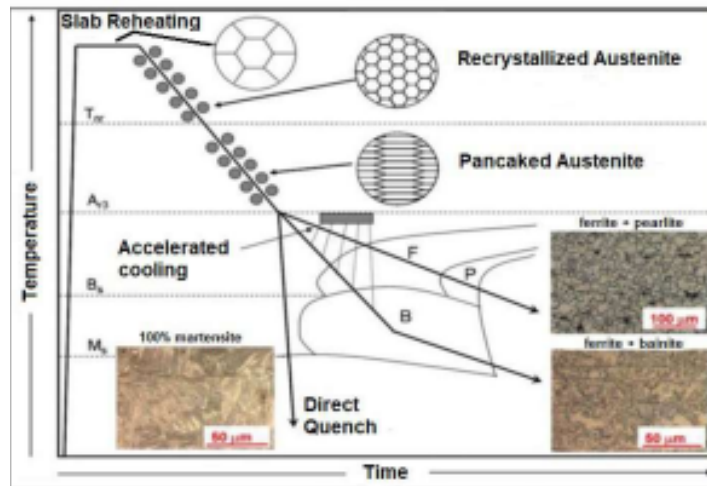


GRAPHICAL ABSTRACT**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NAS DIREÇÕES LONGITUDINAL E TRANSVERSAL DE LAMINAÇÃO DE UMA CHAPA DE AÇO ESTRUTURAL*****CONTROLLED ROLLING: MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN THE LONGITUDINAL AND TRANSVERSE DIRECTIONS.***

André Itman Filho ¹, Sílvia Lacerda de Carvalho ² e Thiago Barreto da Silva Amaral ³

¹Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Vitória, Avenida Vitória, nº 1.729, Jucutuquara, Vitória - ES, CEP 29040-780, Brasil.

²Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha, Urca, Rio de Janeiro - RJ, CEP 22290-270, Brasil.

³Instituto Federal do Amapá, Rodovia BR-210, km 3, s/n, Bairro Brasil Novo, Macapá - AP, CEP: 68.909-398, Brasil.

* andrei@ifes.edu.br

Artigo submetido em 08/07/2025, aceito em 08/02/2026 e publicado em 23/02/2026

ORCID – André Itman Filho: <http://orcid.org/0000-0002-2398-1660>

ORCID – Sílvia Lacerda de Carvalho: <https://orcid.org/0000-0003-4456-4978>

ORCID – Thiago Barreto Amaral: <http://orcid.org/0000-0002-1903-6770>

Resumo: Os aços estruturais são os mais utilizados na construção civil em razão da tenacidade, homogeneidade microestrutural, boa soldabilidade e ductilidade, além de um custo adequado. Aços como o ASTM A36 são utilizados em edifícios, pontes, maquinários, navios e diversos componentes. Em geral a composição química é restrita ao carbono, silício, manganês, enxofre e fósforo. No caso da fabricação de placas, o processo convencional é a laminação controlada. Este processo pode gerar anisotropia das propriedades mecânicas, provocada pelas solicitações na conformação das chapas. Nesta pesquisa, o objetivo foi avaliar as propriedades mecânicas nas direções longitudinal e transversal de uma chapa selecionada de uma bobina do aço ASTM A36 com composição química conhecida. Da bobina foram retiradas amostras para medidas de dureza e corpos de prova para serem submetidos aos ensaios de tração, nas direções longitudinais e transversais de laminação. A microestrutura da chapa foi observada por meio de microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostram que os valores da tensão de escoamento, resistência máxima à tração e dureza são similares. No entanto e energia no ensaio de impacto Charpy na direção longitudinal é maior, provavelmente em razão do alinhamento dos grãos nessa direção.

Palavras-chave: Aços ASTM A36; Enxofre nos aços; Laminação controlada.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES IN THE LONGITUDINAL AND TRANSVERSE ROLLING DIRECTIONS OF A STRUCTURAL STEEL.

Abstract: Structural steels are the most used in civil construction due to toughness, microstructural homogeneity, good weldability and ductility, in addition to the relatively low cost. Steels such as ASTM A36 are used in buildings, bridges, machinery, ships and different components. In these steels the chemical composition is restricted to carbon, silicon, manganese, sulfur and phosphorus. In the case of sheet metal manufacturing, the conventional process is controlled rolling. This process can generate anisotropy in the mechanical properties caused by the mechanical loads in the forming of the sheets. The objective of this study was to evaluate the mechanical properties in the longitudinal and transverse directions of a sheet selected from a coil of ASTM A36 steel, with known chemical composition. Samples were taken from the coil for hardness measurements and specimens were used to carry out tensile tests in the longitudinal and transverse rolling directions. The microstructure of the steel was observed using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the values of yield stress, ultimate tensile strength and hardness are similar. However, the energy in the Charpy impact test in the longitudinal direction is greater, probably due to the alignment of the grains in that direction.

Keywords: ASTM A36 steels; Sulfur in steels; Controlled rolling.

1 INTRODUÇÃO

Uma das classes mais importantes de aços são os denominados estruturais com um faturamento de R\$ 17,2 bilhões de reais para o setor em 2023, com um crescimento em torno de 9% com relação a 2021 (CBCA, 2025). Na construção civil, os aços estruturais de média e alta resistência mecânica são os mais adequados na utilização em componentes submetidos às solicitações mecânicas. Uma característica importante nos aços estruturais é a soldabilidade. Com relação às estruturas, o aço ASTM A36 é um dos que possui melhores propriedades mecânicas para projetos industriais (SAJID; KIRAN, 2018; SUROJO et al., 2021). A norma ASTM A36 especifica a composição química, o limite de escoamento, limite de resistência à tração e o alongamento. Para garantir as propriedades mecânicas destes aços é necessário o controle da composição química. O enxofre, que é prejudicial à tenacidade, é cada vez mais restringido para um teor máximo de 0,004% em massa (ATKINSON; SHI, 2003). Para reduzir o enxofre no ferro-gusa, é necessária a dessulfuração e os principais métodos são realizados com o carro torpedo, em panela, injeção de pós, agitação mecânica ou no convertedor (SESHADRI et al., 2006; ZHU et al., 2024).

O silício no aço aumenta a resistência mecânica, a dureza e a resistência à oxidação em altas temperaturas (CHEN et al., 2020). No entanto, forma inclusões não metálicas (silicatos) responsáveis por microtrincas na estrutura com prejuízo do alongamento, da tenacidade, condutividade térmica e usinabilidade (WANG et al., 2020). O silício também pode atuar como agente desoxidante e endurecedor por solução sólida na ferrita proporcionando aumento de resistência sem perda da ductilidade, pois diminui o teor de carbono da ferrita.

O manganês é um elemento de grande importância nos aços estruturais, pois atua como inibidor das transformações da perlita

e da ferrita poligonal, além de endurecer a ferrita por solução sólida. Isso melhora a resistência da ferrita porque os átomos de manganês impõem deformações na rede de átomos ao redor, restringindo o movimento das discordâncias. Outra finalidade relevante é a redução da fragilidade à quente pela formação do sulfeto de manganês (MnS) ao invés do sulfeto de ferro (FeS). Nesse caso, a relação Mn/S deve ser, no mínimo, igual a 8.

O tratamento com cálcio é usado para controlar a morfologia e a composição das inclusões de óxidos e sulfetos nos aços acalmados, com redução da anisotropia das propriedades mecânicas (WU et al., 2019). O cálcio forma sulfetos e modifica a morfologia das inclusões. O sulfeto de cálcio apresenta formato esférico e é mais duro do que outras inclusões (ZANG et al., 2020). A forma esférica minimiza a ocorrências de trincas e melhora a tenacidade do material (AKHYAR et al., 2022). O princípio da modificação de inclusões de alumina sólida é a reação entre o cálcio dissolvido e a alumina para produzir inclusões líquidas de aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaO}$). De acordo com a literatura, boa parte do enxofre fica na forma de sulfetos de cálcio e uma quantidade menor precipita, como MnS (TERVO et al., 2017). Turkdogan (1996) observou, que o tratamento com cálcio melhora a ductilidade, a tenacidade, a usinabilidade e reduz os defeitos superficiais causados por inclusões em tarugos, blocos e placas.

O fósforo é uma das impurezas que influencia fortemente a qualidade do aço e os principais efeitos são o aumento de dureza, diminuição da ductilidade e da tenacidade, de acordo com Hong et al. (2013). Além disso, o fósforo, raio atômico 1,10 Å, é um elemento substitucional no ferro, raio atômico 1,24 Å, e causa o endurecimento por solução sólida. Jiang et al. (2013) observaram que um teor de fósforo de 0,025% em um aço microligado pode aumentar 89 MPa no limite de escoamento, 85 MPa no limite de

resistência à tração e uma redução de 2% no alongamento.

Em aços bifásicos concluíram que o fósforo pode aumentar o alongamento uniforme devido à alta capacidade de encruamento da ferrita. No entanto, o efeito pode provocar a fragilização do aço se houver segregação para as interfaces ferrita/martensita (JIANG et al., 2013).

Nesse contexto e considerando a anisotropia dos aços estruturais e a escassez de estudos nessa área, o objetivo desse trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas na direção longitudinal e transversal em uma chapa laminada com 8 milímetros de espessura do aço ASTM A36, por meio de medidas de dureza, ensaios de tração e de resistência ao impacto, além de observações da microestrutura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. LAMINAÇÃO DA CHAPA

As placas obtidas no ligotamento contínuo foram aquecidas durante 200 minutos na temperatura de 1200 °C e posteriormente laminadas na espessura de 8,0 mm, com o último passe a 850 °C. A bobina obtida no processo foi resfriada ao ar, até a temperatura ambiente. Posteriormente foram retiradas amostras para medidas de dureza, caracterização microestrutural e confecção dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração e impacto Charpy. Os corpos de prova foram usinados conforme as dimensões especificadas na norma ASTM E23. Os ensaios de impacto foram realizados na faixa de temperaturas entre -40 a 25 °C.

A composição química da chapa é mostrada na Tabela 1 e os valores correspondem à especificação do aço ASTM A36. Os reduzidos teores de fósforo e enxofre são característicos dos processos industriais de refino secundário.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 é apresentada a composição química da bobina elaborada pelo processo

de laminação controlada. É importante destacar o teor comparativamente menor aos valores comerciais, dos elementos fósforo e enxofre. A redução dos residuais proporcionada pelos processos de dessulfuração e desfosforação garantem maior tenacidade do aço produzido (WANG et al., 2024).

Tabela 1. Composição química da bobina do aço ASTM A36 (% em peso).

C	Si	Mn	P	Al	S
0,20	0,01	0,70	0,017	0,037	0,01

Na Tabela 2, os resultados dos ensaios de tração representam a média de três ensaios na temperatura ambiente. Os valores mínimos exigidos pela norma estão colocados na segunda linha da tabela para comparação.

Tabela 2. Tensão de escoamento (LE), resistência à tração máxima (LR) e alongamento (AL), nas direções longitudinal e transversal de laminação.

ASTM A36	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
Mínimo Norma	250	500	20
Longit.	418 ± 4	560 ± 4	24 ± 1
Transv.	419 ± 1	554 ± 1	26 ± 1

Não há diferenças significativas, dos valores considerando os corpos de prova extraídos nas direções longitudinal e transversal.

Na Tabela 3, os resultados dos ensaios de impacto Charpy representam a média, em Joules, de três ensaios em cada temperatura. É observado na literatura que o ensaio de impacto apresenta caráter comparativo qualitativo e as diferenças nos resultados são pouco significativas.

No entanto é possível considerar que os valores maiores na direção longitudinal estão relacionados à orientação dos grãos e ao alinhamento dos sulfetos que favorecem

o aumento da energia absorvida (GHOSH et al., 2016).

Tabela 3. Valores da resistência ao impacto do aço ASTM A36, em Joules (J), nas direções transversal (Tr) e longitudinal (Lt) em diferentes temperaturas.

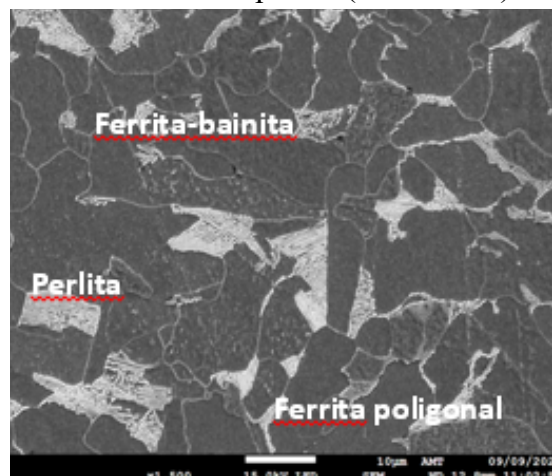
T (°C)	Tr (J)	Lt (J)
-40	5 ± 1	4 ± 1
-25	6 ± 2	10 ± 2
-10	15 ± 3	23 ± 1
0	16 ± 2	25 ± 2
10	14 ± 1	24 ± 3
15	13 ± 1	20 ± 1
25	14 ± 1	25 ± 5

Com relação ao aspecto da fratura, a análise revelou que o material apresenta um comportamento dúctil até -10°C . Com a redução da temperatura, a fratura altera o comportamento de dúctil para frágil. Nesse caso, o mecanismo responsável é o bloqueio do movimento das discordâncias (DIETER, 1981).

Com relação à dureza, o valor encontrado na chapa laminada foi de 88 ± 2 HRB, considerando a média de cinco medidas. Após preparação metalográfica convencional e revelação da microestrutura da chapa laminada com nital, é possível observar na Figura 1, a matriz de ferrita poligonal com distribuição de ferrita bainita e perlita (ABSON, 2018; SHAO et al., 2018). A distribuição microestrutural apresentada é típica do acabamento de laminação a 850°C com posterior resfriamento ao ar.

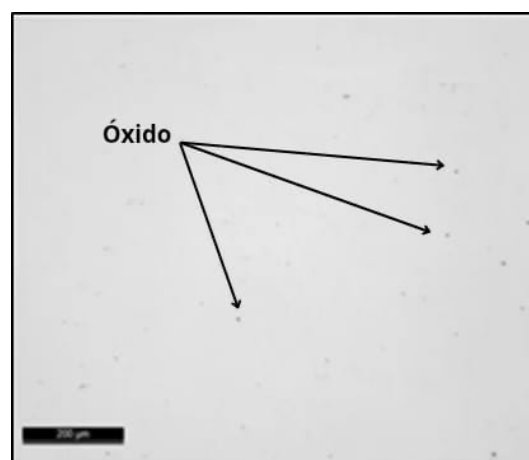
Para caracterizar a microestrutura da chapa laminada do aço ASTM A36 foram realizadas observações por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia ótica (MO).

Figura 1. Regiões dispersas de ferrita, ferrita-bainita e perlita (Nital/MEV).



Na Figura 2, as principais inclusões são de óxidos globulares dispersos na matriz, que têm pouca influência nas propriedades mecânicas.

Figura 2. Os pontos indicados pelas setas mostram óxidos finamente distribuídos na microestrutura da bobina (Nital/MO).



É importante ressaltar que os atuais processos de fabricação do aço ASTM A36, utilizando dessulfuração e desfosforação, asseguram qualidade superior aos tradicionais utilizados na construção civil. A redução dos teores de inclusões garante maior tenacidade e qualidade do aço para ser utilizado em diversos projetos de obras complexas, proporcionando menor peso e economia financeira, além da maior flexibilidade em relação ao concreto armado convencional.

4 CONCLUSÃO & PERSPECTIVAS

- A análise microestrutural da chapa de aço ASTM A36 revela uma estrutura com ferrita, ferrita bainita e perlita típica da temperatura final de laminação da bobina;
- As inclusões aparecem dispersas na matriz e praticamente não influenciam os valores das propriedades mecânicas;
- O processo de laminação controlada garante homogeneidade e similaridade das propriedades mecânicas nas direções transversal e longitudinal do aço ASTM A36.

AGRADECIMENTOS

À FAPES pelo auxílio financeiro referente ao Processo 2024-HDTX4 Edital Fapes nº 22/2023 - Bolsa Pesquisador Capixaba de André Itman Filho, ao auxílio financeiro Edital DPPG 03/2025 do IFES e ao Grupo Metal pelas amostras dos aços.

REFERÊNCIAS

ABSON, D. J. Acicular ferrite and bainite in C-Mn and low alloy steel arc weld metals. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 23, n. 8, p. 635-648, 2018.

AKHYAR; FARHAN, A.; AZWINUR; SYUKRAN; FADHILAH, T. A. Impact toughness of ASTM A36 low carbon steel by metal active gas (MAG) welding process using different cooling media. *Metalurgija*, v. 61, n. 3-4, p. 641-644, 2022.

ATKINSON, H. V.; SHI, G. Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods. *Progress in Materials Science*, v. 48, n. 5, p. 457-520, 2003.

CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço. Estatísticas. Disponível de: <https://www.cbcaacobrasil.org.br/site/estatisticas/>. Acesso em: 07 mar. 2025.

CHEN, Z.Y.; CHU, Y.P.; YANG, W. Thermodynamics and industrial practice of the formation of non-metallic inclusions during deoxidization of heavy rail steel. *Steelmaking*, v. 36, n. 4, 2020.

DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981.

GHOSH, A.; MODAK, P.; DUTTA, R.; CHAKRABARTI, D. Effect of MnS inclusion and crystallographic texture on anisotropy in Charpy impact toughness of low carbon ferritic steel. *Materials Science and Engineering: A*, v. 654, p. 298-308, 2016.

HONG, S.; SHIN, S. Y.; LEE, J.; LEE, C.-H.; LEE, S. Effect of phosphorous and boron addition on microstructural evolution and Charpy impact properties of high-phosphorous-containing plain carbon steels. *Materials Science and Engineering: A*, v. 564, p. 461-472, 2013.

JIANG, X.; CHEN, X. M.; SONG, S. H.; SHANGGUAN, Y. J. Phosphorus-induced hot ductility enhancement of 1Cr-0.5Mo low alloy steel. *Materials Science and Engineering: A*, v. 574, p. 46-53, 2013.

SAJID, H. U.; KIRAN, R. Influence of stress concentration and cooling methods on post-fire mechanical behavior of ASTM A36 steels. *Construction and Building Materials*, v. 186, p. 920-945, 2018.

SESHADRI, V. et al. Assessment of metallurgical performance of Kambara Reactor (KR) through physical modeling. In: Sohn International Symposium on Advanced Processing of Metals and Materials, 2006, San Diego. *Advanced Processing of Metals and Materials: Industrial Practice*. v. 7, 2006. 1 CD-ROM. p. 207-221.

SHAO, Y.; LIU, C.; YAN, Z.; LI, H.; LIU, Y. Formation mechanism and control methods of acicular ferrite in HSLA steels: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 34, n. 5, p. 737-744, 2018.

SUROJO, E.; AJI, R. P.; TRIYONO, T.; BUDIANA, E. P.; PRABOWO, A. R.

Mechanical and microstructural properties of A36 marine steel subjected to underwater wet welding. *Metals*, v. 11, n. 7, art. 999, 2021.

TERVO, H.; KAIJALAINEN, A.; PIKKARAINEN, T.; MEHTONEN, S.; PORTER, D. Effect of impurity level and inclusions on the ductility and toughness of an ultra-high-strength steel. *Materials Science and Engineering: A*, v. 697, p. 184-193, 2017.

TURKDOGAN, E. T. *Fundamentals of steelmaking*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1996.

WANG, Y.; YANG, W.; CHU, Y. P. Thermodynamic and industrial practice of non-metallic inclusion evolution during refining process of Q345 steel. *Hebei Metallurgy*, v. 21, n. 5, 2020.

WANG, J.; ZHANG, L.; REN, Y. Advances in the thermodynamics and kinetics of the steelmaking process and their application in numerical simulation. *Chinese Journal of Engineering*, v. 46, n. 11, p. 1960–1977, 2024.

WU, M.; FANG, W.; CHEN, R.-M.; JIANG, B.; WANG, H.-B.; LIU, Y.-Z.; LIANG, H.-L. Mechanical anisotropy and local ductility in transverse tensile deformation in hot rolled steels: The role of MnS inclusions. *Materials Science and Engineering: A*, v. 744, p. 324-334, 2019.

ZHANG, J. Y. et al. Thermodynamics and industrial practice of non-metallic inclusion formation in deoxidation of 20CrMnTiH gear steel. *Steelmaking*, v. 36, n. 3, p. 21, 2020.

ZHU, G., GAO, P., YANG, J., CHEN, B., ZHAO, X. (2024). Development of the KR Desulfurization Process Model Centered on Production Rhythm. *Materials Processing Fundamentals*, p.31-42, 2024.