

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO OURO PRETO – MINAS GERAIS – BRASIL



GABRIEL LANÇA GALDINO DA ROCHA

"EFEITO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA E DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO DE TRAÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS GROSSAS DE UM AÇO API 5L X65 COM ESPESSURA DE 10,14 mm"

MONOGRAFIA APRESENTADA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Ouro Preto – MG Junho de 2022

GABRIEL LANÇA GALDINO DA ROCHA

"EFEITO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA E DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO DE TRAÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS GROSSAS DE UM AÇO API 5L X65 COM ESPESSURA DE 10,14 mm"

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria Co-Orientador: Eng. Msc. Hideo Sakaibori

Ouro Preto – MG Junho de 2022 SEI/UFOP - 0348711 - Folha de aprovação do TCC



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Lança Galdino da Rocha

Efeito do processo de preparação de corpos de prova e das condições de ensaio de tração sobre as propriedades mecânicas de chapas grossas de um aço API 5L X65 com espessura de 10,14mm

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 22 de junho de 2022

Membros da banca

DSc. Geraldo Lúcio de Faria - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto) Dsc. Leonardo Barbosa Godefroid - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto) Eng. MSc. Charles Henrique Xavier Morais Magalhães - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto)

Geraldo Lúcio de Faria, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/07/2022



Documento assinado eletronicamente por Geraldo Lucio de Faria, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 18/07/2022, às 14:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php? acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0348711** e o código CRC **EED9D73A**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008131/2022-46

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000 Telefone: 3135591561 - www.ufop.br SEI nº 0348711

RESUMO

No Brasil, as grandes empresas fabricantes de aços estão diversificando suas produções para as mais diversas aplicações, desde aços voltados para a sustentação de grandes estruturas (pontes e prédios) até para peças do setor automotivo. No decorrer dos últimos anos, devido à grande demanda do setor petrolífero, o financiamento e fornecimento dos aços da classe API vêm aumentando e resultando em grandes projetos por todo território nacional. Para o desenvolvimento desses produtos, tem-se percebido ainda mais a importância de se manter um processo controlado. Isso se deve ao nível de criticidade da aplicação e às faixas de propriedades mecânicas restritas exigidas pelos clientes e pelas normas. A partir de um histórico de processamento industrial de aços API, observaram-se grandes variações, no limite de escoamento e na relação elástica, medidos por tração, em chapas grossas de um aço do tipo API 5L X65, comprometendo sua aprovação para o mercado. Nesse contexto e, sabendo que as condições de ensaio de tração podem exercer significativa influência sobre as propriedades em questão, o presente estudo avaliou o efeito de algumas variáveis do processo de preparação dos corpos de provas e de condições de ensaio de tração sobre os valores das referidas propriedades mecânicas medidas em tração em chapas grossas com 10,14mm de espessura, de um aço API 5L X65. A partir dos resultados, confirmou-se a influência dos fatores sobre as propriedades mecânicas de tração. Mostrou-se uma diferença média de 10 MPa nos valores de limite de escoamento entre os tipos de máquina de ensaio universal e entre os diferentes métodos de corte avaliados. Com relação ao fator velocidade, observou-se uma menor influência sobre os resultados, apresentando diferença média sobre as propriedades mecânicas de tração abaixo de 5 MPa. Essas diferenças quando avaliado os fatores separadamente não apresentam grandes inferências, mas correlacionando-os foi possível visualizar os 50 MPa de variação nos valores de limite de escoamento. Sobre as análises complementares, o material analisado não apresentou diferenças microestruturais significativas com relação ao tamanho de grão e foi evidenciado diferentes valores de dureza na superfície comparando os diferentes métodos de corte. Por fim, foi possível definir a partir das análises que a condição 6 (máquina eletromecânica, velocidade de 4,2 mm/min e corte sem resfriamento) de preparação dos corpos de provas e ensaio apresentando menor dispersão de resultados.

Palavras-chave: Aço API, ensaio de tração, limite de escoamento, escoamento descontínuo, relação elástica, velocidade de ensaio.

ABSTRACT

Brazil, large steel manufacturing companies are diversifying their production for the most diverse applications, from steel aimed at supporting large structures (bridges and buildings) to parts for the automotive sector. Over the last few years, due to the great demand from the oil sector, the financing and supply of API class steels have been increasing and resulting in large projects throughout the national territory. For the development of these products, the importance of maintaining a controlled process has become even more important. This is due to the criticality of the application and the restricted mechanical property ranges required by customers and standards. From a history of industrial processing of API steels, large variations were observed, in the yield strength and in the elastic relation, measured by traction, in thick plates of a steel type API 5L X65, compromising its approval for the market. In this context, and knowing that the tensile test conditions can exert a significant influence on the properties in question, the present study evaluated the effect of some variables of the test specimen preparation process and of tensile test conditions on the values of the mechanical properties measured in tension in thick plates with 10.14 mm of thickness, of an API 5L X65 steel. From the results, the influence of the factors on the tensile mechanical properties was confirmed. An average difference of 10 MPa in yield point values was shown between the types of universal testing machine and between the different cutting methods evaluated. Regarding the speed factor, there was a lesser influence on the results, with an average difference on the tensile mechanical properties below 5MPa. These differences, when the factors were evaluated separately, do not present great inferences, but by correlating them, it was possible to visualize the 50 MPa of variation in the yield strength values. On the complementary analyses, the analyzed material did not present significant microstructural differences in relation to grain size and different surface hardness values were evidenced comparing the different cutting methods. Finally, it was possible to define from the analysis that condition 6 (electromechanical machine, speed of 4.2 mm/min and cutting without cooling) of preparation of specimens and test presented less dispersion of results.

Keywords: API steel, tensile test, yield strength, yield point, elastic relation, strain rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Exemplo de uma curva tensão x deformação indicando os limites							
	superior e inferior de							
	escoamento	14						
Figura 2:	Desenho esquemático de uma chapa com a posição de retirada das							
	amostras	17						
Figura 3:	Fluxograma do processo de testes e amostragem apresentando as							
	etapas de preparação e ensaios de tração referentes ao projeto de							
	experimento	18						
Figura 4:	Máquina de corte a gás ESAB, utilizada para a retirada dos blanks.	20						
Figura 5:	Operação manual de resfriamento por água durante o processo de							
	oxicorte em amostras de chapas grossas	20						
Figura 6:	Croqui das amostras em que os blanks de tração foram							
	amostrados	21						
Figura 7:	Croqui apresentando o dimensional dos corpos de prova de tração							
	fabricados pelo processo de usinagem	21						
Figura 8:	Ilustração gráfica contendo os pontos definidos para avaliação do							
	perfil da curva tensão versus deformação na região de transição							
	elástica para plástica	22						
Figura 9:	Croqui de corte dos blanks referente aos ensaios complementares							
	de perfis de dureza e TGF	26						
Figura 10:	Ilustração esquemática da retirada dos corpos de prova e da							
	avaliação de dureza Vickers	28						
Figura 11:	Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) $\frac{1}{4}$ e b) $\frac{1}{2}$							
	da espessura com ampliação original de 500X da amostra I0261194							
	(corte com resfriamento).	29						
Figura 12:	Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) $\frac{1}{4}$ e b) $\frac{1}{2}$							
C	da espessura com ampliação original de 500X da amostra I0261195							
	(corte com resfriamento).	29						
Figura 13:	Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) $\frac{1}{4}$ e b) $\frac{1}{2}$							
C	da espessura com ampliação original de 500X da amostra I0261196							
	(corte com resfriamento).	29						

Figura 14:	Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) $\frac{1}{4}$ e b) $\frac{1}{2}$	
	da espessura com ampliação original de 500X da amostra I0261197	
	(corte sem resfriamento)	30
Figura 15:	Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) $\frac{1}{4}$ e b) $\frac{1}{2}$	
	da espessura com ampliação original de 500X da amostra I0261198	
	(corte sem resfriamento)	30
Figura 16:	Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) ¼ e b) ½	
	da espessura com ampliação original de 500X da amostra I0261199	
	(corte sem resfriamento)	30
Figura 17:	Valores médios de dureza Vickers medidos ao longo da espessura	
	nos corpos de prova a) 21406-E1, b) 21406-EH1, c) 21406-E2, d)	
	21406-EH2, e) 21406-E3 e f) 21406-EH3 com carga de 1 kgf e	
	distância entre os pontos de 0,75 mm	33
Figura 18:	Macroestruturas observadas em seções transversais, nas	
	subamostras originadas de corte com resfriamento b) 21406-SH1,	
	d) 21406-SH2 e f) 21406-SH3, e nas subamostras originadas de	
	corte sem resfriamento a) 21406-1, c) 21406-2 e e) 21406-3. Nital	
	4%	34
Figura 19:	Valores médios de dureza Vickers medidos a 0,25 mm das	
	superfícies de corte dos corpos de prova a) 21406-1, b) 21406-SH1,	
	c) 21406-2, d) 21406-SH2, e) 21406-3 e f) 21406-SH3 com carga	
	de 1,0 kgf e distância entre pontos de 0,25 mm	36
Figura 20:	Resultados do planejamento fatorial referentes ao limite de	
	resistência, apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal,	
	c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos	40
Figura 21:	Resultados do planejamento fatorial referentes à relação elástica,	
-	apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c) efeitos	
	principais e d) inteiração dos efeitos	41
Figura 22:	Resultados do planejamento fatorial referentes ao $\Delta Deformação$	
C	(comprimento do patamar), apresentando os gráficos de a) Pareto.	
	b) half normal, c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos	42
	(comprimento do patamar), apresentando os gráficos de a) Pareto,b) half normal, c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos	42

Figura 23:	Resultados do planejamento fatorial referentes ao ΔLE (altura do	
	patamar), apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c)	
	efeitos principais e d) inteiração dos efeitos	45
Figura 24:	Resultados do planejamento fatorial referentes ao ΔLE (altura do	
	patamar), apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c)	
	efeitos principais e d) inteiração dos efeitos	46
Figura 25:	Gráficos da curva tensão versus deformação dos ensaios a) 261885	
	e b) 261936, evidenciando a influência do $\Delta Deformação$ sobre os	
	valores de LE	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Diferenças básicas entre as características das máquinas universais					
	de ensaio utilizadas neste estudo	22				
Tabela 2:	Planilha de monitoramento dos corpos de provas, atrelado com as					
	informações de código de identificação (N° Teste), rastreabilidade					
	da amostra no laminado (Amostra), ordem para a realização de					
	ensaios (Ordem ensaio) e as diferentes condições de preparação e					
	ensaio que foram submetidos (Fator 1, 2 e 3)	23				
Tabela 3:	Resultados das análises de TGF para amostras cortadas com e sem					
	resfriamento	29				
Tabela 4:	Análise sobre os valores de extensão da zona afetada pelo calor					
	(ZAC) gerada pelo corte a gás	35				
Tabela 5:	Resultados obtidos para as propriedades mecânicas de tração nas					
	diferentes condições experimentais avaliadas	38				
Tabela 6:	Dados estatísticos calculados para as propriedades mecânicas de					
	tração	39				
Tabela 7:	Dados estatísticos calculados sobre os valores de limite de					
	escoamento em cada uma das condições ensaiadas	39				
Tabela 8:	Dados estatísticos calculados sobre os valores de limite de					
	resistência em cada uma das condições ensaiadas	39				
Tabela 9:	Resultados coletados nos softwares das máquinas universal de					
	ensaios de limite de escoamento inferior e superior e as					
	deformações para as diferentes condições experimentais					
	avaliadas	44				

LISTA DE SIGLAS

- ANP Agência nacional do petróleo
- API American Petroleum Institute
- CNC Computer Numeric Control
- CP Corpo de prova
- DUR Dureza
- ESAB Empresa fabricante de máquinas e equipamentos
- LE Limite de escoamento
- LR Limite de resistência
- NBR Norma Brasileira Regulamentadora
- RE Relação elástica
- TGF Tamanho de grão ferritíco
- ZAC Zona afetado pelo corte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1 Seleções das Amostras	16
2.2 Procedimentos experimentais	17
2.2.1 Ensaio de tração	17
2.2.1.1 Projeto de experimento	17
2.2.1.2 Curva tensão x deformação	23
2.2.2 Tamanho de grão ferrítico e dureza	25
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1 Caracterização do material	28
3.1.1 Microestrutura	28
3.1.2 Dureza	31
3.2 Caracterização da zona afetada pelo calor (ZAC)	32
3.2.1 Macroestruturas da ZAC	32
3.2.2 Dureza da ZAC	34
3.3 Propriedades em tração	36
3.3.1 Ensaio de tração	36
3.3.2 Projeto de experimento para LE, LR e RE	42
3.3.3 Projeto de experimento para curva tensão versus deformação	47
4 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O mercado mundial, voltado para a produção de aços, tem exigido cada vez mais que as empresas expandam seu portfólio de produtos para atender os seus clientes, nas mais diversas aplicações. O desenvolvimento de novos produtos tem sido reflexo do investimento e aprimoramento das linhas de produções nas indústrias siderúrgicas, obtendo-se produtos de melhor qualidade, garantindo propriedades que atendam precisamente as especificações demandadas por seus compradores (HIPPERT JUNIOR, 2004).

Uma parcela da produção desses aços é voltada para aplicação na indústria petrolífera. A descoberta de regiões ricas em petróleo, gás natural e biocombustíveis (etanol entre outros), tem levado a um aumento da demanda e, portanto, da produção desses tipos de aços. No Brasil, o setor é regulado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e, por meio do seu anuário estatístico, pode-se observar, nos últimos anos, um aumento na produção, consumo e comercialização das matérias-primas em questão. As estatísticas mostram dez anos de resultados diretamente ligados à atuação dessa agência. Após 2011, o País ingressou em uma fase de mudanças, que impactaram positivamente esse mercado. Segundo a ANP (2020), no decorrer da última década (2011-2019), houve um aumento aproximado de 35% na produção diária de petróleo e 72% na produção total de gás natural. Em virtude desse crescimento, tem-se notado em paralelo um aumento no número de projetos metalúrgicos para atender este nicho de aplicação.

A necessidade da exploração de óleo e gás em meios mais hostis, nos últimos anos, levou ao melhoramento das propriedades mecânicas e desenvolvimento de novos aços microligados da classe API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUE, 2018)., uma vez que a exploração de hidrocarbonetos em águas profundas (profundidades maiores do que 1000 metros), como é o caso do campo petrolífero de Tupi (localizado na bacia de santos, no litoral do Rio de Janeiro), que está a 5000 e 7000 metros de profundidade, exige a utilização de tubos de aço com alta resistência mecânica para permitir o fluxo da produção de petróleo (EL-DANAF *et al.,* 2013; FERREIRA *et al.,* 2001; GODEFROID *et al.,* 2014; PEREIRA, 1992). Na indústria petrolífera, os dutos empregados no transporte de petróleo e seus derivados são construídos a partir de tubos especificados pela norma API 5L. Segundo a norma determinada pelo *American Petroleum Institute* (2018), esses aços são classificados em diferentes graus com base em uma série de requisitos relacionados à composição química e a propriedades mecânicas medidas em tração (limite de escoamento, limite de resistência, relação elástica e alongamento). Portanto, para que o aço seja classificado em um determinado grau, é necessário restringir

algumas faixas de composição química dos elementos de liga (HULKA, 2001; FERRARINI, 2004; STREISSELBERGER, et al., 1998), assim como garantir que os resultados dos ensaios mecânicos estejam de acordo com as faixas de propriedades mecânicas indicadas pela norma.

Como já dito anteriormente, o ensaio de tração é fundamental para definir a qualidade na classe dos aços API. A partir desse ensaio, é possível avaliar o comportamento mecânico sendo representado pelo gráfico da variação da deformação no corpo de prova (eixo x), em função da tensão aplicada sobre ele (eixo y) (DIETER, 1981). Na Figura 1, verifica-se um exemplo correspondente à curva tensão x deformação.

Figura 1: Exemplo de uma curva tensão x deformação indicando os limites superior e inferior de escoamento.



Fonte: Souza, 1982.

Alguns parâmetros do processo de preparação dos corpos de provas e condições de ensaios podem ocasionar em mudanças no perfil dessa curva e, consequentemente, resultar em variações nos valores das propriedades mecânicas medidas em tração (limite de escoamento, limite de resistência, relação elástica e alongamento). Durante a preparação destes corpos de provas, existem algumas preocupações necessárias para que as propriedades obtidas pelo ensaio não sofram interferência dos processos de corte e usinagem. A norma brasileira NBR ISO 6892-1.2019 firma que "[...]os corpos-de-prova são preparados de modo a não afetar as propriedades da amostra. Quaisquer pontos que tenham sido encruados por corte ou prensagem deverão ser removidos por usinagem" (NBR ISO 6892-1, 2019). Além disso, Tsuchida *et al.* (2005) apresentaram em seu estudo que alguns fatores metalúrgicos influenciam tanto o alongamento do patamar de escoamento, como os valores de tensão nos limites de escoamento inferior e superior. A temperatura, o teor de carbono, o tamanho do grão ferrítico, a fração volumétrica de ferrita e a taxa de deformação foram algumas das variáveis metalúrgicas avaliadas e

relacionadas a essa variação da curva. De maneira a complementar, Dieter (1981) e Souza (1982) também mencionam a respeito dos tipos de equipamentos utilizados para a realização desses ensaios. As máquinas podem variar quanto a sua rigidez, e as características da máquina de ensaio podem ter uma forte influência no comportamento da curva tensão x deformação.

Evidencia-se o limite de escoamento como sendo uma propriedade mecânica de maior instabilidade, e isso se deve aos muitos fatores mencionados anteriormente, que podem estar relacionados tanto aos parâmetros do processo de fabricação como também ao processo de amostragem e verificação dos valores de propriedades mecânicas. Ainda justificando a complexidade e instabilidade dessa propriedade mecânica, existem diferentes critérios determinados por norma que são utilizados para definição de seus valores, os quais variam de acordo com o tipo de material testado (SOUZA,1982). Para algumas classes de aços, que apresentam um comportamento mais instável da curva na região de escoamento (COTTRELL, 1965; GARCIA, SPIM, ALEXANDRE, 2012), é possível notar grandes dispersões nos resultados de um mesmo laminado, utilizando-se o mesmo critério de medição. Dependendo do nível de variação, esses casos podem ser vistos como problemáticos dentro de um processo siderúrgico, resultando na recusa de produtos acabados devido à obtenção de propriedades mecânicas inapropriadas (fora das faixas de especificação do cliente) aos projetos de qualidade do aço (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2020; KRISTOFFERSEN *et al.*, 2013; RAKHSHKHORSHID; HASHEMI, 2013).

A partir de um vasto banco de dados de uma grande empresa brasileira, com um histórico industrial de produção de aços API 5L X65, algumas análises foram feitas, e foi possível observar variações dos valores de limite de escoamento e relação elástica, utilizandose o critério de medição a 0,5% de deformação plástica (AMERICAN PETROLEUM INSTITUE, 2018), para chapas grossas com espessuras menores que 16 mm, provenientes do processo de laminação controlada, com temperaturas de acabamento inferiores a 700°C e caracterizado por microestruturas bandeadas de ferrita e perlita.

Nesse contexto, a presente monografia visou realizar um estudo sobre este aço API 5L X65, utilizado para a fabricação de oleodutos e gasodutos, e que apresenta um comportamento mecânico caracterizado pela ocorrência do escoamento descontínuo e dispersão recorrente de resultados no que tange a medição do limite de escoamento. Acredita-se que os parâmetros de preparação dos corpos de prova (método de corte) e de realização dos ensaios de tração (tipo de máquina e velocidade de ensaio) podem estar interferindo no comportamento elasto-plástico do material, causando variações no perfil da curva tensão x deformação e, assim, influenciando os valores de limite de escoamento, limite de resistência e relação elástica, medidos. Por meio

desses três fatores, inicialmente, buscou-se verificar e mensurar a influência desses parâmetros nas propriedades mecânicas. Posteriormente, analisou-se a partir de alguns ensaios complementares o impacto da nova metodologia de corte utilizada no estudo. Por fim, avaliaram-se os procedimentos utilizados no estudo, realizando um comparativo dos resultados entre as diferentes condições estudadas, propondo melhoria e a padronização do processo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seleções das Amostras

ntido de laminação

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionadas amostras de chapa grossa, com espessura de 10,14mm da especificação API 5L X-65. Os elementos de liga utilizados para fabricação desse aço em maior concentração foram Nb-Ti-Cr. Os teores de carbono foram menores que 0,15 %, resultando em um carbono equivalente total de 0,35%, e também se garantiu um controle de P e S obtendo concentrações inferiores a 0,020% e 0,005 respectivamente. O material foi processado em rota de laminação controlada e visaram-se temperaturas de acabamento inferiores a 700°C.

Para minimizar o efeito das variações de propriedade mecânica decorrentes do material no julgamento dos resultados das análises realizadas nesse trabalho, as amostras, com dimensional de 550 mm x 650 mm, foram retiradas da chapa do meio do comprimento do laminado, nas regiões de ¹/₄ e ³/₄ da largura, à 180 mm das extremidades e próximo a região central em relação ao comprimento da chapa, conforme ilustra a Figura 2. Assim, receberam a seguinte identificação: 1, 2, 3, 4, 5, e 6, para ensaios de tração; 7 e 8, para ensaios de dureza traçando perfis ao longo da espessura e superfície do material, e análises metalográficas realizando as medições do tamanho de grão ferritíco a partir do método dos interceptos.



Figura 2: Desenho esquemático de uma chapa com a posição de retirada das amostras

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 Procedimentos experimentais

2.2.1 Ensaio de tração

2.2.1.1 Projeto de experimento

O estudo baseou-se em uma metodologia usual voltada para melhoria e otimização de processos. A partir de um projeto de experimento do tipo fatorial 2^k, criou-se um planejamento para a realização dos ensaios de tração. Na execução do experimento, optou-se pelo projeto fatorial completo de três fatores a dois níveis. Este projeto do tipo 2^k, onde k é igual a 3, produz oito combinações de fatores, ou seja, oito ensaios. A amostragem total foi de 48 ensaios de tração, sendo definidas seis réplicas para cada uma das combinações. Os fatores avaliados durante o processo foram: métodos de corte (corte com e sem resfriamento forçado por água), velocidade de ensaio (4,2mm/min e 2,1mm/min) e diferentes modelos de máquina de tração (hidráulica e eletromecânica).

A partir do planejamento fatorial descrito, criou-se um escopo para a realização dos ensaios de tração. O material em análise foi preparado e ensaiado seguindo a norma ASTM E8/E8M. As etapas do processo operacional ocorreram conforme o fluxograma apresentado pela Figura 3 a seguir.





Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxograma utilizado para o estudo seguiu uma sequência similar a modelos convencionais, sem grandes mudanças, passando pelas etapas de corte, usinagem, medição até a realização dos ensaios de tração. A inovação utilizada neste estudo foi dada na etapa de corte das amostras em peças com dimensionais menores, chamados de "*blanks*". Definiu-se uma nova metodologia para a realização do corte, utilizando água em temperatura ambiente durante o oxicorte. O motivo pelo qual foi proposta a variação do método de corte foi no intuito de avaliar a influência térmica do corte sobre o material e o efeito da água durante o corte, com foco na região útil do corpo de prova, correlacionando-a com os resultados obtidos de propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência e relação elástica). Para o corte das amostras e retirada dos *blanks*, foi empregada uma máquina de corte a gás da fabricante ESAB, dotado de seis maçaricos automáticos controlados por CNC (*Computer Numeric Control*), conforme apresentado na Figura 4.



Figura 4: Máquina de corte a gás ESAB, utilizada para a retirada dos blanks.

Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda detalhando o corte dos *blanks*, o processo de resfriamento foi feito, manualmente, utilizando-se uma mangueira conforme ilustra a Figura 5. a seguir.

Figura 5: Operação manual de resfriamento por água durante o processo de oxicorte em amostras de chapas grossas.



Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras 1, 2 e 3 foram cortadas a partir do corte submetido ao resfriamento forçado, e nas amostras 4, 5 e 6 a retirada dos *blanks* aconteceu sem resfriamento durante o processo de corte. O dimensional dos *blanks* retirados para a usinagem dos corpos de tração foi 60 mm de largura x 450 mm de comprimento. Além disso, ressalta-se que todos os *blanks* foram cortados na transversal ao sentido de laminação (90°). A Figura 6 apresenta o croqui de corte das amostras.



Figura 6: Croqui das amostras em que os blanks de tração foram amostrados.

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a realização do corte, passou-se o material para a etapa de usinagem, na qual se realizaram os ajustes dimensionais dos *blanks* conforme a norma ASTM E8/8M, seguindo as bases de medidas especificadas pela Figura 7.

Figura 7: Croqui apresentando o dimensional dos corpos de prova de tração fabricados pelo processo de usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da ASTM E8, 2020

O processo de usinagem dos corpos de prova foi feito por máquinas CNC automáticas, da marca Okuma. Logo em seguida, os corpos de prova foram levados à bancada de medição, onde verificaram-se os dimensionais reais comparando-os com os descritos na norma ASTM-E8. As medições foram realizadas com o auxílio de paquímetros. Além disso, ainda nessa etapa, realizou-se, com marcadores de tintas, a identificação do material, assim definindo códigos, e atrelando a estas diferentes condições de ensaio para cada um dos corpos de provas a serem ensaiados.

Na etapa de execução dos ensaios, restringiu-se a um único técnico, garantindo a repetibilidade dos mesmos. Os ensaios de tração foram realizados em diferentes tipos de equipamentos e submetidos a diferentes velocidades de ensaio, com o intuito de avaliar os efeitos de rigidez e o efeito da taxa de deformação sobre as propriedades mecânicas. Logo, a partir dos corpos de provas submetidos a duas condições de corte durante a preparação do material, definiu-se realizar os ensaios em dois modelos diferentes de máquinas universais de ensaios, e em duas velocidades de ensaio. A Tabela 1 apresenta as especificações de cada uma das máquinas universais de ensaio utilizadas no estudo.

Tabela 1 – Diferenças básicas entre as características das máquinas universais de ensaio utilizadas neste estudo.

MÁQUINA TRA094 (ELETROMECÂNICA)	MÁQUINA TRA096 (HIDRÁULICA)
MARCA: ZWICK	MARCA: INSTRON
CAPACIDADE: 600 kN	CAPACIDADE: 1200 kN
EXTENSÔMETRO: AUTOMÁTICO	EXTENSÔMETRO: MANUAL
	1 1 .

Fonte: Elaborado pelo autor

No que diz respeito a variável velocidade de ensaio pela norma ASTM-E8 o intervalo permitido para ensaio está entre 0,5 mm/min. e 4,2 mm/min, incluindo os extremos. Definiu-se às velocidades de 2,1 mm/min e 4,2 mm/min, permitindo avaliar a condição de maior velocidade e uma condição intermediário da faixa. Esse é um trabalho que além dos quesitos técnicos, visa avaliar condições de melhor produtividade, portanto, não foi avaliado as velocidades mais baixas.

Após a realização dos ensaios, o tratamento de dados foi desenvolvido com base nos recursos disponibilizados pelo *software* MINITAB. Por meio desta ferramenta, estatística computacional, elaborou-se um planejamento experimental, atribuindo ao modelo os fatores 1 (máquina universal de ensaio), 2 (velocidade de ensaio) e 3 (metodologia de corte), e, assim, definindo a aleatoriedade dos ensaios conforme é previsto. O monitoramento dos ensaios foi realizado de acordo com as informações dispostas na Tabela 2.

(Fator	1,	2	e	3).	,

Ordem ensaio	N° Teste	Amostra	Fator 1 (Máquina)	Fator 2 (Vel ensaio)	Fator 3 (Corte)
1	261881	1	TRA096	2.1	C/água
5	261882	1	TRA096	2.1	C/água
6	261883	2	TRA096	2.1	C/água
16	261884	2	TRA096	2.1	C/água
33	261885	3	TRA096	2.1	C/água
46	261886	3	TRA096	2.1	C/água
3	261887	1	TRA094	2.1	C/água
7	261888	1	TRA094	2.1	C/água
31	261889	2	TRA094	2,1	C/água
39	261890	2	TRA094	2.1	C/água
43	261891	3	TRA094	2.1	C/água
45	261892	3	TRA094	2,1	C/água
12	261893	1	TRA096	4.2	C/água
15	261894	1	TRA096	4.2	C/água
17	261895	2	TRA096	4.2	C/água
30	261896	2	TRA096	4.2	C/água
44	261897	3	TRA096	4.2	C/água
47	261898	3	TRA096	4.2	C/água
2	261899	1	TRA094	4.2	C/água
9	261900	1	TRA094	4.2	C/água
19	261901	2	TRA094	4.2	C/água
38	261902	2	TRA094	4.2	C/água
42	261903	3	TR A094	4 2	C/água
48	261904	3	TRA094	4.2	C/água
8	261923	4	TR A096	2.1	S/água
11	261929	4	TRA094	2,1	S/água
13	261935	4	TRA096	4 2	S/água
4	261941	4	TRA094	4.2	S/agua
10	261924	4	TRA096	2.1	S/água
21	261930	4	TRA094	2,1	S/água
20	261936	4	TRA096	4.2	S/água
18	261942	4	TRA094	4.2	S/água
14	261925	5	TRA096	2.1	S/água
23	261931	5	TRA094	2.1	S/água
29	261937	5	TRA096	4.2	S/água
25	261943	5	TRA094	4.2	S/água
22	261926	5	TRA096	2.1	S/água
24	261932	5	TRA094	2.1	S/água
34	261938	5	TRA096	4.2	S/água
27	261944	5	TRA094	4.2	S/água
35	261927	6	TRA096	2.1	S/água
26	261933	6	TRA094	2.1	S/água
37	261939	6	TRA096	4.2	S/água
32	261945	6	TRA094	4.2	S/água
40	261928	6	TRA096	2.1	S/água
28	261934	6	TRA094	2.1	S/água
41	261940	6	TRA096	4.2	S/água
36	261946	6	TRA094	4,2	S/água

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.1.2 Curva tensão x deformação

Para traçar o gráfico de tensão em função da deformação, a força aplicada foi medida, instantaneamente, utilizando uma célula de carga, enquanto o alongamento foi medido por meio de extensômetros. Os equipamentos possuem um *software*, que permite o controle e ajuste dos parâmetros do ensaio, bem como permite geração de relatórios contendo o perfil da curva tensão *versus* deformação e a visualização dos resultados a partir da coleta dos valores (pontos na curva carga x deslocamento) de carga da tensão axial e deformação em diferentes instantes do ensaio. Os gráficos que representam as curvas dos ensaios de tração são plotados em função da carga x deslocamento. O *software* nos permite a coleta dos valores de limite de escoamento e deformação sobre a curva de carga x deslocamento realizando a conversão dos dados de forma automática no próprio software.

Diante disso, coletaram-se, utilizando o referido software, os resultados numéricos das propriedades mecânicas de tração e os gráficos representativos do comportamento mecânico, que o material apresentou ao longo do ensaio. Visando a um melhor entendimento da influência dos fatores sobre o limite de escoamento (máquina universal de ensaio, velocidade de ensaio e método de corte), definiu-se uma maneira de avaliar o comportamento mecânico do material, e análises complementares, associando ao perfil da curva na região de transição elasto-plástica, (patamar de escoamento descontinuo) foram realizadas. Foi determinada a diferença dos pontos contendo os valores do limite de escoamento superior e inferior como sendo a variável ΔLE , e a diferença dos pontos contendo os valores de deformação como sendo a variável ΔD eformação.

Os pontos do gráfico utilizados para avaliar a variação do perfil da curva em relação ao eixo y (Δ LE) foram o LE_{Sup} e LE_{Inf}, e para a variação no eixo x (Δ Deformação) foram δa (deformação proporcional total para a carga do LE Inf), e δc (deformação total para LE Inf). Os valores de LE_{Sup} e LE_{Inf} foram calculados pelo software, automaticamente, a partir dos valores da carga de tensão axial. A Figura 8 apresenta um exemplo de curva carga *versus* deslocamento, permitindo a visualização dos pontos definidos para a avaliação sobre o gráfico.



Figura 8: Ilustração gráfica contendo os pontos definidos para avaliação do perfil da curva carga versus deslocamento na região de transição elástica para plástica.

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a definição dos pontos, os valores referentes aos pontos (LE_{Sup} , LE_{Inf} , $\delta c e \delta a$) foram coletados e, utilizando o *software*, calcularam-se as variáveis ΔLE e $\Delta Deformação a$ partir das Equações 2.1 e 2.2.

$$\Delta LE = LESup - LEInf \tag{2.1}$$

Onde:

- ΔLE = Altura do patamar (MPa)
- *LESup* = Limite de escoamento superior (MPa)
- *LEInf* = Limite de escoamento inferior (MPa)

.

$$\Delta Deformação = \delta c - \delta a$$

Onde:

- $\Delta Deformação = Comprimento do patamar (mm)$
- $\delta c = \text{Deformação total para LE Inf (mm)}$
- $\delta a =$ Deformação proporcional total para a carga do LE Inf (mm)

2.2.2 Tamanho de grão ferrítico e dureza

Os ensaios adicionais foram originados das amostras 7 e 8. O corte da amostra 7 foi realizado, utilizando-se a metodologia de corte com resfriamento forçado pela água, e a amostra 8 foi cortada, utilizando o método sem resfriamento. No total, retiraram-se seis *blanks* para a caracterização microestrutural do material e análise dos perfis de dureza, sendo três na amostra 7 e três na amostra 8. A preparação do material para a realização das análises complementares do tamanho de grão ferrítico (TGF) e perfis de dureza (DUR), ao longo da espessura e superfície, originou-se desses *blanks* com dimensionais de 130 mm de largura x 90 mm de comprimento. A Figura 9 apresenta o croqui do *blank* utilizado para a preparação dos ensaios adicionais do estudo.



Figura 9: Croqui de corte dos blanks referente aos ensaios complementares de perfis de dureza e TGF.

Fonte: Elaborado pelo autor

Seguindo o croqui apresentado, observa-se uma região de descarte e outra região para usinagem. Os ajustes dimensionais da região a ser usinada foram feitos por uma fresadora manual e a região de descarte foi cortada utilizando-se uma serra de fita horizontal. Ainda utilizando a serra, realizou-se o corte das peças, que originaram os corpos de prova designados à análise de TGF e aos ensaios de perfis de dureza.

Por último, alguns ajustes de acabamento dos corpos de prova foram feitos por máquinas retíficas e lixadeiras. Os ensaios de dureza e as análises dos tamanhos de grãos ferríticos basearam-se nos requisitos de preparação e ensaio descritos pelas normas ASTM E-92 e ASTM E-112. A avaliação das durezas ocorrera na escala Vickers, sendo todas as medições realizadas com carga de 1,0 kgf. Para o plano transversal, ao longo da espessura dos corpos de prova preparados a partir dos *blanks*, realizaram-se três perfis a 0,75 mm das superfícies e com distância entre impressões de 0,75 mm. Na avaliação de dureza na superfície, foram realizados seis perfis de dureza, ao longo da ZAC, gerada pelo corte a gás, sendo os primeiros pontos posicionados a 0,25 mm da borda do corpo de prova. De maneira a complementar a análise, também foram realizadas análises metalográficas, após ataque com reativo químico nital 4%. Na Figura 10, é apresentada uma ilustração esquemática de como foram realizadas essas análises:



Figura 10: Ilustração esquemática da retirada dos corpos de prova e da avaliação de dureza Vickers.

Fonte: Elaborado pelo autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do material

3.1.1 Microestrutura

Por meio de análises de microscopia óptica, pôde-se caracterizar a microestrutura do material utilizado. O material em análise apresentou uma microestrutura bandeada constituída por ferrita e perlita. Segundo Garcia, Spim e Alexandre (2012), no início da década de 1950, E. O. Hall e N.J. Petch, em trabalhos independentes, mostraram por meio de uma equação que, quanto menor o tamanho de grão, maior será a resistência à deformação plástica dos materiais metálicos. Nesse contexto, e buscando avaliar a homogeneidade das amostras, neste trabalho, os tamanhos de grão ferrítico médio foram medidos e realizou-se um comparativo das microestruturas em diferentes posições ao longo da espessura das amostras cortadas sob resfriamento forçado com água e sem resfriamento. A medição foi feita em uma região central do *blank*, afastada da ZAC. Foi utilizado para a está medição o método dos interceptos seguindo a norma ASTM E-112. Os resultados referentes às análises de TGF estão apresentados na Tabela 3, assim como as microestruturas são destacadas nas Figuras de 11 a 16 (ampliação original de 500X), nas posições ¹/₄ e ¹/₂ da espessura.

Ensaio	N° Teste	Amostra	Condição	Tamanho de grão ASTM (G)
TGF	261194	7	H1 (água)	12,5
TGF	261195	7	H2 (água)	12,5
TGF	261196	7	H3 (água)	12,5
TGF	261197	8	1 (normal)	13
TGF	261198	8	2 (normal)	13
TGF	261199	8	3 (normal)	13

Tabela 3: Resultados das análises de TGF para amostras cortadas com e sem resfriamento.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11: Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) ¼ e b) ½ da espessura com ampliação original de 500X da amostra 261194 (corte com resfriamento).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12: Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) ¹/₄ e b) ¹/₂ da espessura com ampliação original de 500X da amostra 261195 (corte com resfriamento).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13: Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) ¹/₄ e b) ¹/₂ da espessura com ampliação original de 500X da amostra 261196 (corte com resfriamento).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14: Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) ¼ e b) ½ da espessura com ampliação original de 500X da amostra 261197 (corte sem resfriamento).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15: Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) ¼ e b) ½ da espessura com ampliação original de 500X da amostra 261198 (corte sem resfriamento).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16: Microestrutura bandeada de ferrita e perlita na posição a) ¼ e b) ½ da espessura com ampliação original de 500X da amostra 261199 (corte sem resfriamento).



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados obtidos, observa-se que houve uma diferença muito pequena nos valores de TGF entre as duas amostras analisadas. Além disso, as microestruturas após o procedimento de corte foram muito semelhantes quando comparadas às mesmas posições ao longo da espessura. Com isso, evidenciam-se microestruturas provenientes de um processo controlado, mitigando possíveis inferências microestruturais sobre os valores das propriedades mecânicas de tração (COLPAERT, 1974; PADILHA, 1996).

3.1.2 Dureza

De forma geral, em relação à análise do perfil ao longo da espessura, para todos os corpos de provas analisados, os maiores valores de dureza foram observados próximos a pelo menos uma das superfícies dos corpos de prova. Ademais, verificou-se que há uma tendência de obtenção de menores valores de dureza em regiões distantes das superfícies dos corpos de prova. Esses resultados podem ser observados a partir da Figura 17, sendo identificados com "E" os corpos de prova originados de corte sem refrigeração, e com "EH" os originados do corte com refrigeração.



Figura 17: Valores médios de dureza Vickers medidos ao longo da espessura nos corpos de prova a) 21406-E1, b) 21406-EH1, c) 21406-E2, d) 21406-EH2, e) 21406-E3 e f) 21406-EH3 com carga de 1 kgf e distância entre os pontos de 0,75 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Caracterização da zona afetada pelo calor (ZAC)

3.2.1 Macroestruturas da ZAC

Foram feitas análises metalográficas, as quais realizou-se ataque com reativo nital 4%, sobre as subamostras dos *blanks*, submetidas ao corte a gás com e sem resfriamento forçado. São apresentadas na Figura 18.

Figura 18: Macroestruturas observadas em seções transversais, nas subamostras originadas de corte com resfriamento b) 21406-SH1, d) 21406-SH2 e f) 21406-SH3, e nas subamostras originadas de corte sem resfriamento a) 21406-1, c) 21406-2 e e) 21406-3. Nital 4%.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nessas imagens também é possível observar cinco medições da extensão da ZAC, as quais também foram apresentadas na Tabela 4. De forma geral, verificou-se que a utilização de água para o resfriamento foi efetivo na redução da extensão da ZAC formada pelo corte a gás. A maior redução da ZAC foi observada no *blank* 21406-SH2 (-35%, de 2,00 \pm 0,07 mm para 1,30 \pm 0,05 mm), seguida 21406-SH1 (-32%, de 1,77 \pm 0,03 mm para 1,21 \pm 0,07 mm) e 21406-SH3 (-29%, de 1,49 \pm 0,03 mm para 1,07 \pm 0,02 mm).

	Sem resfriamento			C	Com resfriamen	to
				21406-SH1	21406-SH2	21406-SH3
	21406-1 (1)	21406-2 (2)	21406-3 (3)	(H1)	(H2)	(H3)
	1,79	1,93	1,53	1,22	1,24	1,03
	1,77	2,10	1,50	1,32	1,25	1,05
	1,78	1,99	1,49	1,14	1,34	1,08
	1,79	2,01	1,51	1,17	1,32	1,08
	1,73	1,95	1,45	1,21	1,33	1,09
Média (mm)	1,77	2,00	1,49	1,21	1,30	1,07
Desvio (mm)	0,03	0,07	0,03	0,07	0,05	0,02
Diferença (mm)				-0,56	-0,70	-0,43
Diferença (%)				-32%	-35%	-29%

Tabela 4: Análise sobre os valores de extensão da zona afetada pelo calor (ZAC) gerada pelo corte a gás.

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Dureza da ZAC

Os resultados de dureza médios, realizados a 0,25 mm das superfícies do corte a gás com carga de 1,0 kgf e 0,25 mm de distância entre impressões, são apresentados na Figura 19. Os corpos de prova preparados a partir do *blanks* cortados, empregando o resfriamento forçado, apresentaram, como esperado, uma ZAC com maiores valores de dureza próximos à região do corte. O maior aumento de dureza foi observado em 21406-SH3 (+54% de 201±5HV1 para 309±10HV1), seguido por 21406-SH1 (+50% de 201±5HV1 para 301±8HV1) e 21406-SH2 (+30% de 217±3HV1 para 284±7HV1). Isso se deve ao desenvolvimento de uma maior velocidade de resfriamento, que favorece a formação de microconstituintes de baixa temperatura de transformação e, portanto, de maiores valores de dureza. Também foi verificado que a amostra cortada sem o resfriamento com água apresentou uma região amaciada na porção final da ZAC (próximo ao metal base).



Figura 19: Valores médios de dureza Vickers medidos a 0,25 mm das superfícies de corte dos corpos de prova a) 21406-1, b) 21406-SH1, c) 21406-2, d) 21406-SH2, e) 21406-3 e f) 21406-SH3 com carga de 1,0 kgf e distância entre pontos de 0,25 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor

Condições mais lentas de resfriamento proporcionam um tempo "maior" de permanência em temperaturas localizadas na região intercrítica do metal base, favorecendo características microestruturais, que contribuem para a diminuição da dureza (DIETER, 1981; ZHAO; YANG; SHAN, 2002). Normalmente, esse fenômeno pode estar associado à ocorrência de um ou mais dos seguintes fatores:

- redução da densidade de discordância;
- transformação da microestrutura original do metal base em constituintes com contornos de grãos mais regulares (equiaxiais);
- coalescimento de precipitados;
- revenimento de microconstituintes de mais baixas temperaturas de transformação.

Vale ressaltar que não somente o emprego de um resfriamento forçado é responsável pela variação da velocidade de resfriamento. A velocidade de corte e a distância e inclinação da tocha são variáveis importantes e devem ser mantidas constantes para avaliar o efeito do resfriamento forçado. Especialmente para as subamostras 2 (21406-2 e 21406-H2), observa-se que a diferença é pouco significativa na extensão da ZAC (linha vermelha pontilhada) estimada pela variação de dureza. É possível que para esse caso, a velocidade de corte empregada sem resfriamento com água tenha sido maior do que aquela resfriada.

3.3 Propriedades em tração

3.3.1 Ensaio de tração

Seguindo o roteiro experimental abordado na metodologia, realizaram-se os ensaios de tração em oito condições diferentes. A Tabela 5 apresentam os resultados referentes às propriedades mecânicas de tração a serem avaliadas. Além disso, foram apresentados, na Tabela 6, alguns parâmetros estatísticos gerais sobre os resultados das propriedades mecânicas de tração, definindo os valores de mínimo, máximo, amplitude de variação, média, desvio padrão. Por último, apresentaram-se, nas tabelas 7 e 8, os mesmos parâmetros estatísticos gerais sobre os valores de limite de escoamento e limite de resistência, respectivamente, analisando os valores obtidos para cada uma das oito condições.

T 1 0 0		Fator 1	Fator 2	Fator 3	LE	LR	
Identificação	Condição	(Máquina)	(Vel ensaio)	(Corte)	(MPa)	(MPa)	RE (%)
261881	1	TRA096	2,1 mm/min	C/água	568	611	93
261882	1	TRA096	2,1 mm/min	C/água	595	616	97
261883	1	TRA096	2,1 mm/min	C/água	575	618	93
261884	1	TRA096	2,1 mm/min	C/água	609	619	98
261885	1	TRA096	2,1 mm/min	C/água	571	616	93
261886	1	TRA096	2,1 mm/min	C/água	566	613	92
261887	2	TRA094	2,1 mm/min	C/água	576	615	94
261888	2	TRA094	2,1 mm/min	C/água	602	617	98
261889	2	TRA094	2,1 mm/min	C/água	609	624	98
261890	2	TRA094	2,1 mm/min	C/água	568	621	91
261891	2	TRA094	2,1 mm/min	C/água	603	617	98
261892	2	TRA094	2,1 mm/min	C/água	598	613	98
261893	3	TRA096	4,2 mm/min	C/água	599	612	98
261894	3	TRA096	4,2 mm/min	C/água	570	609	94
261895	3	TRA096	4,2 mm/min	C/água	596	612	97
261896	3	TRA096	4,2 mm/min	C/água	594	607	98
261897	3	TRA096	4,2 mm/min	C/água	573	615	93
261898	3	TRA096	4,2 mm/min	C/água	563	605	93
261899	4	TRA094	4,2 mm/min	C/água	608	614	99
261900	4	TRA094	4,2 mm/min	C/água	593	610	97
261901	4	TRA094	4,2 mm/min	C/água	609	620	98
261902	4	TRA094	4,2 mm/min	C/água	597	613	97
261903	4	TRA094	4,2 mm/min	C/água	578	618	94
261904	4	TRA094	4,2 mm/min	C/água	575	616	93
261923	5	TRA096	2,1 mm/min	S/água	595	609	98
261924	5	TRA096	2,1 mm/min	S/água	584	614	96
261925	5	TRA096	2,1 mm/min	S/água	598	615	97
261926	5	TRA096	2,1 mm/min	S/água	591	613	96
261927	5	TRA096	2,1 mm/min	S/água	566	614	92
261928	5	TRA096	2,1 mm/min	S/água	564	614	92
261929	6	TRA094	2,1 mm/min	S/água	601	614	98
261930	6	TRA094	2,1 mm/min	S/água	604	616	98
261931	6	TRA094	2,1 mm/min	S/água	599	616	97
261932	6	TRA094	2,1 mm/min	S/água	600	615	98
261933	6	TRA094	2,1 mm/min	S/água	593	617	96
261934	6	TRA094	2,1 mm/min	S/água	607	620	98
261935	7	TRA096	4,2 mm/min	S/água	600	613	98
261936	7	TRA096	4,2 mm/min	S/água	598	611	98
261937	7	TRA096	4,2 mm/min	S/água	602	612	98
261938	7	TRA096	4,2 mm/min	S/água	592	610	97
261939	7	TRA096	4,2 mm/min	S/água	601	612	98
261940	7	TRA096	4,2 mm/min	S/água	608	617	99
261941	8	TRA094	4,2 mm/min	S/água	587	614	94
261942	8	TRA094	4,2 mm/min	S/água	606	616	98
261943	8	TRA094	4,2 mm/min	S/água	601	615	98
261944	8	TRA094	4,2 mm/min	S/água	607	617	98
261945	8	TRA094	4,2 mm/min	S/água	595	618	96
261946	8	TRA094	4.2 mm/min	S/água	612	622	98

Tabela 5: Resultados obtidos para as propriedades mecânicas de tração nas diferentes condições experimentais avaliadas.

Fonte: Elaborado pelo autor

	LE (MPa)	LR (MPa)	RE (%)
Valor mínimo	563	605	91
Valor máximo	612	624	99
Amplitude de variação	49	19	8
Valor médio	592	615	96
Desvio Padrão	14,64	3,75	2,30

Tabela 6: Dados estatísticos calculados para as propriedades mecânicas de tração.

Fonte: Elaborado pelo autor

 Tabela 7: Dados estatísticos calculados sobre os valores de limite de escoamento em cada uma das condições ensaiadas.

	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6	Condição 7	Condição 8
Valor mínimo LE	566	568	563	575	564	593	592	587
Valor máximo LE	609	609	599	609	598	607	608	612
Variação LE Média LE	43 581	41 593	36 582	34 593	34 583	14 601	16 600	25 601
Desvio Padrão LE	17,37	16,58	15,57	14,45	14,72	4,76	5,23	9,09

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8: Dados estatísticos calculados sobre os valores de limite de resistência em cada uma das condições ensaiadas.

	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6	Condição 7	Condição 8
Valor mínimo LR	611	613	605	610	609	614	610	614
Valor máximo LR	619	624	615	620	615	620	617	622
Variação LR	8	11	10	10	6	6	7	8
Média LR	616	618	610	615	613	616	613	617
Desvio Padrão LR	3,01	4,02	3,68	7,37	2,13	2,06	2,42	2,82

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados, confirma-se uma maior instabilidade conforme era previsto em relação aos valores de limite de escoamento. Ao comparar as propriedades mecânicas de tração, evidencia-se uma variação na ordem de 50MPa para os valores de limite de escoamento, sendo essa variação bem maior do que a identificada pelos valores de limite de resistência, que se apresentaram na ordem de 20MPa. Com relação ao valor de desvio padrão, as propriedades referentes ao limite de resistência e à relação elástica mostraram-se bem mais estáveis às variações exercidas sobre o processo, apresentando uma dispersão bem menor quando comparado aos resultados de limite de escoamento.

3.3.2 Projeto de experimento para LE, LR e RE

Por meio do software MINITAB, foi possível realizar uma análise mais detalhada dos efeitos de cada um dos fatores sobre os resultados das propriedades mecânicas de tração. As análises são apresentadas, nas Figuras de 20 a 22, onde se verificou, a partir dos gráficos de Pareto, Half normal, efeito principal e de inteiração, os fatores mais significativos sobre o processo, e mensurou-se o impacto sobre os valores das propriedades mecânicas de tração.

Figura 20: Resultados do planejamento fatorial referentes ao limite de escoamento, apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos.



Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 21: Resultados do planejamento fatorial referentes ao limite de resistência, apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos.

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 22: Resultados do planejamento fatorial referentes à relação elástica, apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos.

Fonte: Elaborado pelo autor

Visualizando os gráficos de Pareto e Half normal, da Figura 20, verificou-se uma influência significativa dos fatores máquina de ensaio e método de corte sobre o processo. A partir do gráfico de efeitos principais, observaram-se valores médios de limite de escoamento mais altos dos ensaios realizados na máquina TRA094 (eletromecânica) quando comparados com a máquina TRA096 (hidráulica). A diferença das médias se encontrou na ordem de 10 MPa.

Com relação ao método de corte, evidenciou-se o método de corte com resfriamento apresentando valores médios mais baixos do que o método de corte sem resfriamento. A diferença das médias encontradas entre os métodos de corte foi bem próxima de 10 MPa, assim como a diferença entre as máquinas universais de ensaio. O efeito da velocidade de ensaio, apesar de não ter sido considerado significativo sobre os valores de LE, observou-se uma pequena tendência de obtenção de valores mais baixos dessa propriedade quando ensaiados os corpos de prova em menor velocidade. Segundo Dieter (1981), o efeito da taxa de deformação pode ser evidenciado mais facilmente em alguns tipos de materiais que possuem uma elevada sensibilidade a estas variações de velocidade. Além disso, Souza (1982) menciona que os ensaios, quando submetidos a altas temperaturas, apresentam uma tendência a aumentar a sensibilidade, podendo apresentar grandes influência sobre as propriedades mecânicas de tração. Para o aço avaliado, verificou-se baixa sensibilidade às taxas de deformação durante o ensaio em temperaturas ambientes, resultando em pequenas variações como foi mostrado nos gráficos de efeito principais e de inteiração. Diante do exposto, compreendeu-se que a condição 1 (TRA096, velocidade de ensaio em 2,1 mm/min e método de corte com resfriamento forçado) de ensaio apresentou uma tendência à obtenção de valores baixos, enquanto a condição 8 (TRA094, velocidade de ensaio em 4,2mm/min e método de corte sem resfriamento) apresentou uma tendência à obtenção de valores mais altos de limite de escoamento.

Na figura 21, foram apresentados os gráficos com as análises referentes à variável resposta limite de resistência. Diferentemente do que se pode observar nos valores de limite de escoamento, os resultados obtidos apresentaram pequena inferência dos fatores avaliados durante o processo. A variação encontrada no limite de resistência está mais atrelada a diferença de microestrutura do material, do que aos fatores em estudo. A partir do gráfico de Pareto e Half normal visualizaram-se os efeitos tipo de máquina universal de ensaio e velocidade de ensaio apresentando altos índices de significância. Apesar disso, quando mensurados os valores médios de limite de resistência, encontrou-se uma diferença muito pequena entre as condições avaliadas das máquinas de ensaio e velocidade em 4 MPa e 3 MPa, respectivamente.

Por último, observaram-se os efeitos dos fatores sobre os resultados de relação elástica. A Figura 22 apresentou, nos gráficos de Pareto e Half normal, o efeito do método de corte como significativo. A partir do gráfico de efeito, tem-se a diferença das médias encontradas entre os métodos de corte próxima a 2%. Para os fatores tipo de máquina e velocidade foi de aproximadamente 1% para ambas as condições.

3.3.3 Projeto de experimento para curva tensão versus deformação

Os resultados obtidos para as variáveis respostas ($\Delta LE \ e \ \Delta Deformação$), utilizadas para estudar o comportamento da curva tensão x deformação, podem ser observados, na Tabela 9.

Identificação	Condição	LE Inferior	LE Superior	ΔLE	$\delta_a(mm)$	δ _c (mm)	∆Def
261881	1	<u>(1011 a)</u> 568	(IVII a) 600	30	0.122	0.161	0.030
261882	1	569	603	34	0,122	0,101	0,039
261883	1	577	604	2 4 27	0,123	0,405	0,302
261884	1	572	609	37	0,139	0,210	0,077
261885	1	572	605	3/	0,139	0,042	0,003
261886	1	566	600	34	0,125	0,170	0,041
261887	1	574	600	35	0,133	0,224	0,089
261888	$\frac{2}{2}$	568	604	36	0,133	0,278	0,143 0.417
261889	2	500	616	30	0,127	0,340	0,417
261899	$\frac{2}{2}$	568	607	30	0,117	0,441	0,324
261890	2	572	610	30	0,133	0,245	0,110
261802	2	566	600	35	0,117	0,557	0,420
201892	2	571	605	33	0,123	0,490	0,373
201893	3	570	600	30	0,132	0,322	0,390
201094	3	563	000 507	24	0,123	0,210	0,087
201893	2	563	597	54 25	0,131	0,338	0,407
201890	3	504 572	599	33 26	0,124	0,494	0,570
201897	5	575	609 504	30 20	0,129	0,244	0,115
201898	3	504 572	594	30 42	0,120	0,194	0,008
201899	4	572	014 500	43	0,133	0,455	0,520
261900	4	563	599	30	0,138	0,514	0,376
261901	4	5/3	612	39	0,138	0,624	0,486
261902	4	565	602	3/	0,120	0,471	0,351
261903	4	5/3	614	41	0,128	0,260	0,132
261904	4	574	608	34	0,123	0,260	0,137
261923	5	562	599	37	0,123	0,533	0,410
261924	5	549	590	40	0,128	0,733	0,605
261925	5	569	604	35	0,127	0,405	0,278
261926	5	562	595	33	0,146	0,384	0,238
261927	5	564	599	35	0,128	0,214	0,086
261928	5	563	593	30	0,138	0,214	0,076
261929	6	569	604	34	0,125	0,506	0,381
261930	6	572	607	35	0,129	0,574	0,445
261931	6	566	602	36	0,125	0,467	0,342
261932	6	569	603	34	0,134	0,494	0,360
261933	6	571	603	32	0,134	0,354	0,220
261934	6	574	610	36	0,133	0,558	0,425
261935	7	572	602	30	0,145	0,326	0,181
261936	7	565	601	36	0,126	0,495	0,369
261937	7	568	604	37	0,132	0,465	0,333
261938	7	561	597	36	0,136	0,502	0,366
261939	7	565	602	37	0,155	0,570	0,415
261940	7	570	610	40	0,125	0,677	0,552
261941	8	555	593	38	0,143	0,443	0,300
261942	8	574	611	37	0,126	0,541	0,415
261943	8	565	604	39	0,126	0,534	0,408
261944	8	567	614	46	0,130	0,575	0,445
261945	8	567	604	38	0,134	0,485	0,351
261946	8	576	613	37	0,156	0,567	0,411

Tabela 9: Resultados coletados nos softwares das máquinas universal de ensaios de limite de escoamento inferior e superior e as deformações para as diferentes condições experimentais avaliadas.

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar, a partir dos valores obtidos, que as dispersões foram maiores nos valores de Δ Deformação. Diante disso, realizaram-se as análises no MINITAB, mensurando o impacto de cada um dos fatores avaliados sobre os resultados das variáveis respostas. As figuras 15 e 16 apresentam a análise realizada no MINITAB sobre os valores de Δ LE e Δ Deformação



Figura 23: Resultados do planejamento fatorial referentes ao △Deformação (comprimento do patamar), apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos.

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 24: Resultados do planejamento fatorial referentes ao ∆LE (altura do patamar), apresentando os gráficos de a) Pareto, b) half normal, c) efeitos principais e d) inteiração dos efeitos.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos gráficos elaborados pelo software MINITAB, observou-se, nas figuras 23 e 24, pelos gráficos de Pareto e Half, norma de que o Δ Deformação foi afetado, significativamente, pelo efeito de metodologia de corte. Para os valores de Δ LE foi possível visualizar fator máquina de ensaio exercendo efeitos significativos. Associando esses parâmetros aos valores de limite de escoamento, tem-se a variável Δ Deformação como maior influenciadora da redução dos valores de LE. A Figura 25 evidencia o efeito dessa variável resposta, a partir dos gráficos da curva carga *versus* deslocamento.



Figura 25: Gráficos da curva carga *versus* deslocamento dos ensaios a) 261885 e b) 261936, evidenciando a influência do ∆Deformação sobre os valores de LE.

Fonte: Elaborado pelo autor

Com isso, quanto menor os valores dessa variável resposta, maior a chance de o LE ser definido como sendo no limite inferior do patamar, obtendo menores valores desta propriedade mecânica. Para os valores da variável resposta Δ LE, visualizaram-se diferenças mínimas quando comparadas a diferentes condições de ensaio, ocasionando em variações muito pequenas na propriedade de limite de escoamento do material.

4 CONCLUSÕES

O material analisado apresentou uma microestrutura homogênea, sendo evidenciado uma variação pequena entre os tamanhos de grãos ferríticos. Com relação ao ensaio de dureza Vickers, realizado distante das regiões de corte, observou-se uma tendencia de maiores e menores valores próximos às superfícies e no meio da espessura, respectivamente. De forma geral, os resultados de dureza foram afetados pelo corte a gás, sendo verificado maiores valores nas zonas afetadas pelo calor (ZACs) formadas pelo gradiente térmico gerado por esse processo. A partir da análise macrográfica sobre a superfície do material, verificou-se que a utilização do resfriamento com água foi efetiva na restrição da extensão ZAC gerada pelo corte a gás, com cerca de 30% de redução do seu comprimento quando comparado com as condições em que não foram empregado o resfriamento forçado.

A partir das análises e resultados obtidos, evidenciou-se que os valores de limite de escoamento e de relação elástica foram os mais impactados quando variados os fatores máquina de ensaio, velocidade de ensaio e método de corte. Os fatores tipo de máquina universal utilizada e o método de corte apresentaram maiores influências sobre as propriedades medidas.

O fator, que exerceu maior influência sobre as variações de limite de escoamento, foi o tipo de máquina utilizada. Percebeu-se uma variação média de 10MPa entre os valores de limite de escoamento medidos com as máquinas avaliadas neste estudo. Supõe-se que a diferença de rigidez entre as máquinas, assim como a dos dispositivos de medição utilizados em cada uma possam ser os responsáveis por estas diferenças sistemáticas.

Ainda sobre a variação obtida sobre os valores de limite de escoamento, observou-se para o método de corte também uma diferença do valor médio do limite de escoamento, entre as condições de máximo e mínimo, na ordem de 10 MPa. Os resultados originados do corte com resfriamento apresentaram valores mais baixos. Entende-se que esse fator deve ser explorado em estudos futuros, buscando entender melhor a variação ocasionada por esse resfriamento. Concluiu-se também, a partir das análises sobre a curva tensão *versus* deformação, que o corte com resfriamento apresentou uma tendência à redução dos valores de ΔDeformação, sendo determinante na obtenção de valores menores dessa propriedade.

Com relação ao fator velocidade de ensaio, observou-se uma menor influência sobre os resultados de propriedades mecânicas de tração, em uma maneira geral. Para o material ensaiado, os valores de LE apresentaram uma tendência à obtenção de valores menores em velocidades mais baixas em temperatura ambiente. No caso dos valores de limite de resistência,

a correlação observada foi mostrada contrária aos valores de limite de escoamento, com maiores valores da propriedade em velocidades mais baixas.

Para os valores de relação elástica, compreendeu-se que a variável está diretamente relacionada ao limite de escoamento e ao limite de resistência, considerando que os seus valores são representados pela razão do LE pelo LR. Portanto, a variação dos valores de relação elástica foi decorrente, principalmente, do limite de escoamento.

Por fim, visto os resultados obtidos para as propriedades mecânicas de tração, confirmou-se que a condição 6 apresentou menor dispersão no estudo, na qual se realizaram os ensaios na máquina TRA094 (hidráulica), na velocidade de 4,2 mm/min com amostras cortadas em condições sem resfriamento forçado. Visando um processo mais controlado sobre a amostragem deste material, sugere-se que aplique a essa condição para a obtenção de propriedades mecânicas com menor dispersão.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 6892-1:2019; Materiais Metálicos - Ensaio de Tração: Método de ensaio à temperatura elevada, 2019.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 5L**: Specification for Line Pipe 46th ed. Washington, D.C.: American Petroleum Institute; 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. 2011, EUA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2012, EUA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370:** Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2012, EUA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8M**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2013, EUA.

ANP – Agência Nacional de Petróleo. Anuário Estatístico de 2020. Rio de Janeiro, 2020.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. São Paulo: Edgar Blücher, 1974.

COTTRELL, A. H. **Dislocations and Plastic Flow in Crystals**. Oxford, Clarendon Press, 1965.

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

EL-DANAF, E.; A BAIG, M.; ALMAJID, A.; ALSHALFAN, W.; AL-MOJIL, M.; AL-SHAHRANI, S. Mechanical, microstructure and texture characterization of API X65 steel. **Materials and Design**, v. 47, 2013, p. 529-538.

FERRARINI, J. L. Caracterização de Materiais para o Processo de Estampagem. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004

FERREIRA, M. H. M.; ALCANTARA, N. G.; VENTRELLA, V. A. Microestruturas do metal de solda do Aço Api X-70 soldado com arame tubular AWS E81T1-Ni1. 3. MaProTec-Grupo de Desenvolvimento de Materiais e Processos Tecnológicos, 2001. Disponível: http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/publicado_2001/consolda2001ct34.pdf. Acesso: 22 dez. 2021.

GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GODEFROID L.B.; CÂNDIDO L.C.; TOFFOLO R. B.; BARBOSA L. H. Microstructure and mechanical properties of two API steels for iron ore pipelines. **Materials Research**, São Carlos, v.17, supl. 1. p. 114-120, 2014.

HIPPERT JUNIOR, E. Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J-∆a para previsão de colapso em dutos. 2004. 167f. Tese (Doutorado em Engenharia Naval) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

HULKA, K. "Sour Gas Resistant Steel", Niobium Information, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, v. 18, p. 8, 2001.

KRISTOFFERSEN, M.; BORVIK, T.; WESTERMANN, I.; LANGSETH, M.; HOPPERSTAD, O. Impact against X65 steel pipes – An experimental investigation. **International Journal of Solids and Structures**, v. 50, Issues 20-21, 2013, p. 3430-3445.

PADILHA, F. A.; SICILIANO, F. J. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. São Paulo: ABM, 1996.

PEREIRA, P. F. Produção de aços da classe API para chapas grossas. **Metalurgia & Materiais**, v.48, n. 412, p. 755-760, 1992.

RAKHSHKHORSHID, M.; HASHEMI, S. H. Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel. Materials Science and Engeneering A, v. 573, 2013, p. 37-44.

SOUZA, S.A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

STREISSELBERGER, A.; BAUER, J.; FLÜSS, P.; HILLENBRAND, H. G.; CORDON, P. High strength steel plates for linepipes in grades up to X100. Canada: 1998.

TSUCHIDA, N.; TOMOTA, Y.; NAGAI, K.; FUKAURA, K. A simple relationship between Lüders elongation and work-hardening rate at lower yield stress, **Scripta Materialia**, v.54, p. n. 1, p. 57-60, 2005.

ZHAO, M. C.; YANG, K.; SHAN, Y. Y. The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 1.2, 2002, p.14-20.