



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica

Bacharelado em Engenharia Mecânica

WALLISSON PIMENTEL NEVES

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES
MICROESTRUTURAIS E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AHSS
DP800 APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Recife

2024

WALLISSON PIMENTEL NEVES

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES
MICROESTRUTURAIS E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AHSS
DP800 APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do Curso Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Pernambuco, como requisito para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino

Recife

2024

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Danielle Castro da Silva CRB4/1457

N518a
2024

Neves, Wallisson Pimentel

Análise da correlação entre as propriedades microestruturais e as propriedades mecânicas do aço ahss Dp800 após tratamentos térmicos. / Wallisson Pimentel Neves. --- Recife: O autor, 2024.
66f. il. Color.

Trabalho de Conclusão (Curso Superior Tecnológico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

Inclui Referências.

Orientador: Prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino.

1. Engenharia mecânica. 2. Propriedades mecânicas. 3. Aço DP800. 4. Microestruturas. I. Título. II. Antonino, Tiago de Sousa (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES
MICROESTRUTURAIS E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AHSS
DP800 APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Trabalho aprovado. Recife, 11/03/2025.

Tiago de Sousa Antonino

Igor Rafael Vilarouco Pedrosa

José Endreo Baracho da Costa

Recife

2025

Dedico este trabalho à minha mãe, Jocilene Hemetério Pimentel, cuja força, amor incondicional e apoio constante foram essenciais para a conclusão desta etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, minha base e guia, por me fortalecer e iluminar o caminho através dos desafios enfrentados, permitindo-me chegar até aqui.

Aos meus pais, especialmente minha mãe, Jocilene Pimentel, sou profundamente grato pelo sacrifício e apoio incondicional que me sustentaram e mantiveram focado nos estudos.

À minha irmã, Mylena Pimentel, agradeço pelo apoio constante e por me motivar a superar cada obstáculo ao longo da graduação.

Aos meus familiares, em especial ao meu primo Fabio, obrigado pelo incentivo incansável e por sempre me desafiar a ser a melhor versão de mim mesmo. À minha avó, Aucélia Pimentel, sou eternamente grato por sua motivação e apoio inabalável.

Ao meu amigo de longa data, Hiago Costa, agradeço por estar sempre ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e orientação em todas as decisões.

Aos meus amigos Anderson, Thiago, Lucas, Jobson, Thamiris e Dayanne, expresso minha profunda gratidão por contribuírem significativamente para meu desenvolvimento acadêmico, pessoal e profissional com suas valiosas lições e ensinamentos.

Ao meu orientador, Tiago Antonino, agradeço por toda a orientação, apoio e pelos ensinamentos valiosos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do IFPE, sou grato por todo o conhecimento transmitido e pelas oportunidades de crescimento oferecidas.

Ao IFPE Campus Recife, agradeço pela oportunidade de cursar e me graduar em Engenharia Mecânica, e pela excelente estrutura e suporte disponibilizados.

Finalmente, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. Sem o apoio de cada um de vocês, esta conquista não teria sido possível.

*“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência.”*

(Henry Ford)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a correlação entre as propriedades microestruturais e as propriedades mecânicas do aço AHSS DP800 após a aplicação de diferentes tratamentos termomecânicos. Inicialmente, foram fabricados corpos de prova por meio do corte do material utilizando uma guilhotina mecânica e uma fresadora nos laboratórios de corte e fresagem do curso de Engenharia Mecânica do IFPE – Campus Recife. Os corpos de prova foram submetidos a tratamentos termomecânicos específicos, onde foram aquecidos a 900°C durante 30 minutos, seguidos por laminação a quente e têmpera, finalizando com uma decomposição em banho de chumbo e resfriados à temperatura ambiente. Após os tratamentos termomecânicos, as propriedades mecânicas dos corpos de prova foram avaliadas através de ensaios de tração. Amostras também foram submetidas a preparação metalográfica, utilizando técnicas tradicionais de lixamento, polimento e ataque químico, para análise microestrutural em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). A análise revelou que, em algumas rotas de tratamento, houve um aumento significativo nas propriedades mecânicas do aço DP800, correlacionado com as características microestruturais observadas. No entanto, outras rotas de tratamento resultaram em uma diminuição dessas propriedades. Os resultados mostraram que a presença de ferrita e martensita na microestrutura do aço DP800, após os tratamentos termomecânicos, foi fundamental para o aumento da resistência mecânica do material em algumas condições. A combinação dessas fases microestruturais promoveu a melhoria das propriedades mecânicas, demonstrando a eficácia dos tratamentos aplicados. Entretanto, certas condições de tratamento não favoreceram essa melhoria, levando à diminuição das propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Aço DP800; propriedades mecânicas; microestruturas.

ABSTRACT

This work aims to analyze the correlation between the microstructural properties and the mechanical properties of AHSS DP800 steel after the application of different thermomechanical treatments. Initially, test specimens were fabricated by cutting the material using a mechanical guillotine and a milling machine in the cutting and milling laboratories of the Mechanical Engineering course at IFPE – Recife Campus. The test specimens were subjected to specific thermomechanical treatments, where they were heated to 900°C for 30 minutes, followed by hot rolling and quenching, ending with a lead bath decomposition and cooling to room temperature.

After the thermomechanical treatments, the mechanical properties of the test specimens were evaluated through tensile tests. Samples were also prepared for metallographic analysis using traditional techniques of grinding, polishing, and chemical etching, for microstructural analysis in a scanning electron microscope (SEM). The analysis revealed that, in some treatment routes, there was a significant increase in the mechanical properties of DP800 steel, correlated with the observed microstructural characteristics. However, other treatment routes resulted in a decrease in these properties.

The results showed that the presence of ferrite and martensite in the microstructure of DP800 steel, after the thermomechanical treatments, was fundamental for the increase in the material's mechanical strength under certain conditions. The combination of these microstructural phases promoted the improvement of mechanical properties, demonstrating the effectiveness of the applied treatments. However, certain treatment conditions did not favor this improvement, leading to a decrease in mechanical properties.

Keywords: DP800 Steel; Mechanical Properties; Microstructures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Presença do aço AHSS DP800 em veículos automotivos -----	16
Figura 2. Aços -----	19
Figura 3. Diagrama Ferro-Carbono -----	25
Figura 4. Laminação a quente -----	27
Figura 5. Diagrama de Têmpera -----	29
Figura 6. Microestruturas vistas por um microscópio óptico -----	33
Figura 7. Microestrutura vista em microscópio eletrônico de varredura -----	35
Figura 8. Perlita em vista microscópica -----	36
Figura 9. Martensita em vista microscópica -----	37
Figura 10. Ferrita em vista microscópica -----	38
Figura 11. Bainita em vista microscópica -----	39
Figura 12. Austenita em vista microscópica -----	40
Figura 13. Guilhotina mecânica do IFPE - Campus Recife -----	41
Figura 14. Esquema para fresagem dos corpos de prova na primeira etapa -----	42
Figura 15. Esquema para fresagem de corpos de prova na segunda etapa -----	43
Figura 16. Forno Mufla -----	44
Figura 17. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Como Recebido" -----	48
Figura 18. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 1" -----	48
Figura 19. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 2" -----	49
Figura 20. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 3" -----	49
Figura 21. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 4" -----	50
Figura 22. Microestruturas vistas por MEV da rota 1. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x -----	53
Figura 23. Microestruturas vistas por MEV da rota 2. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x -----	55
Figura 24. Microestruturas vistas por MEV da rota 3. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x -----	57
Figura 25. Microestruturas vistas por MEV da rota 4. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x -----	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades obtidas através dos ensaios de tração -----	50
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

IFPE – Instituto Federal de Pernambuco

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

AHSS – Advanced High Strength Steels

DP – Dual Phase

CFC – Cúbica de Face Centrada

CCC – Cúbica de Corpo Centrado

TCC – Tetragonal de Corpo Centrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.	13
1.1 Contextualização do Tema	13
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivo Geral	17
1.4 Objetivos Específicos	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Aços e suas classificações	19
2.1.1 Classificação dos Aços por Composição Química	20
2.1.2 Classificação dos Aços por Propriedades Mecânicas	21
2.1.3. Classificação dos Aços por Processo de Fabricação	22
2.1.4 Classificação dos Aços por Aplicação	23
2.1.5 Classificação dos Aços por Geometria	23
2.1.6 Tipos de Aço Mais Produzidos e Suas Aplicações	24
2.2 Tratamentos térmicos em aços	24
2.3 Análise Microestrutural	30
2.3.1 Microscopia Óptica	31
2.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	33
2.4 Microestruturas	36
2.4.1 Perlita	36
2.4.2 Martensita	37
2.4.3 Ferrita	37
2.4.4 Bainita	38
2.4.5 Austenita	39
3 METODOLOGIA	40
3.1 Procedimentos	40
3.1.1 Preparação das Chapas de Aço	40
3.1.2 Fresagem dos Corpos de Prova	41
3.1.3 Tratamentos Termomecânicos	43
3.2 Ensaios e Análises	46
3.2.1 Ensaio de Tração	46
3.2.2 Preparação Metalográfica	46
3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	46

4 ANÁLISE DE RESULTADOS	47
4.1 Ensaio de Tração	47
4.2 Microestruturas Obtidas	52
4.2.1 Primeira Rota	52
4.2.2 Segunda Rota	54
4.2.3 Terceira Rota	56
4.2.4 Quarta Rota	58
4.3 Correlação entre microestruturas e propriedades mecânicas	60
5 CONSIDERAÇÕES	63
REFERENCIAS	65

1 INTRODUÇÃO.

1.1 Contextualização do Tema

O tratamento térmico tem suas origens datadas em torno de 1.000 a.C., quando se descobriu que o processo de aquecimento e resfriamento dos metais alterava suas propriedades. Com o tempo, observou-se que esse processo aumentava a dureza do aço e foi identificada a importância do carbono na diferenciação entre aço e ferro. À medida que a tecnologia e os materiais evoluíram, tornou-se claro que o tratamento térmico é um processo complexo e difícil de controlar, exigindo precisão nas condições de temperatura, atmosfera, duração e velocidade de resfriamento para alcançar as características desejadas dos materiais. O tratamento térmico visa modificar as propriedades físicas e mecânicas dos metais sem alterar sua forma, com o objetivo principal de aumentar a resistência do material. Além disso, pode melhorar a usinabilidade, conformabilidade e restaurar a ductilidade após operações a frio. Avanços significativos, como o desenvolvimento dos fornos de indução, trouxeram benefícios em termos de eficiência térmica e redução de custos, contribuindo para a consciência ambiental e aprimorando o processo de tratamento térmico com maior precisão e rapidez.

A microestrutura dos aços refere-se à disposição e organização dos grãos e fases presentes no material em nível microscópico. Esta estrutura é formada por processos metalúrgicos específicos que ocorrem durante a produção e o tratamento térmico dos aços. Compreender a microestrutura é crucial, pois ela afeta diretamente as propriedades mecânicas dos aços, influenciando seu desempenho em diferentes aplicações. Na fabricação de ferramentas de corte, a busca por uma microestrutura específica é vital para alcançar um equilíbrio entre dureza e tenacidade. Como o desgaste é inevitável, a microestrutura é essencial para prolongar a vida útil das ferramentas. A combinação precisa de dureza, obtida por processos como têmpera, e tenacidade, alcançada por tratamentos térmicos específicos, permite que as ferramentas suportem condições severas de corte e realizem cortes precisos e eficientes por mais tempo (ACOS NOBRE, [s.d.]).

Para componentes estruturais, como vigas e barras, a ênfase está na resistência mecânica. A microestrutura desempenha um papel crítico na determinação dessa resistência, com processos como forjamento e laminação moldando a estrutura do material. Tratamentos térmicos controlados são aplicados para otimizar essa microestrutura, evitando fragilização que comprometeria a integridade estrutural. A análise detalhada da microestrutura permite aos engenheiros e metalurgistas ajustar os aços para atender às exigências específicas de cada aplicação industrial, promovendo inovação e avanço. À medida que a tecnologia metalúrgica avança, a capacidade de personalizar a microestrutura amplia as possibilidades de aplicações e desafios, destacando a importância de manter-se atualizado para garantir a qualidade e inovação na produção de aços (ACOS NOBRE, [s.d.]).

Em resumo, a microestrutura dos aços é fundamental para definir as propriedades mecânicas dos materiais. As transformações metalúrgicas moldam essa microestrutura, afetando características como dureza e tenacidade. Compreender esses processos é essencial para fabricar aços que atendam aos rigorosos padrões de desempenho exigidos em várias aplicações industriais.

Com o avanço da metalurgia dos aços, a capacidade de personalizar a microestrutura abre novas possibilidades de aplicação e desafios. Estar na vanguarda dessas transformações é crucial para garantir qualidade e inovação contínuas na produção de aços, impulsionando o progresso em diferentes indústrias. O mundo atualmente está sofrendo constantes avanços tecnológicos e o ramo industrial, mais especificadamente o ramo automotivo, está entre os mais desenvolvidos. Com a evolução das medidas de segurança do carro, da economia de combustível e o aumento dos padrões de desempenho, torna-se necessário a utilização de aços com melhores propriedades mecânicas, o que levou ao desenvolvimento da grade de aços AHSS (Advanced High-Strength Steels), cujas propriedades únicas e capacidade de processamento permite que as indústrias mundiais atendam aos requisitos exigidos (TAMARELLI, 2011). Apesar do AHSS estar na estrada há muitos anos, a sua utilização em alta escala só foi realizada através do desenvolvimento de pesquisas nessa área, o que proporcionou a fabricação efetiva de aços mais resistentes e mais leves, uma das preocupações das montadoras na época.

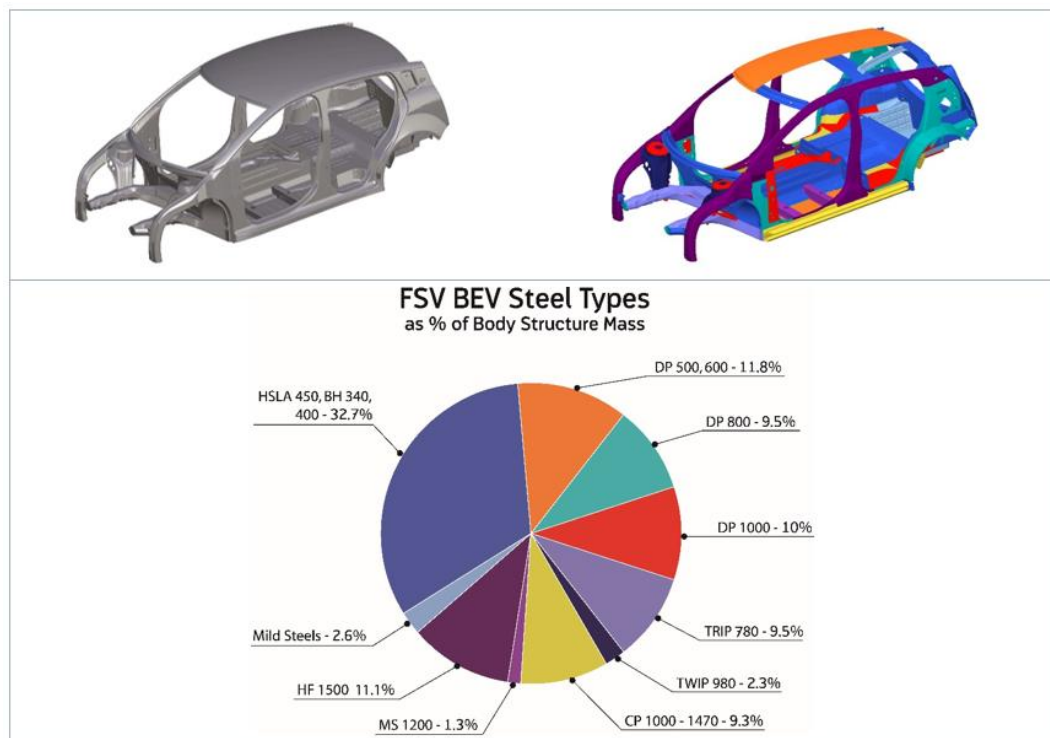
A necessidade de melhoria na fabricação de automóveis foi definida por diversos fatores como segurança, eficiência de combustível, preocupação ambiental, manufaturabilidade, durabilidade e qualidade, o que impulsionou a seleção de materiais para as aplicações automotivas (TAMARELLI, 2017). Compreendendo sobre essas necessidades, as montadoras e siderúrgicas investiram em pesquisas para melhorar as qualidades e propriedades dos materiais que usavam através de tratamentos diversos, com o intuito de tornar os carros mais leves, econômicos, seguros e menos poluentes, uma vez que a queima de combustíveis fosseis leva a danos ambientais e o consumo de combustível está diretamente ligado ao peso do carro, o que foi um dos fatores cruciais para a utilização de novos materiais (GRITTI et al., 2002; MARTINS, 2011; SILVA, 2016; SEFFER et al., 2016).

Os chamados “Aços Avançados de Alta Resistência” - AHSS, são capazes de aliar alta resistência mecânica, redução de peso e maior capacidade de absorção de impacto, além de ser uma opção mais barata frente aos concorrentes (WOLFF, 2008; STÜRMER, 2013). Logo, eles são uma escolha eficaz e barata para se utilizar na carroceria do carro, principalmente nas partes onde resistência e ductibilidade são essenciais, devido as suas propriedades mecânicas. Os AHSS possuem uma microestrutura multifásica, o que os torna complexos e permite uma melhor combinação de ductibilidade e resistência, além da sua excelente formabilidade, construída através do equilíbrio na combinação de suas fases (TAMARELLI, 2011).

1.2 Justificativa

O aço AHSS DP 800 (Dual Phase 800) é amplamente utilizado na indústria automotiva devido às suas propriedades combinadas de alta resistência e boa ductibilidade (Figura 1). Essas características são essenciais para a fabricação de componentes que asseguram tanto a segurança quanto o desempenho dos veículos. Para otimizar a utilização deste material, é fundamental realizar uma avaliação detalhada das suas propriedades mecânicas após diferentes tratamentos termomecânicos, bem como analisar as microestruturas resultantes desses tratamentos.

Figura 1. Presença do aço AHSS DP800 em veículos automotivos



FONTE: WorldAutoSteel

A microestrutura do aço AHSS DP 800 desempenha um papel crucial na determinação de suas propriedades mecânicas, incluindo resistência à tração, ductilidade e tenacidade. Avaliar como diferentes tratamentos termomecânicos afetam a microestrutura e, por conseguinte, as propriedades mecânicas, permite estabelecer uma relação direta entre essas características. Essa compreensão é essencial para ajustar os tratamentos e otimizar as propriedades desejadas para aplicações específicas. A análise das microestruturas formadas durante diferentes tratamentos fornece informações detalhadas sobre a formação de fases, a distribuição de grãos e a densidade de deslocamentos. Estes dados são essenciais para o desenvolvimento e a otimização de processos de tratamento termomecânico, garantindo que o aço alcance o desempenho desejado e mantendo a qualidade e eficiência na produção. Compreender a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas é crucial para prever o comportamento do aço AHSS DP 800 em condições reais de serviço. Esta análise permite antecipar como o material reagirá a diferentes condições de carga e uso, assegurando que os componentes fabricados atendam aos requisitos de desempenho e segurança estabelecidos pela indústria.

A análise detalhada das propriedades microestruturais possibilita a personalização do aço para aplicações específicas, promovendo inovações no design de componentes e na seleção de materiais. Esta personalização é especialmente importante em um setor que busca constantemente melhorar o desempenho e a durabilidade dos seus produtos. A combinação de avaliação das propriedades mecânicas e análise das microestruturas ajuda a garantir que o aço AHSS DP 800 esteja em conformidade com as normas e padrões internacionais. Essa abordagem assegura que o material não apenas atenda às especificações técnicas, mas também mantenha um desempenho consistente e confiável em diversas aplicações. A análise comparativa entre propriedades mecânicas e microestruturais permite identificar problemas potenciais ou inconsistências nos tratamentos termomecânicos e nas propriedades resultantes. Esta identificação é fundamental para ajustes e melhorias contínuas nos processos de fabricação e no desempenho do material.

Dessa forma, a avaliação das propriedades mecânicas do aço AHSS DP 800, acompanhada da análise das propriedades das microestruturas, proporciona uma compreensão abrangente do impacto dos tratamentos termomecânicos sobre o material. Esta abordagem não só contribui para a otimização do desempenho e da durabilidade dos componentes automotivos, mas também apoia a inovação e a conformidade com padrões técnicos, promovendo avanços significativos na indústria automotiva.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas do aço automobilístico AHSS DP 800 submetido a diferentes tratamentos termomecânicos, com o propósito de analisar a influência desses tratamentos sobre as propriedades do material e a microestrutura resultante. A pesquisa visa entender como as variações nos tratamentos termomecânicos impactam a resistência, ductilidade e tenacidade do aço, bem como correlacionar essas propriedades com as características microestruturais. Este conhecimento permitirá a otimização dos processos de tratamento, contribuindo para a melhoria do desempenho e durabilidade dos

componentes automotivos fabricados com este aço, além de garantir sua conformidade com os padrões e normas da indústria.

1.4 Objetivos Específicos

- **Analisar a Eficácia dos Tratamentos Termomecânicos:** Avaliar os efeitos de diferentes tratamentos termomecânicos (como têmpera, revenido e outros) nas propriedades mecânicas do aço AHSS DP 800, incluindo resistência à tração, ductilidade e tenacidade.
- **Investigar as Propriedades Microestruturais:** Caracterizar a microestrutura do aço AHSS DP 800 após a aplicação dos tratamentos termomecânicos, identificando a formação de fases, distribuição de grãos e outros aspectos microestruturais relevantes.
- **Correlacionar Propriedades Mecânicas e Microestruturais:** Estabelecer uma relação entre as propriedades mecânicas observadas e as características microestruturais do aço, para entender como a microestrutura influencia o desempenho do material.
- **Otimizar Processos de Tratamento:** Propor recomendações para a otimização dos tratamentos termomecânicos com base nos resultados obtidos, visando melhorar o desempenho e a durabilidade dos componentes automotivos fabricados com o aço AHSS DP 800.
- **Comparar Resultados com Normas da Indústria:** Verificar a conformidade das propriedades mecânicas e microestruturais do aço AHSS DP 800 com as normas e padrões técnicos exigidos pela indústria automotiva.
- **Contribuir para a Inovação no Setor Automotivo:** Fornecer dados e insights que possam apoiar inovações no design e na seleção de materiais para a indústria automotiva, promovendo o desenvolvimento de componentes com melhor desempenho e maior eficiência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aços e suas classificações

O aço é um material fundamental na engenharia e na indústria, amplamente utilizado em diversos setores devido à sua versatilidade e propriedades mecânicas ajustáveis. Composto principalmente por ferro e carbono, o aço é empregado em uma vasta gama de produtos, desde eletrodomésticos e veículos até materiais de construção. Sua popularidade e aplicabilidade se devem às suas propriedades mecânicas, que variam de acordo com a composição e o tratamento do material. A seguir, exploraremos as principais classificações dos aços, abrangendo sua composição química, propriedades mecânicas, processos de fabricação e aplicações (GRUPO AÇO CEARENSE, [s.d.]). (Figura 2)

Figura 2. Aços



FONTE:K9Aços

2.1.1 Classificação dos Aços por Composição Química

Os aços podem ser classificados com base em sua composição química, que define suas propriedades e aplicações. As principais categorias incluem:

- **Aços Carbono:** Formados pela combinação de ferro e carbono, com o teor de carbono variando de até 2,11%. Os aços carbono são amplamente utilizados e são divididos em:
 - **Aço de Alto Carbono:** Contém mais de 0,50% de carbono, oferecendo alta dureza e resistência, mas menor ductilidade. Usado em ferramentas de corte e lâminas.
 - **Aço de Médio Carbono:** Contém entre 0,20% e 0,49% de carbono, oferecendo uma combinação equilibrada de resistência e ductilidade, utilizado em eixos e engrenagens.
 - **Aço de Baixo Carbono:** Contém entre 0,05% e 0,20% de carbono, com boa soldabilidade e maleabilidade, usado em estruturas de edifícios e componentes automotivos.
 - **Aço de Carbono Extra Baixo e Ultrabaixo:** Com teores de carbono ainda menores, são utilizados em aplicações específicas que requerem propriedades especiais.
- **Aços Liga:** Contêm, além do carbono, outros elementos de liga como cromo, níquel, molibdênio e vanádio, que alteram as propriedades do aço:
 - **Aço Baixa Liga:** A soma dos elementos de liga é menor que 5% do total, oferecendo propriedades específicas como resistência à corrosão e maior dureza.
 - **Aço Média Liga:** Contém entre 5% e 12% de elementos de liga, ajustando as propriedades mecânicas e químicas do material.
 - **Aço Alta Liga:** Contém no mínimo 12% de elementos de liga, como aço inoxidável, conhecido por sua resistência à corrosão e alta resistência mecânica.
 - **Aço Baixa Liga de Alta Resistência:** Com menor teor de carbono e elementos de liga selecionados, oferece alta resistência e é utilizado em aplicações que exigem robustez.

2.1.2 Classificação dos Aços por Propriedades Mecânicas

Os aços podem ser classificados com base em suas propriedades mecânicas, que são determinantes para suas aplicações práticas:

- **Aços de Alta Resistência:** Projetados para suportar cargas elevadas, são amplamente utilizados em estruturas civis e engenharia. Exemplos incluem o aço ASTM A36.
- **Aços de Alta Dureza:** Têm alta resistência ao desgaste e são usados em ferramentas de corte e brocas.
- **Aços de Alta Ductilidade:** Possuem boa capacidade de deformação sem romper, sendo utilizados em peças automotivas e estruturas que exigem flexibilidade.

Os aços avançados de alta resistência (AHSS) são materiais complexos e sofisticados, caracterizados por composições químicas cuidadosamente selecionadas e microestruturas multifásicas. Essas microestruturas resultam de processos de aquecimento e resfriamento precisamente controlados, que utilizam diversos mecanismos para aumentar a resistência, garantindo níveis elevados de ductilidade, tenacidade e propriedades de fadiga. Diferentemente dos aços de baixo carbono do passado, os aços de alta resistência e baixo carbono fabricados atualmente são excepcionalmente leves e projetados para atender às demandas dos veículos modernos, que envolvem rigorosas normas de segurança, redução de emissões e desempenho eficiente a custos acessíveis (NETO, 2015).

A família dos Aços Avançados de Alta Resistência (AAAR), também conhecida como Advanced High Strength Steels (AHSS), inclui várias classes, como: Dual Phase (DP), Complex Phase (CP), Ferrítico Bainítico (FB), Martensítico (MS), aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP), aços formados a quente (Hot-Formed - HF) e aços de plasticidade induzida por maclação (Twinning Induced Plasticity - TWIP). A primeira e a segunda geração desses aços são projetadas para atender às exigências funcionais específicas de certas partes automotivas. Por exemplo, os aços

DP e TRIP são altamente eficazes em zonas de colisão devido à sua capacidade de absorção de energia. Recentemente, houve um aumento no financiamento e nas pesquisas para o desenvolvimento da "terceira geração" de AAAR, que promete combinações ainda melhores de resistência e ductilidade (NETO, 2015).

Entre esses aços, destaca-se o Aço Dual Phase (DP), uma liga de baixo teor de carbono com uma microestrutura composta por ferrita e cerca de 10 a 20% de martensita, que aparece em forma de pequenas ilhas dispersas na matriz ferrítica. Esses aços são geralmente designados como DPX, onde X representa o valor mínimo de resistência à tração do material (NETO, 2015). Segundo Wolff (2008), os aços DP costumam conter menos de 0,1% de carbono, o que confere alta ductilidade à fase ferrítica. Para compensar esse baixo teor de carbono, adiciona-se manganês ao material, o que aumenta sua temperabilidade e a estabilidade da fase de austenita, promovendo a formação de martensita após o tratamento térmico.

A microestrutura do aço DP é resultado de um controle rigoroso da temperatura durante o processamento, seja por laminação de tiras a quente ou recozimento contínuo. Primeiro, forma-se a matriz ferrítica, enriquecendo a austenita remanescente com carbono e outros elementos de liga. Em seguida, a austenita adquire temperabilidade suficiente para se transformar em martensita a temperaturas mais baixas. Dependendo da composição química e do processo, a microestrutura pode conter quantidades significativas de bainita. Esse arranjo bifásico, com ilhas duras de martensita dispersas em uma matriz macia de ferrita, confere ao material excelentes propriedades mecânicas, como boa conformabilidade, escoamento contínuo e alto limite de resistência (LAJARIN, 2012).

2.1.3. Classificação dos Aços por Processo de Fabricação

Os aços também são classificados com base no processo de fabricação:

- **Aços Laminados:** Produzidos por laminação a quente ou a frio, utilizados em chapas, tiras e perfis. A laminação a quente é usada para grandes volumes e formas mais grossas, enquanto a laminação a frio proporciona acabamentos superficiais melhores.

- **Aços Forjados:** Obtidos por forjamento, que molda o aço por deformação plástica sob alta temperatura, resultando em maior resistência e tenacidade.
- **Aços Fundidos:** Produzidos pelo processo de fundição, onde o aço líquido é vertido em moldes para adquirir formas complexas e grandes peças.

2.1.4 Classificação dos Aços por Aplicação

Os aços podem ser classificados de acordo com suas aplicações específicas:

- **Aços Estruturais:** Utilizados em construção civil e engenharia devido à sua alta resistência mecânica. Exemplos incluem o aço CA-50 e CA-60, empregados em estruturas de concreto armado.
- **Aços para Molas:** Com elevado limite elástico, são usados em molas e componentes que precisam suportar tensões sem deformações permanentes.
- **Aços para Fundição:** Usados para produção de peças fundidas, podem ser aço carbono ou aço liga, proporcionando boa resistência e adaptabilidade.
- **Aços para Construção Mecânica:** Incluem aços para fabricar peças forjadas, rolamentos e eixos, com uma ampla gama de produtos e aplicações.

2.1.5 Classificação dos Aços por Geometria

Os aços também são classificados pela geometria obtida durante o processamento:

- **Semiacabados:** Incluem blocos, tarugos e placas, produzidos no lingotamento, uma etapa preliminar à produção final.
- **Produtos Planos:** Obtidos por laminação, incluem chapas e bobinas de aço, que podem ser usadas em diversas aplicações, como revestimentos e componentes automotivos.
- **Produtos Longos:** Caracterizados por um comprimento significativamente maior que a largura e altura, incluem barras, fios e perfis.

2.1.6 Tipos de Aço Mais Produzidos e Suas Aplicações

- **Aço Laminado a Quente e a Frio:** As chapas laminadas a quente são usadas em tubulações e autopeças, enquanto as laminadas a frio são mais maleáveis e utilizadas em eletrodomésticos e esquadrias.
- **Aço Galvanizado:** Passa pelo processo de galvanização para resistir à corrosão, sendo amplamente usado em construção civil.
- **Aço Galvalume:** Composto por zinco, silício e alumínio, oferece resistência superior à corrosão e é utilizado em atmosferas agressivas e construção civil.
- **Aço Inox:** Adicionado com cromo e níquel, é resistente à corrosão e ao calor, amplamente usado em tubulações e equipamentos diversos.

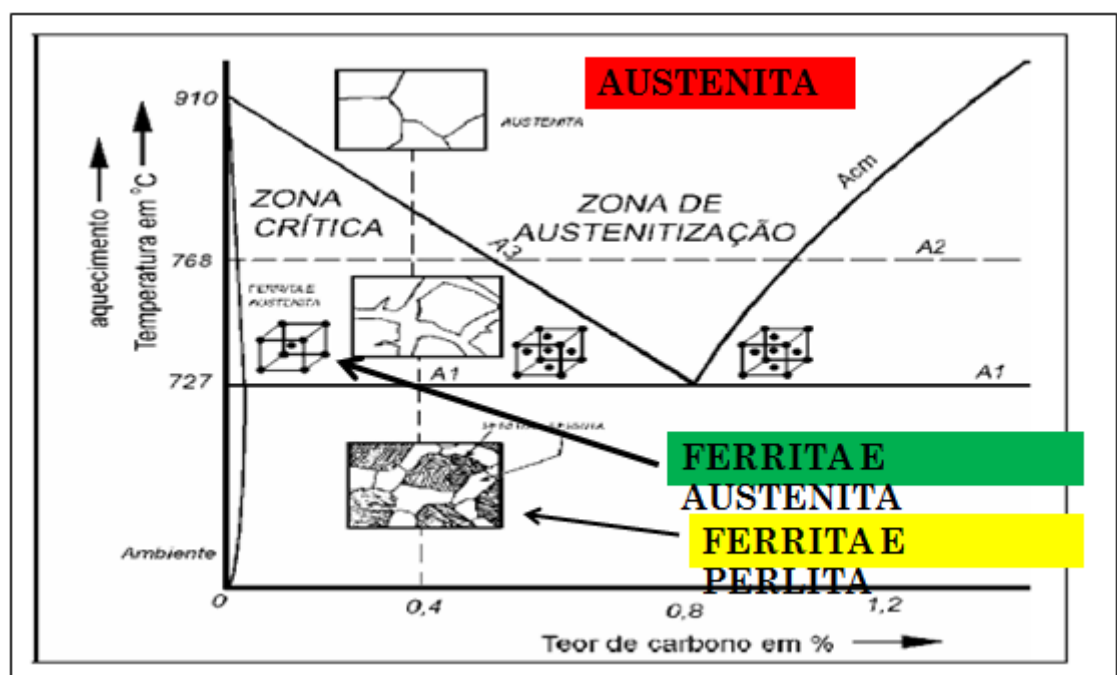
O aço, com suas várias classificações e formas de aplicação, é um dos materiais mais consumidos globalmente e essencial para a economia e o progresso industrial. A compreensão de suas propriedades e aplicações permite uma escolha mais precisa e eficiente para cada uso específico.

2.2 Tratamentos térmicos em aços

A austenitização é uma etapa fundamental no tratamento térmico de aços, essencial para melhorar suas propriedades mecânicas e adaptá-los a diversas aplicações. Este processo envolve o aquecimento do aço a altas temperaturas para transformar sua estrutura cristalina em austenita, uma fase crucial para os seguintes tratamentos térmicos. A seguir, discutiremos os princípios da austenitização, o processo envolvido e suas implicações para as propriedades do aço. A austenitização é o primeiro passo em muitos tratamentos térmicos, como a têmpera e o revenimento. O objetivo principal desse processo é aquecer o aço a uma temperatura suficientemente alta para converter sua estrutura cristalina em austenita. A austenita é uma fase de estrutura cúbica de face centrada (CFC) que oferece uma base homogênea para os subseqüentes processos de resfriamento. A temperatura ideal para a austenitização varia conforme a composição química do aço, mas geralmente está acima da temperatura crítica, que pode variar entre 727°C e 1.000°C. Este intervalo de temperatura é suficiente para dissolver os carbonetos e outras fases

presentes no aço, permitindo que o carbono se solubilize na estrutura austenítica. Além da temperatura, o tempo de manutenção é um fator crucial na austenitização. O aço deve ser mantido na temperatura desejada por um período específico para garantir uma transformação completa para a fase austenítica. Este tempo de manutenção é fundamental para permitir a homogeneização do aço e garantir que as propriedades desejadas sejam atingidas.

Figura 3. Diagrama Ferro-Carbono



FONTE: CENTRO PAULO SOUZA, 2011.

O processo de austenitização pode ser descrito em três etapas principais. A primeira etapa é o aquecimento, onde o aço é submetido a temperaturas elevadas, acima da linha crítica. O controle preciso da temperatura é essencial para garantir uma transformação uniforme e evitar a formação de fases indesejadas. Após alcançar a temperatura desejada, o aço entra na fase de manutenção, onde é mantido nessa temperatura por um período de tempo definido. Este tempo é crucial para a dissolução completa dos carbonetos e outras fases presentes no aço, garantindo que a austenita se forme de maneira homogênea. A última etapa do processo é o resfriamento. Após a austenitização, o aço pode ser resfriado rapidamente ou lentamente, dependendo do tratamento térmico subsequente que será aplicado. A escolha do método de

resfriamento influencia diretamente as propriedades finais do aço, como dureza e tenacidade. (Figura 3)

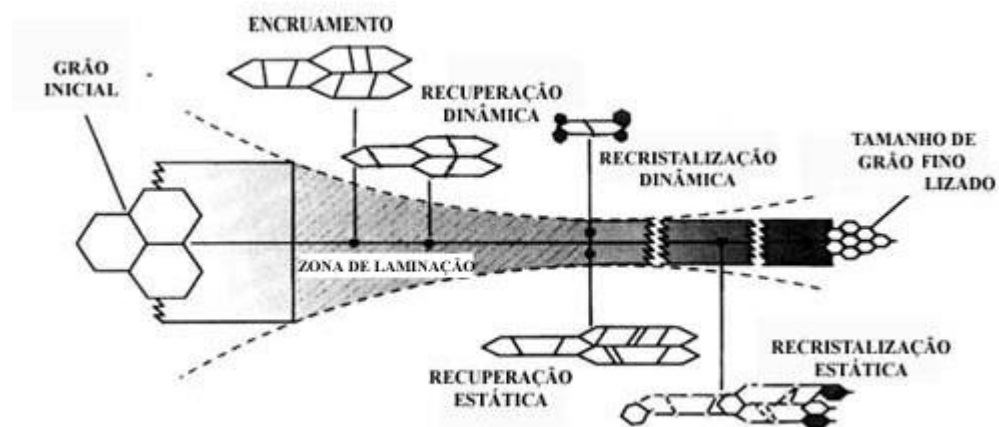
A austenitização altera significativamente as propriedades do aço, preparando-o para processos de endurecimento ou outras modificações. Durante a austenitização, carbonetos presentes no aço são dissolvidos na fase austenítica, permitindo uma melhor distribuição de carbono e uma estrutura mais homogênea. Esse processo é um pré-requisito para tratamentos subsequentes, como a têmpera, que transforma a austenita em martensita ou outras fases durante o resfriamento, aumentando a dureza e a resistência do aço. Além disso, a austenitização altera a estrutura cristalina do aço, criando uma microestrutura que é mais adequada para tratamentos térmicos subsequentes e para aplicações específicas. Austenitização é utilizada em uma variedade de aplicações industriais que exigem a melhoria das propriedades mecânicas do aço. Peças de máquinas e ferramentas, como brocas e moldes, frequentemente passam por austenitização para prepará-las para o processo de têmpera, visando alta dureza e resistência ao desgaste. Componentes automotivos, como eixos e engrenagens, também se beneficiam da austenitização, que melhora sua resistência e durabilidade. Além disso, aços estruturais utilizados em construções que requerem propriedades específicas, como resistência ao impacto e à fadiga, passam pelo processo de austenitização para atender às exigências dos projetos.

Em resumo, austenitização é uma etapa essencial no tratamento térmico de aços, desempenhando um papel crucial na preparação do material para tratamentos subsequentes e garantindo que as propriedades mecânicas do aço sejam aprimoradas para atender às demandas específicas de diversas aplicações industriais. A laminação é um processo fundamental na indústria siderúrgica, sendo crucial para a fabricação de produtos de aço em diversas formas, como chapas, bobinas e perfis. Esse método transforma o aço bruto, inicialmente produzido em lingotes ou tarugos, em produtos finais com as características desejadas. O processo é baseado em princípios de conformação mecânica que utilizam rolos rotativos para reduzir a espessura do aço e ajustar suas dimensões.

A laminação pode ser realizada a quente ou a frio, dependendo das especificidades do produto final. Na laminação a quente, o aço é aquecido a

temperaturas acima da sua temperatura de recristalização, geralmente entre 900°C e 1.200°C. Esse aquecimento torna o aço mais maleável, facilitando a conformação em grandes dimensões e espessura, e é frequentemente utilizado para produzir produtos como vigas, trilhos e placas de aço (Figura 4). Já a laminação a frio é realizada à temperatura ambiente, abaixo da temperatura de recristalização, e é utilizada para refinar o tamanho dos produtos e melhorar suas propriedades superficiais e mecânicas. Este método é ideal para fabricar chapas e bobinas com acabamentos de alta qualidade, como aço para eletrodomésticos e componentes automotivos. O processo de laminação pode ser dividido em várias etapas cruciais. A preparação do material envolve o aquecimento de lingotes ou tarugos, e pode incluir tratamentos térmicos iniciais como o recozimento. Em seguida, a laminação primária aplica uma força de compressão ao aço, reduzindo sua espessura e aumentando sua largura, resultando em formas intermediárias como placas ou chapas grossas. A laminação secundária ajusta ainda mais as dimensões e melhora a qualidade superficial do material, sendo particularmente comum na laminação a frio. Após a laminação, o aço é resfriado e pode passar por tratamentos finais, como recozimento ou galvanização, para garantir que as propriedades mecânicas atendam às exigências do produto.

Figura 4. Laminação a quente



FONTE: IBF – Vol 110

Existem diferentes tipos de laminação que se adaptam a diversas necessidades industriais. A laminação a quente é amplamente utilizada para produtos de grandes dimensões e espessura, enquanto a laminação a frio é empregada para

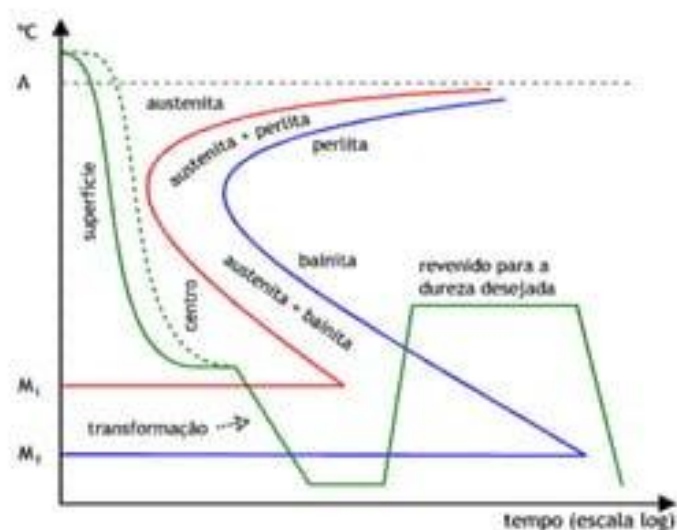
obter produtos com espessura fina e alta precisão dimensional. A laminação contínua é um método eficiente que permite a produção em larga escala de produtos de aço sem interrupções. O impacto da laminação na qualidade do aço é significativo. O processo afeta as propriedades mecânicas do aço, como resistência, ductilidade e dureza, e é essencial para alcançar as características desejadas. A laminação a frio proporciona um acabamento superficial mais liso e uniforme, o que é crucial para aplicações que requerem alta qualidade estética e funcional. Além disso, o controle preciso das dimensões durante a laminação garante que os produtos atendam às especificações exigidas para diferentes aplicações.

Em resumo, a laminação é uma técnica essencial na fabricação de aço, desempenhando um papel vital na obtenção de produtos finais com as dimensões e propriedades mecânicas desejadas. Compreender os princípios, etapas e impactos desse processo é fundamental para otimizar a qualidade dos produtos de aço e atender às necessidades específicas das indústrias. A laminação continua a ser uma técnica inovadora e crucial na produção de aço, contribuindo significativamente para a eficiência e qualidade dos produtos finais. A têmpera é um processo de tratamento térmico crucial na metalurgia, amplamente utilizado para aprimorar as propriedades mecânicas dos materiais, especialmente aços. Este tratamento é projetado para aumentar a dureza e a resistência do material, tornando-o mais adequado para aplicações que exigem alta performance e durabilidade. O processo de têmpera envolve três etapas principais: aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento, cada uma desempenhando um papel fundamental na transformação das propriedades do material.

Durante a etapa de aquecimento, o material é levado a uma temperatura elevada, geralmente acima da temperatura crítica do aço. Esse aquecimento é essencial para converter a estrutura do aço de ferrita e perlita para austenita, uma fase mais homogênea e adequada para o processo de têmpera. Após o aquecimento, o material é mantido na temperatura desejada por um período específico, garantindo que a transformação da estrutura seja completa e uniforme. A última etapa, o resfriamento, é realizada rapidamente em um meio de resfriamento, como água, óleo ou ar. Esse resfriamento rápido transforma a austenita em martensita, uma fase extremamente dura e resistente, embora mais frágil (Figura 5). Os métodos de

resfriamento variam e têm impactos distintos nas propriedades finais do material. O resfriamento por água proporciona uma taxa de resfriamento rápida, resultando em uma estrutura martensítica de alta dureza, mas pode causar distorções e tensões internas devido à rápida solidificação. O resfriamento por óleo oferece uma taxa de resfriamento moderada, equilibrando dureza e tenacidade, e reduz o risco de distorções e fissuras. O resfriamento por ar é o mais lento e é utilizado para aços que requerem menor dureza e maior tenacidade, minimizando tensões internas e reduzindo a fragilidade. O resfriamento por chama, utilizado para peças de geometria complexa ou grandes dimensões, ajusta-se às características específicas do componente, utilizando jatos de ar ou água.

Figura 5. Diagrama de Têmpera



FONTE: Boletim Geologia e Metalurgia - Pág.21.

Os efeitos da têmpera nas propriedades dos materiais são significativos. O resfriamento rápido transforma a austenita em martensita, aumentando a dureza do material e melhorando sua resistência ao desgaste e à abrasão. No entanto, a têmpera pode reduzir a tenacidade do material, tornando-o mais suscetível a fraturas e fissuras sob cargas impactantes. Além disso, o resfriamento rápido pode induzir tensões residuais internas que podem comprometer a integridade estrutural do material. Essas tensões podem ser aliviadas por processos subsequentes, como o revenimento. A

têmpera é amplamente utilizada em diversas aplicações industriais, onde a resistência ao desgaste e a alta dureza são essenciais. Ferramentas de corte, como brocas e facas, frequentemente passam por têmpera para garantir alta durabilidade e desempenho. Componentes automotivos, como eixos, engrenagens e molas, são temperados para suportar condições severas de operação e desgaste. Em engenharia, a têmpera é utilizada para fabricar peças que precisam resistir a altas cargas e desgaste, como rolamentos e componentes estruturais.

Em conclusão, a têmpera é um processo fundamental na metalurgia que oferece a possibilidade de melhorar a dureza e a resistência dos materiais metálicos, tornando-os adequados para uma ampla gama de aplicações industriais. Embora ofereça benefícios significativos, é importante considerar os efeitos colaterais, como a redução da tenacidade e a formação de tensões internas, que podem ser geridos com tratamentos térmicos subsequentes. Compreender os princípios, métodos e efeitos da têmpera é essencial para otimizar as propriedades dos materiais e garantir o sucesso de suas aplicações na indústria (DUSTRE).

2.3 Análise Microestrutural

Os metais geralmente possuem uma estrutura cristalina quando estão no estado sólido, caracterizada por um arranjo tridimensional ordenado e repetitivo dos átomos. Em muitos casos, os metais são policristalinos, ou seja, formados por um aglomerado de pequenos cristais chamados grãos. Em alguns casos, como em componentes fundidos, esses grãos podem ser grandes o suficiente para serem visíveis a olho nu, sendo conhecidos como macroestruturas. No entanto, a maioria dos grãos em materiais metálicos são muito pequenos para serem vistos a olho nu e requerem o uso de microscópios ópticos ou eletrônicos para análise detalhada, sendo então chamados de microestruturas. A microestrutura de um material é crucial porque reflete a composição química, a história térmica e o processamento pelo qual o material passou, influenciando suas propriedades e desempenho. A análise microestrutural oferece informações valiosas sobre o material, permitindo prever suas características e comportamento durante a aplicação. A interpretação das microestruturas exige compreensão dos processos de formação das mesmas, e a

Metalurgia Física estuda essas microestruturas com base nas etapas de fabricação (MARTINS et al., [s.d.]).

Técnicas de análise microestrutural são amplamente utilizadas em controle de qualidade, análise de falhas e pesquisa e desenvolvimento. No controle de qualidade, são verificadas características como tamanho de grão, impurezas, fases secundárias e porosidades, para assegurar que o material esteja conforme as especificações padrão. Em investigações de falhas, a análise pode identificar se problemas ocorreram devido a materiais inadequados ou controle de qualidade deficiente. Na pesquisa e desenvolvimento, as análises confirmam se as microestruturas desejadas foram obtidas e se mudanças no processamento afetaram a estrutura interna. A metalografia é o estudo da estrutura interna dos metais, englobando técnicas de preparação de amostras, exame microscópico e interpretação das microestruturas. A preparação das amostras é crucial para a correta observação e interpretação, e envolve seleção, corte, lixamento, polimento e ataque químico, conforme o tipo de microconstituente a ser revelado. Cuidados durante a preparação são necessários para evitar conclusões equivocadas devido a encruamento ou outros artefatos. Às vezes, a observação é realizada sem ataque químico para examinar características como partículas inclusionárias, enquanto outros materiais precisam ser atacados para revelar suas microestruturas, processo que envolve corrosão controlada para formar uma imagem topográfica refletiva (MARTINS et al., [s.d.]).

2.3.1 Microscopia Óptica

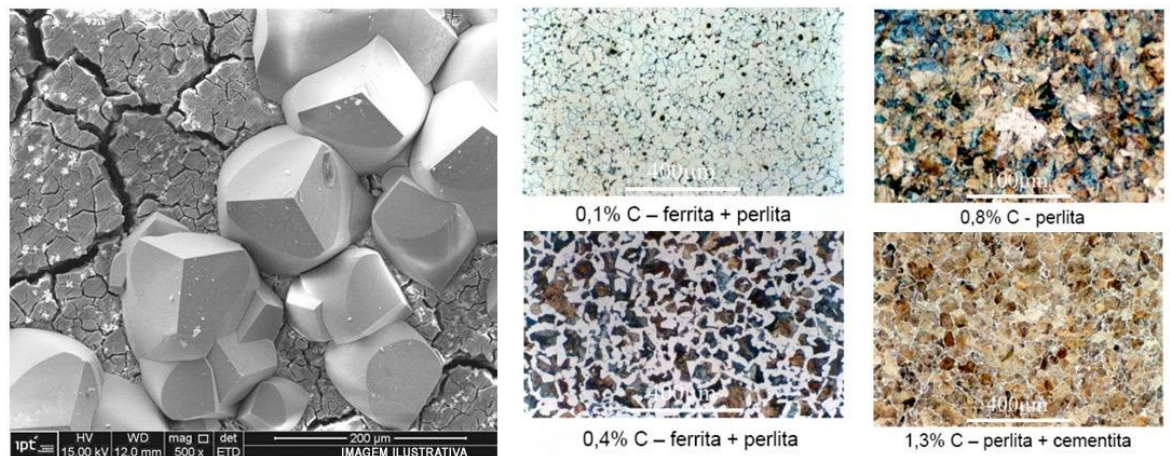
A microscopia óptica é uma técnica fundamental para a visualização de amostras pequenas, utilizando luz visível e lentes para ampliar imagens (Figura 6). Desenvolvida antes do século 18, a microscopia óptica ainda é amplamente utilizada, empregando um microscópio óptico, ou microscópio de luz, que utiliza uma ou várias lentes para ampliar a imagem de uma amostra, facilitando observações detalhadas. Existem vários tipos de microscópios ópticos, cada um com suas características e níveis de complexidade. O microscópio simples, por exemplo, usa uma única lente e é semelhante a uma lupa, sendo adequado para observações básicas. O microscópio composto é mais sofisticado, empregando uma série de lentes para alcançar uma

maior resolução, e é amplamente utilizado em pesquisas modernas. O microscópio digital combina lentes ópticas com câmeras e softwares, permitindo a visualização e análise das imagens diretamente em um computador, sem necessidade de ocular. Já o microscópio estereoscópico oferece uma visão estereoscópica e é ideal para amostras maiores e menos preparadas, enquanto o microscópio invertido visualiza amostras de baixo para cima, sendo útil para culturas celulares (AFINKO POLÍMEROS).

Além desses, existem microscópios especializados, como o microscópio petrográfico, de polarização, de contraste de fase, epifluorescência, imunofluorescência, metalográfico e confocal, cada um projetado para aplicações específicas. A microscopia óptica também permite a captura de micrografias com câmeras fotossensíveis e a análise digital das imagens utilizando softwares avançados. Esses softwares oferecem recursos como banco de dados, elaboração de laudos, comparação de imagens, medições e contagem. O avanço tecnológico trouxe o uso de câmeras CMOS e CCD, possibilitando a visualização em tempo real das amostras em telas de computador, o que aumenta a conveniência e a eficiência do processo. A ampliação proporcionada por um microscópio óptico é determinada pelo produto das lentes oculares e objetivas. Por exemplo, o uso de lentes oculares de 10x e objetivas de 100x resulta em uma ampliação final de 1000x. Para garantir uma visualização eficaz, é crucial configurar corretamente o microscópio, ajustando a lente objetiva para permitir a entrada adequada de luz e criar uma imagem ampliada da amostra.

A microscopia óptica é amplamente aplicada em diversas áreas, como microbiologia, microeletrônica, controle de qualidade industrial, análises clínicas, zoologia, botânica, biotecnologia e pesquisa farmacêutica. No entanto, suas limitações podem levar à adoção de técnicas alternativas, como o microscópio eletrônico de varredura e o microscópio eletrônico de transmissão, que, embora ofereçam maior resolução, são mais caros e geralmente disponíveis apenas em instituições de pesquisa avançadas.

Figura 6. Microestruturas vistas por um microscópio óptico



FONTE: UNESP, 2015.

2.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

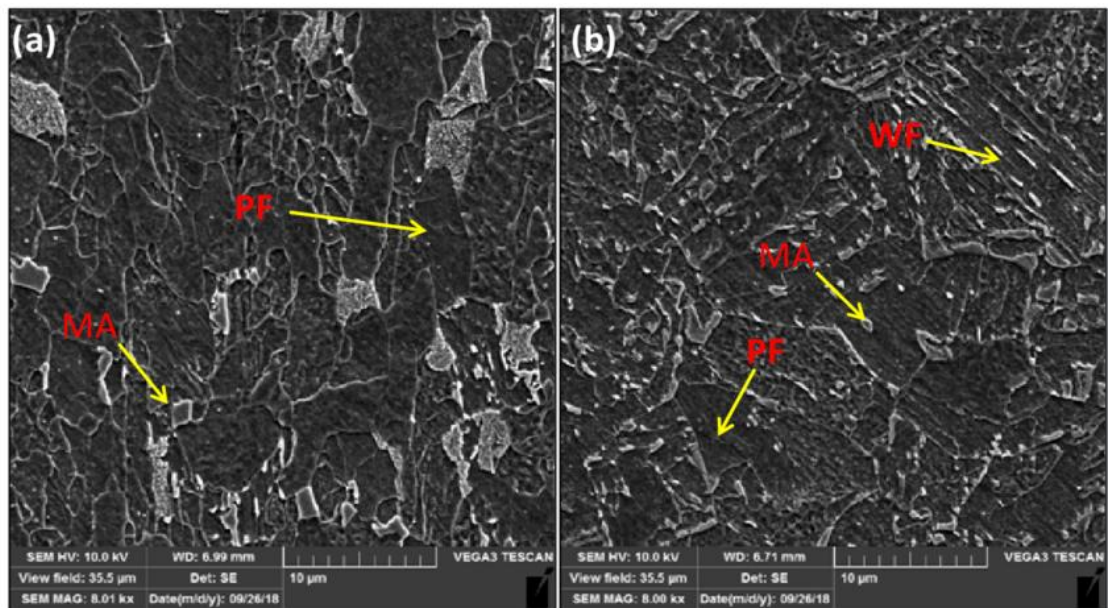
Uma das principais limitações da microscopia óptica é o aumento máximo possível, que gira em torno de 2.000 vezes. Consequentemente, pequenos detalhes estruturais não podem ser detectados por essa técnica. No contexto de avanço tecnológico acelerado, os cientistas têm uma necessidade crescente de observar, analisar e explicar fenômenos que ocorrem em escalas micrométricas e submicrométricas. Nesse sentido, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) se destaca como uma técnica fundamental, já que oferece um aumento muito superior ao da microscopia óptica, podendo alcançar até 900.000 vezes, embora para a análise de materiais o aumento típico seja em torno de 10.000 vezes. Diferentemente da microscopia óptica, a MEV utiliza um fino feixe de elétrons, em vez de luz visível, para irradiar a área ou o micro volume da amostra. Como resultado dessa interação entre o feixe de elétrons e a superfície da amostra, uma série de radiações é emitida, incluindo elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger e fótons. A captura correta dessas radiações fornece informações detalhadas sobre a amostra, como topografia da superfície, composição e características cristalográficas (Figura 7).

No contexto da formação de imagens no MEV, os sinais mais importantes são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários varre a amostra, esses sinais sofrem modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários são responsáveis pela obtenção de imagens de alta resolução, mostrando a topografia da superfície, enquanto os elétrons retroespalhados fornecem informações sobre a variação de composição da amostra. Essas características tornam o MEV uma ferramenta essencial em diversas áreas de pesquisa, como eletrônica, geologia, ciência e engenharia dos materiais, além das ciências da vida. O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um instrumento extremamente versátil e utilizado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos. Embora o processo de obtenção de imagens envolva mecanismos complexos, os resultados são de fácil interpretação. O aumento proporcionado pelo MEV é intermediário entre o microscópio óptico (MO) e o Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET), mas sua maior vantagem em relação ao MO é a alta resolução, que varia de 2 a 5 nm, podendo chegar a 1 nm em modelos mais avançados, enquanto no microscópio óptico a resolução é limitada a 0,5 μm . Em relação ao MET, a vantagem do MEV está na simplicidade da preparação das amostras. Além disso, o MEV oferece uma grande profundidade de foco, que proporciona imagens com aparência tridimensional, e permite combinar a análise microestrutural com a microanálise química, contribuindo para seu uso em larga escala (AFINKO POLÍMEROS).

O desenvolvimento da microscopia eletrônica de varredura remonta a 1935, com o trabalho de M. Knoll. Em 1938, von Ardenne adaptou bobinas de varredura a um microscópio eletrônico de transmissão, criando um aumento máximo de 8.000 vezes e resolução de 50 nm. O primeiro MEV para amostras espessas foi construído em 1942 nos laboratórios da RCA, utilizando um detector de elétrons secundários, mas a resolução ainda era baixa, de apenas 1 μm . A substituição das lentes eletrostáticas por lentes eletromagnéticas e a introdução de cintiladores para converter elétrons em sinais de luz permitiram melhorar a resolução para 25 nm. Em 1965, a Cambridge Scientific Instrument lançou o primeiro MEV comercial, e desde então, muitos avanços tecnológicos, principalmente na área de eletrônica e computação, tornaram o MEV uma ferramenta ainda mais poderosa. Com a

digitalização dos sistemas e o desenvolvimento de softwares especializados, o processamento e análise das imagens se tornaram mais eficientes, facilitando o uso dessa técnica em diversas áreas.

Figura 7. Microestrutura vista em microscópio eletrônico de varredura



FONTE: SILVA GC, Castro JA (2019).

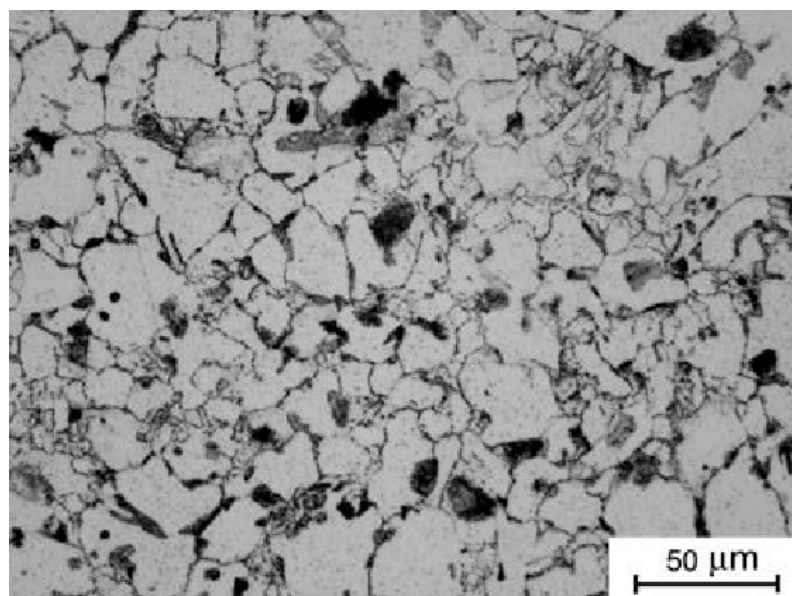
Hoje em dia, a maioria dos MEVs é equipada com detectores de raios-X, que permitem a análise química das amostras em observação. Esses detectores capturam os raios-X característicos emitidos pela interação dos elétrons primários com a superfície da amostra, fornecendo informações qualitativas e quantitativas sobre a composição química na região submicrométrica. Esse procedimento é extremamente útil para identificar precipitados e variações de composição química dentro de um grão, tornando o MEV ainda mais indispensável em laboratórios de desenvolvimento de novos materiais. Entre os detectores, o mais amplamente utilizado é o de energia dispersiva (EDX), devido à sua confiabilidade e facilidade de operação. O MEV, portanto, não apenas proporciona imagens de alta resolução e análise detalhada da topografia e composição dos materiais, mas também possibilita a realização de microanálises químicas, sendo uma ferramenta fundamental em diversas áreas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

2.4 Microestruturas

2.4.1 Perlita

A perlita é uma microestrutura que se forma em aços durante o resfriamento lento da austenita, a fase de alta temperatura do ferro-carbono (Figura 8). Esta estrutura resulta da decomposição eutectoide da austenita a aproximadamente 727°C, onde ela se transforma em uma combinação lamelar de ferrita e cementita. A perlita é composta por cerca de 88% de ferro e 12% de carbono, com a cementita (Fe_3C) representando cerca de 25% da microestrutura e a ferrita (Fe) compondo o restante. A disposição lamelar da perlita, com camadas alternadas de ferrita e cementita, proporciona um equilíbrio entre dureza e ductilidade. Enquanto a ferrita confere ductilidade e tenacidade, a cementita adiciona resistência à tração. Esta combinação resulta em uma microestrutura com uma resistência à tração razoável e uma ductilidade moderada, sendo adequada para aços estruturais e de construção civil. Embora a perlita ofereça um bom equilíbrio de propriedades mecânicas, tratamentos térmicos adicionais, como a têmpera e o revenimento, podem ser aplicados para otimizar suas características para aplicações específicas (SACCHELLI).

Figura 8. Perlita em vista microscópica

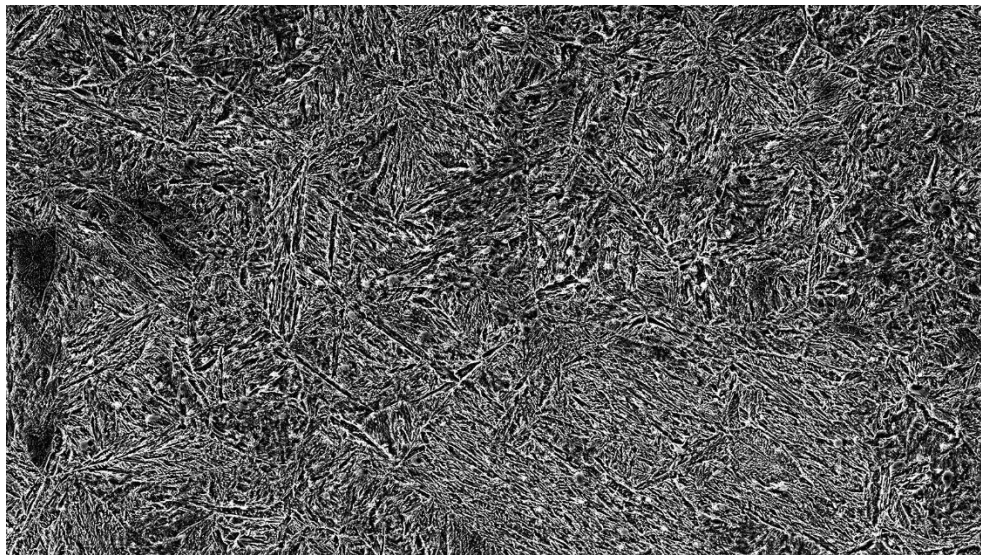


FONTE: M.B. Lisboa, 2011.

2.4.2 Martensita

A martensita é uma microestrutura de alta dureza e fragilidade que se forma quando a austenita é resfriada rapidamente, um processo conhecido como têmpera. Diferente da perlita, a martensita não passa por transformações de equilíbrio e possui uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC) (Figura 9). Durante a têmpera, o aço é resfriado a uma taxa suficientemente rápida para evitar a formação de perlita ou bainita, resultando em uma estrutura martensítica. Essa microestrutura é caracterizada pela distorção da rede cristalina devido ao aprisionamento de átomos de carbono, o que contribui para sua extrema dureza. No entanto, essa dureza vem acompanhada de uma fragilidade significativa. Portanto, é comum realizar um tratamento de revenimento para melhorar a tenacidade e reduzir a fragilidade. A martensita é amplamente utilizada em aços de alta liga para ferramentas, moldes e componentes que precisam resistir ao desgaste intenso, sendo o tratamento de revenimento essencial para equilibrar dureza e tenacidade (SACCHELLI).

Figura 9. Martensita em vista microscópica



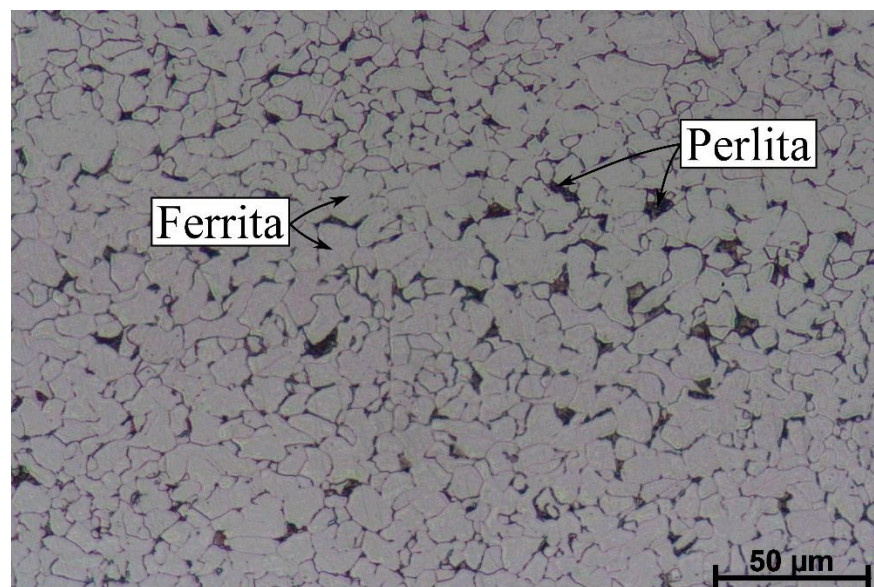
FONTE: WAEHZHOLZ, 2021.

2.4.3 Ferrita

A ferrita é a fase de ferro puro com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e é a fase mais macia e dúctil encontrada em aços de baixo carbono

(Figura 10). Formada durante o resfriamento da austenita em aços com baixo teor de carbono, a ferrita é estável em temperaturas mais baixas e possui uma solubilidade muito limitada para o carbono, geralmente abaixo de 0,02%. A ferrita é conhecida por sua alta ductilidade e tenacidade, embora tenha uma resistência à tração relativamente baixa. Sua principal vantagem é a capacidade de deformação plástica e conformabilidade, tornando-a ideal para aplicações onde a ductilidade é mais valorizada do que a dureza. Em muitos aços, a ferrita contribui para a absorção de impactos e resistência ao choque, e sua presença em microestruturas como a perlita e a bainita ajuda a equilibrar as propriedades mecânicas dos aços. A ferrita é amplamente utilizada em aços estruturais e de construção, onde a ductilidade e a capacidade de conformação são essenciais (SACCHELLI).

Figura 10. Ferrita em vista microscópica



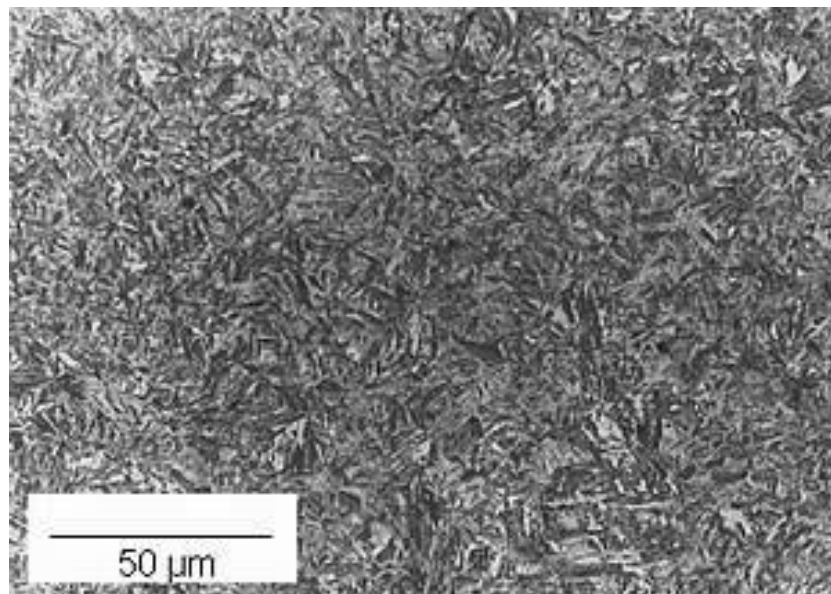
FONTE: GIAROLLO F, DANIELA (2018).

2.4.4 Bainita

A bainita é uma microestrutura que se forma em aços quando a austenita é resfriada a uma taxa intermediária, situada entre as condições que formam perlita e martensita. Dependendo da temperatura de resfriamento, a bainita pode ser classificada como bainita superior, formada a temperaturas mais altas, ou bainita inferior, formada a temperaturas mais baixas. A bainita é composta por uma mistura de ferrita e cementita, mas com uma morfologia diferente da perlita (Figura 11). A

bainita superior é mais grosseira, enquanto a bainita inferior possui uma estrutura mais fina e é mais dura. Esta microestrutura combina a dureza e resistência da cementita com a ductilidade da ferrita. A bainita inferior, em particular, é valorizada por sua alta resistência ao impacto e tenacidade, tornando-a adequada para aplicações que requerem alta resistência ao desgaste e ao choque. Em contraste, a bainita superior oferece uma resistência moderada e ductilidade, sendo usada em aplicações menos exigentes. A bainita é frequentemente utilizada em aços de alta resistência e em componentes de engenharia que exigem um equilíbrio entre dureza e tenacidade (SACCHELLI).

Figura 11. Bainita em vista microscópica



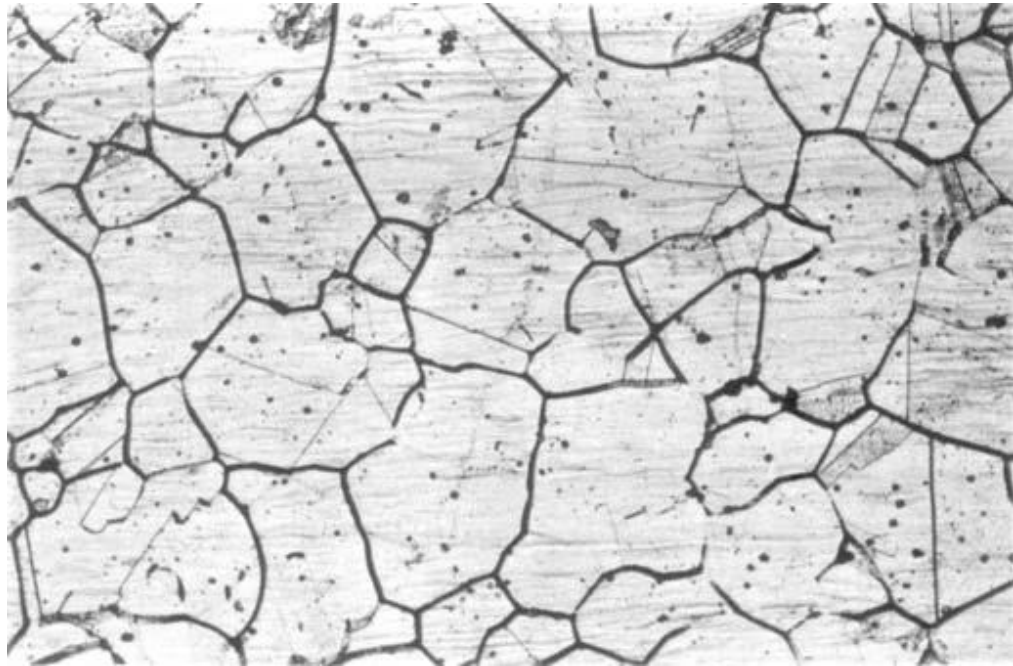
FONTE: CIMM

2.4.5 Austenita

A austenita é uma fase de ferro-carbono com uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) que se forma a altas temperaturas (Figura 12). Esta fase é crucial na formação de outras microestruturas durante o tratamento térmico dos aços. Quando o aço é aquecido a temperaturas acima de 727°C, a austenita se forma e pode dissolver mais carbono do que a ferrita. Esta capacidade de dissolver carbono é fundamental para a transformação da austenita em martensita, perlita ou bainita, dependendo das condições de resfriamento. A austenita é conhecida por sua alta ductilidade e tenacidade, além de boa resistência à corrosão em aços inoxidáveis. Em

aços de alta liga, a formação de austenita é essencial para obter propriedades desejadas, e seu tratamento subsequente influencia significativamente as características finais do material. Em aços inoxidáveis austeníticos, a adição de elementos como níquel e manganês ajuda a estabilizar a austenita a temperaturas mais baixas, ampliando suas aplicações industriais (AÇOS NOBRES, [s.d.]).

Figura 12. Austenita em vista microscópica



FONTE: E.O. Correa, 2008.

3 METODOLOGIA

3.1 Procedimentos

3.1.1 Preparação das Chapas de Aço

Para a realização do trabalho, chapas de aço AHSS DP800 foram seccionadas por meio de uma guilhotina mecânica localizada no laboratório de corte do curso de Engenharia Mecânica do IFPE, campus Recife (Figura 13). Esse procedimento viabilizou a obtenção de dimensões adequadas para o subsequente processamento dos corpos de prova. No total, foram preparados 20 corpos de prova, distribuídos da seguinte forma: 4 para cada uma das quatro rotas de tratamento termomecânico e 4

na condição como recebida. Após a etapa de corte, os corpos de prova foram usinados por fresamento, garantindo a geometria exigida para a realização dos ensaios mecânicos e metalúrgicos, em conformidade com os requisitos da norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013.

Figura 13. Guilhotina mecânica do IFPE - Campus Recife



FONTE: Autor, 2021.

3.1.2 Fresagem dos Corpos de Prova

A fresagem foi dividida em duas etapas, utilizando ferramentas de corte distintas para garantir a precisão geométrica dos corpos de prova.

- **Primeira Etapa:** Para a usinagem das chapas, foi empregada uma fresa de topo com diâmetro de 32 mm, garantindo a obtenção de superfícies planas e uma geometria retangular precisa. Essa etapa foi essencial para padronizar as dimensões dos corpos de prova, que possuem 100 mm de comprimento, 10 mm de largura e 1,75 mm de espessura, assegurando uniformidade na espessura e repetibilidade dos ensaios subsequentes. O processo foi

conduzido em uma fresadora, seguindo o esquema de fixação representado na Figura 14.

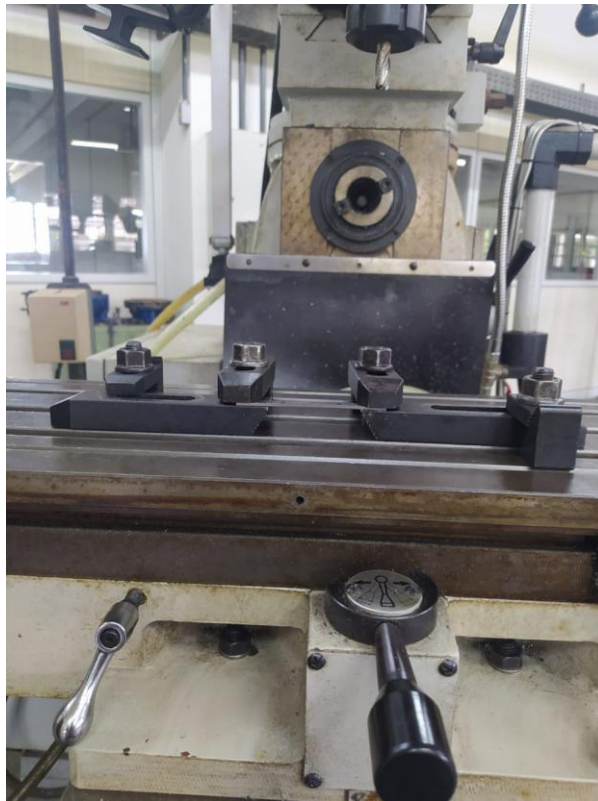
Figura 14. Esquema para fresagem dos corpos de prova na primeira etapa



FONTE: Autor, 2021.

- **Segunda Etapa:** Na segunda etapa, uma fresa de topo de 12 mm de diâmetro foi utilizada para usinar as chapas, padronizando a geometria dos corpos de prova. As cabeças foram conformadas com 32 mm de comprimento, enquanto a seção útil possui 32 mm de comprimento e 6 mm de largura. Esse processo assegurou a precisão dimensional necessária para os ensaios mecânicos. O esquema de fixação e usinagem está representado na Figura 15.

Figura 15. Esquema para fresagem de corpos de prova na segunda etapa



FONTE: Autor, 2021.

3.1.3 Tratamentos Termomecânicos

Com os corpos de prova devidamente conformados, os tratamentos termomecânicos foram realizados com o objetivo de modificar as microestruturas do aço AHSS DP800, visando estudar as suas propriedades mecânicas. Quatro diferentes rotas de tratamento foram seguidas, todas iniciando com um aquecimento a 900°C por 30 minutos, para austenitização, seguido de laminação a quente com uma redução de 20%, têmpera e subsequente tratamento térmico complementar. O processo foi realizado utilizando dois fornos do tipo mufla (Figura 16) e um laminador, pertencentes ao laboratório de tratamentos térmicos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Figura 16. Forno Mufla



FONTE: Autor, 2021.

3.1.3.1 Primeira Rota de Tratamento Termomecânico

- **Aquecimento:** O corpo de prova foi aquecido a 900°C durante 30 minutos para promover a transformação austenítica do material.
- **Laminação:** Após o aquecimento, foi realizada uma laminação com uma redução de 20% da área transversal do corpo de prova.
- **Têmpera:** O material foi imediatamente resfriado em água à temperatura ambiente, promovendo a formação de martensita.
- **Revenimento em Banho de Chumbo:** Por fim, o corpo de prova foi submetido a um banho de chumbo por 30 minutos a uma temperatura de 380°C, visando transformar parte da martensita em bainita.

3.1.3.2 Segunda Rota de Tratamento Termomecânico

- **Aquecimento e Laminação:** Seguiu-se o mesmo procedimento da primeira rota, com aquecimento a 900°C e laminação de 20%.

- **Têmpera:** O resfriamento em água foi repetido.
- **Revenimento em Banho de Chumbo:** Nesta rota, o banho de chumbo foi realizado por um período menor, de 20 minutos, ainda a 380°C. A redução do tempo visa alterar a quantidade de bainita formada, modificando as propriedades mecânicas do material.

3.1.3.3 Terceira Rota de Tratamento Termomecânico

- **Aquecimento:** O corpo de prova foi aquecido a 900°C por 30 minutos.
- **Laminação:** A laminação de 20% foi realizada conforme nas rotas anteriores.
- **Têmpera:** O corpo de prova foi temperado em água à temperatura ambiente.
- **Revenimento em Banho de Chumbo:** Diferente das primeiras duas rotas, o banho de chumbo foi realizado a uma temperatura mais elevada, de 420°C, e por 30 minutos. O aumento da temperatura tem como objetivo favorecer a formação de bainita com características distintas, alterando as propriedades mecânicas do aço.

3.1.3.4 Quarta Rota de Tratamento Termomecânico

- **Aquecimento e Laminação:** O procedimento de aquecimento a 900°C e laminação com redução de 20% foi mantido.
- **Têmpera:** O corpo de prova foi temperado em água como nas rotas anteriores.
- **Revenimento:** Nesta rota, ao invés de realizar o revenimento em banho de chumbo, o material foi reaquecido a 420°C, sendo mantido nesta temperatura por 30 minutos. Esse reaquecimento visa aliviar tensões internas e modificar a estrutura martensítica sem o uso do banho de chumbo.

3.2 Ensaios e Análises

3.2.1 Ensaio de Tração

Após os tratamentos termomecânicos, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração uniaxial em uma máquina universal de ensaios da marca Emic, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas resultantes, tais como o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e a ductilidade. O ensaio consistiu na aplicação de uma carga axial crescente até a ruptura do material, gerando curvas tensão-deformação, a partir das quais foi possível avaliar o comportamento mecânico das amostras. Os resultados obtidos foram comparados à condição como recebida, possibilitando uma análise crítica do impacto das diferentes rotas de tratamento sobre o desempenho mecânico do aço AHSS DP800.

3.2.2 Preparação Metalográfica

Para a análise microestrutural, os corpos de prova foram cortados em amostras menores utilizando uma serra de disco. Em seguida, essas amostras foram submetidas ao processo de embutimento, utilizando resina aquecida para facilitar as etapas posteriores de lixamento e polimento. O lixamento foi realizado em várias etapas com lixas de granulometria crescente (220, 320, 400 e 600), visando eliminar irregularidades e ranhuras na superfície das amostras. Após o lixamento, as amostras foram polidas em uma politriz com o uso de alumina como abrasivo e água como lubrificante. Finalmente, as superfícies polidas foram submetidas a um ataque químico com nital (mistura de ácido nítrico e álcool etílico) para revelar as microestruturas.

3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com a preparação metalográfica concluída, as amostras foram analisadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um equipamento MIRA3 da Tescan. O MEV emprega um feixe de elétrons focalizado para varrer a superfície das amostras, gerando imagens de alta resolução que revelam a topografia

e os aspectos microestruturais do material. Foram realizadas ampliações variando de 3000x a 20000x, possibilitando uma análise comparativa entre a condição como recebida e os corpos de prova submetidos às diferentes rotas de tratamento termomecânico. As imagens obtidas foram fundamentais para a caracterização das alterações microestruturais decorrentes dos tratamentos, permitindo correlacionar essas transformações com as propriedades mecânicas observadas nos ensaios de tração.

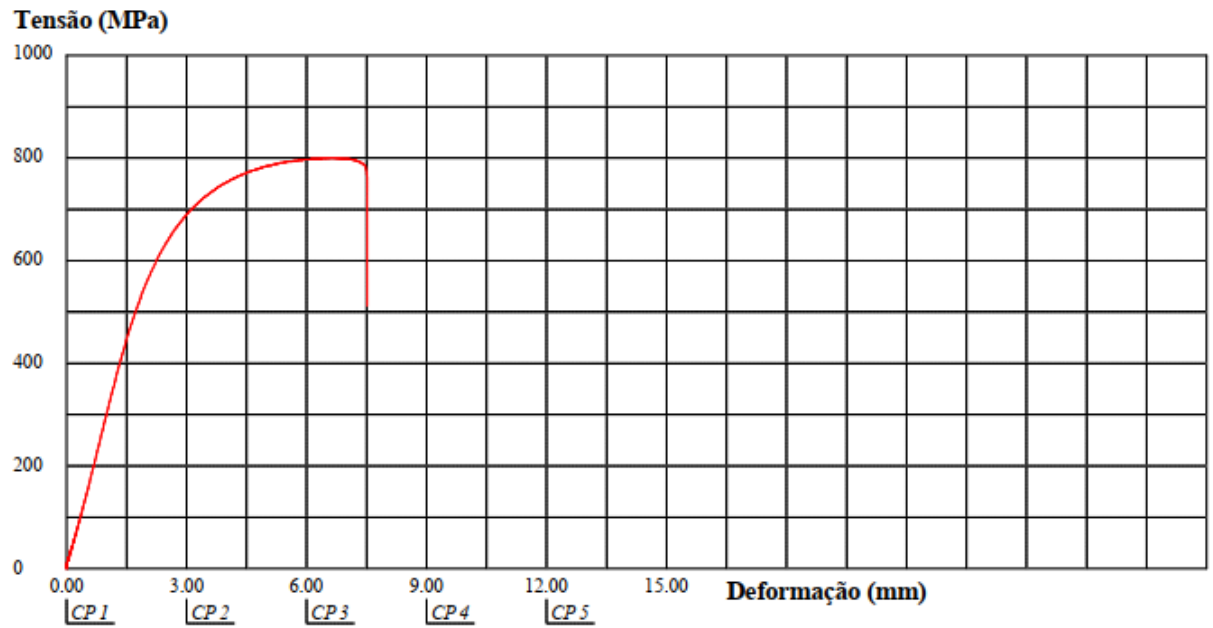
4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Ensaio de Tração

A análise dos gráficos obtidos permitiu compreender a relação entre a resistência à tração e a capacidade de deformação do aço AHSS DP800, fornecendo subsídios relevantes para a avaliação dos efeitos das modificações microestruturais resultantes dos tratamentos térmicos e mecânicos aplicados. Desde a condição como recebida até as distintas rotas de processamento, os resultados evidenciaram a evolução das propriedades mecânicas, como o limite de resistência, o limite de escoamento e a ductilidade, possibilitando comparações quantitativas entre as diferentes condições e suas respectivas influências no comportamento do material.

- **Material na condição “Como Recebido”**

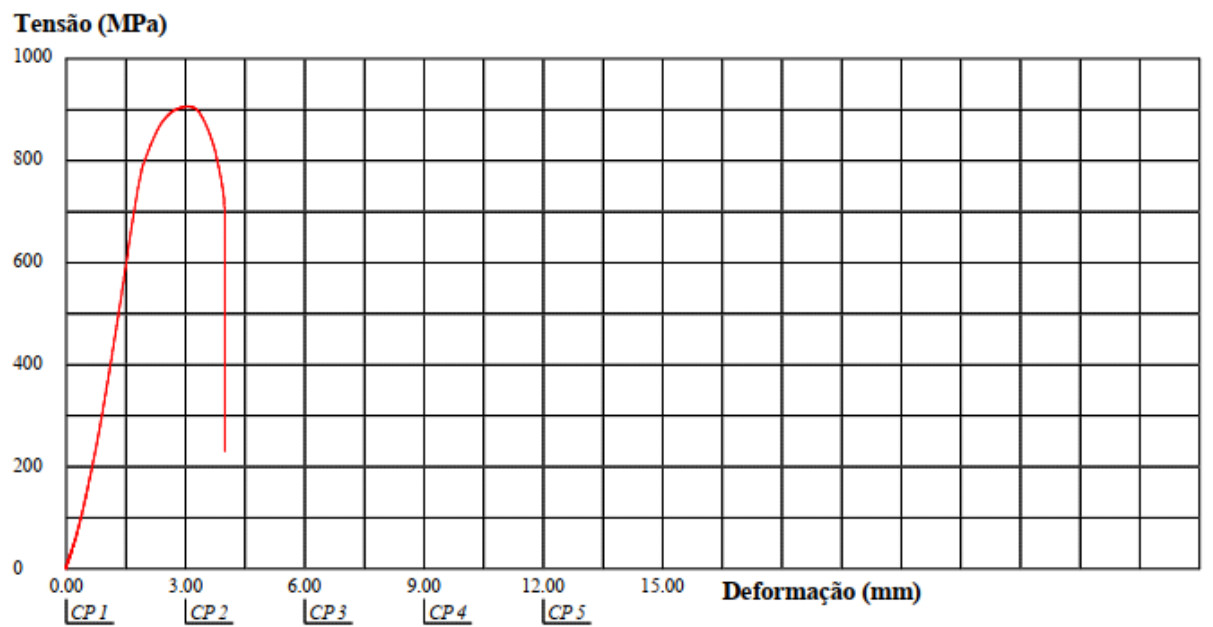
Figura 17. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Como Recebido"



FONTE: Autor, 2021

- Material na condição "Rota 1"

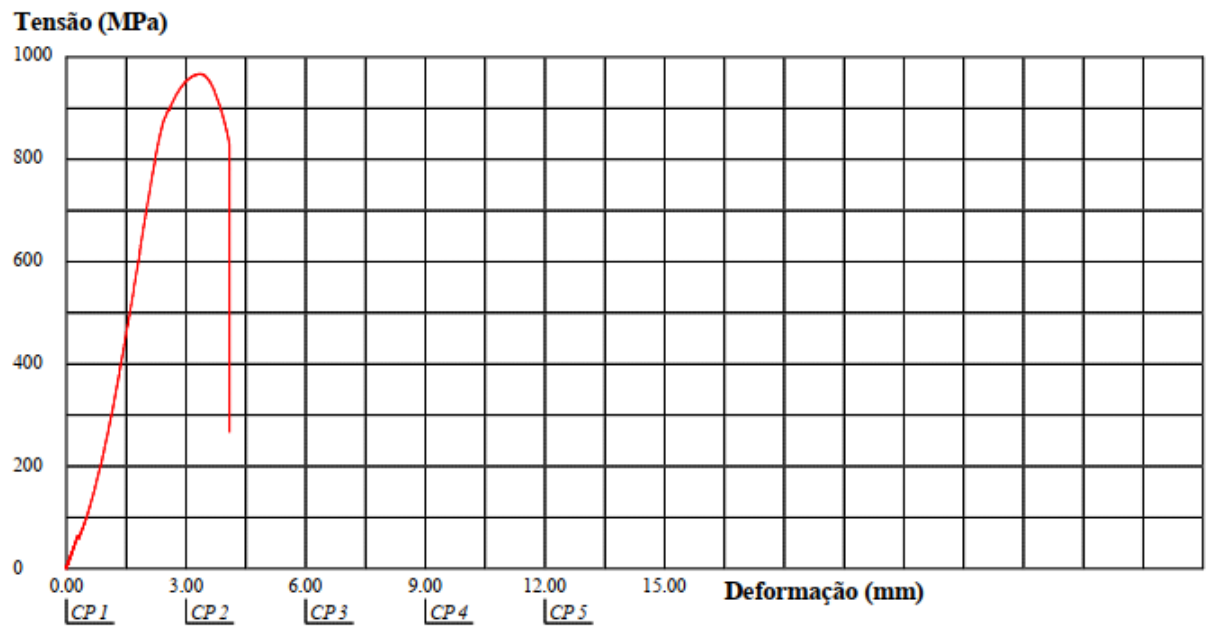
Figura 18. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 1"



FONTE: Autor, 2021

- Material na condição "Rota 2"

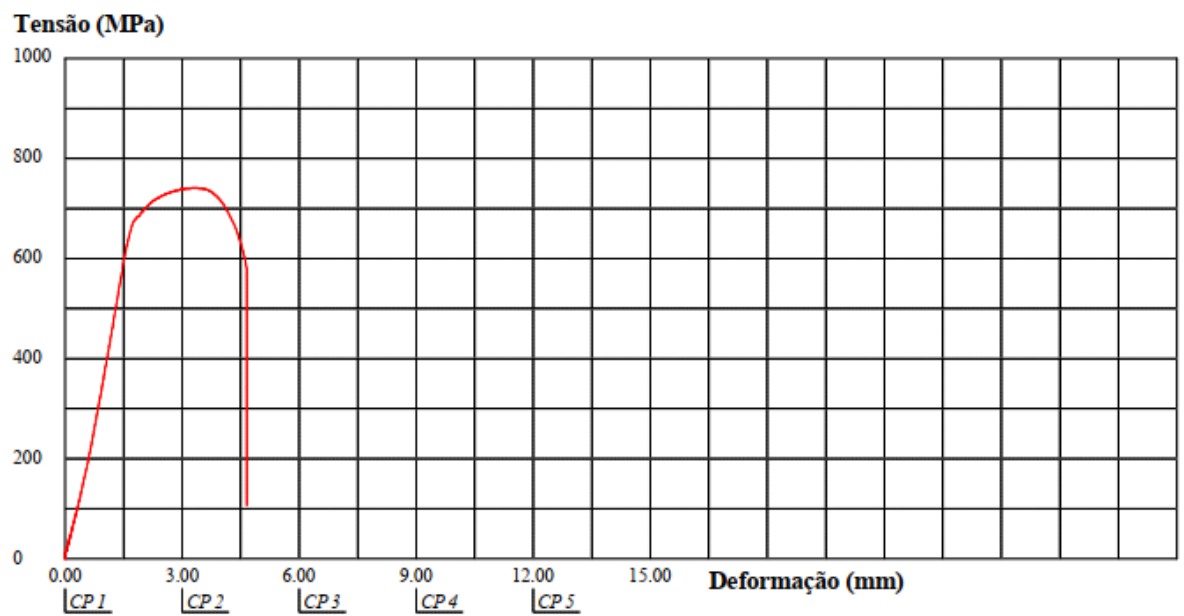
Figura 19. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 2"



FONTE: Autor, 2021.

- **Material na condição "Rota 3"**

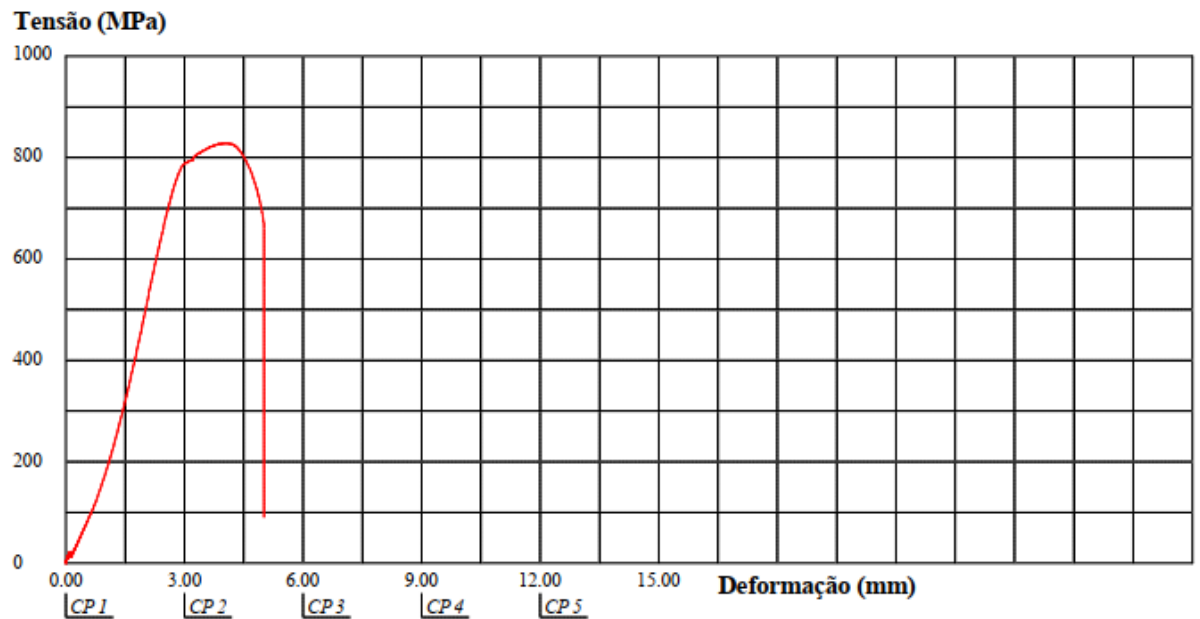
Figura 20. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 3"



FONTE: Autor, 2021.

- **Material na condição "Rota 4"**

Figura 21. Gráfico de Tensão x Deformação na condição "Rota 4"



FONTE: Autor, 2021.

Através dos gráficos e dos dados obtidos, foi possível elaborar uma tabela que resume as médias e os desvios padrão de limite de resistência, limite de escoamento e deformação para cada uma das rotas de tratamento termomecânico, além do material na condição "como recebido". (Figura 17)

Tabela 1. Propriedades obtidas através dos ensaios de tração

Condições	Média (Limite de Resistência) MPa	Desv. Pad (Limite de Resistência) MPa	Média (Limite de Escoamento) MPa	Desv. Pad (Limite de Escoamento) MPa	Média (Deformação) %
Como Recebido	776,00	21,93	705,00	28,58	23%
Rota 1	932,33	67,93	795,00	49,50	19%
Rota 2	905,67	1,53	692,67	52,27	15%
Rota 3	724,00	16,37	549,33	28,92	13%
Rota 4	779,00	70,71	620,00	63,64	14%

FONTE: Autor, 2021.

Ao analisar a tabela, nota-se que as rotas 1 e 2 apresentaram valores médios de limite de resistência significativamente superior ao material como recebido. A Rota 1, em particular, destacou-se com o maior valor médio de limite de resistência (932,33 MPa) e também com o maior limite de escoamento (795 MPa), indicando que esse tratamento foi o mais eficaz em melhorar essas propriedades mecânicas (Figura 18). A Rota 2 também apresentou um aumento considerável no limite de resistência (905,67 MPa), embora o limite de escoamento (692,67 MPa) tenha sido ligeiramente inferior ao do material como recebido (Figura 19).

Esses resultados são corroborados pelo estudo de Silva (2019), que também observou ganhos significativos nas propriedades mecânicas do aço AHSS DP800 após tratamentos semelhantes.

Em contraste, a Rota 3 resultou em uma redução no valor médio do limite de resistência (724 MPa), tornando-se a única rota a apresentar desempenho inferior ao material como recebido (776 MPa) nesse parâmetro. O limite de escoamento da Rota 3 (549,33 MPa) também foi o mais baixo entre todas as condições testadas, indicando que este tratamento não foi eficaz na melhoria das propriedades mecânicas do material (Figura 20). Os resultados obtidos para a Rota 3 diferem dos observados por Silva (2019), que relatou desempenho superior em condições semelhantes.

A Rota 4 apresentou resultados intermediários. Embora tenha demonstrado um aumento no limite de resistência (779 MPa) em comparação com o material como recebido, esse valor foi apenas marginalmente superior. O limite de escoamento (620 MPa), por sua vez, foi inferior ao do material como recebido, mas ainda superior ao observado na Rota 3, caracterizando um comportamento mecânico moderado (Figura 21). Para essa condição, os resultados obtidos corroboram com os encontrados por Silva (2019), indicando consistência entre os estudos.

Além das variações nos limites de resistência e escoamento, observou-se uma tendência de redução na deformação média do material após os tratamentos termomecânicos. O material como recebido apresentou uma deformação média de 23%, enquanto as rotas 1, 2, 3 e 4 resultaram em deformações reduzidas para 19%, 15%, 13% e 14%, respectivamente. Isso indica que os tratamentos termomecânicos

não só aumentaram a resistência, mas também diminuíram a capacidade do material de se deformar, um efeito típico de microestruturas mais duras, como a martensita e a bainita, formadas durante os processos de têmpera e decomposição em banho de chumbo.

Esses resultados corroboram a importância dos tratamentos termomecânicos na modificação das propriedades mecânicas do aço AHSS DP800, sendo que a Rota 1 demonstrou o melhor equilíbrio entre alta resistência e limite de escoamento, ao mesmo tempo que reduziu a deformação de forma menos pronunciada.

4.2 Microestruturas Obtidas

Segundo Farias Neto (2015), os aços AHSS são predominantemente compostos por ferrita e martensita, com quantidades muito pequenas de austenita retida e bainita. Para a análise das microestruturas resultantes dos tratamentos termomecânicos, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura, que oferece uma visualização detalhada e precisa das características microestruturais. No decorrer do estudo, foram registradas imagens com aumentos de 3000x, 5000x, 10000x e 20000x.

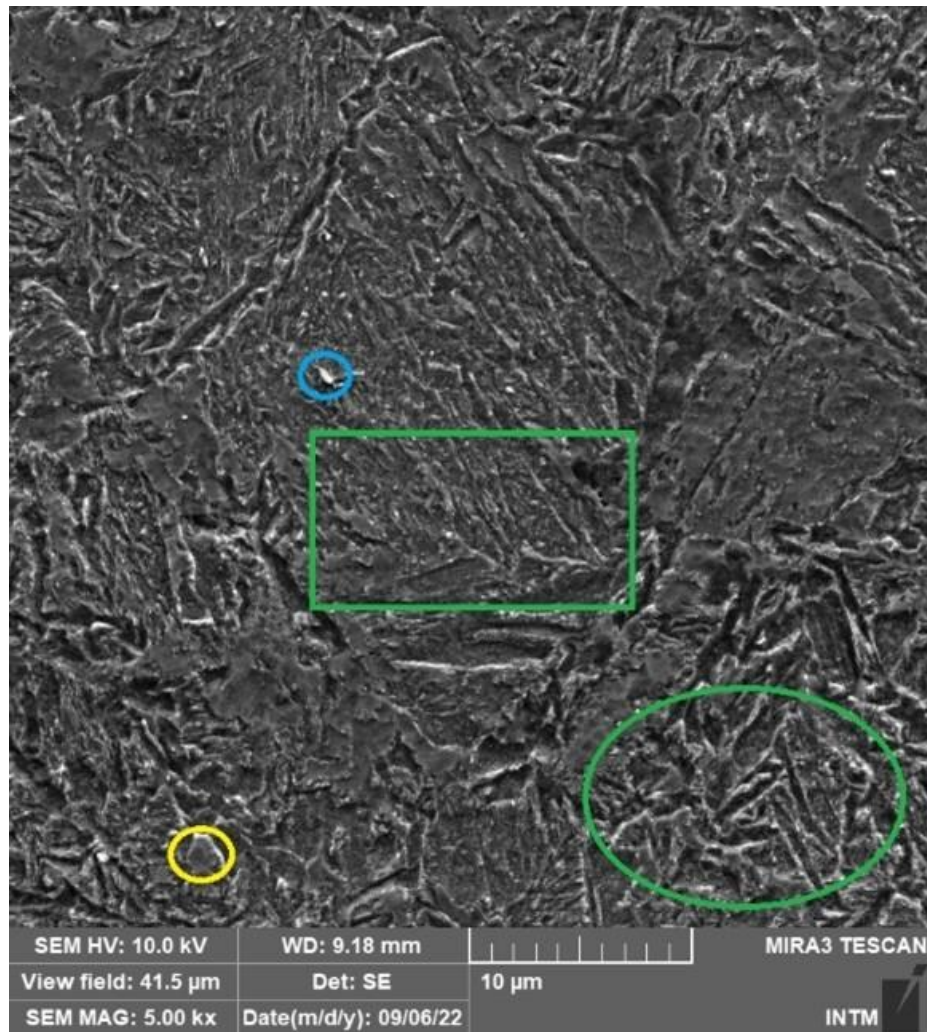
4.2.1 Primeira Rota

A caracterização microestrutural realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciou diferenças marcantes entre o material como recebido e aquele submetido à Rota 1. A microestrutura da Rota 1 apresentou-se significativamente mais refinada, com predominância de bainita, destacada pelas elipses e retângulos verdes nas imagens. Essa morfologia está diretamente associada a melhores propriedades mecânicas. Além disso, foram identificadas pequenas quantidades de constituinte MA (elipses azuis) e de austenita retida (elipses amarelas). A presença reduzida desses constituintes e o refino da bainita indicam uma microestrutura mais otimizada. (Figura 22)

Esses resultados estão em concordância com a análise de Silva (2019), que observou, em tratamento aplicado ao aço AHSS DP800, uma microestrutura

majoritariamente composta por ferrita, com a presença adicional de martensita e do constituinte M-A.

Figura 22. Microestruturas vistas por MEV da rota 1. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x



FONTE: Autor, 2022.

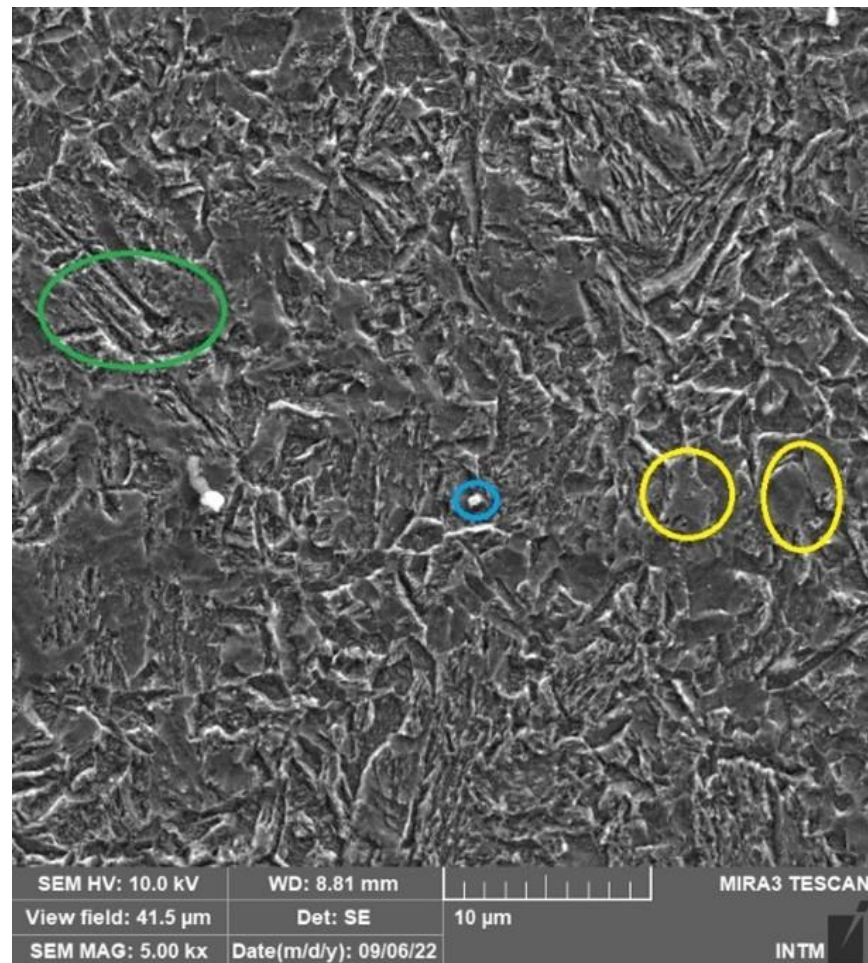
Esse refinamento e a organização microestrutural observada são fundamentais para justificar as notáveis melhorias nas propriedades mecânicas do aço, como o limite de resistência e o escoamento. Comparado com o material como recebido e com as outras rotas analisadas, o material da Rota 1 demonstra desempenhos superiores em termos de resistência e ductilidade. Essas observações destacam a eficácia da Rota 1 na obtenção de características mecânicas aprimoradas.

4.2.2 Segunda Rota

A análise da microestrutura, realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para o material tratado pela Rota 2, revelou características semelhantes às observadas na Rota 1. Ambas as rotas apresentaram formação predominantemente bainítica, conforme indicado pelas elipses verdes nas imagens. No entanto, a Rota 2 exibiu uma maior quantidade de austenita retida (elipses amarelas), em comparação com a Rota 1, além de apresentar uma redução na fração do constituinte MA (elipses azuis). (Figura 23)

Resultados semelhantes foram descritos por Silva (2019), que observou, em tratamento aplicado ao aço AHSS DP800, uma microestrutura composta por martensita, constituinte M-A, ferrita e bainita.

Figura 23. Microestruturas vistas por MEV da rota 2. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x



FONTE: Autor, 2022.

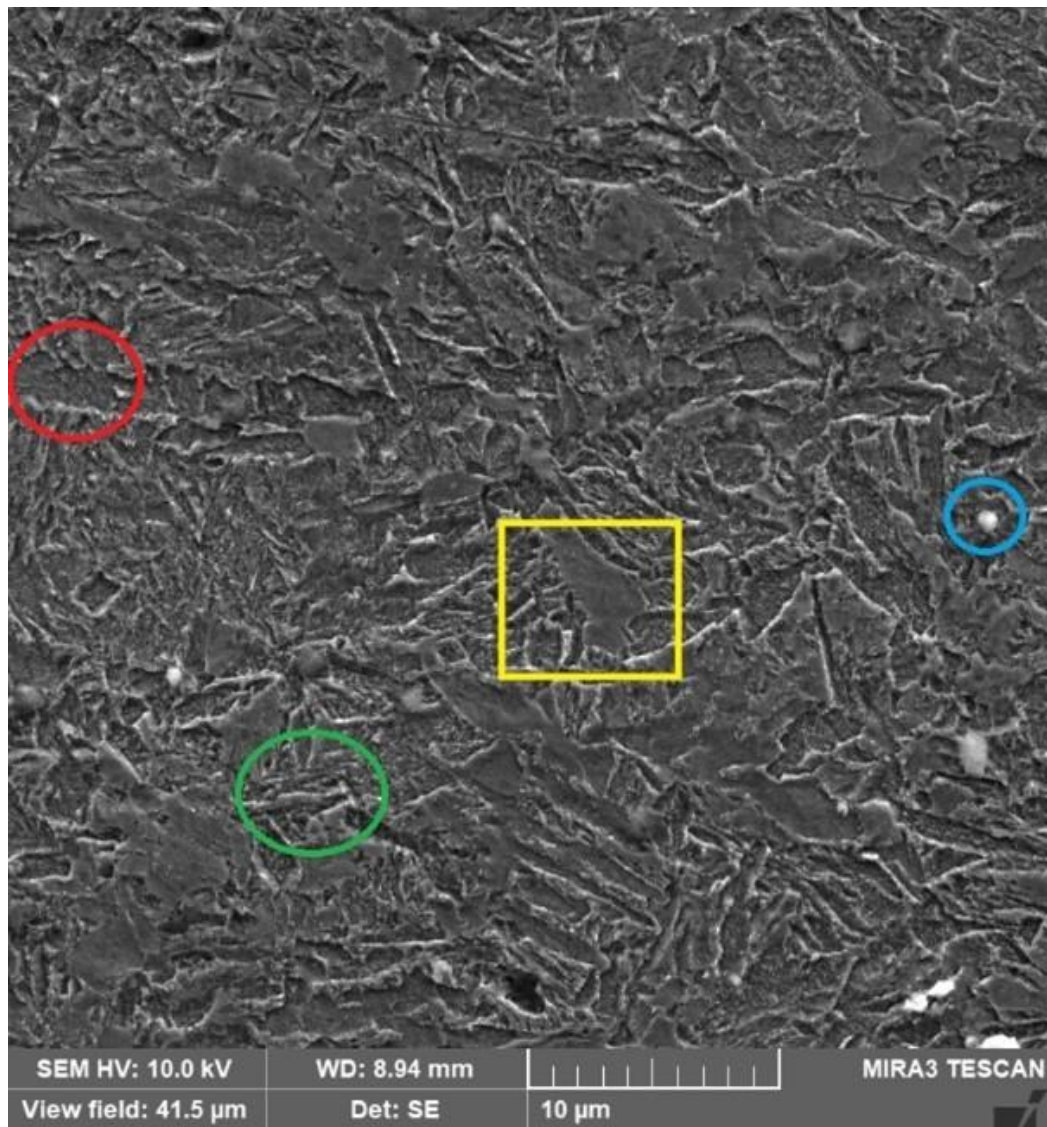
A maior quantidade de austenita retida na Rota 2 pode ser atribuída ao menor tempo de decomposição isotérmica, que foi de apenas 20 minutos em banho de chumbo. Este fator é crucial, pois a austenita retida é menos estável e pode influenciar negativamente as propriedades mecânicas do material. Como resultado, as propriedades mecânicas do material da Rota 2, como o limite de resistência, o limite de escoamento e a deformação, são inferiores às observadas na Rota 1. Esse comportamento destaca a importância do tempo de tratamento na otimização das propriedades mecânicas do aço.

4.2.3 Terceira Rota

A análise da microestrutura observada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para o material tratado pela Rota 3 revela características distintas em relação às demais rotas. A microestrutura da Rota 3 é composta por menores quantidades de bainita (elipses verdes) e de ferrita (elipses vermelhas). Além disso, observa-se a presença de austenita retida (retângulos amarelos) e do constituinte MA (elipses azuis), ambos em proporções reduzidas. (Figura 24)

Essa configuração microestrutural está de acordo com os resultados descritos por Silva (2019), que identificou, em tratamentos aplicados ao aço AHSS DP800, a presença de ferrita, martensita, bainita e constituinte M-A.

Figura 24. Microestruturas vistas por MEV da rota 3. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x



FONTE: Autor, 2022.

A menor quantidade de bainita e ferrita, juntamente com uma quantidade relativamente maior de austenita retida e constituinte MA, pode ser atribuída à maior temperatura de decomposição utilizada no tratamento em banho de chumbo. Essa maior temperatura tende a reduzir a quantidade de bainita formada e promover a estabilidade da austenita retida. Como resultado, os valores das propriedades mecânicas do material da Rota 3 são os menores observados entre todas as rotas analisadas e o material como recebido. Esse comportamento é consistente com a expectativa de que o aumento da temperatura de decomposição compromete a

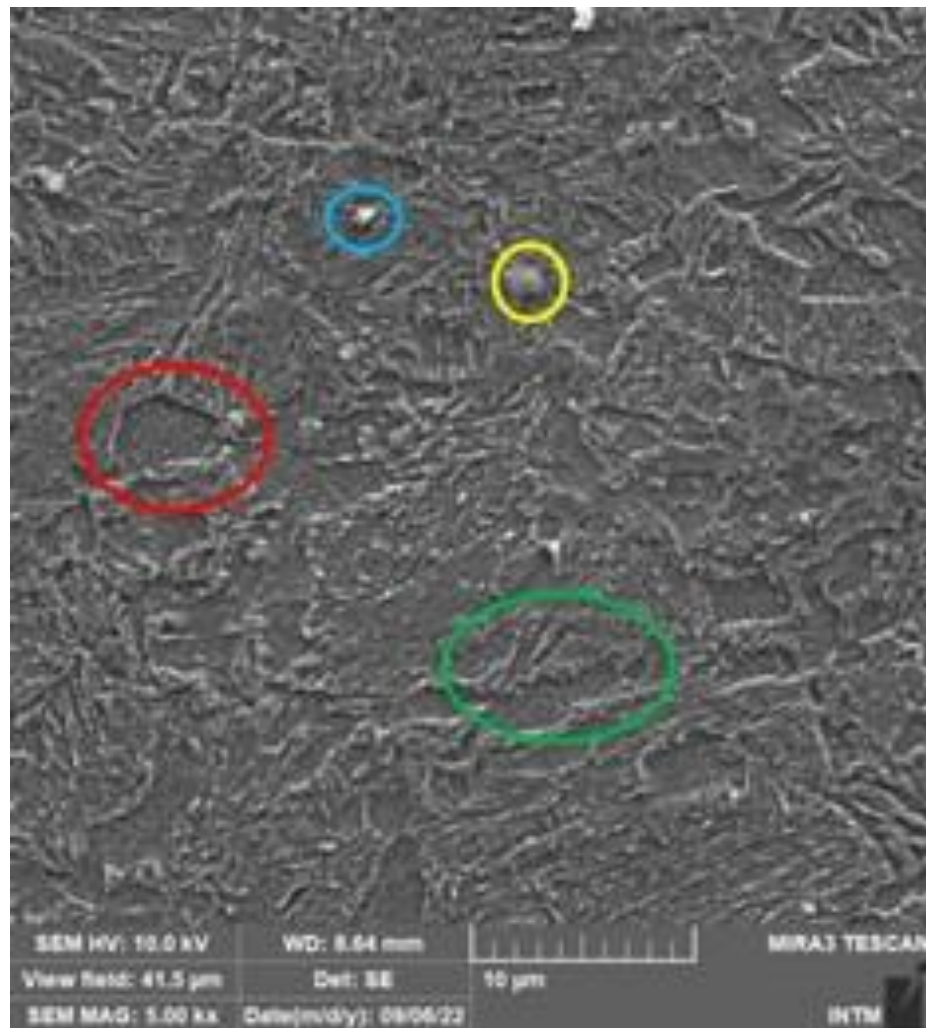
formação de estruturas microestruturais mais desejáveis e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do aço.

4.2.4 Quarta Rota

A análise da microestrutura, realizada com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para o material tratado pela Rota 4, revela características distintas em relação às outras rotas. Observa-se que a microestrutura da Rota 4 é composta por quantidades menores de bainita, representada por elipses verdes, bem como de ferrita, identificada por elipses vermelhas. A quantidade de austenita retida, mostrada por elipses amarelos, e do constituinte MA, indicado por elipses azuis, também é reduzida. (Figura 25)

A principal diferença em relação às demais rotas é que, na Rota 4, não foi utilizada a decomposição isotérmica em banho de chumbo. A ausência deste tratamento térmico específico resultou em uma microestrutura menos refinada, com menor formação de bainita e outros constituintes desejáveis. Essa configuração microestrutural menos otimizada leva a um desempenho inferior nas propriedades mecânicas do material, comparado às outras rotas que empregaram a decomposição em banho de chumbo. Portanto, a ausência desse tratamento é um fator crítico para as menores propriedades mecânicas observadas na Rota 4.

Figura 25. Microestruturas vistas por MEV da rota 4. a)3000x, b)5000x, c)10000x e d)20000x



FONTE: Autor, 2022.

Ao observar as microestruturas resultantes dos diferentes tratamentos e compará-las com a do material como recebido, é possível identificar a presença dos mesmos elementos principais em todas as amostras, como martensita e ferrita. No entanto, as amostras submetidas aos tratamentos termomecânicos apresentam quantidades significativamente maiores de bainita e austenita retida em comparação com o material não tratado. Esse aumento na presença desses constituintes é um indicativo das modificações promovidas pelos tratamentos térmicos e mecânicos aplicados.

Os tratamentos termomecânicos realizados no aço AHSS DP 800 resultaram em microestruturas que alteram substancialmente as propriedades mecânicas do

material. Entre as diferentes rotas analisadas, a Rota 1 se destacou por produzir os melhores resultados em termos de propriedades mecânicas. Esta rota foi capaz de otimizar a formação de bainita e controlar a quantidade de austenita retida, resultando em um equilíbrio favorável que proporciona um desempenho mecânico superior. Assim, as modificações microestruturais obtidas através dos tratamentos termomecânicos demonstram sua eficácia na melhoria das propriedades do aço AHSS DP 800.

4.3 Correlação entre microestruturas e propriedades mecânicas

Os tratamentos térmicos e mecânicos aplicados ao aço AHSS DP800 em cada rota tiveram impactos diretos na formação das microestruturas e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas do material. A combinação de aquecimento, laminação a quente, têmpera e decomposição em banho de chumbo foi projetada para induzir diferentes microestruturas, como martensita, bainita, ferrita e austenita retida, cada uma contribuindo de maneira específica para a resistência, ductilidade e tenacidade do aço. Para compreender como essas rotas influenciaram o comportamento do material, é necessário correlacionar os tratamentos executados em cada etapa com as microestruturas formadas e as propriedades resultantes.

- **Rota 1: Aquecimento, Laminação a Quente, Têmpera em Água e Revenido em Banho de Chumbo a 380°C por 30 Minutos**

Na primeira rota, o corpo de prova foi aquecido a 900°C por 30 minutos para promover a austenitização completa do material. A alta temperatura transforma a estrutura existente em austenita, uma fase de alta temperatura com estrutura cúbica de face centrada (CFC). Essa fase é essencial para os tratamentos subsequentes, pois é a base para a formação de martensita e outras microestruturas durante o resfriamento. Após o aquecimento, o aço passou por uma laminação a quente, que promoveu a deformação plástica e uma redução de 20% na área transversal do corpo de prova. A laminação a quente introduz tensões no material e refina o tamanho de grão, o que pode aumentar a resistência mecânica. Esse processo ajuda a alinhar a microestrutura e facilita a formação de fases mais finas e uniformes após o resfriamento.

Em seguida, o corpo de prova foi submetido a uma têmpera em água à temperatura ambiente. Esse resfriamento rápido transforma a austenita em martensita, uma microestrutura extremamente dura e resistente, devido à impossibilidade de difusão de carbono durante o resfriamento brusco. A presença de martensita nesta rota é a principal responsável pelo aumento significativo da resistência mecânica observado nos ensaios de tração. Finalmente, o corpo de prova foi submetido a uma decomposição em banho de chumbo a 380°C por 30 minutos. Esse processo permitiu a formação de bainita, uma fase que proporciona um equilíbrio entre resistência e ductilidade. A bainita formada nesse estágio possui uma estrutura de placas de ferrita com precipitados de carbonetos, o que melhora a resistência sem comprometer a tenacidade. A bainita contribui para aumentar a capacidade de deformação do aço, mantendo uma resistência relativamente alta.

- **Rota 2: Aquecimento, Laminação a Quente, Têmpera em Água e Revenido em Banho de Chumbo a 380°C por 20 Minutos**

A segunda rota foi semelhante à primeira em termos de aquecimento, laminação e têmpera, o que resultou em uma estrutura inicial de martensita, novamente promovendo um aumento significativo na resistência à tração. A principal diferença aqui foi o tempo reduzido de decomposição em banho de chumbo, que foi de apenas 20 minutos, em comparação com os 30 minutos da primeira rota. A decomposição mais curta limitou a formação de bainita, resultando em uma menor quantidade dessa fase. Embora a bainita ainda estivesse presente, sua formação menos intensa se traduziu em uma leve redução da ductilidade em comparação com a Rota 1. Isso sugere que o tempo de decomposição é crucial para o equilíbrio entre resistência e capacidade de deformação. Apesar da menor quantidade de bainita, a martensita continuou a fornecer alta resistência, o que fez da Rota 2 uma opção interessante quando se busca uma resistência elevada com menor influência na ductilidade.

- **Rota 3: Aquecimento, Laminação a Quente, Têmpera em Água e Revenido em Banho de Chumbo a 420°C por 30 Minutos**

Na terceira rota, o processo de aquecimento, laminação a quente e têmpera seguiu os mesmos parâmetros das rotas anteriores, promovendo a formação de

martensita após o resfriamento rápido. No entanto, a principal diferença aqui foi a temperatura mais elevada do banho de chumbo, que foi de 420°C. A decomposição a uma temperatura mais alta favoreceu a formação de bainita de uma forma mais acentuada, o que impactou diretamente as propriedades mecânicas. A bainita formada a 420°C tem características diferentes daquela formada a 380°C, apresentando uma maior quantidade de ferrita bainítica e uma menor proporção de carbonetos. Isso resulta em um material com maior ductilidade, embora a resistência ainda seja significativa devido à presença de martensita. A maior quantidade de bainita também proporciona uma melhor tenacidade, tornando o material mais resistente a fraturas sob condições de impacto ou carga repetitiva.

A austenita retida também pode ter uma presença mais significativa nessa rota, devido à decomposição a uma temperatura mais elevada. A austenita retida pode se transformar em martensita durante o uso ou deformação do material, contribuindo para o aumento progressivo da resistência através do efeito TRIP (Transformação Induzida por Plástico).

- **Rota 4: Aquecimento, Laminação a Quente, Têmpera em Água e revenido a 420°C por 30 Minutos**

A última rota foi semelhante à terceira em termos de aquecimento, laminação e têmpera, mas, em vez de uma decomposição em banho de chumbo, o corpo de prova foi submetido a um reaquecimento a 420°C, seguido de manutenção nessa temperatura por 30 minutos. Esse processo difere da bainitização porque não há resfriamento em banho, mas sim uma permanência controlada em alta temperatura. Esse reaquecimento permitiu o alívio de tensões e a estabilização de algumas fases. Embora a martensita ainda estivesse presente, o tratamento térmico a 420°C promoveu uma decomposição parcial da martensita em ferrita bainítica e carbonetos. Isso resultou em uma microestrutura mais dúctil do que nas rotas anteriores, com uma maior quantidade de ferrita bainítica.

O reaquecimento também favoreceu a estabilização de austenita retida, o que aumenta a capacidade de conformação do material durante o uso. Essa rota final, embora tenha produzido um material menos resistente que as rotas 1 e 2, ofereceu a melhor combinação de ductilidade e tenacidade. A presença de bainita e a

estabilidade da austenita retida foram fatores-chave para garantir que o material pudesse se deformar sem perder sua integridade estrutural.

Cada uma das rotas aplicadas ao aço AHSS DP800 resultou em diferentes combinações de martensita, bainita, ferrita e austenita retida. Essas microestruturas, por sua vez, foram responsáveis pelas variações nas propriedades mecânicas observadas nos ensaios de tração. As rotas 1 e 2, que promoveram uma maior formação de martensita, resultaram nos maiores aumentos de resistência à tração, mas com uma redução na ductilidade. A bainita formada nas rotas 1 e 3 proporcionou uma melhor tenacidade e capacidade de deformação, enquanto a austenita retida presente na rota 3 contribuiu para o efeito TRIP, aumentando a resistência progressiva do material. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmou a presença e distribuição dessas microestruturas, demonstrando a correlação direta entre os tratamentos termomecânicos aplicados, as fases formadas e as propriedades finais do aço.

5 CONSIDERAÇÕES

- Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que os tratamentos termomecânicos aplicados ao aço AHSS DP800 proporcionaram um aumento significativo na resistência mecânica do material, acompanhado de uma redução na deformação quando submetido a esforços.
- Dentre as rotas analisadas, as Rotas 1 e 2 destacaram-se por promoverem os maiores ganhos em resistência, sendo, portanto, as mais eficazes para a otimização das propriedades mecânicas do aço em questão.
- A caracterização microestrutural revelou a formação predominante de martensita e ferrita, com a presença adicional de bainita e austenita retida. Essas fases desempenham papéis distintos no comportamento mecânico do material:
 - A martensita é responsável pela elevada resistência e dureza.
 - A ferrita confere maior ductilidade e tenacidade.
 - A bainita oferece um equilíbrio entre resistência e capacidade de deformação.

- A austenita retida pode modificar o desempenho sob diferentes condições de carregamento.
- As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) corroboraram os resultados obtidos, confirmando a presença e a distribuição das fases previstas, em conformidade com a literatura, como descrito por Silva (2019).
- Conclui-se, portanto, que os tratamentos termomecânicos empregados foram eficazes na modificação da microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas do aço AHSS DP800, contribuindo de forma relevante para o entendimento do comportamento desse material e para possíveis aplicações industriais.

REFERENCIAS

AÇO NOBRE. **Microestrutura dos aços**. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/microestrutura-dos-acos/>. Acesso em: 9 set. 2024.

AÇO NOBRE. **Têmpera superficial**. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/tempera-superficial/>. Acesso em: 9 set. 2024.

AÇO NOBRE. **Tratamento térmico do aço**. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/tratamento-termico-do-aco/>. Acesso em: 9 set. 2024.

AFINKO POLÍMEROS. **Ensaio de microscopia óptica**. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/ensaio-de-microscopia-optica/>. Acesso em: 9 set. 2024.

AFINKO POLÍMEROS. **O que é microscopia eletrônica (MEV)**. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-microscopia-eletronica-mev/>. Acesso em: 9 set. 2024.

BARBOSA, Andeson Leonne Santos. **Estudo das transformações de fases no aço DP 800**. 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BIOPDI. **Tratamento térmico dos metais**. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/tratamento-termico-dos-metais/>. Acesso em: 9 set. 2024.

BOYDE, A. **Pros and cons of critical point drying and freeze drying for SEM**. Scan Electr Microsc, v. 2, p. 303–314, 1978.

BOZOLLA, J. J.; RUSSEL, L. D. **Electron Microscopy: principles and techniques for biologists**. 2. ed. Sudbury: MA Jones and Bartlett, 1999.

DUSTRE. **Têmpera**. Disponível em: <https://dustre.com.br/servicos/tratamentos-termicos/tempera/>. Acesso em: 9 set. 2024.

FARIA NETO, Antônio dos Reis de. **Aços avançados de alta resistência: avaliação da microestrutura e propriedades dos aços DP 600 e DP 780**. 2015. 69 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

GORNI, Arlindo Silva. **Solidificação de metais**. Disponível em: https://www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_De2008.pdf. Acesso em: 9 set. 2024.

GRITTI, J. A.; CANGUE, F. J. R.; GODEFROID, L. B. **Fatigue crack growth in two dual-phase steels used in automotive wheels discs**. Fatigue 2002; International Fatigue Conference 2002, IISI - International Iron and Steel Institute, Stockholm, Sweden, v. 1, p. 1-20.

GRUPO AÇO CEARENSE. **Principais tipos de aço**. Disponível em: <https://www.grupoacocearense.com.br/blog/vender-mais/principais-tipos-de-aco/>. Acesso em: 9 set. 2024.

MARTINS, M. S. **Caracterização em impacto e fadiga do aço estrutural de fases complexas, utilizado na indústria automotiva**. 2011. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

METALURGIA. **Objetivos do tratamento térmico**. Disponível em: <https://www.metalurgia.com.br/noticias-tratamento-termico/#:~:text=Objetivos%20do%20tratamento%20t%C3%A9rmico>. Acesso em: 9 set. 2024.

REVISTA FERRAMENTAL. **O que é têmpera? Processo de tratamento térmico metalurgia**. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/o-que-e-tempera-processo-de-tratamento-termico-metalurgia/>. Acesso em: 9 set. 2024.

SACCHELLI. **Microestrutura dos aços na indústria metalúrgica**. Disponível em: <https://sacchelli.com.br/microestrutura-dos-acos-na-industria-metalurgica/>. Acesso em: 9 set. 2024.

SACCHELLI. **Tipos de aço: conheça os principais e suas utilizações**. Disponível em: <https://sacchelli.com.br/tipos-de-aco-conheca-os-principais-e-suas-utilizacoes/>. Acesso em: 9 set. 2024.

SEFFER, O.; PFEIFER, R.; SPRINGER, A.; KAIERLE, S. **Investigations on laser beam welding of different dissimilar joints of steel and aluminum alloys for automotive lightweight construction**. Physics Procedia, n. 83, p. 383-395, 2016.

SILVA, Éverton Fernandes da. **Estudo da influência das sequências termomecânicas nas propriedades mecânicas do aço DP 800**. 2021. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

SILVA, Karla Cybelle Alves de Oliveira. **Estudo de sequências termomecânicas em aços AHSS de primeira geração**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

STÜRMER, L. **Estudo da eficiência de estiradores na conformação de aços avançados de alta resistência DP800 e DP1000**. 2013. 145 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

TAMARELLI, C. M. **AHSS 101: The evolving use of advanced high-strength steel for automotive applications**. Steel Mark. Dev. Inst., Michigan, p. 42, 2011.

TAMARELLI, C. M. **The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications**. [S. l.], 1 mar. 2017.