**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO NO AÇO SAE 4340**

ADRIANA MARIA PONTES MENEZES COSTA1, EMMANUELLE DE OLIVEIRA SANCHO2, JULIETTY BARRETO MAIA DE MORAIS3 e MAURO DA JUSTA CABRAL4

1Engenheira Mecânica, UNIFOR, Fortaleza-CE, dri.mpmcosta@edu.unifor.br;

2Dra. em Engenharia e Ciência de Materiais, Profa. Assistente, UNIFOR, Fortaleza-CE, esancho@unifor.br;

3Ma. em Energias Renováveis, Profa. Auxiliar, UNIFOR, Fortaleza-CE, julietty@unifor.br;

4Especialista em Engenharia de Petróleo, Prof. Auxiliar, UNIFOR, Fortaleza-CE, maurojcabral@unifor.br.

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC

8 a 11 de agosto de 2023

**RESUMO**: O método de soldar a arco elétrico é amplamente utilizada no ramo industrial em consequência da sua ampla disponibilidade e eficácia, pois, trata-se de um método rápido, prático, de baixo custo e que permite sua aplicação em diferenciados posicionamentos e ambientes. O desenvolvimento dessa prática pode ser facilmente mecanizado ou automatizado o que contribui para a sua eficiência. Além disso, uma característica importante desse método é a capacidade de promover a coalescência entre os materiais, metais e não metais, essa flexibilidade é possível devido à liberdade de produção de eletrodos revestidos com composições químicas específicas que agregam melhorias durante e depois de elaborada a soldagem. Ao soldar aços temperáveis surge um desafio significativo de controlar a microestrutura resultante dos diferentes ciclos térmicos envolvidos na aplicação da solda. Portanto, todo estudo que venha a ser feito com o propósito de identificar e solucionar possíveis falhas após aplicação de solda nesses aços é de grande importância, sendo este o objetivo deste trabalho, analisar as características da região soldada a SMAW (Soldagem a arco de metal blindado) no aço SAE 4340, conhecido por sua capacidade de transformação. Para conduzir este estudo foram consideradas as seguintes variáveis de controle: nível de corrente e material de base sem tratamento térmico. A proposta deste estudo é a apontar os níveis empíricos que resultem em uma zona termicamente afetada com um baixo percentual de fases endurecidas, e também, oferecer uma geometria adequada do cordão de solda que garanta as qualidades mecânicas necessárias.

**PALAVRAS-CHAVE:** SMAW, SAE4340, Propriedades mecânicas.

**ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES IN THE SAE 4340 STEEL COATED ELECTRODE WELDING PROCESS**

**ABSTRACT**: The electric arc welding method is widely used in the industrial sector as a result of its wide availability and effectiveness, as it is a fast, practical, low-cost method that allows its application in different positions and environments. The development of this practice can be easily mechanized or automated, which contributes to its efficiency. In addition, an important feature of this method is the ability to promote coalescence between materials, metals and non-metals, this flexibility is possible due to the freedom of production of coated electrodes with specific chemical compositions that add improvements during and after the welding is elaborated. When welding hardened steels, there is a significant challenge of controlling the microstructure resulting from the different thermal cycles involved in the application of the weld. Therefore, any study that may be carried out with the purpose of identifying and solving possible failures after applying welding to these steels is of great importance, and this is the objective of this work, to analyze the characteristics of the region welded with SMAW (Metal Arc Welding). armored steel) in SAE 4340 steel, known for its transformability. To conduct this study, the following control variables were considered: current level and base material without heat treatment. The purpose of this study is to point out the empirical levels that result in a thermally affected zone with a low percentage of hardened phases, and also to offer an adequate geometry of the weld bead that guarantees the necessary mechanical qualities.

**KEYWORDS:** SMAW, SAE4340, Mechanical properties.

**INTRODUÇÃO**

No ambiente da mecânica industrial, vários processos são realizados para construção e reparação dos materiais metálicos e não metálicos, possuindo como finalidade fornecer produtos conforme a necessidade da sociedade. Dentre vários processos industriais, podemos citar: Forjamento, Fundição, Retificação, Usinagem, Polimento, Estampagem, Extrusão, Soldagem, dentre outros. Durante a fabricação, especificamente nos processos que envolvam soldagem, uma maior atenção deve ser dada, visto que essa operação envolve muitos fenômenos físicos e metalúrgicos como, fusão, solidificação, deformações que podem resultarem grandes problemas.

A Soldagem é fortemente utilizada em todos os setores industriais para a junção permanente de metais e não metais, sendo necessário experiência e prática em sua aplicabilidade. Esse processo vem passando ultimamente por diversas melhorias tecnológicas para atender o progresso que o mercado está apresentando correspondente ao acréscimo da demanda de fabricação, assim, satisfazendo o crescimento produtivo (OLIVEIRA, 2015).

Segundo Cardoso Neto *et. al.* (2016), o aço SAE 4340 é considerado um aço de ultra-alta resistência á tração, combina resistência e tenacidade e é usado em elementos estruturais críticos que exigem altas-tensões. Suas aplicações vão desde as indústrias automotiva, petrolífera e naval até a confecção de elementos estruturais críticos para veículos espaciais e trens de pouso de aeronaves.

As propriedades como resistência mecânica e tenacidade, são características importantes na fabricação de diversos produtos na indústria mecânica, entretanto, o aço SAE 4340 tem elevada temperabilidade e baixa soldabilidade o que torna o processamento de soldagem mais complexo. Portanto, este trabalho visa identificar e apresentar soluções que tornem mais produtivo, eficiente e menos oneroso o manuseio na aplicação do processo de soldagem com eletrodo revestido, desta forma, proporcionando e garantindo todo o rendimento e todas as funcionalidades do aço SAE 4340.

**MATERIAL E MÉTODOS**

 O processo experimental deste trabalho está representado na Figura 1, e foi segmentado em fases, o fluxograma demonstra a sequência metodológica empregada, correlacionando cada uma das etapas. O trabalho envolve a aplicação de cordões de solda sobre o aço SAE 4340 através do processo de soldagem com eletrodo revestido. Realização de ensaios de soldagem com diferentes níveis de corrente sem a aplicação de tratamentos térmicos. Através do processo de metalografia foi possível averiguar as propriedades mecânicas no metal de base, na zona fundida e na zona termicamente afetada, decorrentes dos diferentes níveis de corrente usados na soldagem. Além disso, com o auxílio de um microdurômetro da marca Shimadzu, foi realizado o ensaio mecânico de microdureza, através do ensaio não destrutivo Vickers, com a aplicação de carga de 500 kgf durante o tempo de 15 segundos. Este trabalho utilizou como MB o aço SAE 4340, um aço que possui características como alta temperabilidade, pertencente a família molibidênio, cromo-níquel-molibdênio, comumente adotado na manufatura de peças mecânicas como: eixos, engrenagens, virabrequins, colunas, dentre outros. O aço SAE 4340 dispõe de baixa soldabilidade e pouco poder de usinabilidade, entretanto, é possível acentuar suas qualidades mecânicas por meio de tratamentos térmicos.

Figura 1 – Etapas dos processos



Fonte: Próprio autor

 Realizou-se testes preliminares que delimitaram os níveis de corrente em 120 A e 150 A para o consumível E6013, e, assim 110 A e 150 A para o consumível E7018. Visto que o consumível E7018 possui um maior diâmetro, com 3,25 mm, o mesmo foi escolhido para avaliar o comportamento do material MB quando submetido a diferentes níveis de corrente. O aço SAE 4340, recebido na condição normalizado, foi submetido a dois cordões de solda com a utilização do eletrodo E7018 e com variação de corrente, o primeiro cordão foi aplicado uma corrente de 120 A e o segundo cordão de solda uma corrente de 150 A. Os cordões de solda foram aplicados em um tarugo medindo 5/8” (16 mm).

 A Figura 2, apresenta o material aço SAE 4340 com aplicação de solda com nível de corrente de 120 A, soldado com o consumível E7018, visualmente o cordão apresenta boa qualidade. O material não recebeu tratamento térmico antes e nem após a soldagem.

Figura 2 – Aço SAE 4340 com aplicação do cordão de solda a 120 A



Fonte: Próprio autor

 O resfriamento para ambos os cordões de solda ocorreram de forma natural, em temperatura ambiente e não receberam tratamento térmico após a aplicação do cordão de solda. Após o completo resfriamento do material, foi efetuado o corte das amostras para a inicialização do processo de metalografia e posteriormente aplicação do ensaio de micro dureza Vickers. As dimensões para o corpo de prova foi diâmetro de 50 mm x 15 mm de altura.

 Para o processo de metalografia foram usadas lixas d’água de 200, 400, 600 e 1.200 gr, seguido do polimento com pasta de diamante de 3 mícrons, durante 10 min, e aplicação de ataque químico com Nital a 5% durante 3 segundos. Com a ajuda do microscópio, verificamos a microestrutura e características do material na ZTA e no cordão de solda. A Figura 3, apresenta a amostra para análise das suas características após o processo de metalografia.

Figura 3 – Amostra para realização de metalografia e ensaio de dureza Vickers



Fonte: Próprio autor

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A amostra do aço SAE 4340 foi atacada com Nital (Nital 5%), e, foram realizadas metalografia na amostra sem aplicação de tratamento térmico no qual percebeu-se a presença de perlita e austenita retida. Após aplicação do cordão de solda e realizada a metalografia da amostra com ataque de Nital (Nital 5%), a ZF apresentou a formação de ripas de martensita, o que proporciona a região o aumento da dureza. Com o aumento da corrente para 150 A, a Figura 4 mostra a estrutura martensítica na ZF, atribuindo ao material maior dureza.

Figura 4 – Metalografia ZTA da amostra soldada a 150 A - sem tratamento térmico – ampliação de 1000x (Nital 5%)



Fonte: Próprio autor

Após a aplicação das soldas no aço SAE 4340, não tratado termicamente, em ambas as correntes de 120 A e 150 A, observou-se que os cordões de solda não demonstraram descontinuidades e/ou falhas que possam ser notadas de forma visual. O ataque químico com Nital a 5% axiliou na verificação das características das amostras não soldadas (MB) e nas amostras após a soldagem. Foi possível observar características como perlita e austenita, assim como, ripas de martensita e bainita, entretanto, outras formações não foram possíveis de serem identificadas.

Podemos verificar nas microestruturas que aconteceu a modificação da austenita em martensita e, além disso, em outras prováveis microestruturas. Segundo Ranieri (2010), o revelador Le Pera seria mais eficiente para a verificação, o mesmo é constituído por uma solução 1:1 de metabissulfito de sódio 1% e picral 4%. De acordo com os resultados obtidos, a ZTA formada após a soldagem com corrente de 120 A apresentou um menor volume de martensita-austenita. Desta forma, mostra-se que com um menor nível de corrente aplicado 120 A, formou-se martensita, microestrutura com maiores médias de dureza.

Para efeitos comparativos, foram realizados ensaio de dureza Vickers antes da aplicação dos cordões de solda no metal de base SAE 4340. A média dos resultados foi obtida após realizados 5 ensaios com aplicações de carga de 500 kgf durante 15 segundos, no valor de 354,4 HV.

Foram aplicadas a carga de 500 kgf, na amostra pontualmente, ao todo foram realizadas 25 ensaios de durezas na amostra soldada, conforme apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Posições dos ensaios de dureza aplicados no corpo de prova



Fonte: Próprio autor

A Tabela 1 apresenta as médias dos ensaios de dureza feitos nos cordões de soldas com carga de 500 kgf durante 15 segundos, aplicado sobre as regiões conforme apresentado na tabela 5.2, zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA).

Tabela 1 – Média dos ensaios de durezas Vickers das amostras soldadas

|  |
| --- |
| **Microdureza Vickers em cordão de solda com aplicação de corrente a 120A e 150A** |
| **Ensaios** | **ZF (HV) – 120 A** | **ZTA (HV) – 120 A** | **ZF (HV) – 150 A** | **ZTA (HV) – 150 A** |
| Ponto 1 | 233,0 | 347,0 | 303,0 | 375,0 |
| Ponto 2 | 263,0 | 395,0 | 299,0 | 385,0 |
| Ponto 3 | 256,0 | 418,0 | 305,0 | 430,0 |
| Ponto 4 | 235,0 | 409,0 | 310,0 | 402,0 |
| Ponto 5 | 236,0 | 386,0 | 308,0 | 400,0 |
| **Média** | **245,0** | **391,9** | **305,0** | **398.0** |

Fonte: Próprio autor

 A Tabela 1 apresenta as médias dos ensaios de dureza Vickers feitos nos cordões de soldas, com diferentes níveis de correntes: 120 A e 150 A. Vale destacar que a dureza média do metal de base SAE 4340 foi de aproximadamente 354 HV, ensaio realizado antes do processo de soldagem, este resultado oferecerá um comparativo com os valores obtidos na amostra após aplicada a soldagem. A zona termicamente afetada se transformou em um ponto de concentração de tensão de toda a liga, acarretando assim que toda a propagação de trincas, falhas ou fraturas, venham a ter a sua origem na ZTA. Foram realizadas indentações nas áreas do cordão de solda, zona termicamente afetada e no metal de base, analisando assim a dureza e consequentemente a resistência mecânica de cada área respectivamente. Os valores de dureza apresentados nas áreas do cordão de solda e do MB obtiveram os valores mais baixos de dureza no ensaio, enquanto que a zona termicamente afetada (ZTA), apresentou os valores mais altos. Devido ao acréscimo do nível de corrente para 150 A os resultados mostram uma extensão maior da área que sofreu austenitização, sendo assim, formando uma concentração mais elevada de martensita, o que proporciona ao material um maior dureza.

**CONCLUSÃO**

 Embora o aço SAE 4340 não tenha recebido tratamento térmico para a realização deste trabalho, percebe-se que ocorreu transformações na microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) após a aplicação de soldagem com variações de correntes. Como esperado, nos cordões de soldas, em ambos os níveis de correntes, identificamos formação da microestrutura martensítica, o que proporciona alta dureza e fragilidade e, uma média de dureza baixa quando comparado ao material de base, 354 HV. Os maiores valores de durezas média foram obtidos na ZTA, 391 HV e 398 HV, respectivamente. Em relação ao consumível utilizado para a soldagem E7018, apresentou boa estabilidade na aplicação e boa penetração. Por fim, este trabalho apresenta a alternativa de soldar o aço SAE 4340 através do processo SMAW com a utilização do consumível ASME SFA 5.1, mesmo em condições não tratadas termicamente. É importante que mais estudos sejam realizados no manuseio de aplicações de soldagem para o aço SAE 4340, visto que, é um material muito requisitado em diversos equipamentos.

**AGRADECIMENTOS**

A Universidade de Fortaleza – UNIFOR pelo apoio concedido.

**REFERÊNCIAS**

BAUER, L. A F. Materiais de Construção - Vol. 2. [Rio de Janeiro - RJ]: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788521636618. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636618/. Acesso em: 20.out.2022.

BARROS, Renato A. et.al. Caracterização de um aço SAE/AISI 4340 com diferentes microestruturas. Disponível em: http://www.sbvacuo.org.br/rbav/index.php/rbav/article/view/957. Acesso em 19.mar.2023

BRUNATTO, Silvio Francisco. Introdução ao Estudo dos Aços. Disponível em: <[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Silvio/INTRODU%C3%87%C3%83O%20](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Silvio/INTRODU%C3%87%C3%83O%20AO%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%205.pdf) [AO%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%205.pdf.](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Silvio/INTRODU%C3%87%C3%83O%20AO%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%205.pdf)Acesso em 23.nov.2022. Acesso em 25.out.2022.

CALLISTER, William D. J. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Abordagem Integrada . [Rio de Janeiro - RJ]: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788521636991. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636991/. Acesso em: 20.out.2022

CARDOSO NETO, A. .; OLIVEIRA Pereira Gouvêia, A. de .; SOUZA Boechat, J. V. de .; SOUZA Duarte, P. R. .; SOUZA Barbosa, V. de . Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas do Aço AISI 4340 Submetido ao Tratamento Térmico por Têmpera. Congresso de Interdisciplinaridade do Noroeste Fluminense, [S. l.], v. 1, 2022. Disponível em: <https://anais.eventos.iff.edu.br/index.php/coninfitaperuna/article/view/1059>. Acesso em 25.out.2022.

COSTA, Ivanilson Sousa da. Usinabilidade do Aço de Corte Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT12l14. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal De Uberlândia, Uberlândia-Mg,2014. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14976/1/UsinabilidadeAcoCorte.pdf.>. Acesso em 22.nov.2022.

OLIVEIRA, Fabiano Farias de. Estudo Das Transformações Macro E Microestruturais Das Juntas Soldadas Do Aço Sae- 4340 Pelo Processo Fcaw. 2015. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG. Disponível em: https://www.posmat.cefetmg.br/wpcontent/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o\_Fabiano\_Oliveira.pdf. Acesso em: 25.nov.2022.

RANIERI, Arus. Caracterização Mecânica e Microestrutural de um Aço 4340 com Estruturas Multifásicas e Tratamento de Nitrocarbonetação a Plasma / Arus Ranieri.- Guaratinguetá : [s.n.], 2010 180 f.: il. Bibliografia: f. 171-180 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010 Orientador: Prof. Dr. Antonio Jorge Abdalla Co-orientador: Prof Dr. Tomaz Manabu Hashimoto. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/103756?show=full. Acesso em 05. Jun.2023.