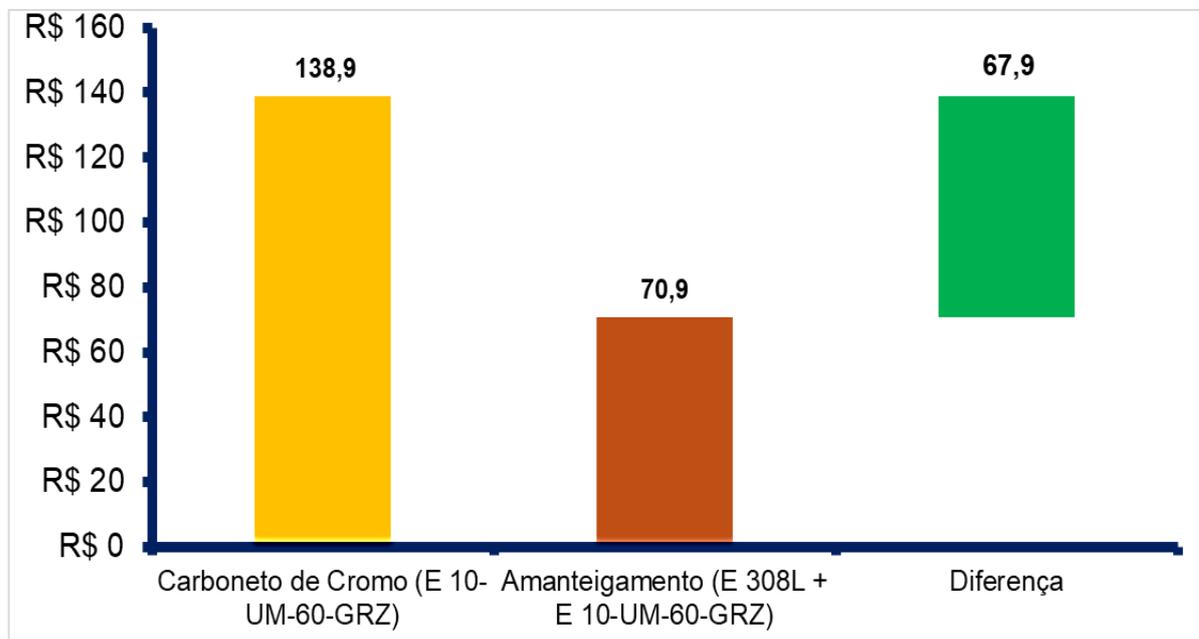
Figura 78: Composição de Custos: (a) Revestimento duro, (b) amanteigamento.



Fonte: Autora (2024)

Em resumo, a Figura 79 a representação gráfica dos custos totais do processo deste estudo, demonstrando um menor custo na técnica de amanteigamento.

Figura 79: Comparativo de Custos Totais



Fonte: Autora (2024)

Em resumo, observou-se uma redução de 48,88% no custo com a técnica de soldagem com amantejamento em sinergia com o revestimento de carboneto de cromo, comparando-se com a soldagem de revestimento utilizando apenas o carboneto de cromo, fazendo-se uso do processo de Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW).

5 CONCLUSÃO

A metodologia utilizada para os procedimentos de soldagem aplicadas aos revestimentos com carboneto de cromo (revestimento duro / E 10-UM-60-GRZ) e com o amanteigamento (E 308L + E 10-UM-60-GRZ), demonstraram a possibilidade de avaliar os dois procedimentos em condições individuais, permitindo concluir que:

- No Ensaio Visual ocorreu a reprovação da soldagem do carboneto de cromo de acordo com a AWS D.1.1, a soldagem com amanteigamento embora tenha apresentado descontinuidades, estava dentro do limite permitido pela AWS D1.1.

- No Ensaio de Líquido Penetrante, foi evidenciado a presença de trincas transversais onde foi realizado o revestimento duro, reprovando a mesma.

- Em ambos os processos, o ensaio de dureza nos demonstrou que os limites de dureza da ZAC não excederam os limites de tolerância estabelecidos pela AWS D 1.1. E na Zona Fundida, também em ambos os processos, a dureza do cordão de solda estabelecida pela norma alemã DIN 8555 foram próximos ao valor estabelecido pela normativa.

- Na Macrografia, foi evidenciado que o processo de soldagem com carboneto teve menor diluição do que o processo de soldagem com amanteigamento. A ZAC do processo com amanteigamento foi maior do que o processo de soldagem com carboneto de cromo em 36,10%. Assim, sendo mais expressiva no processo com amanteigamento. O que é pertinente ao processo de Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW).

- Na micrografia foram encontrados inclusões globulares e refinamento de grãos no carboneto de cromo, assim como um aumento de grãos no amanteigamento. Esta alteração no tamanho de grãos reflete-se em aumento da resistência mecânica no carboneto de cromo e diminuição da resistência mecânica no amanteigamento. No que diz respeito à zona fundida, verificou-se a presença de dendritas de austenita numa matriz ferrítica, refletindo a maior diluição do eletrodo E308L com o material SAE 1020.

- Os custos com a soldagem de revestimento com carboneto de cromo foram mais elevados que com a soldagem de revestimento com amanteigamento, utilizando o processo de Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW).

É muito comum notar-se trincas transversais nesse tipo de revestimento, elas são comuns e até aceitáveis. Não são aceitáveis as trincas longitudinais pois os

revestimentos, tendem a serem danificado, ou até removidos. Porém, obteve-se sua reprovação por estar utilizando a normativa AWS D.1. Com amanteigamento, o revestimento foi aprovado. Nessa demonstração, o processo de soldagem com amanteigamento se tornou mais eficaz, tanto do ponto de vista técnico como econômico, podendo beneficiar tanto os fornecedores como consumidores de facas colheitadeiras e de seus produtos gerados de forma indireta.

REFERÊNCIAS

AGRICORTE peças Agrícolas com tecnologia anti-desgaste. Disponível em: <https://www.agricorte.com.br/> Acesso em 22 nov 2024.

ANDRADE, J. F. S.; MENDES, F. R.; VENTURA, A. C. M. Jr. **Comparação de revestimento duro em facas picadoras de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro com arame tubular e eletrodo revestido.** Simpósio de Tecnologia – Sitefa – Fatec Sertãozinho-SP, 2021.

ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes.** 55 páginas. ABENDI, São Paulo, 2019.

ARAUJO, A. C.; MOUGO A. L.; CAMPOS, F. O. **Usinagem para Engenharia, um curso de Mecânica de Corte.** Versão Digital por Kindle *Direct Publishing*. Rio de Janeiro, 2020. Versão Impressa pela Editora *E-papers*. ISBN 978-65-00-08056. (*E-book*) Livro Eletrônico: 344 páginas.

ASME II, *Section II, Materials, Part C, Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals.* **Boiler and Pressure Vessel Code An International Code.** 966 Páginas. Pdf. 2019.

ASME IX, *Section IX, Welding Brazing, and Fusing Qualifications.* **Boiler and Pressure Vessel Code An International Code.** 367 Páginas. Pdf. 2019.

AWS A2.4, *American National Standard.* **Standart Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination.** 109 páginas. Pdf. 1998.

AWS D1.1/D1, *American National Standard.* **Structural Welding Code-Steel.** 635 páginas. Pdf. 2020.

BÁLSAMO, P. S. S. **Influência dos TeorLes de Carbono, Cromo e Energia de Soldagem Sobre a Resistência ao Desgaste de Ligas Soldadas da Classe Fe-Cr-C.** 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 138 p. Pdf. 1995.

BARNES, M. G., Loughran, J. G.; Whiteing, C.; Lamb, B. W. *Development and testing of a sugarcane harvester single drum chopper system. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 31 (2009), páginas 546-555.

BRANDÃO, J. E. **Tecnologia da Soldagem**. Belo Horizonte: Editora PUC Minas, 2019; ISBN (versão digital): 978-85-829-120-7. (E-book) Livro eletrônico: 1371 páginas.

BRITO, J. D.; PARANHOS, R. **Como determinar os Custos da Soldagem**. Campos de Goytacazes-RJ, 2005. 73 páginas.

BUCHANAN, V. E.; SHIPWAY, P. H.; MCCARTNEY, D. G. *Microstructure and Abrasive Wear Behavior of Shielded Metal Arc Welding Hardfacings Used in the Sugarcane Industry. Wear*. p. 1-12, Pdf. 2007.

BUCHELY, M. F.; GUTIERREZ, J. C.; LÉON, L. M. & TORO, A. *The Effect of Microstructure on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys. Tribology International*. v.259, p. 52-61, Pdf. 2005.

CARCELLER, R. C. **Influencia de los Parâmetros del Régimen de Recargue em la Morfologia de los Depósitos de Acero e Fundición Blanca al Cromo y su incremento em la Resistencia al Desgaste Abrasivo**. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Mecánica, República de Cuba, Tesis de Doctorado em Ciências Técnicas, 2007, Pdf. 154 p.

CHERUBIN. N. **Entressafra mais longa impactará manutenções?** RPA News cana & indústria. Ed 203. 01 nov. 2018. Disponível em: <<https://revistarpanews.com.br/especial-entressafra-mais-longa-impactara-as-manutencoes/>>. Acesso em 05 nov. 2024.

Tecnologia & Benefícios: **Saiba mais sobre essa máquina agrícola tão importante para os produtores rurais**. Tecnologia no campo, 2023. Disponível em: <<https://tecnologianocampo.com.br/colheitadeira/>>. Acesso em 13 nov. 2023.

COLHEITADEIRA de Grãos Série S. SLC Máquinas. Disponível em: <<https://www.slcmáquinas.com.br/page/pt/colheitadeiras/s%C3%A9rie-s>>. Acesso em 02 out. 2024.

CORRÊA, E. O.; ALCÂNTARA, N. G.; TECCO, D. G.; KUMMAR, R. V. **Avaliação de Resistência ao Desgaste de Ligas Fe-Cr-C-Nb-V Desenvolvidas para a Solda de Revestimento Duro para Uso Sob Condições Altamente Abrasivas**. 8^{vo} Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIBIM 8, 23 a 25 de outubro, Cusco, Peru, Pdf. 2007.

CROPPER DWG Elevation for Autocad. **Designs cad**. Disponível em: <<https://designscad.com/downloads/cropper-dwg-elevation-for-autocad/>>. Acesso em 02 out. 2023.

DIN 8555, Deutsche Norm. **Filler metals uses for surfacing**, tradução em inglês, 08 páginas. Pdf. 1983.

DUTRA, E. S. **Análise técnica e econômica da soldagem robotizada de vasos de pressão utilizando os arames maciço e metal cored sob atmosfera ativa**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 146 folhas. São Paulo, Pdf. 2020.

EL SHAL, A.M.; MAZROU, Y.S.; EL DIDAMONY, M.I. **Engineering and Economic Evaluation of a Prototype Fabricated for Harvesting Sugarcane**. *Designs* 2022, 6, 40. <https://doi.org/10.3390/designs6030040>. Academic Editor: Julian D. Booker Received: 4 March 2022 Accepted: 18 April 2022 Published: 20 April 2022.

ESAB. **ELETRODOS Revestidos (SMAW)**. Disponível em: <<https://assets.esab.com/assetbank-esab/assetfile/48530.pdf>>. Acesso em 29 out. 2024.

FRATARI, R. Q.; SCHVARTZMAN, M. M. A. A.; SCOTTI, A. **Otimização dos parâmetros de tecimento para confecção de amanteigamento de chapas de aço pelo processo TIG com arame AWS ER 309L**. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Belo Horizonte-MG, 2009.

GERDAU, Aços Finos Piratini. **Manual de Aços**. 2023. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf>. Acesso em 29 out. 2023.

HERNÁNDEZ, O. J. S. **Otimização do Consumível na Solda de Revestimento Aplicada na Indústria Sulcroalcooleira**. Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 102 p. pdf. 1997.

LEITE, Paulo Gomes de P. **Ensaio não destrutivo**. Associação Brasileira de Metalurgia. 600 páginas. São Paulo, 1984.

LIMA, A. C. **Estudo da Aplicação de Revestimento Duro por Soldagem com Arames Tubulares quanto à Resistência ao Desgaste de Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar**. 232 páginas. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, MG, 2008.

LIMA, A. C. e FERRARESI, V. F. **Desgaste em equipamentos de processamento da cana-de Açúcar em destilaria de álcool**. 16 POSMEC – Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFU-MG, Uberlândia. 2 a 5 de outubro, 2006.

LIMA, A. C e FERRARESI; A. F. **Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar**. 102 páginas. Artigo, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, Goiânia, Goiás e Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2010.

LIMA, A. C. e WINCK, L. B. **Análise Comparativa de Dois Eletrodos Revestidos Utilizados na Aplicação de Revestimentos Duros em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar.** XXXII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Belo Horizonte, MG. 2 a 5 de outubro, 2006.

LUZ, W. A. **Desgaste em Ferramentas de Máquinas Agrícolas: Avaliação Bibliográfica.** 2019. 47 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

MARQUES, P.; MODENESI, P.; BRACARENSE, A. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia.** Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2016; Edição Eletrônica: Estúdio Castellani; ISBN (versão digital): 978-85-352-7881-1. (E-book) Livro eletrônico: 545 páginas.

MARTINS FILHO, A. S. **Soldagem de Revestimentos com Arame Tubular.** Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 93 p. 1995.

MANUTENÇÃO adequada é a chave para a redução no custo sucroenergético, de grupo Atlantic. Companhia disponibiliza peças para as unidades de produção de biogás. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/manutencao-adequada-chave-reducao-custos-sucroenergeticos-grupo-atlantic-230621>>. Acesso em 06 nov. 2024.

MERCADO Livre. Disponível em: < <https://www.mercadolivre.com.br/> > Acesso em 21 dez 2024.

METALCHEK. **Líquidos Penetrantes. Mas o que são os líquidos penetrantes?** Disponível em: <<https://metalchek.com.br/informacoes/liquidos-penetrantes/>>. Acesso em 02 dez. 2023.

MÉTODOS de revestimento duro: quais são os mais comuns? Condinter. Disponível em: <<https://www.codinter.com/br/metodos-de-revestimento-duro-quais-sao-os-mais-comuns/>>. Acesso em 07 nov. 2023.

MJV Soldas. **Venda de Equipamentos e Consumíveis de Soldagem**. Disponível em: <<http://www.mjvsoldas.com.br/produto/esab-eletrodo-esab-ok-8478>>. Acesso em 27 set. 2023.

MODENESI, P. J. **Soldagem de Ligas Metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 28 páginas. Minas Gerais, 2001.

ATON TECNOLOGIA. **O Uso do Ferro nas Produções Industriais**. 2019. Disponível em: <<https://www.atontecnologia.com.br/o-uso-do-ferro-nas-producoes-industriais/>>. Acesso em 27 set. 2023.

PETROBRÁS. **Norma Petrobrás N-133**. Revisão N. Soldagem. 114 páginas. Rio de Janeiro, Petrobrás, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica**. 18 abr 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica>>. Acesso em 06 nov. 2024.

RIBEIRO, R. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do Tipo Fe-Cr-C Usados na Indústria Sucoalcooleira**. Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Dissertação de Mestrado. 118 p. 2004.

RICCI, R. M.; TEIXEIRA, P. E. F.; SANTOS, M. L. QUEIROZ, R. P. N. **Avaliação das Perdas no Processo de Colheita da Cultura da Cana-de-Açúcar na Região do Vale do Ivlhema**. Revista Aracê. São José dos Pinhais, v. 6, n. 2, p; 3317-3334, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.56238/arev6n2-172>>. Acesso em 05 nov. 2024.

RODRIGUES, C.; CERSOSIMO, A. **Soldagem na Indústria do Petróleo**. Programa Petrobrás de Editoração de Livros Didáticos. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2022. ISBN (versão digital): 978-65-88763-01-8. Livro eletrônico: 901 páginas.

MENDONÇA, A. J.; SANTOS, C. R.; NOVAIS J. C.; FILHO E. H. S.; RODRIGUES G. I. S.; GOMES L. S.; PEREIRA M. T. B.; LEÃO M. B. M. G. B.; SILVA M. L.; MOTTA N. S. P.; MAGALHÃES O. M.; ALVES P. P. A.; REZENDE R. F.; OLIVEIRA R. G.; TEIXEIRA R. C.; SILVA R. R.; BARROS S. K.; ALVES A. R.; SOARES P. S. **Inspetor de Soldagem**. 440 páginas. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI/BA, SENAI/MG, SENAI/RJ; Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, F. J. G. **Tecnologia da Soldadura uma abordagem técnico-didática**. 292 páginas. Edição: Publindústria, Edições Técnicas, Ltda. Porto; 2014.

FABRICAÇÃO SOLBRINIL. **Equipamentos Industriais**, 2024. Disponível em: <<https://solbrinil.com.br/produtos.html>> Acesso em: 23 out. 2024,

PKM Aços. **Empresa especializada em fornecer aços para construção de máquinas e equipamentos**. Disponível em: <https://www.pkmacos.com.br/chapa-aco-1020>. Acesso em 22 nov. 2023.

STACHOWIAK G. B.; STACHOWIAK G. W. **The Effects of Particle Characteristics on Three-body Abrasive Wear**. *Elvesier Science B*. V. v. 249, p. 201-207, 2001.

TRATORES e Colheitadeiras. **Máquinas e implementos agrícolas**. Disponível em: <https://www.tratoresecolheitadeiras.com.br/veiculo/ijui/rs/colheitadeira/massey-ferguson/mf-34/2004/saca-palha/hydro/cabine-cabinado/paulo-mokan-compra-e-venda-de-maquinas-usadas/957933>. Acesso em 09/11/2023.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 495 páginas. Editora: Edgard Blucher Ltda; 2004; ISBN 85-212-0238-5.

ZHOU, B; MA S.; LI, W; PENG, C.; LI, W. **Study on sugarcane chopping and damage mechanism during harvesting of sugarcane chopper harvester**. *Biosystems Engineering*. V. 243, p.1-12, july 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.019>>. Acesso em: 06 nov.2024.

**APÊNDICE A – A ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DO
AMANTEIGAMENTO**



**APÊNDICE B – A ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DO
CARBONETO DE CROMO**

