

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA SOLDAGEM**

Karine Madeira Nogueira Vigiani

**ANÁLISE DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO NA
RECUPERAÇÃO EM ROLO DE LAMINAÇÃO**

Belo Horizonte

2024

Karine Madeira Nogueira Vigiani

**ANÁLISE DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO NA
RECUPERAÇÃO EM ROLO DE LAMINAÇÃO**

Monografia apresentada no curso de pós-graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito final para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense

V676a

Vigiani, Karine Madeira Nogueira.

Análise de procedimentos de soldagem por arco submerso na recuperação em rolo de laminação [recurso eletrônico] / Karine. Madeira Nogueira Vigiani. - 2024.

1 recurso online (57 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Bibliografia: f. 57.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Soldagem. 2. Arco de soldagem submersa. 3. Laminação (Metalurgia) I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE SOLDAGEM

UFMG

ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DA ALUNA KARINE MADEIRA NOGUEIRA VIGIANI

Realizou-se, no dia 29 de maio de 2024, às 19:30 horas, TEAMS, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *ANÁLISE DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO NA RECUPERAÇÃO EM ROLO DE LAMINAÇÃO*, apresentada por KARINE MADEIRA NOGUEIRA VIGIANI, número de registro 2021662319, graduada no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em SOLDAGEM, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Alexandre Queiroz Bracarense - Orientador (UFMG), Prof(a). Ariel Rodriguez Arias (UFMG), Prof(a). Luis Antonio Barbosa (GERDAU OURO BRANCO).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada 97 Nota


Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 29 de maio de 2024.


Prof(a). Alexandre Queiroz Bracarense (Doutor)


Prof(a). Ariel Rodriguez Arias (Doutor)


Prof(a). Luis Antonio Barbosa (Especialista)

Dedico este trabalho ao meu dedicado marido, Fabricio, e ao meu amado filho, Antônio. São eles a fonte de força e inspiração que me impulsionam a superar meus desafios diários.

Aos meus pais, irmãos, cunhadas e ao meu sobrinho/afilhado, Davi. Dedico esta conquista, por todo o apoio e carinho constantes ao longo desta jornada.

Karine

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho e, em especial:

- A Deus por ter me dado força nos momentos difíceis;
- A minha família, em especial meu marido Fabricio e meu filho Antônio;
- Ao professor Bracarense, por todos os ensinamentos, ajuda e paciência em orientar meu trabalho;

Aos colegas e professores da turma 2021.1 que tanto ensinou e ajudou ao longo do curso.

RESUMO

O arco submerso, também conhecido como SAW, é um processo de soldagem no qual um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo contínuo consumível e a peça de trabalho. O processo é chamado de "submerso" porque o arco, a zona de fusão e o eletrodo são cobertos por um fluxo granuloso que funde e forma uma camada protetora sobre a solda. Durante o processo de recuperação de um rolo, após sua entrega ao cliente, foram observadas indicações na superfície da mesa do mesmo, como marcas do cordão de solda. Como resultado, o rolo foi devolvido à fábrica para reparo, onde foram realizados diversos testes e ensaios não destrutivos. Isso incluiu análises metalográficas (realizadas após o envio de cavacos para o laboratório do SENAI), análises da composição química do arame utilizado, ensaios de líquido penetrante, entre outros. Após a conclusão dos testes, foi identificada a necessidade de alteração no procedimento de soldagem para a recuperação dos rolos destinados à laminação. As indicações surgiram no cliente após 36 horas de operação do rolo, causando marcas na tira e exigindo que o rolo fosse desmontado para a intervenção da empresa responsável pelo reparo. Foi utilizado processo de soldagem SAW no primeiro procedimento soldagem com oscilação e no segundo procedimento alterado para soldagem sem oscilação. A análise fez-se necessária, quando o rolo Superior entrou em operação (esse rolo está posicionado no fim da linha de Laminação a Quente de Tiras), porém após 36h horas, ocorreram essas indicações ao longo do corpo do rolo. Ao fim dos testes, ocorreu a alteração do procedimento, passando para soldagem sem oscilação. Alteração essa que atendeu as expectativas do cliente quando os rolos entraram em operação novamente.

Palavras chaves: soldagem SAW; arco submerso; oscilação; laminação a quente de tiras.

ABSTRACT

The submerged arc, also known as SAW, is a welding process in which an electric arc is established between a continuous consumable electrode and the workpiece. The process is called "submerged" because the arc, the molten zone, and the electrode are covered by a granular flux that melts and forms a protective layer over the weld. During the recovery process of a roll, after its delivery to the customer, indications were observed on the surface of the table, such as weld bead marks. As a result, the roll was returned to the factory for repair, where various tests and non-destructive examinations were conducted. This included metallographic analyses (performed after sending chips to the SENAI laboratory), analyses of the chemical composition of the wire used, liquid penetrant tests, among others. Upon completion of the tests, the need for a change in the welding procedure for the recovery of rolls intended for lamination was identified. The indications appeared at the customer's site after 36 hours of roll operation, causing marks on the strip and necessitating the roll to be disassembled for intervention by the repair company. The SAW welding process was used in the first procedure with oscillation, and in the second procedure, it was changed to welding without oscillation. The analysis was necessary when the upper roll started operating (this roll is positioned at the end of the Hot Strip Mill), but after 36 hours, these indications appeared along the body of the roll. At the end of the tests, the procedure was altered to non-oscillation welding. This change met the client's expectations when the rolls went back into operation.

Key words: SAW welding; submerged arc; oscillation; roller of the rolling mill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Bobina a Quente.....	13
Figura 2 Aplicação Rolo Superior.....	14
Figura 3 Partes Processo Arco Submerso.....	16
Figura 4 Rolo com Líquido Penetrante aplicado.....	17
Figura 5 Rolo com Revelador.....	18
Figura 6 Carta gráfica TTAT.....	21
Figura 7 LP antes usinagem final.....	22
Figura 8 Resultado LP antes usinagem final.....	23
Figura 9 Rolo com Líquido Penetrante após usinagem final.....	24
Figura 10 Rolo com revelador após usinagem final.....	24
Figura 11 Defeito apresentado no cliente.....	25
Figura 12 Defeito apresentado no cliente.....	25
Figura 13 Inspeção Visual.....	26
Figura 14 Máquina de Solda.....	27
Figura 15 Máquina de Solda.....	28
Figura 16 Torno CNC Nardini.....	29
Figura 17 Cavaco.....	29
Figura 18 Durômetro.....	30
Figura 19 Réplica metalográfica.....	31
Figura 20 Tocha.....	32
Figura 21 Bicos de Contato CuCrZr.....	33
Figura 22 Utilização Fluxo.....	33
Figura 23 Pontos fotografados.....	36
Figura 24 Foto em zoom lado motor.....	37
Figura 25 Foto em zoom lado motor.....	38
Figura 26 Foto em zoom centro.....	39
Figura 27 Região preparada para exame.....	42
Figura 28 Réplica Metalográfica.....	42
Figura 29 Réplica Metalográfica.....	43
Figura 30 Réplica Metalográfica.....	43
Figura 31 Rolo com penetrante após usinagem.....	45
Figura 32 Rolo com revelador após usinagem.....	45
Figura 33 Carta Gráfica TTAT pós amateigamento.....	48
Figura 34 Rolo com penetrante final, pós soldagem revestimento duro.....	51
Figura 35 Rolo com revelador, final pós soldagem revestimento duro.....	51
Figura 36 Rolo com penetrante, pós usinagem e retífica final.....	52
Figura 37 Rolo com revelador, pós usinagem e retífica final.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - US Rolo Superior	19
Tabela 2 - Parâmetro Soldagem Amanteigamento	20
Tabela 3 - Parâmetro Soldagem Revestimento Duro	20
Tabela 4 - Composição Química Fluxo	34
Tabela 5 - Composição química arame para amanteigamento	34
Tabela 6 - Composição química arame revestimento duro	35
Tabela 7 - Análise dureza	40
Tabela 8 - Análise Química	41
Tabela 9 - Análise Cavaco	44
Tabela 10 - US após usinagem	46
Tabela 11 - Parâmetros soldagem amanteigamento	47
Tabela 12 - Relatório ensaio PM	48
Tabela 13 - Parâmetros soldagem revestimento duro	49
Tabela 14 - US pós usinagem e retífica final	54

SUMÁRIO

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	14
2.1 Laminação a Quente	14
2.2 Rolos de Laminação	15
2.3 Aço Carbono.....	15
2.3.1 Aço ASTM A36.....	16
2.4 Processo de Soldagem por Arco Submerso.....	16
2.5 Fabricação Rolo Superior Novo	17
2.6 Recuperação de Rolo Laminação a Quente por meio de soldagem a arco submerso	18
2.6.1 Relatório Ultrassom.....	20
3. METODOLOGIA.....	28
3.1 Equipamentos e consumíveis.....	28
3.1.1 Máquina de Arco Submerso	28
3.1.2 Torno Mecânico.....	29
3.1.3 Durômetro.....	31
3.1.4 Aparelho Réplica metalográfica	32
3.2 Consumíveis e Acessórios	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
5. CONCLUSÕES	56
6 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	57

1 INTRODUÇÃO

O arco submerso, também conhecido como SAW, é um processo de soldagem no qual um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo contínuo consumível e a peça de trabalho. O processo é chamado de "submerso" porque o arco, a zona de fusão e o eletrodo são cobertos por um fluxo granulado que funde e forma uma camada protetora sobre a solda.

Durante o processo de recuperação de um rolo superior da área de laminação a quente, quando após sua entrega ao cliente, foram observadas indicações na superfície da mesa do mesmo. Como resultado, o rolo foi devolvido à fábrica para reparo, onde foram realizados diversos testes e ensaios não destrutivos. Isso incluiu determinação quantitativa de Cr, Mo e V, por Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente, realizadas após o envio de cavacos para o laboratório do SENAI, análises da composição química do arame utilizado, ensaios de líquido penetrante, entre outros. Após a conclusão dos testes, foi identificada a necessidade de alteração no procedimento de soldagem para a recuperação dos rolos destinados à laminação. As indicações surgiram no cliente após 36 horas de operação do rolo, causando marcas na tira e exigindo que o rolo fosse desmontado para a intervenção da empresa responsável pelo reparo.

Todos os processos de soldagem são reconhecidos como métodos para unir duas ou mais peças metálicas, podendo ou não envolver a adição de material, utilizando uma fonte de calor. Uma ampla variedade de métodos é empregada na realização da soldagem, e o êxito na escolha desses processos está vinculado a diversos fatores que influenciam sua aplicação, considerando as propriedades físicas, químicas e mecânicas dentro ou nas proximidades da região de solda. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Segundo Gimenes e Ramalho (2022), o processo de soldagem por arco submerso é caracterizado pelo fornecimento de calor para a soldagem através de um ou mais arcos criados entre um eletrodo de arame sólido ou tubular e a peça a ser soldada. Como indicado pelo nome, o arco é protegido por uma camada de fluxo granular fundido, preservando tanto o arco quanto o metal fundido e a poça de fusão contra a contaminação atmosférica. Devido ao arco elétrico estar totalmente envolto pelo fluxo, ele não é visível, resultando em um processo de soldagem que se desenvolve sem faíscas, luminosidades ou respingos, características distintas de outros métodos de soldagem em que o arco é exposto. O fluxo, em sua forma granular, desempenha

não apenas as funções de proteção, limpeza do arco e do metal depositado, mas também atua como isolante térmico. Isso assegura uma excelente concentração de calor, contribuindo para a notável penetração característica desse processo.

A busca por recuperação de rolos faz-se necessária, pois os rolos de laminação estão sujeitos a diversos mecanismos de desgaste. Estes incluem o desgaste abrasivo metal com metal, resultante do contato direto entre a superfície dos rolos e as tiras sendo laminadas, corrosão e oxidação causadas pelas altas temperaturas das tiras e pelos sprays de água utilizados para refrigeração dos rolos, fadiga térmica devido às variações constantes de temperatura dos rolos, e adesão química de particulados das tiras.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma análise detalhada dos procedimentos empregados na recuperação de rolo de laminação (metal base aço carbono ASTM A36), destacando o impacto das modificações realizadas. Além disso, busca-se visualizar de que maneira essas alterações contribuí para assegurar a qualidade e atender às expectativas dos clientes após o processo de recuperação. Serão abordados aspectos específicos relacionados à eficácia da alteração do procedimento que inicialmente utiliza soldagem com oscilação e após um problema ocorrido no cliente, onde apresentaram marcas de cordão na mesa do rolo, alterou-se o procedimento para soldagem sem oscilação, garantindo uma qualidade no processo de recuperação do rolo e sua relevância para a satisfação do cliente.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Laminação a Quente

O processo de laminação a quente inicia-se com a preparação do material, onde o metal é submetido a altas temperaturas para assegurar sua maleabilidade. Posteriormente, o metal aquecido é conduzido através de rolos de laminação, nos quais é aplicada pressão para modificar sua forma e dimensões. O produto resultante é então resfriado e pronto para o próximo estágio de produção ou para ser despachado. Esse procedimento é minucioso e demanda precisão para garantir a conformidade do produto final com os padrões de qualidade estabelecidos.

O equipamento principal utilizado é o laminador a quente, composto por uma série de rolos que exercem pressão sobre o metal. Existem diversos tipos de laminadores a quente, tais como laminadores reversíveis, laminadores contínuos e laminadores universais, cada um apresentando vantagens e aplicações específicas.



Figura 1 – Bobina a quente. Fonte: Jornal EmpresariALL, 2019.

2.2 Rolos de Laminação

Dentro de uma linha de laminação, uma série de rolos é empregada para realizar diversas etapas do processo. No contexto deste trabalho, focaremos especificamente no rolo superior, esse, fica localizado acima do rolo enrolador, desempenhando um papel crucial no processo de enrolamento, fornecendo a força necessária para direcionar a extremidade da tira ao mandril do enrolador e gerar a tensão requerida para bobinamento. Na figura 2, é mostrado onde está localizado o Rolo Superior.

O rolo superior é construído a partir de uma chapa de ASMT A36 calandrada. Nesse estágio, são realizados procedimentos de soldagem com o objetivo de aprimorar a superfície de contato com a tira. Este processo de soldagem visa melhorar a durabilidade e a eficiência do rolo durante a operação de laminação.

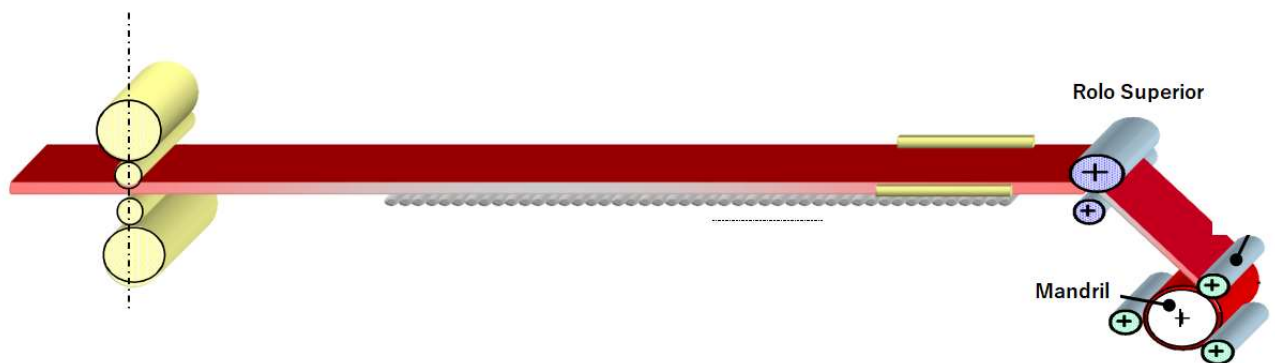


Figura 2 – Aplicação Rolo Superior. Fonte: Imagem cedida pela SMS Group

2.3 Aço Carbono

O aço é uma liga composta, predominantemente, por ferro e carbono, podendo ainda conter outros elementos residuais provenientes do processo de fabricação ou ser enriquecido intencionalmente para ajustar certas propriedades. Em termos gerais, as ligas de ferro e carbono, com teores de carbono variando de 0,008% a aproximadamente 2,11%, podem ser categorizadas em três grupos distintos (CHIAVERINI, 2002).

- I. Aço de baixo carbono: teor de C inferior a 0,3%;
- II. Aço de médio carbono: teor de C entre 0,3% a 0,6%;

III. Aço de alto carbono: teor de C acima de 0,6%

2.3.1 Aço ASTM A36

O material base do rolo superior de laminação é o ASTM A36, esse amplamente empregado em diversos setores da indústria metalmeccânica, o aço estrutural ASTM A36 destaca-se pela sua notável soldabilidade e resistência mecânica moderada. Os perfis estruturais, confeccionados a partir de chapas de aço soldadas, oferecem uma resistência média, sendo aplicados em uma variedade de componentes estruturais, desde os mais comuns até os mais complexos.

2.4 Processo de Soldagem por Arco Submerso

A soldagem por arco submerso ocupa atualmente uma posição de destaque no cenário industrial. Iniciado por volta de 1935, este processo representou uma revolução em termos de produtividade em comparação aos métodos então existentes. Até os dias de hoje, ele continua sendo empregado de acordo com suas características particulares.

Conhecido como SAW (Submerged Arc Welding), este método envolve a alimentação contínua de um arame (eletrodo) nu, revestido com materiais de alta condutividade elétrica, como o cobre, por meio de cabeçotes que o conduzem até a poça de fusão. Durante a fusão, esse arame se funde com o metal base por meio de um arco elétrico. Simultaneamente, é coberto por uma camada de material mineral granulado, chamado de fluxo. Além de proteger a poça de fusão contra contaminações atmosféricas, o fluxo desempenha funções metalúrgicas, incorporando ligas e estabilizando a estrutura do metal.

Durante todo o processo, não há presença visível de arco elétrico, fiação ou respingos, proporcionando maior segurança ao operador do equipamento (MACHADO, 1996).

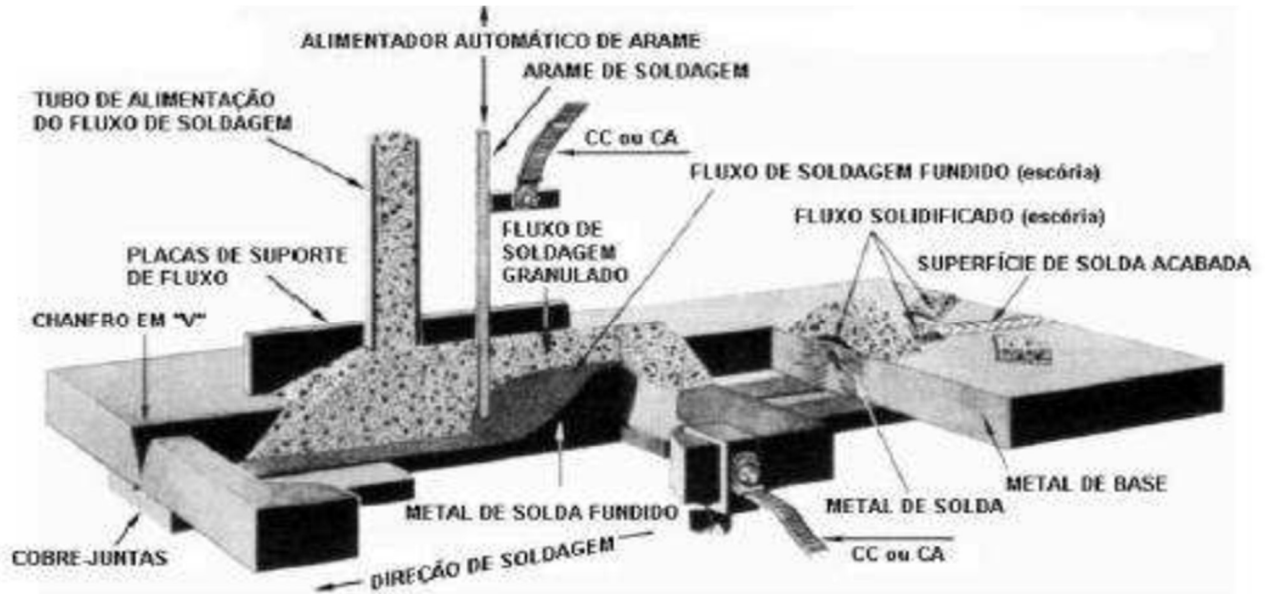


Figura 3 – Partes processo Soldagem Arco Submerso. Fonte: Fortes (2004, pág. 6)

A Figura 3 em um corte, demonstra o processo de soldagem, para proporcionar uma compreensão sobre o arco submerso.

2.5 Fabricação Rolo Superior Novo

A fabricação de um Rolo Superior é um processo detalhado que começa com a aquisição da matéria-prima, uma chapa de dimensões 50x2440x6000mm. Essa chapa é encaminhada para o serviço de calandra e soldagem, onde é moldada para formar a camisa do rolo. Após o processo de calandragem, são conduzidos ensaios não destrutivos para verificar a integridade do metal base.

Em seguida, inicia-se a soldagem da mesa do rolo, começando com a aplicação de uma camada de amanteigamento, seguida por camadas adicionais de revestimento duro, seguindo os procedimentos e considerando a complexidade do processo.

Após a conclusão da soldagem, o rolo passa por um ensaio de tratamento térmico para alívio de tensões. Posteriormente, o rolo é usinado conforme as especificações do desenho técnico.

Após a etapa de usinagem, são realizados ensaios não destrutivos, como ultrassom e líquido penetrante, para garantir a qualidade e a integridade do produto final. Somente após a conclusão desses ensaios e a verificação da conformidade com os padrões exigidos, o rolo é enviado ao cliente.

2.6 Recuperação de Rolo Laminação a Quente por meio de soldagem a arco submerso

Os rolos de Laminação a Quente estão em diversos setores da siderurgia, como, Sistema de Transporte de Placas, Laminadoras, Guias para Placas de Cobre, etc.

Devido aos desgastes em que são submetidos, como desgastes mecânicos quando em contato com placas de aço muito quente, desgaste ambiental quando expostos a corrosão (água, humidade, etc), a recuperação é necessária, pois a superfície dos rolos piora consideravelmente, e consequentemente piora a qualidade do aço que irá entrar em contato com esses rolos.

O alvo principal na recuperação dos rolos, é a possibilidade de remoção do revestimento anterior, até atingir a camada do metal base, e posterior soldagem de novo revestimento, garantindo assim, vida útil do rolo.

Para a recuperação do rolo, inicialmente é realizado usinagem para remoção do revestimento anterior, o rolo Superior foi usinado até diâmetro de 860mm, após a usinagem, foram realizados LP e US em 100% da mesa do rolo. A figura 4 mostra o líquido penetrante aplicado no rolo e a figura 5 representa o revelador aplicado no rolo, podendo observar nenhuma indicação no rolo.



Figura 4 – Rolo com Líquido Penetrante aplicado. Fonte: Autor

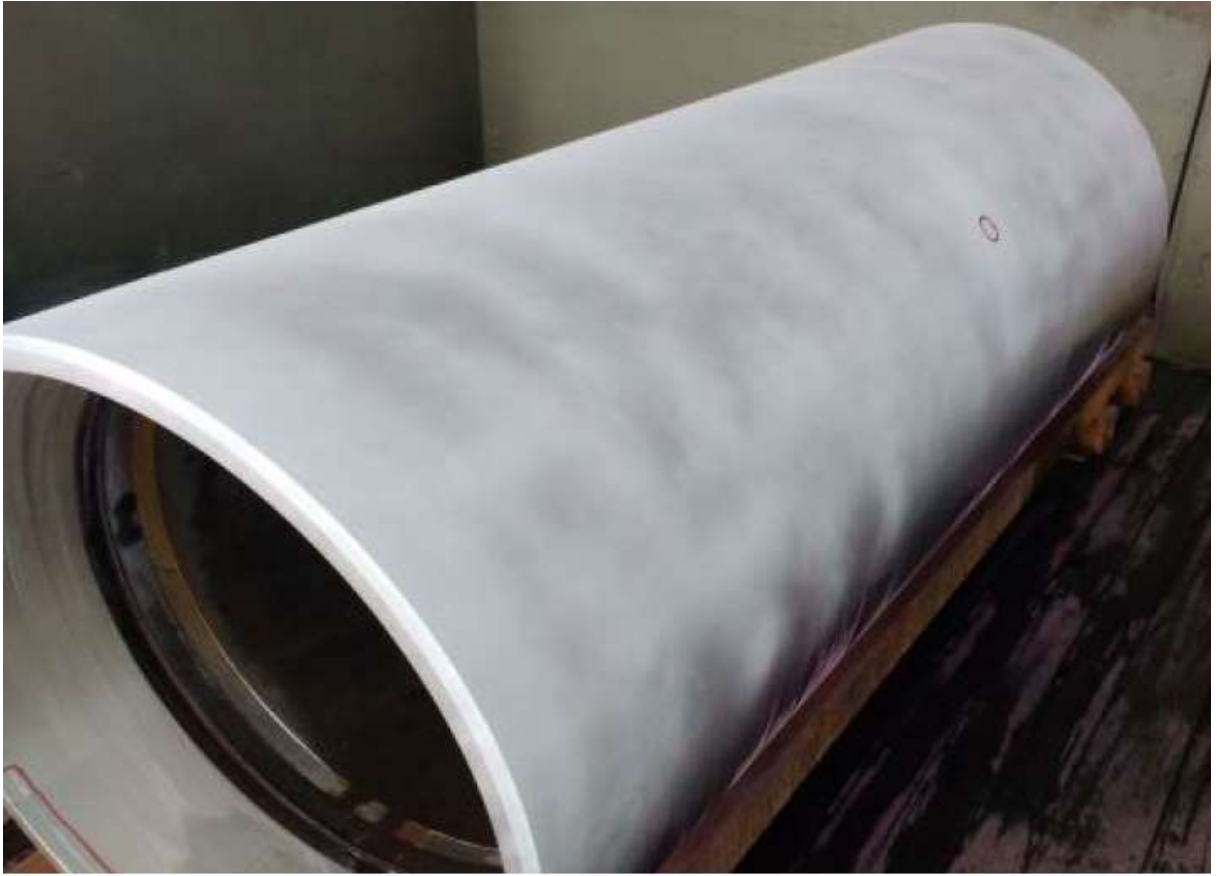


Figura 5 – Rolo com revelador. Fonte: Autor

2.6.1 Relatório Ultrassom

O relatório de ultrassom abaixo, foi realizado após a conclusão do líquido penetrante, afim de certificar que ausência de indicações, como trincas, poros. Sendo aprovado, pois não foram encontradas nenhuma indicação.

Tabela 1 - US Rolo Superior. Fonte: Autor

RELATÓRIO DE INSPEÇÃO ULTRASSOM CHAPAS									
ÁREA	EQUIPAMENTO	ORDEM DE SERVIÇO	COMPONENTES INSPECIONADOS	LOCAL DE INSTALAÇÃO	FABRICANTE	MATERIAL			
	ROLL SUPERIOR	NA	CAMISA USINADA		---	ASTM A 36			
TABELA 01 - ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS DA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM									
APARELHO	PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO / REV.	NORMA DE REFERÊNCIA/ CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO	CONDIÇÃO SUPERFICIAL	ACOPLANTE					
USM-GO	norma A 578	norma A 578	USINADA	METIL					
PADRÃO DE CALIBRAÇÃO	BLOCO DE REFERÊNCIA	TRANSDUTORES UTILIZADOS							
		Normal Diâmetro Frequência	Duplo Cristal Diâmetro Frequência	Angular (45°) Dimensões Frequência	Angular (60°) Dimensões Frequência	Angular (70°) Dimensões Frequência			
V1	PRÓPRIA PEÇA	B2S 24 mm 2 MHZ	--	--	--	--			
DADOS DE CALIBRAÇÃO									
Ganho Primário		Perda por Transferência		Ganho de Varredura			Ganho Corrigido		
56dBs		-		6dBs			-		
Identificação	Espessura (mm)	Número	Tipo de Descontinuidade	Afastamento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Nível de Resposta (%)	Laudo (mm)
CORPO	62	---	---	---	---	---	---	---	AP
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LEGENDA									
AP - Aprovado RP - Reprovado RAC - Recomendação de Avaliação Complementar				FF - Falta de Fusão TL - Trinca Longitudinal PO - Poros Superficiais			TT - Trinca Transversal MO - Mordedura OV - Sobreposição FP - Falta de Penetração		

Normalmente realiza-se a medição de dureza do rolo. No rolo, que é foco desse trabalho, obtu-se valores que variam de 27,1HRC a 28,5 HRC.

Após a usinagem e realização dos ensaios e inspeções do rolo, ocorreu a soldagem conforme procedimento. Na tabela 1 são apresentados os parâmetros utilizados para soldagem de amanteigamento.

Tabela 2 - Parâmetro Soldagem Amanteigamento. Fonte: Autor

SOLDAGEM AMANTEIGAMENTO	
Recomposição COM Oscilação	Parâmetros de Referência
Diâmetro do Arame	3.2mm
Tipo de fluxo	Neutro
Stick Out	28 - 32mm
Ângulo da tocha	8° a 10°
Deslocado do Centro	10 a 20 mm
Passo	33 a 35
Veloc. do arame	185
Tensão	28V +/- 1V
Freq. Oscilação	41,5 rpm
Veloc. Superficial	225 mm/min
Pré-Aquecimento	280° a 325°C

Algumas considerações importantes foram repassadas ao operador para execução da soldagem, como, acompanhamento e verificação do pré aquecimento solicitado.

Após a soldagem de amanteigamento, realiza-se o revestimento duro conforme parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetro Soldagem Revestimento Duro. Fonte: Autor

SOLDAGEM REVESTIMENTO DURO	
Recomposição COM Oscilação	Parâmetros de Referência
Diâmetro do Arame	3.2mm
Tipo de fluxo	Neutro
Stick Out	28 - 32mm
Ângulo da tocha	8° a 10°
Deslocado do Centro	10 a 20 mm
Passo	33 a 35
Veloc. do arame	150
Tensão	29V +/- 1V
Freq. Oscilação	41,5 rpm
Veloc. Superficial	185 mm/min
Pré-Aquecimento	375° a 425°C

Para essa operação de soldagem, são implementados critérios rigorosos devido à extrema importância

da aplicação deste revestimento. Isso incluiu medidas como a troca do bico a cada passe, garantindo assim a integridade do processo. Além disso, foi crucial controlar o diâmetro do rolo a partir da quarta camada de revestimento, esse controle foi realizado até atingir o diâmetro final desejado, entre 910 a 915 mm.

Durante todo o processo, monitoramos de perto a temperatura, realizando medições a cada 30 minutos e registrando os dados para avaliar a necessidade de ajustar os queimadores. Manter a temperatura constante foi um requisito fundamental, nunca permitindo que ela diminuísse em qualquer fase da soldagem.

Após a conclusão da soldagem, segue-se com o pós-aquecimento do rolo, elevando sua temperatura para um intervalo entre 325°C a 350°C, mantendo-o nesse estado por 4 horas. Na figura 6, está apresentada a carta gráfica utilizada para o TTAT. Durante esse período, garante-se que o rolo permanecesse em movimento contínuo para promover a uniformidade da temperatura em toda a sua extensão. Após o pós-aquecimento, o rolo foi cuidadosamente coberto com uma manta protetora e deixado para resfriar gradualmente até atingir a temperatura ambiente. Essas medidas foram essenciais para garantir a qualidade e a integridade do revestimento aplicado.

Após o rolo atingir a temperatura ambiente, o mesmo foi enviado para TTAT (Tratamento Térmico de Alívio de Tensões). A execução do TTAT foi realizada conforme carta gráfica abaixo.

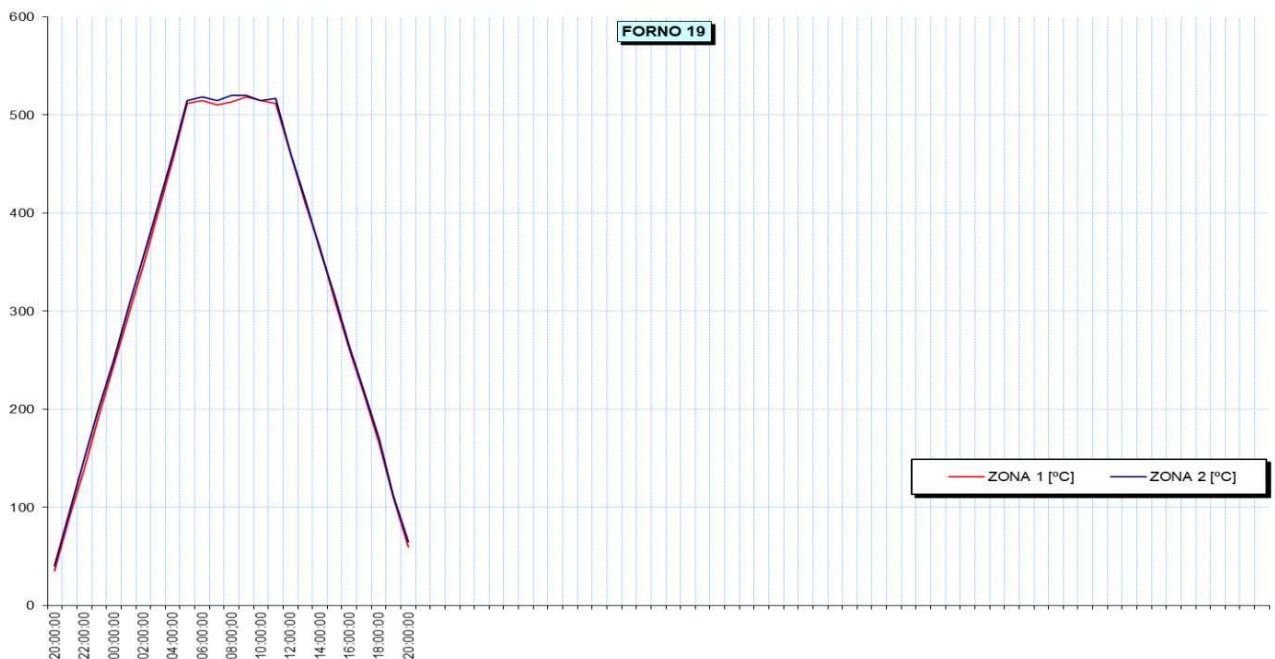


Figura 6 - Carta Gráfica TTAT. Fonte: Autor

Após a etapa do TTAT, o rolo passou por um processo de usinagem final. Durante essa fase, o operador realizou a usinagem completa da mesa do rolo para garantir a regularização da superfície. Em seguida, foram selecionados dois pontos específicos para a realização do LP, a fim de verificar se havia ocorrido algum desvio decorrente do revestimento aplicado. O resultado do ensaio de LP foi aprovado, permitindo assim a continuidade do processo de usinagem final. Na figura 7 mostra-se os pontos de execução do líquido penetrante e na figura 8, mostra-se o revelador no rolo, onde pode-se observar ausência de indicações. Nas figuras, 9 e 10, está mostrando o ensaio por líquido penetrante, na fase de usinagem final do rolo, garantindo que o rolo está livre de descontinuidade.



Figura 7 - LP antes usinagem final. Fonte: Autor



Figura 8 - Resultado LP antes usinagem final. Fonte: Autor



Figura 9 – Rolo com penetrante após usinagem final. Fonte: Autor



Figura 10 – Rolo com revelador após usinagem final. Fonte: Autor

Ainda no processo de recuperação do rolo, o mesmo foi submetido ao balanceamento dinâmico sendo este aprovado e liberado para finalização do processo.

O rolo foi entregue ao cliente devidamente protegido para evitar danos durante o transporte. A superfície revestida recebeu uma camada de proteção contra impactos, oxidação e outros possíveis fatores que pudessem comprometer sua integridade.

Durante o processo de revestimento, foi alcançada uma dureza entre 58 e 60 HRC, com uma espessura de revestimento de 15mm. Após dois meses da entrega, o rolo foi colocado em operação nas instalações do cliente. No entanto, após 36 horas de funcionamento, foram observadas marcas na tira. Uma inspeção detalhada revelou a presença de marcas do cordão de solda na mesa do rolo, estendendo-se por cerca de 770mm ao longo de todo o diâmetro.

Diante o relatado, o rolo retornou para que realizar análises para entendimento do ocorrido.

Nas figuras 11 e 12, está o defeito apresentado após o início de operação rolo. Pode-se observar as marcas de cordão de solda ao longo da mesa do rolo.



Figura 11 - Defeito apresentado no cliente. Fonte: Autor

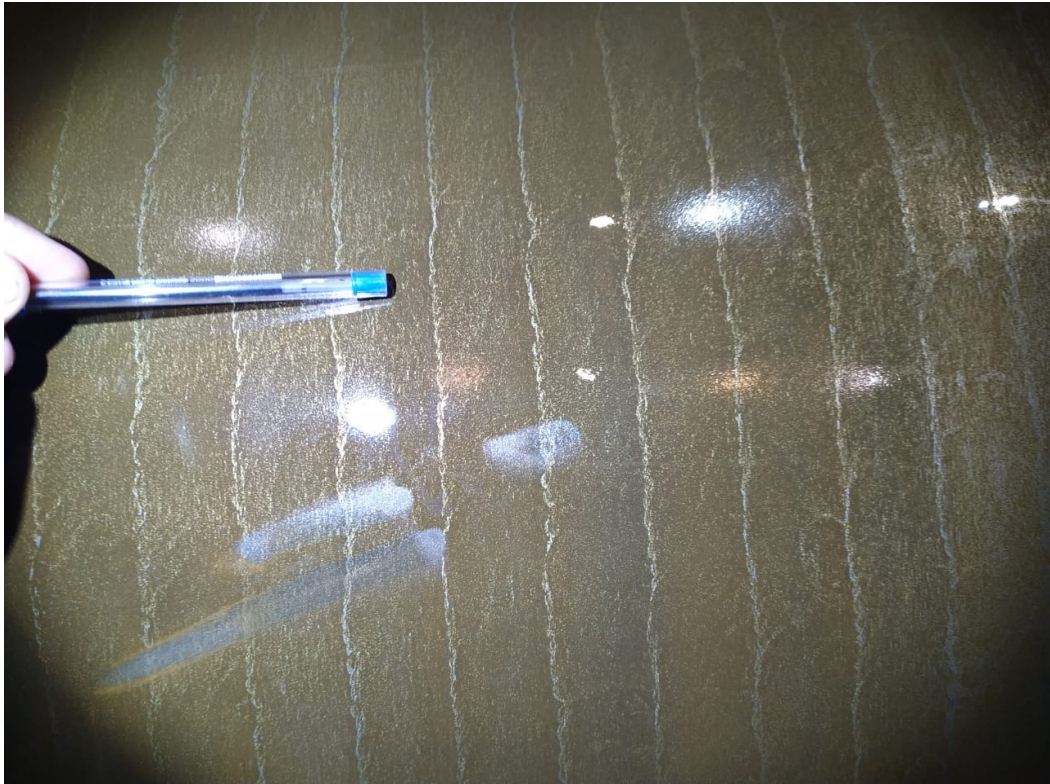
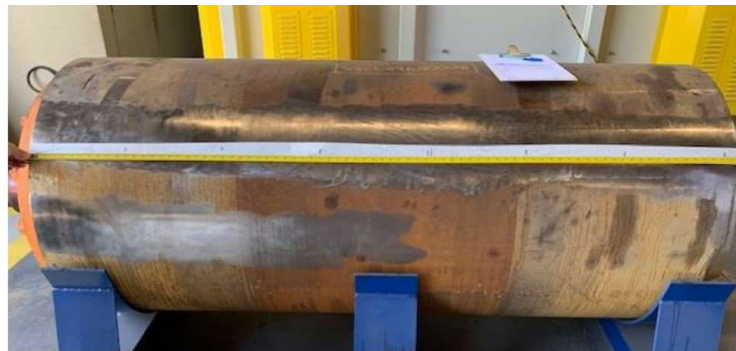


Figura 12 - Defeito apresentado no cliente. Fonte: Autor

Após recebimento do rolo, iniciou-se o processo de avaliação, foi conduzida uma inspeção visual minuciosa do rolo. Na figura 13 abaixo, fez-se mapeamento com relação as faces e dimensionado para análises fez-se então várias análises que serão apresentadas abaixo



Lado Motor



Centro



Lado Operador

Figura 13 - Inspeção Visual. Fonte: Autor

3. METODOLOGIA

3.1 Equipamentos e consumíveis

3.1.1 Máquina de Arco Submerso

A máquina de solda utilizada é uma criação interna da empresa responsável pela recuperação dos rolos. Ela foi meticulosamente projetada para lidar com a soldagem de rolos de grande porte, oferecendo capacidade impressionante. Essa máquina é capaz de alcançar um comprimento máximo de 5000 mm entre as castanhas e pode acomodar diâmetros de munhões de até 200 mm em cada lado. Sua estrutura inclui uma fonte DC1000 de alta performance, garantindo um fornecimento estável de energia para o processo de soldagem. O controle dessa máquina é feito por meio de um painel de controle NA5, proporcionando uma interface intuitiva e eficiente para os operadores. Além disso, um sistema de PLC foi desenvolvido especificamente para atender às exigências exclusivas desta máquina. Esse PLC é controlado por uma IHM (Interface Homem-Máquina) integrada ao painel da máquina, oferecendo controle preciso e flexível sobre as operações de soldagem. A figura 14 mostra o detalhe da máquina de solda utilizada e a figura 15 mostra a máquina em operação.



Figura 14 - Máquina de Solda. Fonte: Autor



Figura 15 - Máquina de Solda. Fonte: Autor

3.1.2 Torno Mecânico

O torno CNC é uma máquina amplamente utilizada na indústria de usinagem. Ele permite a fabricação de peças metálicas com alta precisão e eficiência, utilizando um sistema de controle automatizado.

O torno CNC é amplamente utilizado na fabricação de componentes para diversas indústrias, como automotiva, aeroespacial, médica, de energia e muitas outras. Ele é utilizado para a produção de peças como eixos, pinos, buchas, roscas, flanges e uma variedade de outros componentes mecânicos. Sua capacidade de produzir peças com alta precisão e eficiência o torna um elemento fundamental na fabricação moderna.

O torno utilizado (figura16) para usinagem dos cavacos, é o Torno CNC AM 650 Nardini, com capacidade de diâmetro admissível sobre o carro de 1060mm, diâmetro sobre cava 1250mm e carro transversal em z 6000mm e X 625mm. Foram removidos cavacos (os cavacos removidos são semelhantes ao da figura 17) de pontos mapeados, medidas específicas de regiões de trabalho da tira no rolo, separados e enviados para o SENAI avaliar a composição química.



Figura 16 – Torno CNC Nardini. Fonte: Autor



Figura 17 – Cavaco. Fonte: Autor

3.1.3 Durômetro

O durômetro é um instrumento de medição usado para determinar a dureza de um material, ou seja, sua resistência à deformação plástica permanente sob carga. Esse equipamento é amplamente utilizado em diversas áreas da indústria para garantir a qualidade e a consistência dos materiais utilizados na fabricação de peças e componentes.

O durômetro utilizado no processo foi Brand: SOONDA, modelo SKD-553, conforme figura 18.

Antes do início da medição, a superfície do rolo é preparada certificando ausência de irregularidades e 100% limpa. O durômetro é posicionado e então é aplicado a carga de teste. Os resultados então são mostrados na tela do equipamento.



Figura 18 – Durômetro. Fonte: Autor

3.1.4 Aparelho Réplica metalográfica

A réplica metalográfica é uma técnica utilizada para avaliar a microestrutura de um material sem a necessidade de seccioná-lo. Essa técnica é especialmente útil quando se deseja preservar a integridade da peça ou quando a análise *in loco* é necessária. É amplamente utilizada em diversas áreas da metalurgia, engenharia de materiais e pesquisa científica para avaliar a microestrutura de materiais como metais, cerâmicas e compósitos. Ela permite a visualização e análise de características como tamanho de grão, inclusões, fases, trincas, porosidade e outras características microestruturais sem danificar ou alterar a peça original.

Para a execução desse ensaio, a superfície foi preparada e limpada, a fim de remover impurezas, após, realizado ataque de nital 2% e realizada massagem na superfície por cerca de 20 segundos. O ataque de nital foi suspenso com álcool e posterior foi aplicado o acetato com acetona pura por 20min. O equipamento utilizado para a execução do ensaio é semelhante ao da figura 19.



Figura 19 – Réplica metalográfica. Fonte: LPB Inspeções, 2024

3.2 Consumíveis e Acessórios

3.2.1 Tocha

A tocha de soldagem é composta por um bico deslizante feito de cobre e ligas, um mecanismo para prender o cabo de saída da fonte de soldagem e um suporte isolante. A tocha da máquina utilizada foi projetada com um sistema de resfriamento para mitigar os efeitos que a alta temperatura ocasiona no processo.

A tocha utilizada, conforme figura 20, foi adaptada conforme necessidade da máquina, contendo refrigeração e também adaptação para utilização de bicos de contato conforme figura 21.



Figura 20 – Tocha. Fonte: Autor

3.2.2 Bico de contato

O bico de contato desempenha um papel crucial na energização do arame durante o processo de soldagem. Qualquer falha no contato pode resultar no comprometimento da qualidade do cordão de solda. Embora seja pouco comum, respingos eventuais podem danificar o próprio bico de contato. Por isso, é essencial realizar verificações regulares da limpeza e do estado de conservação da tocha, especialmente em sua parte interna. Essas medidas garantem um funcionamento eficiente e confiável durante a soldagem. Nessa soldagem, foram utilizados os bicos de contato fabricados com material CuCrZr de diâmetro 3,2mm, e a limpeza realizada a cada passe, o

operador verificava, e quando necessário realizava a troca do bico.

Para a tocha utilizada, houve uma adaptação para que possibilitasse a utilização dos bicos de contato conforme figura 21.



Figura 21 – Bicos de Contato CuCrZr. Fonte: Autor

3.2.3 Fluxo

Os fluxos têm múltiplas funções cruciais durante o processo de soldagem por arco submerso. Entre essas funções, incluem-se estabilizar o arco elétrico e proteger o metal aquecido contra a contaminação do ambiente, bem como diminuir a presença de impurezas no metal de solda. Além disso, eles contribuem para a formação de uma escória com propriedades específicas, as quais podem impactar diversos aspectos da solda final, como sua aparência, a facilidade de remoção e a prevenção de defeitos. A figura 22 pode nos mostrar como o fluxo é utilizado no arco submerso.



Figura 22 – Utilização Fluxo. Fonte: Alusolda, 2018.

3.2.4 Arames

Para o processo de soldagem, foi utilizado fluxo neutro, que é uma formulação neutra e aglomerada, desenvolvida especificamente para soldagem de aços inoxidáveis austeníticos e martensíticos. Destaca-se pela sua capacidade de formar uma escória altamente descascante tanto no passe raiz quanto nos passes de cobertura, sendo frequentemente utilizado em aplicações de cladeamento para rolos em usinas siderúrgicas.

A composição química do fluxo é cuidadosamente ajustada para garantir uma perda mínima de cromo e nitrogênio durante o processo de soldagem através do arco. Isso é crucial para preservar as propriedades desejadas dos aços inoxidáveis e garantir a integridade da solda. Na tabela 4, está a composição química do fluxo utilizado.

Tabela 4 - Composição Química Fluxo. Fonte: Autor.

CaO + MgO + CaF ₂	55%
TiO ₂ + ZrO ₂ + Al ₂ O ₃	25%
FeO + MnO	5%
SiO ₂	15%

Foram utilizados dois tipos de arames. Um arame de alma metálica, mais utilizado para soldagem de aços de baixa liga e no caso dessa soldagem, foi utilizado para camada de almofada antes da aplicação do revestimento duro, fazendo uma excelente transição do metal base para com o revestimento. Na tabela 5, está a composição química do arame utilizado para amanteigamento.

Tabela 5 - Composição química arame para amanteigamento. Fonte: Autor

C	< 0,14
Mn	0,8 - 1,85
Si	< 0,80
Cr	< 0,65
Ni	1,5 - 2,25
Mo	< 0,60

Para o revestimento duro, utilizou um arame tubular especialmente desenvolvido para soldagem por arco submerso. Este arame é projetado para produzir depósitos de solda com estrutura martensítica, composta por uma liga de ferro, cromo, nióbio, molibdênio, tungstênio, vanádio e alto teor de carbono, resultando em elevada dureza e resistência consistente ao desgaste.

A textura superficial proporciona uma resistência eficaz contra o desprendimento de material da superfície, especialmente em situações de fadiga decorrente de processos de laminação. Além disso, o material depositado é capaz de suportar as consideráveis tensões de compressão geradas entre os rolos laminadores e os rolos de apoio, garantindo uma performance duradoura em ambientes de trabalho desafiadores. Na figura 6, está a tabela do arame de revestimento duro utilizado.

Tabela 6 - Composição química arame revestimento duro. Fonte: Autor

C	1,0 - 1,5
Mn	0,5 - 2,50
Si	0,5 - 1,5
Cr	5,5 - 9,5
Mo	0,5 - 1,5
Nb	5,5 - 9,5
V	< 1,0
W	1,0 - 2,0
Fe	Bal.

Para viabilizar o processo de soldagem novamente, foi necessário modificar o procedimento de revestimento do rolo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas inspeções visuais, utilizando câmera com zoom em três pontos distintos: lado do operador, lado do motor e centro do rolo (indicadas na figura 23). Essas inspeções foram fundamentais para visualização da superfície do rolo que havia sido recebido, proporcionando uma compreensão abrangente da condição e das características do material em diferentes áreas do rolo.

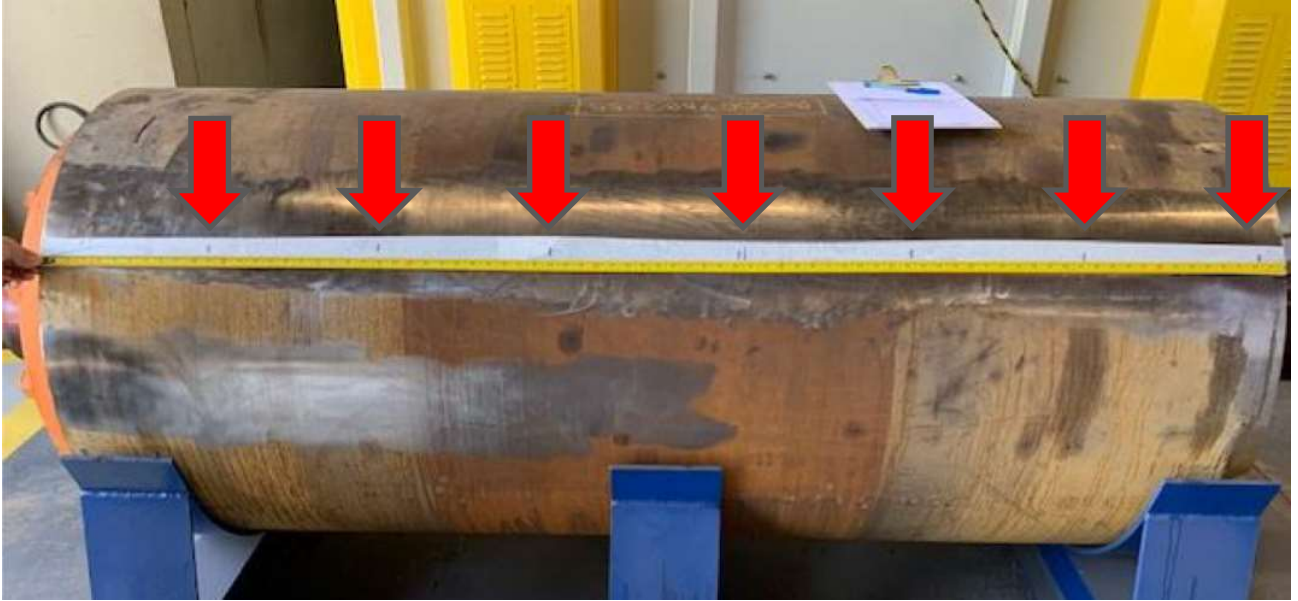


Figura 23 – Pontos fotografados. Fonte: Autor

Nessa inspeção, não foram evidenciadas anormalidades na superfície do rolo. O resultado é esperado de acordo com a superfície exposta e condições de recebimento do rolo, como mostra nas figuras 24, 25 e 26.

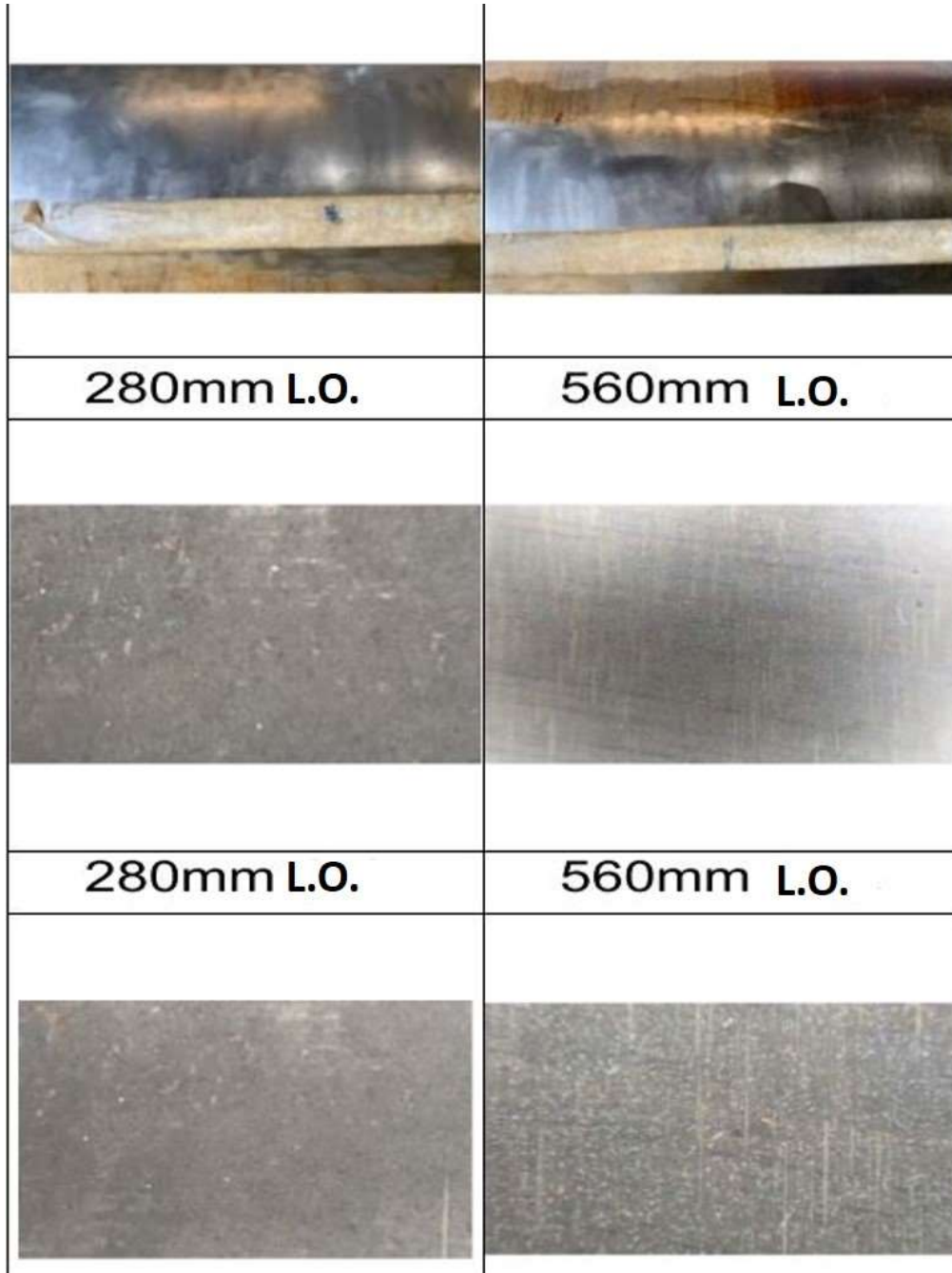


Figura 24 – Foto em zoom lado motor. Fonte: Autor

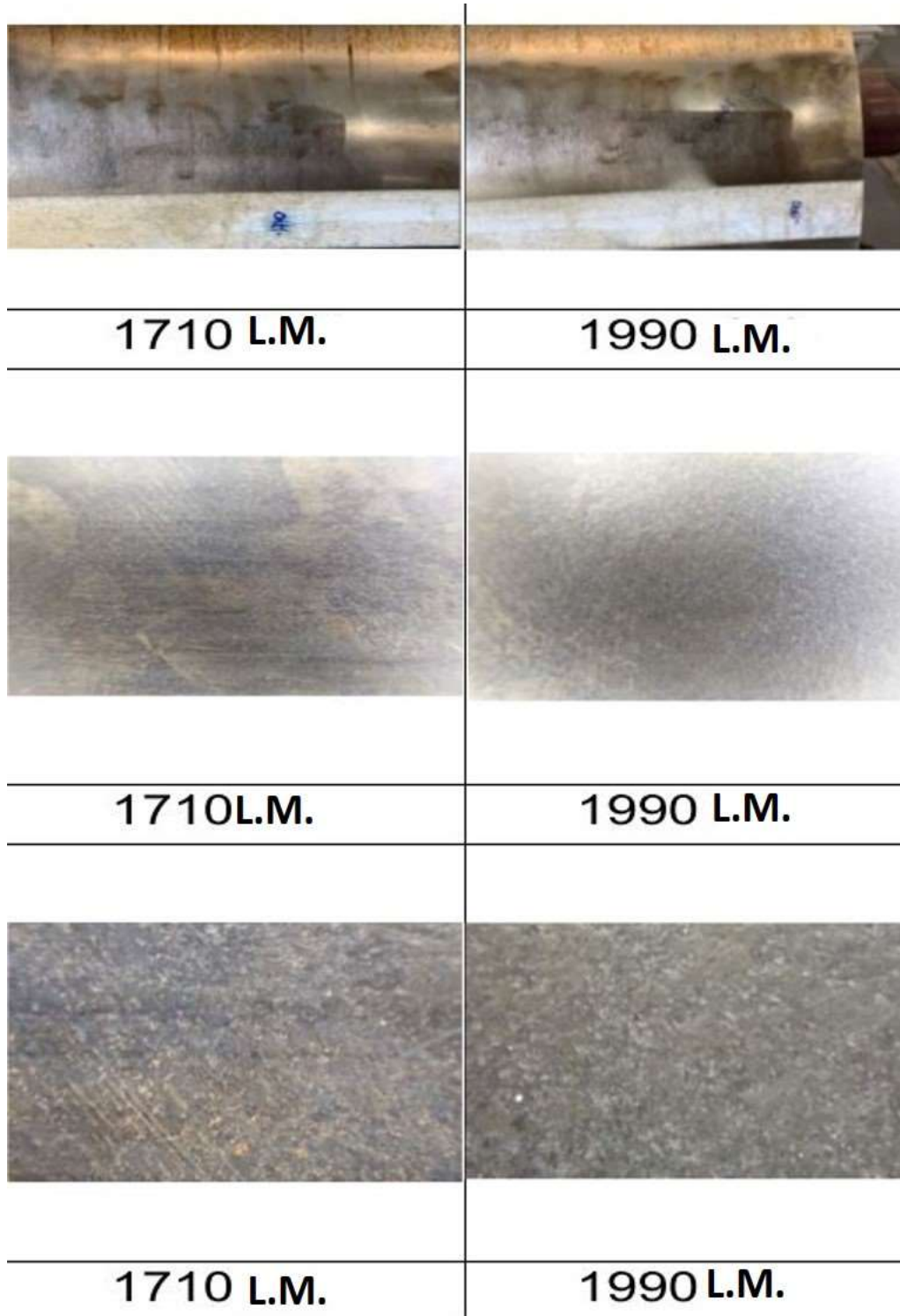


Figura 25 – Foto em zoom lado motor. Fonte: Autor

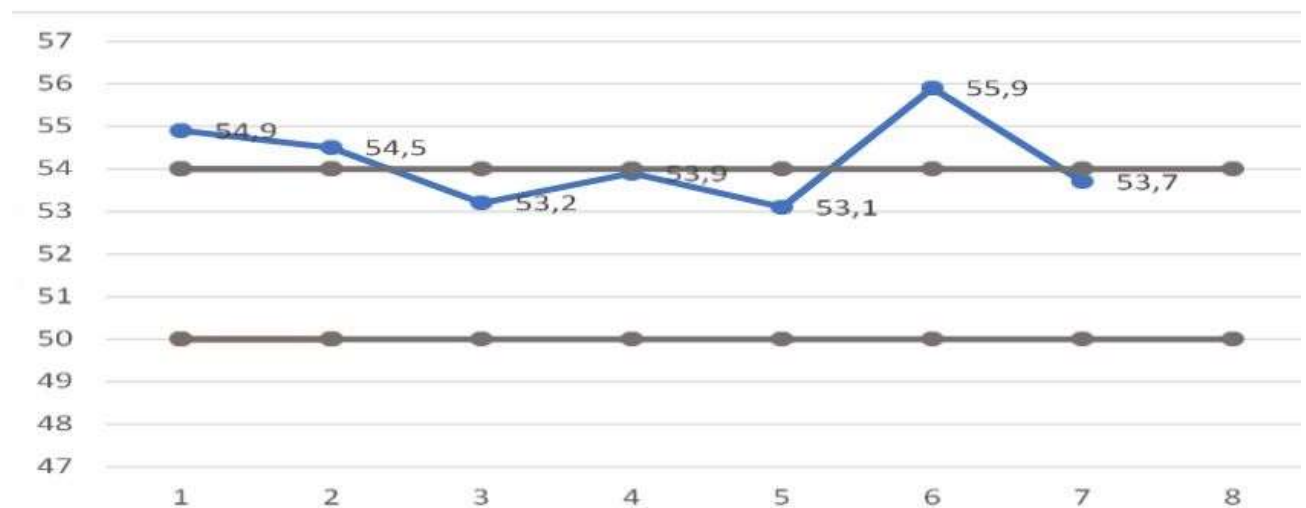
	
1150mm Centro	1430mm Centro
	
1150mm Centro	1430mm Centro
	
1150mm Centro	1430mm Centro

Figura 26 – Foto em zoom centro. Fonte: Autor

Foi realizada a medição de dureza na mesa do rolo, na tabela pode observar medidas referenciados a partir do lado motor. A análise apresentada na Tabela 7 não revelou nenhuma anormalidade em relação à dureza do material, e os resultados estão em conformidade com as especificações estabelecidas para o revestimento duro após sua aplicação.

Tabela 7 - Análise dureza. Fonte: Autor

Distance to DS [mm]	Specification [HRC]	HRC
280	50-54	54,9
560	50-54	54,5
840	50-54	53,2
1150	50-54	53,9
1430	50-54	53,1
1710	50-54	55,9
1990	50-54	53,7

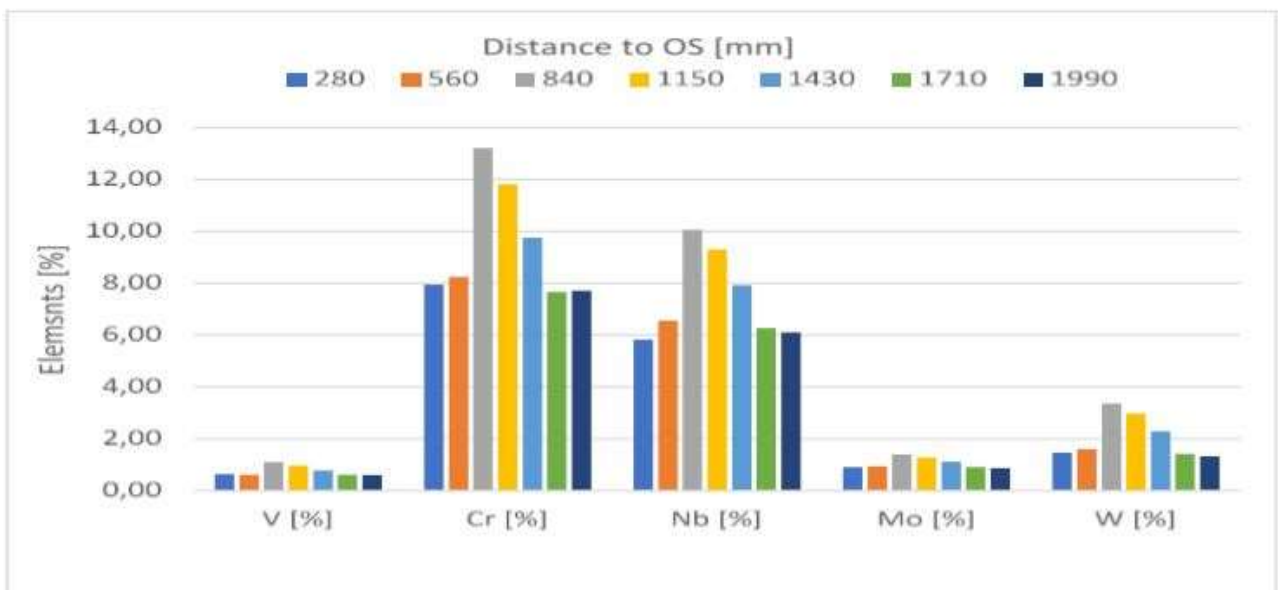


Realizado também análise de elementos químicos, referenciando a partir da face do lado motor.

Em relação a análise dos elementos químicos, conforme tabela 8, observou-se uma curva de crescimento no percentual de massa em todos os elementos químicos, em função de uma possível oxidação. Em ligas metálicas, o aumento de cromo pode ser um sinal de corrosão seletiva, onde outros elementos metálicos estão sendo corroídos, deixando para trás uma maior concentração de cromo.

Tabela 8 - Análise Química. Fonte: Autor

Distance to OS [mm]	V [%]	Cr [%]	Nb [%]	Mo [%]	W [%]
280	0,63	7,94	5,82	0,90	1,46
560	0,62	8,25	6,56	0,94	1,60
840	1,11	13,20	10,06	1,39	3,36
1150	0,96	11,81	9,30	1,28	2,97
1430	0,78	9,75	7,92	1,11	2,29
1710	0,61	7,66	6,27	0,90	1,42
1990	0,60	7,70	6,10	0,87	1,33



Por fim, antes de continuar com as análises, foi realizado um ensaio de réplica metalográfica na mesa do rolo. Foi seguido um procedimento para realização do ensaio, a superfície foi preparada e limpada, a fim de remover impurezas, após, realizado ataque de nital 2% e realizada massagem na superfície por cerca de 20 segundos. O ataque de nital foi suspenso com álcool e posterior foi aplicado o acetato com acetona pura por 20min. Na Figura 26, pode-se observar os resultados.



Figura 27 – Região preparada para exame. Fonte: Autor

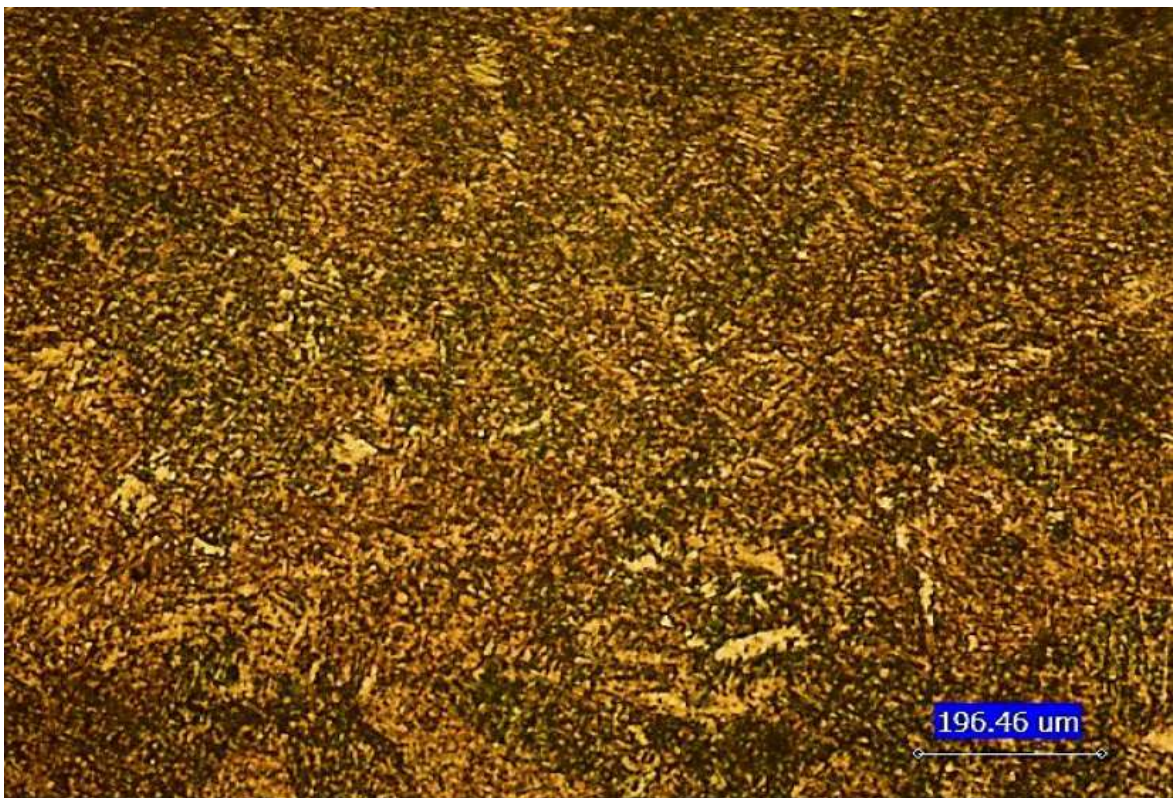


Figura 28 - Réplica Metalográfica – Aumento de 80X. Fonte: Autor



Figura 29 – Réplica Metalográfica – Aumento de 200X. Fonte: Autor

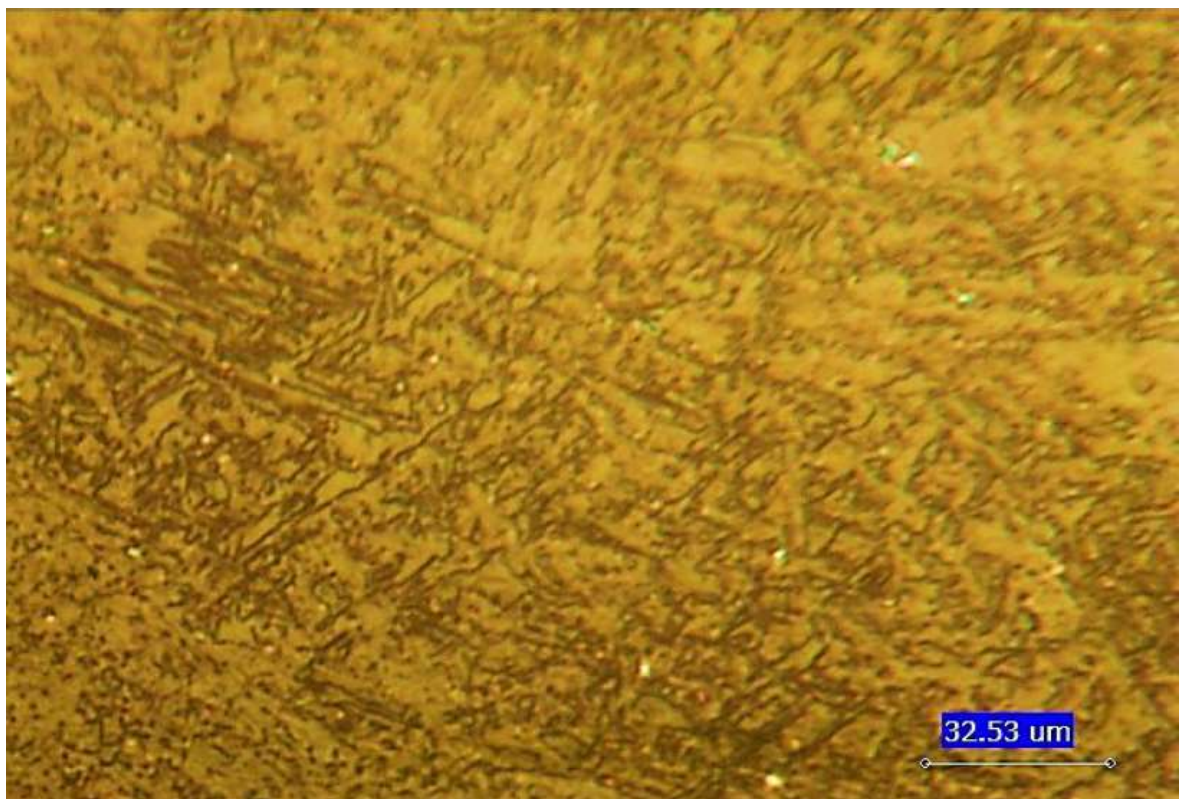


Figura 30 – Réplica Metalográfica – Aumento de 400X. Fonte: Autor

Nas figuras 28, 29 e 30, é possível observar uma microestrutura detalhada composta por uma matriz de ferrita acicular, que se apresenta em forma de agulhas ou placas finas, juntamente com a presença de carbonetos dispersos. Esses carbonetos aparecem como pequenas partículas distribuídas de forma uniforme pela matriz, conferindo características específicas à microestrutura.

Após a conclusão das análises preliminares, prosseguiu com o desbaste da mesa do rolo, com o objetivo de coletar amostras representativas para análise da composição química. Essa etapa foi crucial para permitir a remoção de cavacos necessários para o envio das amostras. Os pontos específicos de coleta foram selecionados com base em uma análise cuidadosa das áreas críticas da mesa do rolo, os quais podem ser identificados na Tabela 9. Na coluna verde escuro é referente a análise realizada pelo fornecedor do arame de solda. Na coluna verde claro é referente a análise realizada pela empresa que recuperou o rolo.

Tabela 9 - Análise Cavaco. Fonte: Autor

Região CP	Cr	Mo	V	Cr	Mo	V
Inferior 2º Passe - Lado Oposto Chaveta - Centro	6,90%	1,00%		7,12%	0,90%	0,67%
Inferior 3º Passe - Extremidade lado Oposto Chaveta	6,94%	1,00%		6,87%	0,88%	0,63%
Superior 3º Passe - Extremidade Lado oposto Chaveta	6,78%	0,97%		6,52%	0,84%	0,59%
Superior 4º Passe - Extremidade Lado Chaveta	6,75%	1,03%		6,44%	0,83%	0,58%
Superior 2º Passe - Lado Chaveta - Centro	6,84%	1,00%		6,52%	0,84%	0,59%
Inferior 4º Passe - Centro	6,96%	1,03%		6,50%	0,88%	0,65%
Inferior 1º Passe - Lado Oposto Chaveta	7,46%	1,13%		6,92%	0,86%	0,63%
Superior 1º Passe - Lado Chaveta - Centro	7,23%	1,08%		6,61%	0,82%	0,59%

Diante os resultados apresentados nas informações anteriores, não foram apresentadas anormalidades consideráveis, a fim de se concluir a causa do problema que ocorreu. Então, após análises os procedimentos de soldagem foram alterados para sem oscilação e a recuperação do rolo foi realizada novamente.

Iniciando o processo de recuperação, o rolo foi submetido a usinagem, na qual o revestimento anterior foi completamente removido até atingir um diâmetro de Ø860mm, foram conduzidos os ensaios de Líquido Penetrante e Ultrassom para garantir a ausência de quaisquer indicações ou imperfeições na superfície do material. Esses testes foram realizados para assegurar a integridade e a qualidade do metal base após a remoção do revestimento anterior. Nas figuras 31 e 32 estão as etapas do ensaio de líquido penetrante realizadas.

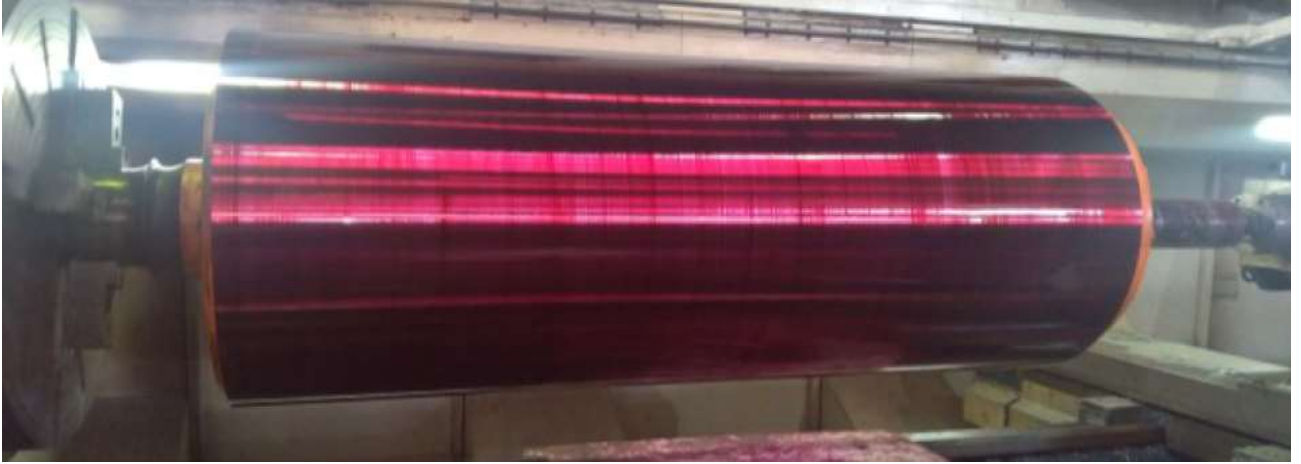


Figura 31 – Rolo com penetrante após usinagem. Fonte: Autor



Figura 32 – Rolo com revelador após usinagem. Fonte: Autor

A tabela 10, está mostrando o relatório de ultrassom realizado após a usinagem final, a fim de identificar indicações no revestimento.

Tabela 10 – US após usinagem. Fonte: Autor

RELATÓRIO DE INSPEÇÃO									
ÁREA	EQUIPAMENTO	ORDEM DE SERVIÇO	COMPONENTES INSPECIONADOS	LOCAL DE INSTALAÇÃO	FABRICANTE	MATERIAL			
	ROLL SUPERIOR	0057/21	CAMISA		---	ASTM A36			
TABELA 02 - ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS DA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM									
APARELHO	PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO / REV.	NORMA DE REFERÊNCIA/ CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO		CONDIÇÃO SUPERFICIAL	ACOPLANTE				
USM GO	PRO-007	DIN EN 10228 CLASSE 03		ESCOVADA	METIL CELULOSE				
PADRÃO DE CALIBRAÇÃO	BLOCO DE REFERENCIA	TRANSDUTORES UTILIZADOS							
		Normal Diâmetro Freqüência	Duplo Cristal Diâmetro Freqüência	Angular (45°) Dimensões Freqüência	Angular (60°) Dimensões Freqüência	Angular (70°) Dimensões Freqüência			
V1	V1 / ECO DE FUNDO DA PEÇA A 80%	B25 Ø24mm 2MHZ	MSB4S 10 mm 4 MHZ	--	--	--			
DADOS DE CALIBRAÇÃO									
Ganho Primário		Perda por Transferência		Ganho de Varredura			Ganho Corrigido		
B25 - 45 dBs		-		65 dBs			-		
MSB4 - 52 dBs		-		72 dBs			-		
Região Inspeccionada	Espessura (mm)	Número da Descontinuidade	Tipo de Descontinuidade	Afastamento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Nível de Resposta (%)	Lauda (mm)
100% da Camisa	Conforme desenho	---	---	---	---	---	---	---	AP
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LEGENDA									
AP - Aprovado / Approved RP - Reprovado / Disapproved RAC - Recomendação de Avaliação Complementar/ Supplementary Evaluation Recommendation			FF - Falta de Fusão/ Lack of Fusion TL - Trinca Longitudinal/ Longitudinal Crack PO - Poros Superficiais/ Surface Pores IE - Inclusão de Escória/ Inclusion of slag			TT - Trinca Transversal/ transversal crack MO - Mordedura/ Bite OV - Sobreposição/ Overlay FP - Falta de Penetração/ Lack of Penetration			

Por fim, após os ensaios foram medidas também a dureza, essa apresentou 205 a 213HB.

Ao posicionar a peça na máquina, deu-se início ao processo de pré-aquecimento utilizando queimadores de gás GLP, elevando a temperatura até 300°C. Esse procedimento foi fundamental para preparar a superfície e permitir o início da soldagem de amanteigamento, com a aplicação de uma camada de 5mm, resultando em uma mesa com diâmetro de Ø870-872mm. Nesse momento, pontuamos a primeira alteração no procedimento, passando o modo de soldagem de com oscilação para sem oscilação. O procedimento seguido, foi o detalhado abaixo:

Na tabela 11, mostra-se o procedimento alterado para realizar a soldagem sem oscilação, da camada de amanteigamento.

Tabela 11 – Parâmetros soldagem amanteigamento. Fonte: Autor

<i>SOLDAGEM AMANTEIGAMENTO</i>	
Recomposição SEM Oscilação	Parâmetros de Referência
Diâmetro do Arame	3.2mm
Tipo de fluxo	Neutro
Stick Out	25 a 35mm
Corrente Soldagem	300 a 550A
Ângulo da tocha	8° a 10°
Deslocado do Centro	10 a 20 mm
Passo	10
Veloc. do arame	90-100
Tensão	27V a 32V
Veloc. Superficial	350 mm/min
Pré-Aquecimento	200° mín
Temperatura entre passes	350°C máx

Após a conclusão da soldagem de amanteigamento, o rolo foi resfriado até atingir a temperatura de 50°C, condição necessária para a realização envio do rolo para Tratamento Térmico de Alívio de Tensões. Tratamento esse realizado conforme carta gráfica indicada na figura 33.

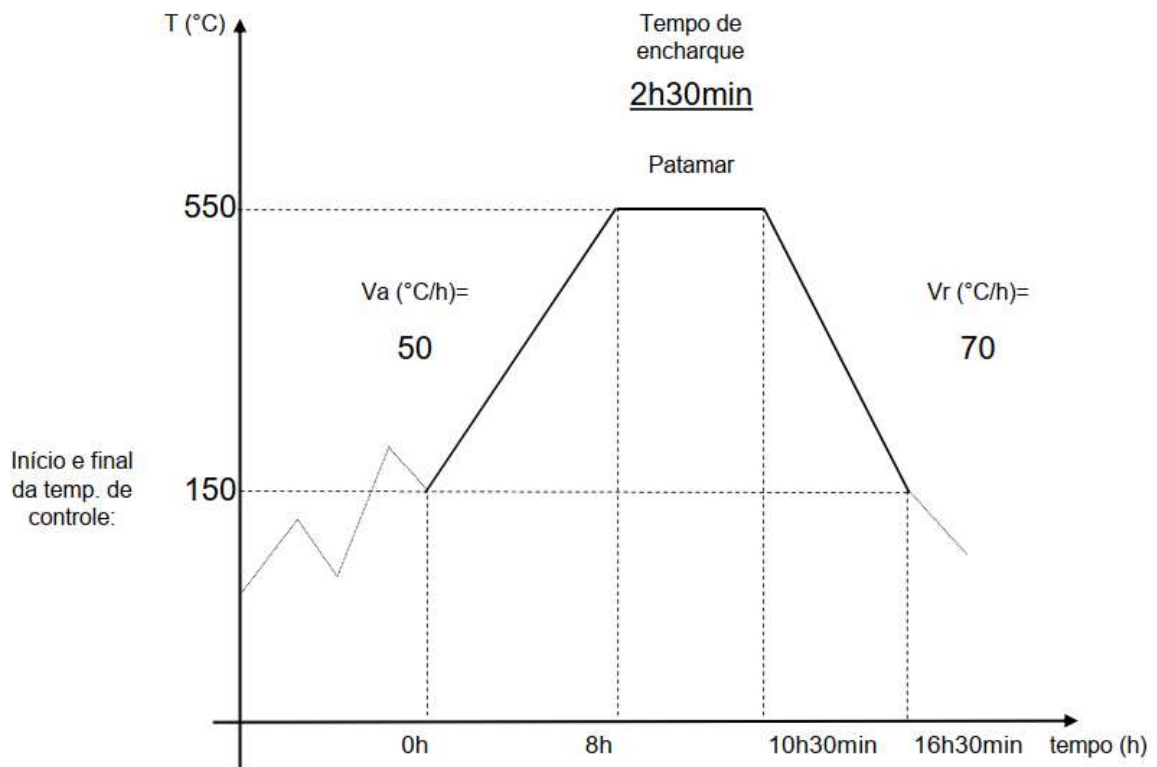


Figura 33 – Carta Gráfica TTAT pós amanteigamento. Fonte: Autor

Após a etapa de Tratamento Térmico Alívio de Tensão, foi conduzido o ensaio de Partículas Magnéticas, onde é mostrado o resultado na tabela 12, com o objetivo de assegurar a integridade e qualidade do material. Esse procedimento é essencial para identificar possíveis discontinuidades, falhas ou trincas na superfície da peça, contribuindo para garantir a confiabilidade e segurança do componente após o tratamento térmico.

Tabela 12 – Relatório ensaio PM. Fonte: Autor

RELATÓRIO DE INSPEÇÃO						
ÁREA	EQUIPAMENTO	ORDEM DE SERVIÇO	COMPONENTE INSPECIONADO	LOCAL DE INSTALAÇÃO	CLIENTE	MATERIAL
USINAGEM	ROLL SUPERIOR	0159/21	ROLD		--	
ANEXO A- ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS DA INSPEÇÃO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS						
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO		NORMA DE REFERÊNCIA		CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO		
PRO 02 - REV.01		SN 200 Rev. 2010		Isento de Descontinuidade		
EQUIPAMENTO/MODELO	CONDIÇÃO SUPERFICIAL		ILUMINAÇÃO		PROCESSO MAGNETIZAÇÃO	
YOKE HMM 6	ESCOVADA		NATURAL		CONTÍNUO	
VALOR DA CORRENTE UTILIZADA (A/cm ²)	CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO (A)		BLOCO MASSA: DATA PRÓXIMA CALIBRAÇÃO		CONTRASTE: FAB. MODELO/ LOTE/VAL	
17 a 65 A/cm ²	ALTERNADA		ET-0218 04/22		METAL CHEK LT-20-0338 09/2022	
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS: FAB. MODELO/ LOTE/VAL	TIPO DE ENSAIO		TIPO DA PARTÍCULAS MAGNÉTICAS			
7 C BLACK 190102655 / 04-2024	VIA SECA	VIA ÚMIDA	COLORIDA		FLUORESCENTE	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
IDENTIFICAÇÃO	DESCONTINUIDADE				LAUDO	
	Nº	TIPO	POSIÇÃO (mm)	DIMENSÃO (mm)		
PINCH ROLL SUPERIOR (100%)	--	--	--	--	AP	
--	--	--	--	--	--	
--	--	--	--	--	--	
--	--	--	--	--	--	
--	--	--	--	--	--	
--	--	--	--	--	--	
--	--	--	--	--	--	
LEGENDA						
AP – Aprovado		FF – Falta de Fusão		TT – Trinca Transversal		
RP – Reprovado		TL – Trinca Longitudinal		MO – Mordedura		
RAC – Recomendação de Avaliação Complementar		PO – Porosidade		OV – Sobreposição		
				FP – Falta de penetração		

Realizado o tratamento térmico e ensaio de PM, o rolo então foi direcionado para a soldagem de revestimento duro, conforme procedimento abaixo. O procedimento da camada de revestimento duro também alterado, para sem oscilação utilizado, está demonstrado na tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros soldagem revestimento duro. Fonte: Autor

<i>SOLDAGEM REVESTIMENTO DURO</i>	
Recomposição SEM Oscilação	Parâmetros de Referência
Diâmetro do Arame	3.2mm
Tipo de fluxo	Neutro
Stick Out	25 a 35mm
Corrente Soldagem	480 a 550A
Ângulo da tocha	8° a 10°
Deslocado do Centro	10 a 20 mm
Passo	16
Veloc. do arame	115
Tensão	30V
Veloc. Superficial	350 mm/min
Pré-Aquecimento	350 a 400°C
Temperatura entre passes	375 a 450°C

Após a conclusão da soldagem com o revestimento duro, o rolo foi submetido a um processo de equalização de temperatura, mantendo-o entre 400 a 450°C por um período mínimo de 3 horas e máximo de 6 horas. Durante esse tempo, todos os queimadores foram mantidos ligados para garantir uma distribuição uniforme de calor por toda a peça. Após o término da equalização, o rolo foi cuidadosamente protegido com uma manta térmica até que sua temperatura fosse reduzida gradualmente até atingir a temperatura ambiente. Esse procedimento é fundamental para minimizar o estresse térmico e garantir a estabilidade dimensional do rolo após a soldagem. Chegando a temperatura ambiente, foi realizado LP em 100% da mesa do rolo para verificar possíveis indicações.

As figuras 34 e 35 está mostrando o ensaio de líquido penetrante utilizado após a soldagem do revestimento duro. Pode-se observar que nenhuma descontinuidade foi encontrada.



Figura 34 – Rolo com penetrante final, pós soldagem revestimento duro. Fonte: Autor



Figura 35 – Rolo com releve, final pós soldagem revestimento duro. Fonte: Autor

Com a confirmação dos resultados dos ensaios dentro dos padrões estabelecidos, o rolo avançou para a etapa crucial de usinagem final e retífica, seguindo rigorosamente as especificações detalhadas no desenho técnico. Essa fase exigiu habilidade e precisão, pois cada detalhe era crucial para garantir a conformidade do produto final.

Uma vez concluída a usinagem final, não foram poupados esforços na realização de testes abrangentes para garantir a qualidade e a integridade do rolo. Foram conduzidos ensaios de dureza, Líquido Penetrante e Ultrassom em 100% da superfície da mesa do rolo. Essa abordagem minuciosa visava garantir que a mesa fosse entregue ao cliente sem quaisquer discontinuidades ou imperfeições, assegurando assim sua confiabilidade e desempenho em operação. A dureza atingida foi entre 55 e 56HRC. Nas figuras 36 e 37 mostra-se o líquido penetrante após a usinagem e retífica final do rolo.



Figura 36 – Rolo com penetrante, pós usinagem e retífica final. Fonte: Autor



Figura 37 – Rolo com revelador, pós usinagem e retífica final. Fonte: Autor

Ainda para certificar da integridade do revestimento realizado, fez-se ensaio de ultrassom, conforme resultado mostrado na tabela 14.

Tabela 14 – US pós usinagem e retífica final. Fonte: Autor

RELATÓRIO DE INSPEÇÃO									
ÁREA	EQUIPAMENTO	ORDEM DE SERVIÇO	COMPONENTES INSPECIONADOS	LOCAL DE INSTALAÇÃO	FABRICANTE	MATERIAL			
	ROLL SUPERIOR	0297/21	ROLO + REVESTIMENTO SOLDADO		---	ASTM A36 / revestimento			
TABELA 02 - ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS DA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM									
APARELHO	PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO / REV.	NORMA DE REFERÊNCIA/ CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO		CONDIÇÃO SUPERFICIAL	ACOPLANTE				
USM GO	PRO 04 Rev.01	ASME VIII DIV.01		USINADA	METIL CELULOSE				
PADRÃO DE CALIBRAÇÃO	BLOCO DE REFERÊNCIA	TRANSDUTORES UTILIZADOS							
		Normal Diâmetro Freqüência	Duplo Cristal Diâmetro Freqüência	Angular (45°) Dimensões Freqüência	Angular (60°) Dimensões Freqüência	Angular (70°) Dimensões Freqüência			
V1	ASME 20	--	MSB4S 10 mm 4 MHz	--	MWB60 8x9mm 4MHz	MWB70 8x9mm 4MHz			
DADOS DE CALIBRAÇÃO									
Ganho Primário		Perda por Transferência		Ganho de Varredura			Ganho Corrigido		
MWB60 - 42 dBs		+1 dBs		49 dBs			43 dBs		
MWB70 - 44 dBs		+2 dBs		52 dBs			46 dBs		
Região Inspeccionada	Espessura (mm)	Número da Descontinuidade	Tipo de Descontinuidade	Afastamento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Nível de Resposta (%)	Laudo (mm)
100% do Rolo	Conforme desenho	---	---	---	---	---	---	---	AP
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LEGENDA									
AP - Aprovado / <i>Approved</i> RP - Reprovado / <i>Disapproved</i> RAC - Recomendação de Avaliação Complementar / <i>Supplementary Evaluation Recommendation</i>			FF - Falta de Fusão / <i>Lack of Fusion</i> TL - Trinca Longitudinal / <i>Longitudinal Crack</i> PO - Poros Superficiais / <i>Surface Pores</i> IE - Inclusão de Escória / <i>Inclusion of slag</i>			TT - Trinca Transversal / <i>transversal crack</i> MO - Mordedura / <i>Bite</i> OV - Sobreposição / <i>Overlay</i> FP - Falta de Penetração / <i>Lack of Penetration</i>			
OBSERVAÇÃO									
*Foi realizado uma varredura com transdutor duplo cristal avaliando todo material (metal base A36 e revestimento), posteriormente foi realizada uma nova varredura com transdutores angulares (60° e 70°) avaliando o revestimento soldado (com altura de aproximada de 13mm da superfície). Os mesmos encontram-se aprovados.									

Ao fim do processo de recuperação do rolo, o mesmo foi embalado cuidadosamente, a fim de evitar danos na mesa do rolo, e então, entregue ao cliente.

5. CONCLUSÕES

- A alteração do procedimento de soldagem com oscilação para sem oscilação, resultou em melhorias significativas na deposição de material. Essa mudança permitiu controle mais preciso no processo de soldagem, resultando em uma distribuição mais uniforme do revestimento ao longo da superfície. Além disso, a ausência de oscilação na soldagem contribuiu para a redução das marcas de cordão de solda na mesa do rolo;
- Incluir TTAT como uma etapa intermediária, logo após a soldagem de amanteigamento, desempenha um papel fundamental ao proporcionar uma oportunidade única de visualização de potenciais descontinuidades antes do processo de soldagem do revestimento duro. A importância dessa inclusão reside no fato de que a detecção precoce de descontinuidades durante o estágio do TTAT pode significar uma diferença substancial na eficácia e na eficiência do processo de soldagem subsequente do revestimento duro. Uma vez que a aplicação do revestimento duro é uma etapa particularmente crítica, qualquer descontinuidade não detectada previamente poderia resultar em complicações significativas, tornando-se um desafio considerável para a resolução posterior;
- Seguindo o novo procedimento estabelecido e com base nos ensaios meticulosamente conduzidos ao longo de todo o processo, foi possível entregar o rolo completamente isento de quaisquer indicações ou imperfeições, atendendo assim plenamente às exigências e expectativas do cliente. Após a aplicação do rolo em operação, o mesmo teve comportamento positivo, destacando a eficácia e o desempenho superiores alcançados em comparação com a primeira recuperação. Esse relato confirma não apenas a excelência do resultado, mas também a eficácia da abordagem adotada.

6 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GIMENES, Luiz Jr. Ramalho, José Pinto. *Apostila Processo de Soldagem por Arco Submerso*. Info Solda, 2022.

CHIAVERINI, Vicente. *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos*. 7. ed. São Paulo: ABM, 2002.

MACHADO, I. G. *Soldagem & Técnicas conexas: Processos*. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477p.

CÉSAR, Paulo. *Artigo Equipamentos utilizados no processo de Arco Submerso*. AluSolda, 2028.