



APROVEITAMENTO DE ESCÓRIAS INDUSTRIAIS COMO ALTERNATIVA ECOLÓGICA NA SOLDAGEM SAW

USE OF INDUSTRIAL SLAG AS AN ECOLOGICAL ALTERNATIVE IN SAW WELDING

PAULO SÉRGIO DA SILVA | paulo.silva@fatec.sp.gov.br | Fatec Pindamonhangaba/SP

AGNALDO BENEDITO MOREIRA | agnaldo.moreira@fatec.sp.gov.br | Fatec Pindamonhangaba/SP

EDILON DE OLIVEIRA FRANÇA | edilon.franca@fatec.sp.gov.br | Fatec Pindamonhangaba/SP

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e ambiental do reaproveitamento de escória proveniente do processo de soldagem por arco submerso (SAW), visando à redução de resíduos industriais e ao desenvolvimento de práticas sustentáveis. O material base utilizado foi o aço ASTM A36, amplamente empregado em aplicações estruturais. Foram realizadas três condições experimentais: CP1 (100% fluxo ativo novo), CP2 (50% fluxo novo e 50% escória moída) e CP3 (100% escória moída). Os ensaios incluíram inspeção visual, líquido penetrante, análise macrográfica, granulometria e dureza Rockwell A. Os resultados indicaram que nenhuma das amostras apresentou descontinuidades críticas, mantendo boa integridade superficial. A amostra CP2 obteve a maior penetração (15,55 mm), enquanto a CP3 apresentou a menor (11,43 mm), demonstrando que a substituição parcial da escória não compromete o desempenho metalúrgico. A diluição variou entre 51% e 55%, com diferenças pouco significativas entre as composições. A análise granulométrica revelou concentração predominante entre as malhas 20/40, e o teor de finos aumentou conforme o uso de escória reciclada. A dureza média apresentou variações inferiores a 1 HRA entre as condições, sendo estatisticamente irrelevante. Dessa forma, conclui-se que a substituição de até 50% do fluxo novo por escória reciclada é tecnicamente viável, mantendo as propriedades metalúrgicas do cordão de solda. A proposta contribui para a sustentabilidade na soldagem, reduzindo custos e o impacto ambiental associado ao descarte de resíduos sólidos industriais, sem comprometer a qualidade do processo.

Palavras-chave: Soldagem por arco submerso. Escória reciclada. Sustentabilidade. Aço ASTM A36. Reaproveitamento de resíduos industriais.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the technical and environmental feasibility of reusing slag from the submerged arc welding (SAW) process, aiming at reducing industrial waste and developing sustainable practices. The base material used was ASTM A36 steel, widely used in structural applications. Three experimental conditions were performed: CP1 (100% fresh active flux), CP2 (50% fresh flux and 50% ground slag), and CP3 (100% ground slag). The tests included visual inspection, liquid penetrant testing, macrographic analysis, particle size distribution, and Rockwell A hardness. The results indicated that none of the samples presented critical discontinuities, maintaining good surface integrity. Sample CP2 obtained the highest penetration (15.55 mm), while CP3 presented the lowest (11.43 mm), demonstrating that partial slag replacement does not compromise metallurgical performance. Dilution ranged from 51% to 55%, with negligible differences between the compositions. The granulometric analysis revealed a predominant concentration between the 20/40 meshes, the fines content increased with the use of recycled slag. The average hardness varied by less than 1 HRA between conditions, making it statistically insignificant. Therefore, it can be concluded that replacing up to 50% of the new flux with recycled slag is technically feasible, maintaining the metallurgical properties of the weld bead. This proposal contributes to sustainability in welding, reducing costs and the environmental impact associated with the disposal of industrial solid waste, without compromising process quality.

Keywords: Submerged Arc Welding. Recycled Slag. Sustainability. ASTM A36 Steel. Reuse of Industrial Waste.

1. INTRODUÇÃO

O aço ASTM A36 é amplamente empregado na indústria devido às suas propriedades mecânicas bem definidas, excelente soldabilidade e facilidade de conformação. Trata-se de um material versátil, utilizado em uma ampla gama de aplicações, desde estruturas metálicas em pontes até projetos industriais e construção naval (Silva; Gheno, 2018).

Na fabricação industrial, a união de metais ferrosos ou não ferrosos, por meio de juntas ou ângulos, envolve a aplicação de calor ou pressão, com ou sem adição de material, caracterizando o processo de soldagem. Diversos métodos estão disponíveis para atender às diferentes necessidades industriais, desde técnicas simples até aquelas com elevado grau de automação. Dentre esses, o processo de soldagem por arco elétrico destaca-se como o mais utilizado (Marçal; Spolzino, 2022).

No contexto da soldagem por arco elétrico, destacam-se os processos com eletrodo revestido TIG (*Tungstênio Gás Inerte*), MIG (*Metal Inerte Gás*), MAG (*Metal Ativo Gás*) e o processo de arco submerso. Cada um desses métodos é amplamente empregado em setores específicos da indústria, conforme suas exigências técnicas (Castro; Pinheiro; Motta, 2017).

O processo de soldagem por arco submerso (Submerged Arc Welding - SAW) é caracterizado por sua elevada produtividade e é amplamente utilizado em setores como a siderurgia, mineração e indústria naval. Essa técnica permite a deposição de material em chapas e tubos, conferindo maior resistência ao desgaste por abrasão e à corrosão. Além disso, é utilizada em operações de recuperação de peças, como no preenchimento de desgaste em rodas ferroviárias. O arco é gerado sob uma camada de fluxo granular, que protege a poça de fusão e contribui com elementos de liga para a zona fundida (Batista; Santana, 2022).

Ainda segundo Batista e Santana (2022), os fluxos utilizados nesse processo consistem em minerais fundíveis granulares, compostos por óxidos de manganês, silício, titânio, alumínio, cálcio, zircônio, magnésio, e por compostos como o fluoreto de cálcio.

Durante o processo, o fluxo sofre fusão e se transforma em escória, cuja função é proteger a poça de fusão e controlar a taxa de resfriamento. Contudo, ao término do processo, essa escória é descartada como resíduo sólido classificado como Classe II = não inerte, o que exige destinação adequada e implica em custos ambientais e operacionais. Estima-se que, no Brasil, são geradas

aproximadamente 6 mil toneladas de escória de arco submerso por ano (Costa, 2018).

Frente a esse cenário, estudos apontam alternativas para o reaproveitamento dessas escórias, como a sua aplicação na formulação de massas cerâmicas (até 10%), na substituição de até 50% da areia em argamassas, e até mesmo na reinserção parcial no próprio processo de soldagem, substituindo parte do fluxo novo (Batista; Santana, 2022).

Nesse contexto, este trabalho tem como foco investigar a viabilidade da reutilização da escória gerada no processo de soldagem por arco submerso, analisando os possíveis impactos na qualidade do cordão de solda e identificando os defeitos que podem surgir com essa prática, de modo a contribuir para soluções técnicas e sustentáveis para o reaproveitamento desse resíduo industrial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Caracterização do Aço Carbono

O termo “aço” refere-se a uma liga metálica composta predominantemente por ferro e carbono, cuja concentração de carbono pode variar entre 0,008% a 2,11%. Em temperatura ambiente, a solubilidade máxima do carbono no ferro é de 0,008%, alcançando até 2,11% quando aquecido a 1140 °C (Marçal; Spolzino, 2022).

A obtenção do aço e suas variações é realizada por meio da siderurgia, processo no qual o ferro é levado à fusão e se incorpora o carbono como elemento principal da liga ferro-carbono. Nos chamados aços ligados, adicionam-se outros elementos como níquel, manganês, enxofre, cromo e fósforo, além de resíduos provenientes do processo de fabricação. Esses elementos de liga têm como objetivos principais aumentar a dureza, resistência mecânica, tenacidade a baixas temperaturas, temperabilidade, usinabilidade, bem como melhorar a resistência à oxidação, corrosão e abrasão (Souza, 2021).

A classificação dos aços é feita pela *American Iron and Steel Institute* (AISI) e pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) utilizando um código numérico de quatro ou cinco dígitos. Os dois primeiros identificam os principais elementos de liga presentes, e os últimos indicam a porcentagem aproximada de carbono (Marçal; Spolzino, 2022).

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) especifica o aço carbono A36 como um material de qualidade estrutural, caracterizado por propriedades mecânicas bem definidas, boa conformabilidade e excelente soldabilidade. Esse aço é amplamente utilizado em aplicações estruturais, como pontes, passarelas e plataformas, bem como em peças como cantoneiras e barras (Marçal; Spolzino, 2022; Oliveira *et al.*, 2025).

Esse tipo de aço é fabricado em diversos formatos e perfis – como chapas com diferentes espessuras, larguras e comprimentos, cantoneiras e perfis em “U” – atendendo às exigências da construção civil e da indústria mecânica (Souza, 2021).

2.2. Soldagem

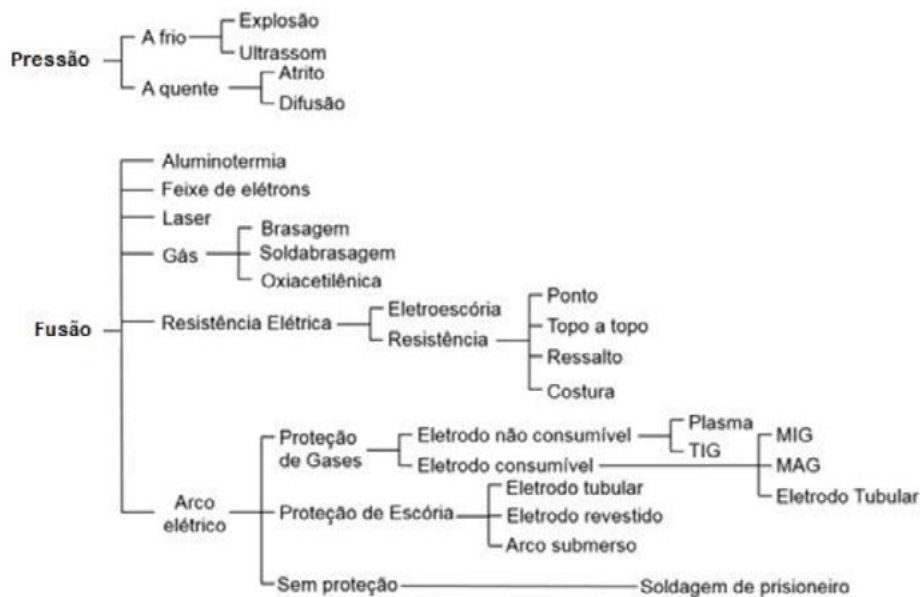
A soldagem é um dos processos mais empregados na indústria metalmeccânica, sendo utilizada para unir dois ou mais materiais por meio da fusão total do metal base e, quando necessário, do metal de adição. A união pode ocorrer entre materiais de mesma ou diferentes espessuras, com ou sem uso de metal adicional (soldagem autógena), e abrange ligas ferrosas, não ferrosas, polímeros e compósitos (Silva, 2023).

Nos processos por fusão, destacam-se na indústria os métodos soldagem por arco elétrico:

- *SMAW (Shielded Metal Arc Welding)* – Eletrodo Revestido;
- *GMAW (Gas Metal Arc Welding)* – MIG/MAG;
- *GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)* – TIG;
- *SAW (Submerged Arc Welding)* – Arco Submerso.

Ainda segundo Silva (2023), os métodos de soldagem são classificados conforme a técnica de união empregada, podendo ser agrupados em processos por fusão ou por pressão. A Figura 1 ilustra a classificação geral dos principais processos de soldagem.

Figura 1 | Classificação dos processos de soldagem

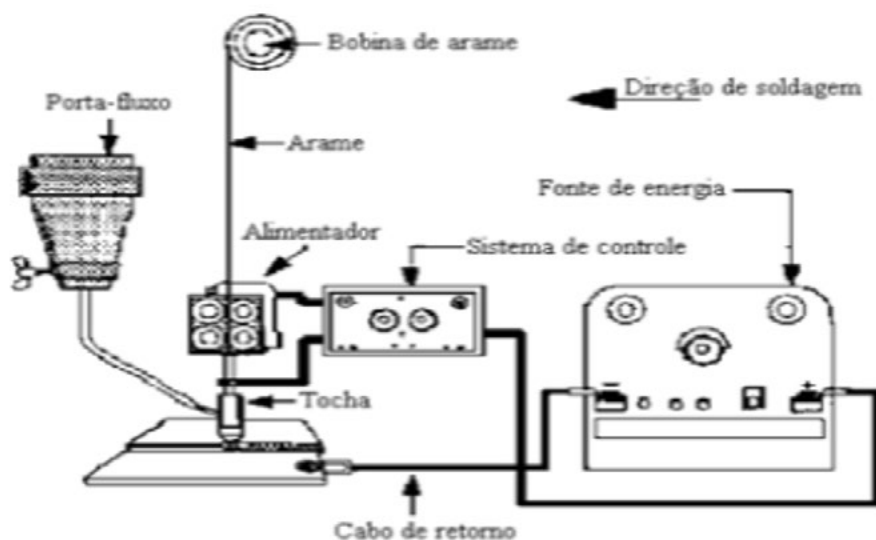


Fonte: Souza, (2021)

Arco Submerso

O equipamento básico do processo SAW é composto por fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem, sistema de controle, dispositivo de alimentação de fluxo, cabos elétricos, exaustor, tracionador e o material base, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 | Esquema genérico do processo de soldagem a arco submerso



Fonte: Felizardo (2016).

Durante a operação, o arco elétrico não é visível, pois permanece coberto pelo fluxo. Esse material granulado tem a função de proteger a poça de fusão contra contaminações atmosféricas, estabilizar o arco e gerar uma escória sólida após a solidificação (Batista; Santana, 2022).

A soldagem por arco submerso (SAW) é um processo caracterizado por elevada taxa de deposição de material e alta penetração, sendo indicado para união de chapas espessas, a partir de 12 mm (Cunha *et al.*, 2021; Da Silva Filho *et al.*, 2025). O processo se baseia na formação de um arco elétrico entre um eletrodo contínuo e o material base, submerso sob um leito de fluxo granulado (Silva, 2023).

Fluxos

O fluxo é um material granulado composto por óxidos metálicos e elementos de liga. Sua função é cobrir completamente o arco elétrico, proporcionando proteção contra contaminações e garantindo a forma e integridade do cordão de solda (Batista; Santana, 2022).

As designações principais do fluxo são:

- (F): fluxo para soldagem ao arco submerso;
- (S): fluxo reciclado (escória moída ou misturada); ausência de “S” indica fluxo virgem.
- Os fluxos podem ser classificados como fundidos ou granulados. Cada tipo apresenta características específicas que influenciam sua aplicação (Santos, 2015).

Fluxos fundidos são produzidos pela fusão de óxidos de manganês, silício, alumínio, zircônio ou cálcio, junto a desoxidantes como ferrosilício e ferromanganês. Após a fusão, o material é resfriado e fragmentado em grânulos. Possuem excelente estabilidade do arco, maior velocidade de soldagem e podem ser reciclados, embora tenham menor resistência a carepas e ferrugem (Santos, 2015).

Fluxos granulados apresentam boa resistência à ferrugem e carepas, menor consumo (30% a 40% inferior aos fundidos) e permitem a inclusão de elementos de liga. Apesar disso, são sensíveis à umidade e exigem armazenamento adequado para evitar alterações na composição do metal depositado (Santos, 2015).

Fluxos neutros são assim chamados por não alterarem significativamente a composição química do metal de solda, mesmo com possíveis variações nos teores de manganês (Mn) e silício (Si), embora afetem as tensões do arco (Santos, 2015).

Fluxos ativos apresentam maior variação na composição do metal de solda, promovendo alteração nas propriedades mecânicas. Possuem maior teor de Mn e Si, conferindo resistência contra trincas e porosidades (Santos, 2015).

Material consumível: Arame

A AWS (*American Welding Society*) especifica os consumíveis usados na soldagem SAW. Os arames, que conduzem a corrente elétrica e funcionam como metal de adição, são classificados conforme seu teor de manganês: baixo (L), médio (M) e alto (H), com variações nos teores de carbono e silício. Arames com maiores teores desses elementos favorecem cordões de maior dureza e resistência. O silício, em particular, melhora a fluidez da poça e o acabamento do cordão, além de reduzir a porosidade (Silva, 2023).

Penetração e Diluição

Durante a soldagem, ocorre fusão do metal de adição com o metal base, resultando na formação da Zona Fundida (ZF). Essa região é fortemente influenciada pelas composições químicas dos metais envolvidos e pela proporção relativa entre eles, conhecida como diluição (Souza Neto, 2015).

A diluição representa a quantidade de metal base que se incorpora ao metal adicionado. Esse parâmetro é crucial para o desempenho em serviço, sobretudo quando se utilizam metais distintos. A diluição deve ser minimizada para manter a integridade metalúrgica da união (Romão; Silva, 2018). A Figura 3 ilustra a diluição entre o material adicionado (A) e a porção do substrato fundido (B).

Figura 3 | Diluição em camada depositada



Fonte: Souza Neto (2015)

A diluição pode ser calculada pela Equação 1.

$$\text{Diluição (\%)} = (B / (A + B)) \times 100 \quad (1)$$

A penetração, também conhecida como profundidade de fusão, é a distância que a fusão alcança no metal base ou no passe anterior durante o processo de soldagem. Essa característica é fundamental para assegurar a resistência e a qualidade da junta soldada. A variável de maior influência sobre a penetração é a corrente de soldagem (amperagem). Quanto maior a corrente, maior será a penetração; por outro lado, a redução da amperagem resulta em menor profundidade fundida (Nazaré, 2022).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Soldagem da FATEC Pindamonhangaba, utilizando-se uma máquina de soldagem por arco submerso da marca Lincoln, modelo DC-1000, na posição plana o objetivo foi analisar os possíveis defeitos associados à soldagem sob diferentes composições de proteção por fluxo, sendo elas: CP1 100% fluxo ativo novo; CP2 mistura composta por 50% de fluxo ativo novo e 50% de escória triturada; e CP3 100% escória triturada.

Para a realização dos testes, foram utilizadas três chapas de aço ASTM A36, cada uma com dimensões de 100 mm × 200 mm × 12,78 mm e os parâmetros de soldagem utilizados estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem arco submerso

Parâmetros de Soldagem	Voltagem
Voltagem [V]	30
Amperagem [A]	550
Velocidade de Soldagem [cm/min]	24
Posição de Soldagem	1G
Distância bico de contato [mm]	25
Diâmetro do Arame [mm]	2,38

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023).

Após a execução dos procedimentos de soldagem, as amostras foram direcionadas ao Laboratório de Ensaio Não Destrutivos (END) da Fatec Pindamonhangaba, onde foi realizado o ensaio por Líquido Penetrante, utilizando o produto Spotcheck SKL-WP. Esse método visa à identificação de descontinuidades superficiais — como porosidades e trincas — por meio do princípio da capilaridade, em que o líquido penetrante se infiltra em falhas superficiais, sendo posteriormente revelado, permitindo a visualização clara de imperfeições no cordão de solda.

Em continuidade às análises, as juntas soldadas foram submetidas à avaliação macrográfica no Laboratório de Metalografia da mesma instituição (Moura *et al.*, 2024).

As amostras foram inicialmente seccionadas por meio de uma cortadora metalográfica da marca Teclago, modelo CM80. Na sequência, procedeu-se ao lixamento das superfícies cortadas, respeitando a ordem crescente de abrasividade das lixas com granulometrias de 100, 220, 320, 400 e 600 Mesh, com o intuito de obter uma superfície polida e uniforme, adequada à observação macroestrutural.

Para a revelação da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e da linha de fusão, realizou-se o ataque químico utilizando reagente Nital a 20%, preparado pela mistura de 20 ml de ácido nítrico com 80 ml de álcool etílico. A aplicação foi conduzida manualmente, por meio da técnica de esfregamento, até que os contornos metalúrgicos da junta soldada se tornassem visíveis.

Concluído o ataque químico, as amostras foram examinadas sob estereoscópio, permitindo a análise da geometria do cordão de solda. Nessa etapa, foram mensuradas a profundidade de penetração da solda, bem como os reforços superior e inferior do cordão. As imagens registradas possibilitaram comparar as técnicas de soldagem aplicadas, nas modalidades de tração (puxando) e compressão (empurrando) do arco elétrico (Benevides *et al.*, 2025).

A análise granulométrica dos fluxos utilizados nos diferentes parâmetros de composição como : 100% fluxo novo, 50% fluxo novo e 50% escória reciclada, e 100% escória reciclada foi conduzida no laboratório de Fundição da Fatec Pindamonhangaba.

Para a execução do ensaio, empregou-se um agitador de peneiras granulométricas com acionamento magnético da marca Betel, conforme representado na Figura 09. A sequência de peneiras utilizadas seguiu a padronização com aberturas de 8, 20, 30, 40, 50, 70, 80, 100, 120, 140, 170, 200 e 300 Mesh, submetidas à agitação por 15 minutos com frequência de 3 Hz.

Cada amostra foi previamente pesada, com massa de 100 g, utilizando uma balança analítica da marca Gehaka, modelo P440. Ao término do ensaio, o material retido em cada peneira foi cuidadosamente coletado e pesado individualmente, permitindo a determinação da distribuição granulométrica dos fluxos em cada uma das condições analisadas

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o processo de soldagem foi aguardado as chapas resfria ao ar e encaminhada para o laboratório de ensaios não destrutivo e realizado a inspeção visual direta das amostras, não evidenciou descontinuidades superficiais severas, como trincas ou mordeduras. Contudo, foi observada, ao final do cordão de solda em todas as amostras, a presença de porosidade agrupada característica típica do processo de soldagem por arco submerso. Esse resultado está em consonância com achados semelhantes reportados por Batista e Santana (2022).

Complementando a análise visual, foi realizado o ensaio de Líquido Penetrante com o intuito de detectar descontinuidades superficiais não visíveis a olho nu.

A preparação das amostras consistiu na limpeza da superfície da solda com escova de aço e posterior aplicação de removedor para eliminação de resíduos oleosos ou contaminantes. Após a secagem, aplicou-se o penetrante à base de água sobre as três amostras, conforme Figura 4, após 10 minutos de penetração, o excesso foi removido com água corrente.

Figura 4 | Aplicação do líquido penetrante nas amostras



Fonte: Elaborado pelos Autores (2023).

Em seguida, com os corpos de prova secos, foi aplicado o revelador para destacar possíveis descontinuidades. As regiões tratadas são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 | Aplicação do revelador nas amostras soldadas



Fonte: Elaborado pelos Autores (2023).

A análise das superfícies após a revelação (Figura 5) confirmou os resultados do exame visual: não foram detectadas descontinuidades críticas, porém, porosidade agrupada foi novamente observada ao final do cordão de solda em todas as amostras. Tais evidências reforçam os dados relatados por Batista e Santana (2022), sugerindo uma possível influência do término da soldagem sobre a formação desses defeitos.

Após os ensaios não destrutivos, as amostras foram seccionadas transversalmente em corpos de prova de 20 mm de largura. A diluição foi determinada a partir das imagens macrográficas, utilizando o *software Analysis* para calcular as áreas fundidas.

A diluição foi expressa como a razão entre a área do metal base fundido e a área total da zona soldada. Os resultados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 | Áreas fundidas e percentual de diluição das soldas

Tipo de Fluxo	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Área Superior mm ² [A]	80,457	85,169	65,090
Área Inferior [mm ²] [B]	98,104	92,040	66,861
Área Total [mm ²]	178,561	177,209	131,951
Diluição [%]	55	52	51
Penetração [mm]	13,75	15,55	11,43

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023).

Observa-se que a amostra 3, composta integralmente por escória reciclada, apresentou a menor taxa de diluição (51%). A amostra 1 apresentou a maior diluição (55%), com uma área fundida aproximadamente 26% superior à da amostra 3.

A proximidade dos valores entre as amostras 1 e 2 reforça a viabilidade técnica do uso de até 50% de escória reciclada, conforme também verificado por Silva (2023).

Análise granulométrica foi realizada as três condições de fluxo, utilizando peneiramento mecânico. As análises indicaram que:

- **Fluxo 100% novo** apresentou concentração predominante entre malhas 20/40, com granulometria média de 45 Mesh, concentração de 89,8% e teor de finos de 0,09%.
- **Fluxo 50% novo / 50% escória** também teve concentração predominante entre 20/40, com 80,2% de material retido e 0,86% de finos.
- **Fluxo 100% escória** apresentou concentração de 70,8% e teor de finos significativamente maior (3,08%).

Após o peneiramento, os dados de massa retida por malha são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 | Distribuição granulométrica por peneira

Abertura Peneira [Mesh]	100%Novo [g]	50% Novo 50% Escória [g]	100% Escória [g]
8	0	1,82	4,22
20	42,32	42,29	44
30	32,67	24,64	16,76
40	14,8	13,3	10,05
50	7,22	6,33	7,02
70	1,13	4,1	4,7
80	0,17	3,1	2,02
100	0,1	0,9	1,38
120	0,1	1	1,78
140	0,19	0,79	1,58
170	0,03	0,5	1,14
200	0,03	0,18	0,91
300	0,03	0,18	3,08

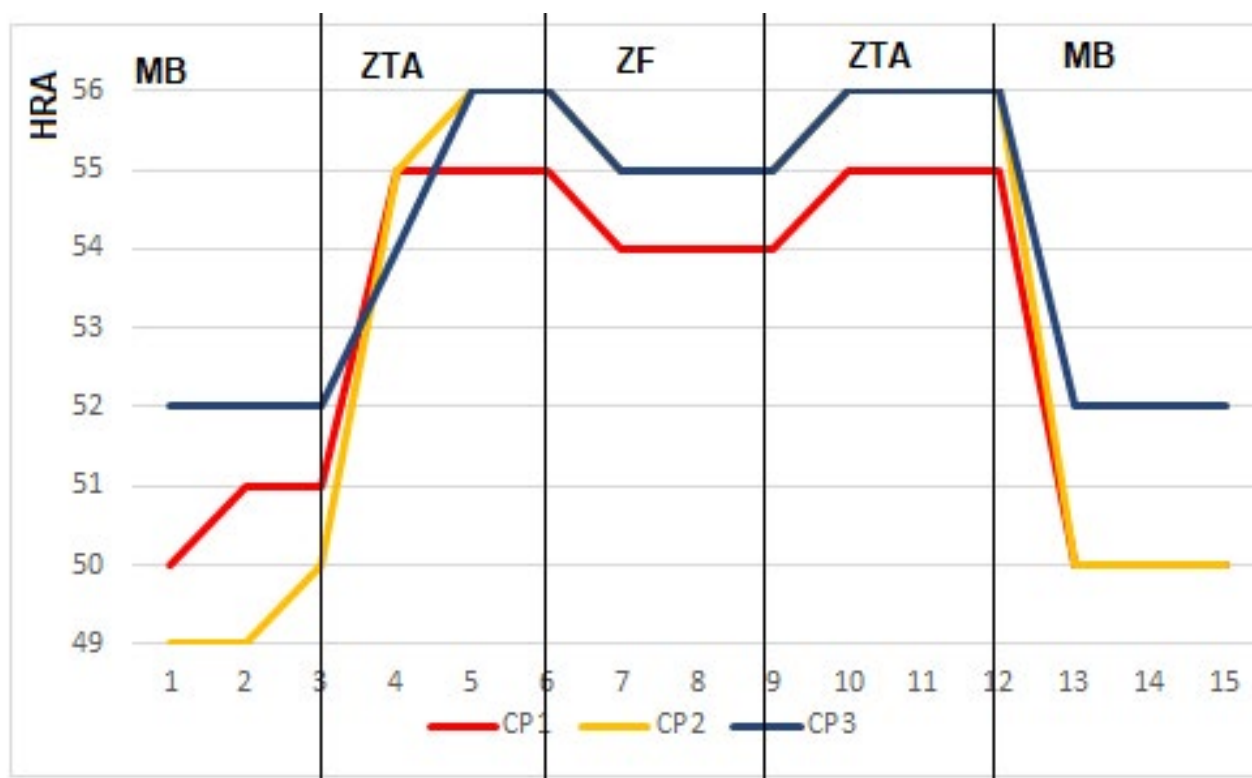
Fonte: Elaborado pelos Autores (2023).

Foi realizado o ensaio de dureza Rockwell A, com penetrador de cone de diamante a 120° e carga de 60 kgf, em três regiões distintas dos corpos de prova:

- Metal base (MB) – 3 medições em cada lado (6 no total);
- Zona termicamente afetada (ZTA) – 3 medições por lado (6 no total);
- Zona fundida (ZF) – 3 medições centrais.

A Figura 6 **ilustra as regiões ensaiadas**.

Figura 6 | Dureza Perfil da Solda MB, ZTA e ZF



Fonte: Elaborado pelos Autores (2023).

A amostra 1 (100% fluxo novo) apresentou os menores valores médios de dureza, especialmente na ZTA e ZF, sendo aproximadamente 1 HRA inferior às demais. As amostras 2 e 3 apresentaram valores similares entre si e ligeiramente superiores à amostra 1.

A diferença de aproximadamente 1 HRA entre os valores médios foi considerada estatisticamente irrelevante, indicando que a substituição parcial ou total por escória reciclada não afetou significativamente a dureza das regiões soldadas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise das três condições de fluxo estudadas, CP1 (100% fluxo ativo novo), CP2 (50% fluxo ativo novo e 50% escória moída) e CP3 (100% escória moída), foi possível obter resultados relevantes quanto ao desempenho metalúrgico e físico dos cordões de solda.

Nos ensaios visuais e por líquido penetrante, nenhuma das amostras apresentou descontinuidades superficiais visíveis, como trincas, mordeduras ou indicações lineares, o que sugere boa integridade superficial das soldas nas três composições de fluxo.

No que tange à análise da penetração, a condição CP2 destacou-se com a maior profundidade de fusão, atingindo 15,55 mm — aproximadamente 12% superior à CP1 e 26% superior à CP3. A CP1 apresentou penetração intermediária (13,75 mm), enquanto a CP3 obteve o menor valor (11,43 mm). Esses resultados indicam que a adição de escória reciclada em até 50% ao fluxo novo não compromete a capacidade de penetração da solda, podendo até mesmo favorecê-la.

Em relação à diluição, a CP3 apresentou o menor valor (51%), seguida por CP2 (52%) e CP1 (55%). A área fundida total foi 26% maior na CP1 em comparação à CP3, enquanto a diferença entre CP1 e CP2 foi de apenas 0,7%, considerada desprezível.

Esses dados reforçam a viabilidade técnica da utilização de até 50% de escória reciclada no fluxo sem prejuízo significativo à diluição.

A análise granulométrica revelou que todas as amostras apresentaram distribuição concentrada entre as malhas 20/40, com valor médio de 45 Mesh. No entanto, o fluxo novo (CP1) apresentou maior concentração de partículas nesta faixa (89,8%) e menor teor de finos (0,09%), enquanto a CP2 apresentou 80,2% e 0,86%, respectivamente.

A CP3 teve a menor concentração (70,8%) e o maior teor de finos (3,08%), o que pode afetar negativamente a estabilidade do processo de soldagem.

O ensaio de dureza Rockwell A indicou valores muito próximos entre CP2 e CP3, com leve superioridade de 1 HRA em relação à CP1. No entanto, essa variação é considerada irrelevante do ponto de vista prático, evidenciando que a substituição parcial ou total do fluxo por escória reciclada não compromete a dureza na Zona Fundida (ZF) nem na Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Dessa forma, conclui-se que a substituição de até 50% do fluxo ativo novo por escória reciclada apresenta desempenho técnico satisfatório em termos de penetração, diluição, granulometria e dureza, configurando-se como uma alternativa viável tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental para o reaproveitamento de resíduos na soldagem por arco submerso.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, D. S.; SANTANA, J.L. A influência da granulometria do fluxo ativo no Processo de Soldagem Arco submerso "SAW" no aço ASTM A36. 2022. 49p. Trabalho de Graduação (Curso de Mecânica em Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2022.
- BENEVIDES, K. D. G.; BENEVIDES, P. P.; BENEVIDES, M. P.; VIAGI, A. F.; MOURA, R. A. (2025). Neuroengenharia: uma pesquisa sobre Inteligência Artificial em um posto de trabalho compartilhado entre humano e máquina. Revista Exatas, [S. l.], v31, n2, 2025. DOI: 10.69609/1516-2893.2025.v31.n2.a4017. <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/4017>
- CASTRO, J. N.; PINHEIRO, B. R.; M. M. F., Estudo da Variação da DBCP e do ângulo de soldagem em corrente pulsada, curto-circuito convencional e curto-circuito controlado em soldagem MIG/MAG 72º Congresso Anual da ABM, Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.
- COSTA, M. S. W. Caracterização das Escórias Geradas no Processo de Soldagem ao Arco Submerso e suas vias de Reutilização. 2018. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte - Minas Gerais. 2018.
- CUNHA, I. O. J.; JUNIOR, I. A. C.; MOURA, G. G.; MOURA, R. A.; SILVA, M. B. Segurança e ergonomia para força laboral feminina: interação com máquinas colaborativas. Sodebras. Vol. 16. Nº 187. 2021. ISSN 1809-3957. DOI: <https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.16.2021.187.08>
- DA SILVA FILHO, A. L.; BENEVIDES, M. P.; NOHARA, E. L.; DE MOURA, R. A. (2025). Engenharia mecânica na construção de máquina-ferramenta portátil para usinar peças de até 1200 milímetros de diâmetro. ARACÊ, [S. l.], v. 7, n. 7, p. 40298–40314, 2025. DOI: [10.56238/arev7n7-295](https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/6788). <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/6788>
- FELIZARDO, I. Apostila - Tecnologia da Soldagem. 2016. 113p. Departamento de Engenharia Mecânica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG. 2016.
- MARÇAL, I.S.L.; SPOLZINO, L.E.C.L.; Estudo do Processo de Soldagem por MIG em Material A-36 com Adição de Óxido de Titânio. 2022. 46p. Trabalho de Graduação (Curso de Mecânica em Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba/SP. 2022.
- MOURA, R. A.; MARÍLIO, J. W. O.; MARQUES, D. J. R.; OLIVEIRA, M. R.; SILVA, M. B. (2024). Neuroergonomia aplicada na engenharia para testar materiais mais leves e confortáveis para usuários de cadeiras de rodas. Revista SODEBRAS, Vol. 19, Nº 221, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29367/5bge8b53> . <https://revista.sodebras.com.br/index.php/revista/article/view/13/8>
- NAZARÉ, V. D. M. Estudo da Profundidade e Diluição do Aço A36 com a Variação da Inclinação do Ângulo da Tocha No Processo MIG (GMAW). 2022. 42p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba.-SP 2022.
- OLIVEIRA, M. R.; BENEVIDES, K. G.; RUFINO, L. G. C.; SANTOS, D. A.; BENEVIDES, M. P.; MOURA, R. A. (2025). Direito Digital e sua limitação no uso da inteligência artificial hodierna: um ponto para reflexão e ações requeridas. DOI: 10.55905/revconv.18n.7-341. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/19679>

ROMÃO, E. J. E.; SILVA, L. F. N. Análise do Perfil de Dureza da Solda, Variando a Temperatura de Pré-Aquecimento. 2018. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2018.

SANTOS, C.E.F Processo de Soldagem Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança Érica, 152p São Paulo 2015.

SILVA, L. G. C. Estudo dos Efeitos da Adição de Óxido de Titânio na Soldagem por Arco Submerso. 2023. 53p. Trabalho de Graduação do Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba/SP. 2023.

SILVA, R. C.; GHENO, S. M. Caracterização Mecânica e Estrutural do Aço Astm A131 Classe DH36 em Comparação com Aço ASTM A36 Utilizado para Projetos Estruturais. I STEFA Simpósio de Tecnologia Fatec Sertãozinho. 2018. Fatec Sertãozinho-São Paulo.

SOUZA NETO, E.C., Avaliação da Resistência ao Desgaste de Revestimentos Duros Aplicados por Soldagem em Martelo Triturados de Baterias Automotivas. Dissertação mestrado em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e tecnologia, 2015.

SOUZA, L. Influência do Preaquecimento e do Sentido de Soldagem no Processo TIG Sobre a Microestrutura e as Propriedades Mecânicas do Aço ABNT 1020. 2021. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul, do Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul/SC. 2021.

