



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
PERNAMBUCO  
Campus Recife

Bacharelado Em Engenharia Mecânica

ALISSON SOARES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE ROTAS TÉRMICAS E TERMOMECAÑICAS PARA O ESTUDO DA  
TENACIDADE DO AÇO AHSS DP800**

Recife

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estado e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

S586a  
2023

Silva, Alisson Soares da

Avaliação de rotas térmicas e termomecânicas para o estudo da tenacidade do aço AHSS DP800. / Alisson Soares da Silva. — Recife: O autor, 2023.

34f. il. Color.

Trabalho de Conclusão (Curso Superior Tecnológico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr. Tiago de Sousa Antonino.

1. Aço AHSS DP800. 2. Tenacidade. 3. Sequências termomecânicas. I. Título. II. Antonino, Tiago de Sousa (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1

ALISSON SOARES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE ROTAS TÉRMICAS E TERMOMECÂNICAS PARA O ESTUDO DA  
TENACIDADE DO AÇO AHSS DP800**

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

Orientador: Prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino

RECIFE

2023

**AVALIAÇÃO DE ROTAS TÉRMICAS E TERMOMECÂNICAS PARA O ESTUDO DA  
TENACIDADE DO AÇO AHSS DP800**

ALISSON SOARES DA SILVA

Recife, 14/02/2023.

---

Prof. Dr. TIAGO ANTONINO DE SOUSA  
PROFESSOR ORIENTADOR

---

Prof. Dr. PABLO GUIMARÃES  
CONVIDADO 1

---

Prof. Mestre. ÉVERTON FERNANDES DA SILVA  
CONVIDADO 2

RECIFE

2023

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças e sabedoria para todos os desafios que enfrentei durante todas as etapas do curso e por eu ter chegado até onde estou hoje. A toda a minha família, em especial aos meus pais, Alexandre e Gilda, por me apoiarem sempre em toda a minha trajetória. À minha namorada Klenda Dayanna, que tem me apoiado sempre sendo uma grande parceira. Aos professores do GMA&SC, em especial ao meu orientador: Dr. Tiago de Sousa Antonino, por ter me dado a oportunidade de entrar no ambiente da pesquisa através da iniciação científica e pelo conhecimento compartilhado. A todos os professores e professoras que contribuíram com a minha formação acadêmica com seus ensinamentos e conselhos. A Deisiane, Edilson, Everton e aos técnicos Elinaldo e Josiel, por terem dado um importante apoio na elaboração dos experimentos do trabalho. Aos meus amigos, que durante minha jornada me ajudaram muito e proporcionaram ótimos momentos. A todos que contribuíram de alguma forma, muito obrigado!

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a tenacidade do aço AHSS DP 800 por meio de diferentes rotas termomecânicas. Inicialmente foi feito o corte do material em uma guilhotina mecânica para fabricação dos corpos de prova e realização de 4 sequências termomecânicas onde a primeira foi realizada com austenitização à 920 °C durante 15 minutos para uma redução de 15%, a segunda durante 20 minutos para uma redução de 10% em sua seção transversal, finalizando com resfriamento em água à temperatura ambiente, realizando assim uma têmpera. E a terceira e quarta durante 15 minutos para uma redução de 15%, com têmpera seguida de banho de chumbo à 450°C e 480°C respectivamente. Também foram feitos ensaios de tração para obter dados em relação ao limite de resistência, à tensão de escoamento, deformação e tenacidade do material como recebido e após as sequências termomecânicas. Para concluir os experimentos, foi feita a análise metalográfica da microestrutura do material, cortando-o, polindo e aplicando um ataque químico para visualização em microscópio óptico. Os resultados mostraram aumento do limite de resistência e tensão de escoamento do aço AHSS DP 800 nas rotas 01 e 02 e redução percentual na deformação. Já para tenacidade, a única rota em que essa propriedade teve aumento foi a 02. Nas rotas 03 e 04, as mesmas propriedades obtiveram uma redução em relação ao material como recebido. Com os experimentos realizados, a rota termomecânica 02, que foi feita apenas com têmpera, representou uma ótima maneira de se obter uma melhoria na tenacidade do aço AHSS DP800, assim como em outras propriedades, aumentando a possibilidade de o material suportar tensões maiores que a de escoamento.

Palavras-chave: Aço AHSS DP800; tenacidade; sequências termomecânicas.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate the toughness of AHSS DP 800 steel through different thermomechanical rotations. Initially, the material was cut on a mechanical guillotine for the manufacture of test specimens and 4 thermomechanical sequences performing, where the first was performed with austenitization at 920 °C for 15 minutes for a reduction of 15%, the second for 20 minutes to a reduction of 10% in its cross-section, ending with cooling in water at room temperature, performing a temper. And the third and fourth for 15 minutes for a 15% reduction, with temperature followed by a lead bath at 450°C and 480°C respectively. Tensile tests were also carried out to obtain data regarding the resistance limit, yield stress, deformation and toughness of the material as received and after the thermomechanical sequences. To conclude the experiments, a metallographic analysis of the microstructure of the material was carried out, cutting it, polishing it and applying a chemical attack for visualization in an optical microscope. The results found an increase in the resistance limit and yield stress of the AHSS DP 800 steel in routes 01 and 02 and a percentage reduction in deformation. As for toughness, the only route in which this property had an increase was 02. In routes 03 and 04, the same properties had a reduction in relation to the material as received. With the experiments carried out, the thermomechanical route 02, which was performed only with tempering, represented a great way to obtain an improvement in the tenacity of the AHSS DP800 steel, as well as in other properties, increasing the possibility of the material supporting muscles larger than that of flow.

Keywords: AHSS DP800 Steel; Toughness; Thermomechanical sequences.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama de transformação para recozimento pleno.....	14
Figura 2: diagrama de equilíbrio Fe-C.....	15
Figura 3: diagrama TTT para uma liga Fe-C eutetóide. ....	15
Figura 4: guilhotina mecânica. ....	16
Figura 5: dimensões da peça cortada na guilhotina.....	16
Figura 6: chapas retangulares após o corte na guilhotina. ....	17
Figura 7: guilhotina mecânica com a chapa posicionada.....	17
Figura 8: dimensões do corpo de prova.....	17
Figura 9: fresadora utilizada.....	18
Figura 10: corpos de prova fabricados.....	18
Figura 11: fresadora do laboratório de fresagem do IFPE Campus Recife. ....	19
Figura 12: forno tipo mufla utilizado na UFPE. ....	20
Figura 13: corpo de prova após laminação.....	20
Figura 14: máquina utilizada para o ensaio de tração.....	21
Figura 15: pressurizador utilizado para embutimento à quente.....	22
Figura 16: amostra embutida e polida. ....	22
Figura 17: microscópio óptico utilizado. ....	23
Figura 18: gráfico tensão [MPa] x deformação específica (Como recebido).....	24
Figura 19: gráfico tensão [MPa] x Deformação específica (Rota 1). ....	25
Figura 20: gráfico tensão [Mpa] x deformação específica (Rota 2). ....	25
Figura 21: gráfico tensão [MPa] x deformação específica (Rota 3).....	26
Figura 22: gráfico tensão [MPa] x deformação específica (Rota 4).....	26
Figura 23: micrografia do material como recebido (1000x). ....	28
Figura 24: microestrutura do aço AHSS DP800 como recebido.....	29
Figura 25: microestrutura do material como recebido.....	29
Figura 26: microestrutura em MEV do aço AHSS DP800 após rota termomecânica à 450°C.....	30
Figura 27: microestrutura em MEV do aço AHSS DP800 após rota termomecânica à 480°C.....	31

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: cronograma do TCC.....</b>	<b>24</b>
<b>Tabela 2: média dos valores obtidos.....</b>	<b>28</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa/Motivação	11
1.2 Objetivo	12
1.3 Objetivos específicos	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1 Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS)	13
2.2 Aços Bifásicos (Dual Phase)	13
2.3 Tenacidade	14
2.4 Características Microestruturais	14
2.5 Tratamentos Térmicos	14
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
3.1 Corte do material	17
3.2 Fabricação dos corpos de prova	18
3.3 Sequências termomecânicas	20
3.4 Ensaio de tração	21
3.5 Microscopia óptica	22
3.6 Cronograma	24
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>25</b>
4.1 Resultados do ensaio de tração do material como recebido e tratado termicamente	25
4.2 Análise microestrutural do aço AHSS DP800 como recebido	29
4.3 Análise microestrutural das rotas termomecânicas	31
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>33</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Há diversos fatores que influenciam a escolha de materiais para serem aplicados na indústria automotiva, dentre eles estão: a segurança, eficiência do combustível do veículo, o ambientalismo, a manufaturabilidade, a durabilidade e a qualidade (TAMARELLI, 1999 apud SILVA, 2019). Outra questão importante quando se trata da indústria automotiva é o custo para selecionar os materiais, o qual se torna menor ao diminuir o peso dos veículos, e para isso, as montadoras aprofundam suas pesquisas, o que maximiza a eficiência da seleção de novos materiais (SILVA, 2019).

Os aços do tipo AHSS (Advanced High-Strength Steels) estão sempre em desenvolvimento pelos grandes fabricantes mundiais através de parcerias com as indústrias automotivas de todo o mundo (SILVA, 2019). O impulsionador para esse desenvolvimento tem sido a redução da massa do veículo e do combustível, junto com o aumento da segurança das carrocerias dos automóveis fabricados (SILVA, 2019). O nordeste brasileiro apresenta dois grandes fabricantes de automóveis: a FIAT e a FORD, nelas é muito comum o uso de alguns dos aços AHSS justamente por apresentarem as características informadas anteriormente (SILVA, 2019). A principal característica desse tipo de material é encontrada nas suas microestruturas multifásicas, contendo ferrita e diferentes divisões volumétricas de martensita, bainita e austenita retida em quantidades suficientes para produzir propriedades mecânicas únicas (ANGELI; FUREDER; KNEISS, 2006; KUZIAK; KAWALLA; WAENGLER, 2008 apud FARIA NETO; FUKUGAUCHI; PEREIRA, 2019).

A primeira geração de aços do tipo AHSS apresenta aços assistidos por efeito TRIP, DP, CP e martensíticos (BHAT, 2008 apud FARIA NETO; FUKUGAUCHI; PEREIRA, 2019). Os materiais citados apresentam combinações de liga e de processamento para formar combinações microestruturais, as quais são resultados de ciclos de tratamentos térmicos (FARIA NETO; FUKUGAUCHI; PEREIRA, 2019).

### 1.1 Justificativa/Motivação

O trabalho realizado se justifica e é motivado pela grande presença desses aços na indústria automotiva, visto que são um tipo de material que confere uma redução no peso do veículo e aumento da segurança, sendo vantajoso economicamente e de grande qualidade simultaneamente. Com isso, neste trabalho foi analisada uma propriedade que

indica a absorção de energia e resistência do material quando ele é submetido a uma força de tração que pode levar à sua consequente deformação ou ruptura, a tenacidade. A fim de avaliar essa propriedade do aço AHSS DP800 de primeira geração, juntamente com o Grupo de Materiais Aplicados e Simulação Computacional (GMA&SC), serão realizadas sequências termomecânicas para utilização em corpos de prova e sua influência na tenacidade do material estudado e a análise de microestruturas obtidas por Microscopia Óptica (MO), contribuindo assim para a melhoria das propriedades e utilização de aços de grande custo-benefício na indústria automotiva.

## **1.2 Objetivo**

O Objetivo geral deste trabalho é avaliar a tenacidade do aço AHSS DP800 de primeira geração, de grande aplicação na indústria automotiva, submetido a diferentes sequências termomecânicas.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Desenvolver sequências termomecânicas para utilização em corpos de prova do aço AHSS DP800 de primeira geração;
- Analisar, por Microscopia Óptica (MO), as microestruturas obtidas;
- Avaliar a influência das sequências termomecânicas na tenacidade do material estudado.
- Avaliar a influência das rotas térmicas no limite de resistência, tensão de escoamento e deformação do aço AHSS DP800.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS)

Com o surgimento de novas tecnologias, tais como a fundição contínua e o processamento termomecânico, deu-se início a grandes avanços no ramo dos aços, dando origem aos avançados de alta resistência (AHSS) (M.Y. DEMERI, 2013; SILVA, 2021). Eles são multifásicos, sendo assim constituídos por ilhas duras de martensita, bainita e austenita residual espalhadas em uma matriz de ferrita dúctil de forma a produzir a diversidade de propriedades mecânicas desejadas (SILVA, 2021).

Essa classificação de aços compreende os seguintes tipos: dupla fase (DP), ferrítico-bainítico (FB), fase complexa (CP), martensítico (MS), plasticidade induzida pela transformação (TRIP), conformado a quente (HF) e transformação induzida por maclação (TWIP) (SILVA, 2019). Além desses fatores, são compostos quimicamente por C, Mn, Si, os quais dependendo das propriedades mecânicas e microestruturas exigidas, podem ser microligados ao Cr, Mo, V, Ni, Al, B, Nb ou Ti (SKRIKANT, 2015; SILVA, 2021).

Desses elementos citados, o nióbio tem função importante no refino de grãos e o manganês na garantia da estabilidade da austenita à temperatura ambiente (SILVA, 2019). Já os restantes funcionam como endurecedores em solução sólida (HEISTERKAMP, CARNEIRO, 2015; SILVA 2021).

### 2.2 Aços Bifásicos (Dual Phase)

Os aços denominados bifásicos são geralmente chamados de DPX, em que X indica o mínimo valor de resistência à tração do material (FARIA NETO, 2015). Na engenharia dos materiais, são constituídos principalmente por ferrita poligonal e martensita (FARIA NETO, 2015). Logo, um aço composto por ferrita e bainita, por exemplo, é um aço com duas fases, porém não se pode classificá-lo como bifásico (FARIA NETO, 2015).

Esse tipo de aço apresenta baixo teor de carbono e de liga, possuindo como principais elementos o manganês, silício e cromo (FARIA NETO, 2015). A pequena presença de carbono e o silício aceleram a formação de ferrita, ao mesmo tempo que o manganês e o cromo retardam a transformação da austenita em perlita para transformar-se em martensita durante o processo de resfriamento (FARIA NETO, 2015).

## 2.3 Tenacidade

A tenacidade é definida como a capacidade de um material absorver energia até sua fratura. Isso representa também a possibilidade de suportar tensões maiores que a tensão de escoamento, a partir da qual a deformação plástica é iniciada. Além disso, de forma gráfica, essa propriedade é definida como a área da curva tensão x deformação específica (CALLISTER, 2022).

## 2.4 Características Microestruturais

A microestrutura do aço bifásico é principalmente formada por ferrita e martensita, porém sabe-se que em função da composição química do aço e dos tipos de tratamentos térmicos, a microestrutura final poderá ser mais complexa, composta por ferrita, martensita, bainita, austenita retida e diversos tipos de agregados de ferrita e carbonetos (SUN, PUNGH, 2002; SILVA, 2021). Logo, as propriedades mecânicas do aço dual phase serão influenciadas pelas características das fases presentes e da forma como elas interagem (SUN, PUNGH, 2002; SILVA, 2021).

A consequência da transformação completa da martensita é o aumento da resistência acima de 1500 MPa e da dureza em torno de 450 HV após temperado em água, e o aumento da temperatura inicial da martensita pode estar ligado a deformação uniaxial em altas temperaturas (SILVA, 2021).

## 2.5 Tratamentos Térmicos

O diagrama de fases Fe-Cementita, TTT e de resfriamento contínuo são utilizados para a pesquisa das transformações de fases nos aços (FARIA NETO, 2015). Para situações que apresentam mais tecnologia, o aço dificilmente é aplicado com sua microestrutura mais estável por conta da necessidade de propriedades mais específicas ou a união de propriedades de fases (FARIA NETO, 2015). Dentre os vários tipos de tratamentos térmicos, os mais comuns são:

- Reozimento;
- Normalização;
- Têmpera;

- Revenimento.

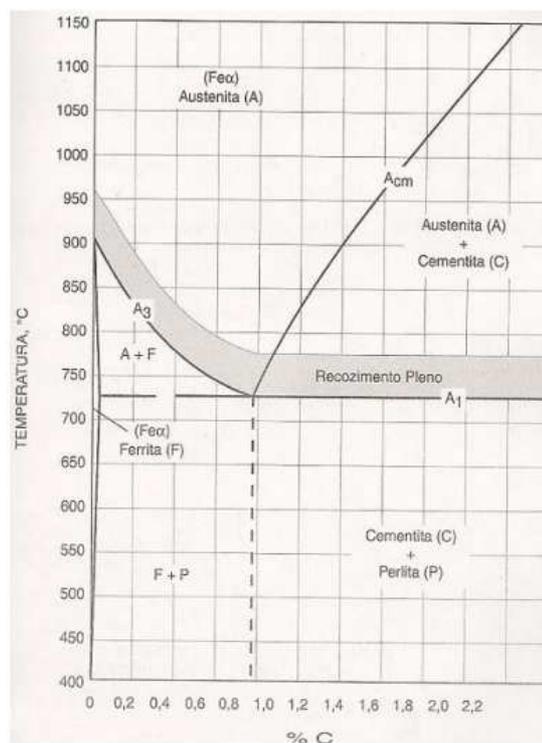
As figuras 1, 2 e 3 abaixo mostram alguns diagramas relacionados ao recozimento pleno, equilíbrio Fe-C e o diagrama TTT respectivamente.

**Figura 1: diagrama de transformação para recozimento pleno.**



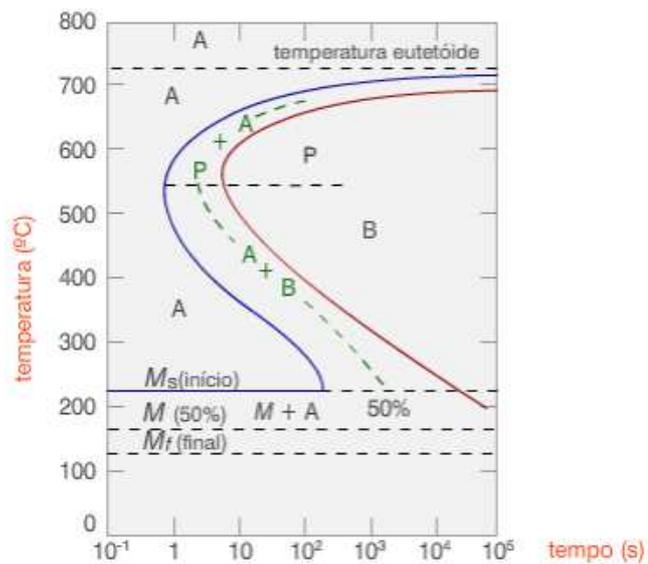
Fonte: (FARIA NETO, 2015; CHIAVERINI, 1996).

**Figura 2: diagrama de equilíbrio Fe-C.**



Fonte: (FARIA NETO, 2015; CHIAVERINI, 1996).

Figura 3: diagrama TTT para uma liga Fe-C eutetóide.



Fonte: (FARIA NETO, 2015; CARDOSO et al, 2014).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Corte do material

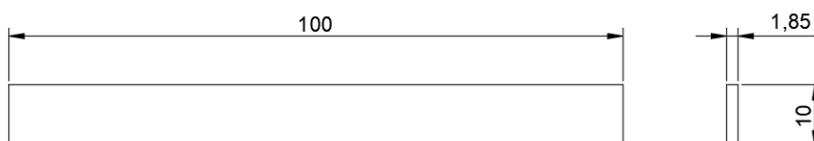
O primeiro passo para o estudo foi o corte de chapas finas de aço AHSS DP800 (Dual Phase), cujo material foi fornecido pela indústria automotiva da Jeep de Goiana – PE. Essas chapas apresentaram as seguintes dimensões: 100 x 10 x 1,85 mm. O mecanismo de corte foi feito em uma guilhotina mecânica num dos laboratórios do IFPE Campus Recife. As figuras 4, 5, 6 e 7 abaixo ilustram o experimento realizado:

**Figura 4: guilhotina mecânica.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 5: dimensões da peça cortada na guilhotina.**



Fonte: O autor, 2022.

**Figura 6: chapas retangulares após o corte na guilhotina.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 7: guilhotina mecânica com a chapa posicionada.**

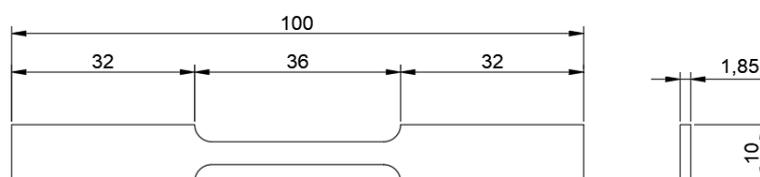


Fonte: o autor, 2022.

### 3.2 Fabricação dos corpos de prova

Após o corte do material, foi feita a fabricação dos corpos de prova em uma fresadora no laboratório de tornearia do IFPE Campus Recife para posterior realização das sequências termomecânicas do material. As figuras 8, 9, 10 e 11 representam os corpos de prova fabricados e suas dimensões:

**Figura 8: dimensões do corpo de prova.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 9: fresadora utilizada.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 10: corpos de prova fabricados.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 11: fresadora do laboratório de fresagem do IFPE Campus Recife.**



Fonte: o autor, 2022.

### **3.3 Sequências termomecânicas**

Com a fabricação dos corpos de prova concluída, foram realizadas 4 rotas termomecânicas. Para a realização desse experimento foram utilizados dois fornos tipo mufla e um laminador num laboratório da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Na primeira rota foi feito um tratamento por têmpera onde o material sofreu um austenitização a 920°C durante 15 minutos, após isso ele foi laminado com uma redução de sua seção transversal de 15% e resfriado rapidamente com água à temperatura ambiente. Na segunda rota, foi feito o mesmo processo, porém o material foi aquecido durante 20 minutos e obteve uma laminação de 10% de redução. Na terceira rota, foi feita uma austenitização à 920 °C, durante 15 minutos, seguida de uma deformação de 15% na seção transversal do corpo de prova e a realização de uma têmpera acompanhada de um banho de chumbo à temperatura de 450°C. E na última rota, o mesmo processo, porém com uma têmpera seguida de um banho de chumbo à temperatura de 480°C. As figuras 12, 13 mostram o corpo de prova sendo encaminhado ao forno tipo mufla para austenitização seguido do processo de laminação respectivamente:

**Figura 12: forno tipo mufla utilizado na UFPE.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 13: corpo de prova após laminação.**



Fonte: o autor, 2022.

### **3.4 Ensaio de tração**

Com os tratamentos térmicos concluídos, foi feito o ensaio de tração para os 3 corpos de prova como recebido e os das 4 rotas termomecânicas realizadas. Esse experimento foi feito com o objetivo de analisar a relação tensão x deformação específica das amostras, resultando assim na análise das propriedades de limite de escoamento, limite

de resistência, deformação e tenacidade. A figura 14 abaixo mostra a máquina para ensaio de tração utilizada:

**Figura 14: máquina utilizada para o ensaio de tração.**



Fonte: o autor, 2022.

### **3.5 Microscopia óptica**

A fim de se analisar os corpos de prova através da microscopia óptica, primeiramente foi realizado um preparo metalográfico em que as amostras foram cortadas em pequenos quadrados para realizar o embutimento à quente em um pressurizador. Terminado esse processo, foi feito o lixamento da mesma utilizando lixas d'água 220, 320, 400 e 600, o polimento das amostras numa politriz a base de alumina e logo em seguida o ataque químico com uma solução de nital 2% para posterior análise microestrutural no microscópio óptico. As figuras 15, 16 e 17 retratam o processo de embutimento, a peça resultante e o microscópio óptico utilizado respectivamente:

**Figura 15: pressurizador utilizado para embutimento à quente.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 16: amostra embutida e polida.**



Fonte: o autor, 2022.

**Figura 17: microscópio óptico utilizado.**



Fonte: o autor, 2022.

### 3.6 Cronograma

**Tabela 1: cronograma do TCC.**

PERÍODO	2022						
	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	X	X					
INTRODUÇÃO		X					
METODOLOGIA			X				
COLETA DE RESULTADOS				X	X		
RESULTADOS				X	X		
CONCLUSÃO					X		
REFERÊNCIAS					X		
ENTREGA VERSÃO FINAL						X	
APRESENTAÇÃO DO TCC							X

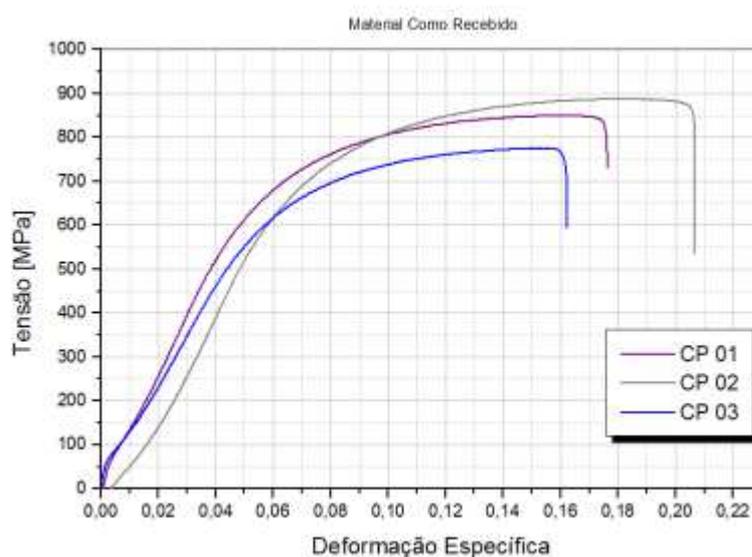
Fonte: o autor, 2022.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

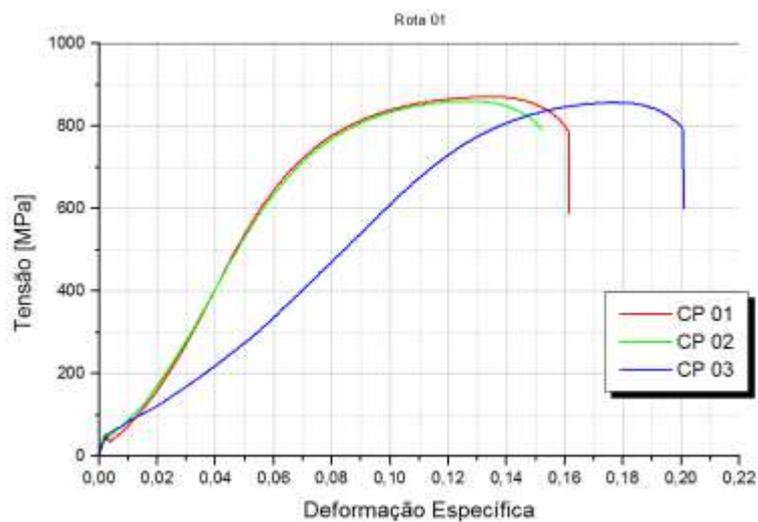
### 4.1 Resultados do ensaio de tração do material como recebido e tratado termicamente

Com os ensaios de tração concluídos, foram obtidos, através de um software gráfico para análise de dados e estatística chamado “Origin”, os seguintes diagramas de tensão x deformação específica do material como recebido, das rotas 1, 2, 3 e 4 assim como mostram as figuras 18, 19, 20, 21 e 22 respectivamente:

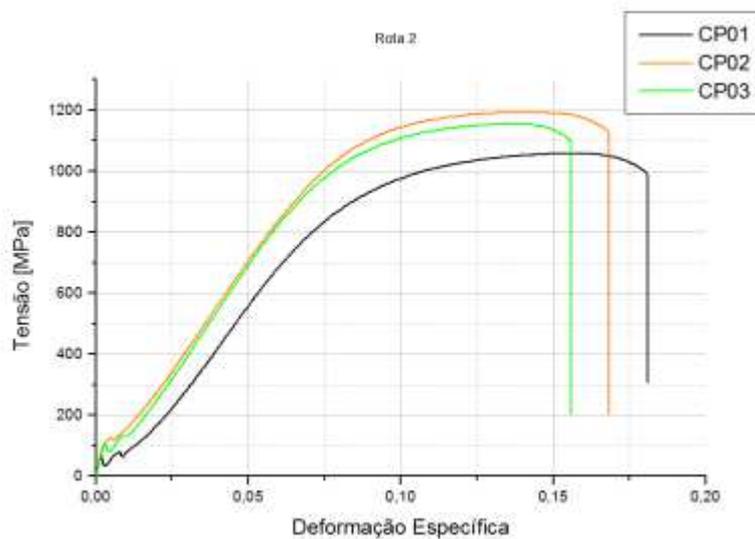
**Figura 18: gráfico tensão [MPa] x deformação específica (Como recebido)**



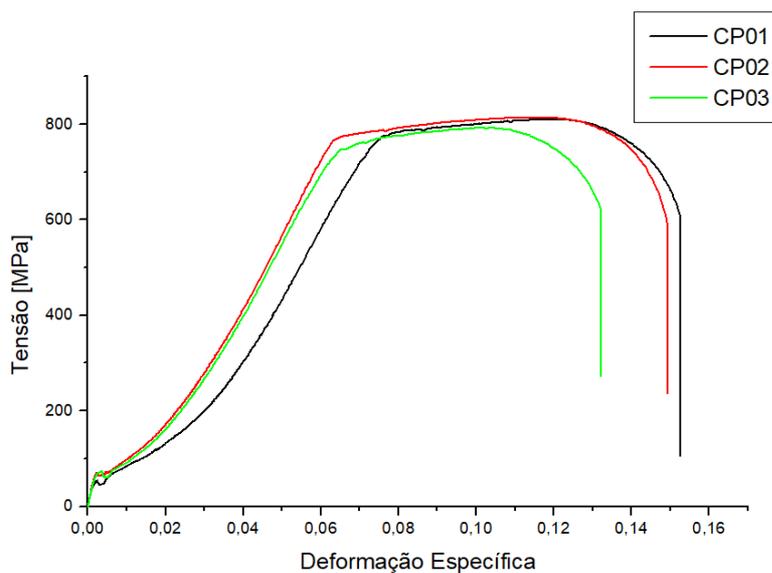
Fonte: o autor, 2022.

**Figura 19: gráfico tensão [MPa] x Deformação específica (Rota 1).**

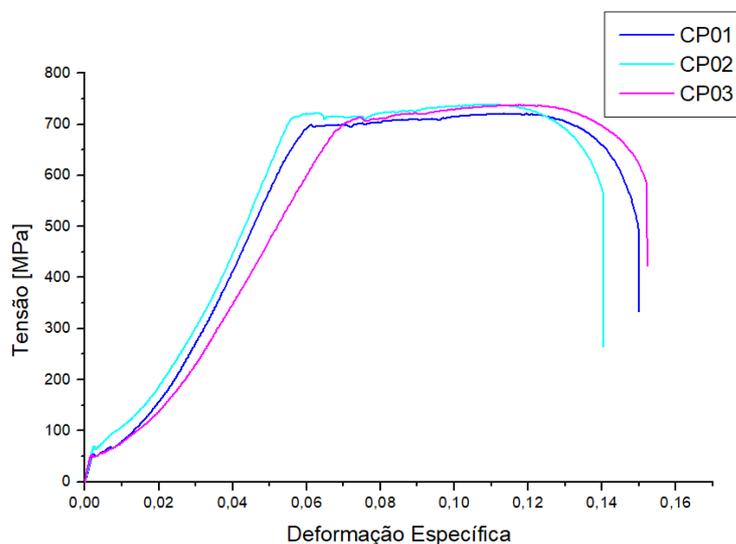
Fonte: o autor, 2022.

**Figura 20: gráfico tensão [MPa] x deformação específica (Rota 2).**

Fonte: o autor, 2022.

**Figura 21: gráfico tensão [MPa] x deformação específica (Rota 3)**

Fonte: o autor, 2022.

**Figura 22: gráfico tensão [MPa] x deformação específica (Rota 4)**

Fonte: o autor, 2022.

A partir dos dados obtidos nos ensaios de tração, foi feita uma média dos valores correspondentes ao limite de resistência, à deformação, à tensão de escoamento e à tenacidade do aço AHSS dp800 para a condição de como recebido e as rotas termomecânicas correspondentes, como mostra a tabela 2:

**Tabela 2: média dos valores obtidos.**

CONDIÇÃO	LIMITE DE RESIST.	TENSÃO DE ESCOAMENTO	DEFORMAÇÃO	TENACIDADE
COMO REC.	837,67 MPa	594,18 MPa	18,2%	118,77 J/m <sup>3</sup>
ROTA 01	863,35 MPa	814,02 MPa	17,2%	101,04 J/m <sup>3</sup>
ROTA 02	1135,19 Mpa	815,42 MPa	16,8%	137,51 J/m <sup>3</sup>
ROTA 03	805,97 Mpa	760,44 MPa	14,3%	82,58 J/m <sup>3</sup>
ROTA 04	759,28 Mpa	723,58 MPa	14,8%	81,95 J/m <sup>3</sup>

Fonte: o autor, 2022.

Analisando-se os dados da tabela acima, percebe-se que a rota 02 (austenitização à 920°C durante 20 minutos, redução de 10% e têmpera), em relação ao limite de resistência, foi a que apresentou o maior resultado com o valor de 1135,19 MPa. Comparando com o padrão adotado pelo fabricante SSAB (800 a 950 MPa), o número obtido foi além. E a rota 04 (austenitização à 920°C durante 15 minutos, redução de 15%, têmpera seguida de banho de chumbo à 480°C) obteve o menor resultado com o valor médio de 759,28 MPa, sendo inferior ao intervalo da norma adotada. Assim, comparando-se os dois números, pode-se dizer que a rota 02, que sofreu apenas têmpera, teve um bom aumento no limite de resistência do DP800 se associada ao padrão do SSAB e à rota 04, a qual recebeu um banho de chumbo após o resfriamento rápido da amostra.

Em relação à tensão de escoamento, a rota 02 também apresentou o maior resultado com o valor médio de 815,42 MPa e a rota 04 o menor com o valor de 723,58 MPa. Com isso, ambos os números superaram o limite de escoamento do padrão adotado pelo fabricante SSAB de 500 a 650 MPa.

Associando os resultados referentes à deformação, o material obteve uma redução em sua na mesma após ser submetido às rotas termomecânicas. Isso pode ser observado com o resultado obtido no material como recebido, que apresentou uma deformação média de 18,2% enquanto que as rotas termomecânicas obtiveram valores menores, destacando-se a rota 03 (austenitização à 920°C durante 15 minutos, redução de 15%, têmpera seguida de banho de chumbo à 480°C), a qual apresentou o menor valor com um percentual de 14,3%.

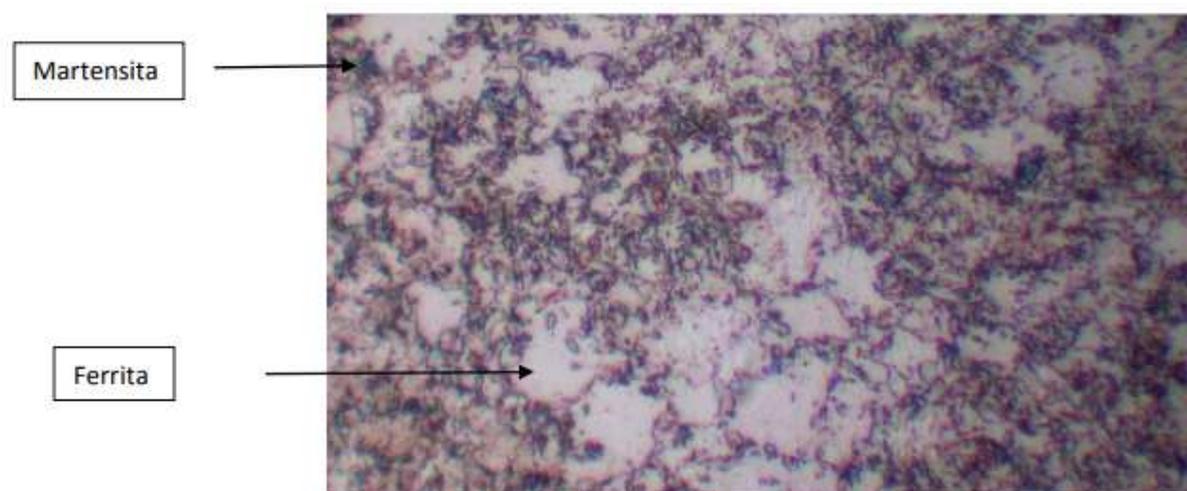
E para a condição de tenacidade, a rota 02 foi a única que apresentou um aumento em relação ao material como recebido com um valor médio de 137,51 J/m<sup>3</sup>. Já as outras rotas obtiveram uma redução em seus valores médios de tenacidade, onde a rota 04 apresentou o menor resultado (81,95 J/m<sup>3</sup>). Os valores para essa propriedade foram calculados através da área da curva tensão x deformação específica, a qual foi obtida para cada corpo de prova com a utilização do software "Origin".

## 4.2 Análise microestrutural do aço AHSS DP800 como recebido

De acordo com Faria Neto (2015), apesar do aço AHSS ser formado por estrutura ferrítica – martensítica, na estrutura mais escura também pode estar presente austenita retida e bainita, porém a quantidade dessas duas fases chega a ser inferior a 1 por cento, sendo predominantes as fases ferrítica e martensítica.

Através da realização do procedimento metalográfico foi possível observar, por microscopia óptica, as microestruturas presentes no material como recebido, como mostra a figura 23:

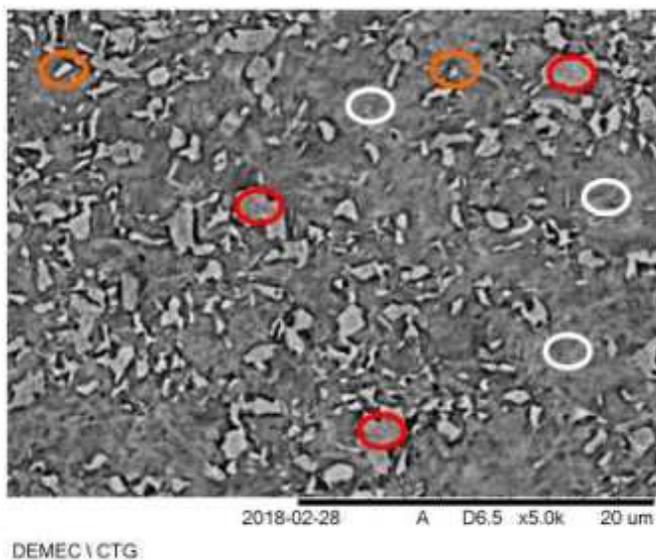
**Figura 23: micrografia do material como recebido (1000x).**



Fonte: o autor, 2022.

Observando a micrografia acima, pode-se perceber que as áreas mais escuras correspondem à fase martensítica e as áreas mais claras correspondem à fase ferrítica. No trabalho de Silva (2019), era esperado que a microestrutura do aço AHSS DP800 como recebido fosse composta basicamente de martensita e ferrita, porém, o material apresentou 3 fases: bainita (branco), austenita retida (laranja) e ferrita (vermelho), como mostra a figura 24:

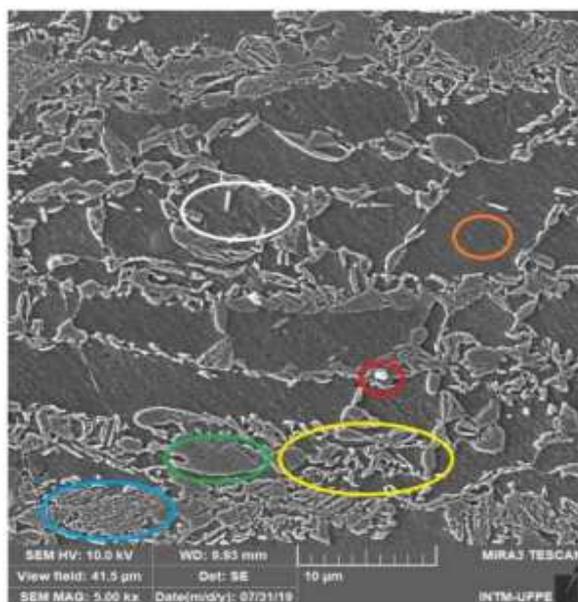
**Figura 24: microestrutura do aço AHSS DP800 como recebido.**



Fonte: Silva, 2019.

Já Silva (2021), em seu trabalho, analisou que a microestrutura do material como recebido apresentou uma mistura das fases martensita (azul), constituinte M-A (vermelho), austenita retida (verde), perlita (branco), bainita (amarelo) e a fase ferrítica (laranja), como mostra a figura 25:

**Figura 25: microestrutura do material como recebido.**



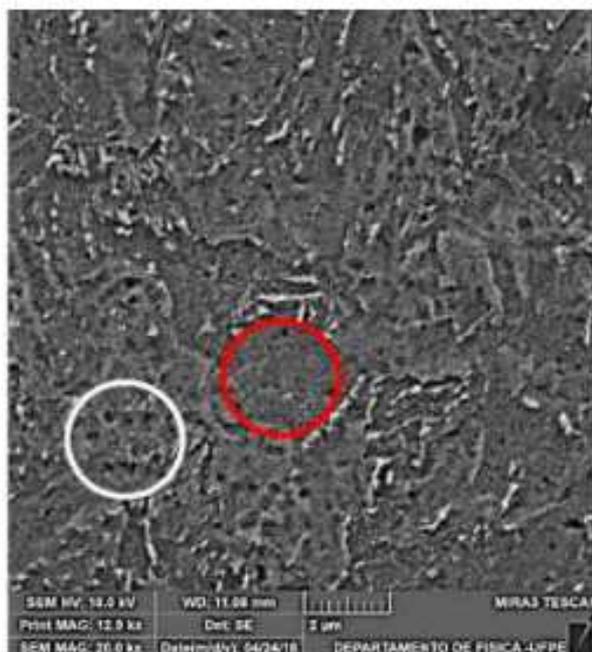
Fonte: Silva, 2021.

Na análise de Faria Neto (2015), foram feitas as micrografias dos aços DP600 e DP780. No DP600 observou-se a presença de grãos maiores de ferrita, e que a fase predominante é a mais clara, a qual é ferrítica. Já o aço DP780 apresentou uma microestrutura contendo uma maior fração de martensita, que é a fase mais escura.

#### 4.3 Análise microestrutural das rotas termomecânicas

No trabalho de Silva (2019), foi analisada uma micrografia em MEV de uma amostra austenitizada à 450 °C durante 20 minutos, laminada a quente com redução de 10% e decomposição isotérmica a 450 °C em banho de chumbo por 15 minutos, concluindo assim que a estrutura predominante era a ferrita (vermelho) e que também havia presença de bainita (branco), como mostra a figura 26:

**Figura 26: microestrutura em MEV do aço AHSS DP800 após rota termomecânica à 450°C.**

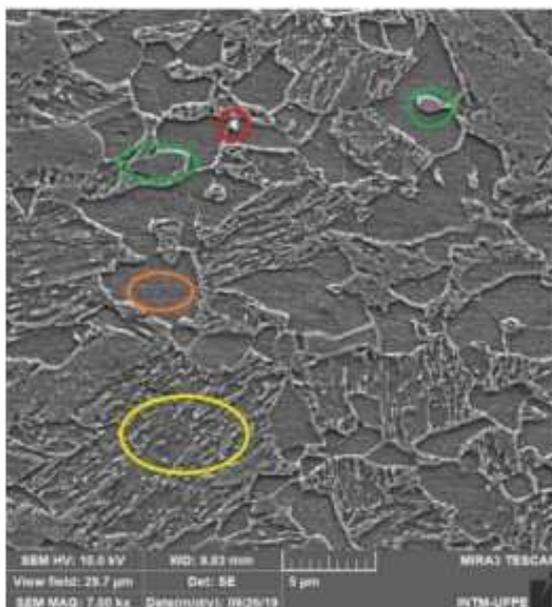


Fonte: Silva, 2019.

Silva (2021), em seu trabalho, obteve uma micrografia de uma sequência austenitizada à 480°C durante 20 minutos, laminada à quente com redução de 10%, temperada e em seguida reaquecida com banho de chumbo numa temperatura de 480°C por 30 minutos, concluindo então que as microestruturas apresentadas foram ferrita mais

bainita (laranja), bainita (amarelo), constituinte M-A (vermelho) e austenita retida (verde), como mostra a figura 27:

**Figura 27: microestrutura em MEV do aço AHSS DP800 após rota termomecânica à 480°C.**



Fonte: Silva, 2021.

No trabalho de Silva (2019), em sua sequência térmica L (600-15), do corpo de prova austenitizado durante 20 minutos, laminado a quente com redução de 10% e decomposição isotérmica a 600°C em banho de chumbo por 15 minutos, foi analisado, após feita uma micrografia por MEV, que a quantidade de ferrita presente foi menor. Isso se justifica pelo fato da solução sólida resultante do resfriamento, após realização da laminação, ter uma temperatura maior e um tempo menor para decomposição isotérmica no domínio ferrítico-bainítico.

## 5 CONCLUSÃO

Portanto, diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que as rotas termomecânicas que sofreram apenas têmpera após redução de sua seção transversal, foram as que obtiveram aumento nas propriedades de limite de resistência e tensão de escoamento do aço AHSS DP800. Já em relação à tenacidade, apenas a rota 02, nas condições de austenitização à 920°C durante 20 minutos, redução de 10% e têmpera, apresentou um aumento na tenacidade em relação ao material como recebido. Essas rotas apresentaram em sua microestrutura uma maior concentração de martensita após o resfriamento rápido em água na temperatura ambiente.

Já as rotas que passaram por banho de chumbo após o processo de têmpera, apresentaram diminuição nas propriedades de limite de resistência, tensão de escoamento e tenacidade do aço AHSS DP800. Essas sequências termomecânicas concentram em sua microestrutura uma maior presença de ferrita e também bainita.

Para a propriedade de deformação, as amostras do aço após passarem pelos tratamentos térmicos apresentaram uma diminuição da mesma em relação ao material como recebido.

Em relação às microestruturas, de forma geral, através da microscopia óptica, concluiu-se que para o aço AHSS DP800, as microestruturas predominantes são de ferrita e martensita no material como recebido. Já para as amostras que passaram por rotas termomecânicas, foram analisados os trabalhos de Silva (2019) e Silva (2021) para sequências termomecânicas com 10% de redução e banho de chumbo, e nas duas estiveram presentes predominantemente as microestruturas de ferrita e bainita.

## 6 REFERÊNCIAS

ANGELI, J.; FÜREDER, E; KNEISS, A. C. Etching Techniques for Characterizing the Phases of Low-Alloy Dual-Phase and TRIP Steels. *Prakt. Metallogr, München*, v.43, n.4, p.127-142, fev.2006.

CALLISTER, William. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Ramsey: Ltc, 2002. 592 p.

DEMERI, Mahmoud Y. *Advanced high-strength steels: science, technology, and applications*. ASM international, 2013.

FARIA NETO, Antonio dos Reis de; FUKUGAUCHI, Cristina Sayuri; PEREIRA, Marcelo dos Santos. *Indústria automotiva: aço avançados de alta resistência – Revisão*. Sinergia, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 25-33, 17 jul. 2019.

FARIA NETO, Antonio 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) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá - Sp, 2015.

FUKUGAUCHI, C. S. *Metodologia para Caracterização Metalográfica de um Aço TRIP por Microscopia Óptica*. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Materiais) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

HEISTERKAMP, FRIEDRICH; CARNEIRO, TADEU. *Niobium: Future possibilities technology and the market place*. Düsseldorf, Germany, 13 jul. 2015. Disponível em:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.197.7960&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 12 mar. 2019.

SILVA, Éverton Fernandes da. *Estudo da Influência das sequências termomecânicas nas propriedades mecânicas do aço DP 800*. 2021. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de 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) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SUN, Shoujin; PUGH, Martin. *Properties of thermomechanically processed dualphase steels containing fibrous martensite*. *Materials Science and Engineering: A*, v. 335, n. 1-2, p. 298-308, 2002.

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