

# CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE DA MORFOLOGIA DE FRATURA DE CHAPAS DE AÇO API 5L X80 COM DIFERENTES ESPESSURAS E COMPOSIÇÕES QUÍMICAS

Mathews Lima dos Santos<sup>1</sup>

Arthur Filgueira de Almeida<sup>2</sup>

Luiz Fernando Alves Rodrigues<sup>3</sup>

Marcos Mesquita da Silva<sup>4</sup>

Renato Alexandre Costa de Santana<sup>5</sup>

## RESUMO

Os aços API 5L X80 são bastante utilizados no setor de petróleo e gás por atender a requisitos como elevada resistência mecânica, tenacidade e ductilidade. Neste contexto, são destinados recursos para o contínuo aperfeiçoamento das rotas de fabricação, a fim de garantir a confiabilidade necessária, além da redução de custos de materiais e processos. Entretanto, falhas de caráter repentino ainda são reportadas, causando prejuízos inestimáveis. O presente estudo objetiva caracterizar as propriedades mecânicas e as superfícies de fratura de aços API 5L X80 fabricados nacionalmente, bem como investigar a adequação dos mesmos às especificações da norma API 5L. Os ensaios de tração foram realizados em concordância com a norma ASTM E8 (2016) e as superfícies de fratura foram avaliadas utilizando-se técnicas comuns de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que a chapa de maior espessura apresentou limite de escoamento e de resistência inferiores àqueles estipulados pela norma API 5L para o grau X80. Os corpos de prova apresentaram superfície de fratura em formato elíptico, com características de fratura dúctil. A chapa de menor espessura apresentou inclusões alongadas de sulfeto de manganês, a qual pode ser prejudicial às aplicações em ambientes *sour*.

**Palavras-chave:** ARBL, API 5L, Propriedades Mecânicas, Fractografia.

## INTRODUÇÃO

---

<sup>1</sup> Mestre pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, mathewslimads@gmail.com;

<sup>2</sup> Doutorando do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, arthur.filgueira@eq.ufcg.edu.br;

<sup>3</sup> Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, luiz.rodrigues@ifpb.edu.br;

<sup>4</sup> Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, marcos.silva@ifpb.edu.br;

<sup>5</sup> Professor orientador: Doutor, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, renatoacs@ufcg.edu.br.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A busca contínua por materiais mais eficientes e seguros permite a obtenção de componentes e estruturas capazes de garantir baixo risco de falhas repentinas quando em serviço. Neste contexto, os aços desenvolvidos para o setor de petróleo e gás – devido à natureza química dos produtos transportados, à agressividade do ambiente e às severas condições de operação – requerem avaliação criteriosa de qualidade. Devido a tal fato, são destinados massivos esforços e investimentos para o aprimoramento das propriedades mecânicas destes materiais, bem como para identificar metodologias que eliminem tais falhas (BRUSCHI; GENTILE; TORSELLETTI, 2017).

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) são largamente utilizados por apresentarem, entre outras características, elevada resistência mecânica, alta tenacidade e boa soldabilidade (HOYOS et al., 2019). Neste contexto, o aço API 5L X80 apresenta microadição de elementos de liga – a exemplo de manganês, nióbio, vanádio e titânio – e é submetido a tratamentos termomecânicos – que envolvem cadeias de laminação controlada e podem ou não conter resfriamento acelerado ao final do processo – permitindo obter uma microestrutura bastante refinada e as propriedades mecânicas desejadas (HIPPERT JR, 2004; LI et al., 2018).

Contudo, apesar do recente desenvolvimento tecnológico, são reportados acidentes causados por falha de componentes e estruturas associada à degradação do material em serviço ou ao não atendimento das especificações estabelecidas em projeto. Essas falhas catastróficas podem conduzir a perdas irreparáveis para os seres humanos, o ambiente e a indústria petroquímica. Neste cenário, o presente estudo objetiva caracterizar as propriedades mecânicas e as superfícies de fratura de aços API 5L X80 fabricados nacionalmente, bem como investigar a adequação dos mesmos às especificações da norma API 5L.

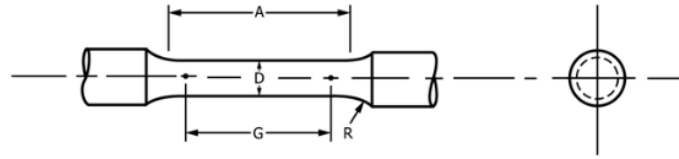
## **METODOLOGIA**

Chapas de aço API 5L X80 com espessuras iguais a 20,0 mm (C1) e 38,1 mm (C2) fabricadas no Brasil foram estudadas. As composições químicas das chapas são 0,061 %C, 0,288 %Si, 1,790 %Mn, 0,037% Nb, 0,022 %V, 0,012 %Ti (para C1); e 0,053 %C, 0,252 %Si, 1,670 %Mn, 0,006% Nb, 0,019 %V, 0,007 %Ti (para C2).

Os corpos de prova (CP) para o ensaio de tração uniaxial foram retirados do centro da espessura e usinados em torno CNC (controle numérico computadorizado), atendendo às especificações do *Specimen 3* da norma ASTM E8 (2016), ou seja, o mesmo foi usinado com 6,0 mm de diâmetro. As demais dimensões estão apresentadas na Figura 01, conforme dados

destacados pelo retângulo azul. Os ensaios foram conduzidos tanto na direção transversal à de laminação quanto na direção paralela à de laminação das chapas.

Figura 01 – Corpo de prova para ensaios de tração uniaxial



Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]					
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced parallel section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Fonte: (ASTM E8, 2016)

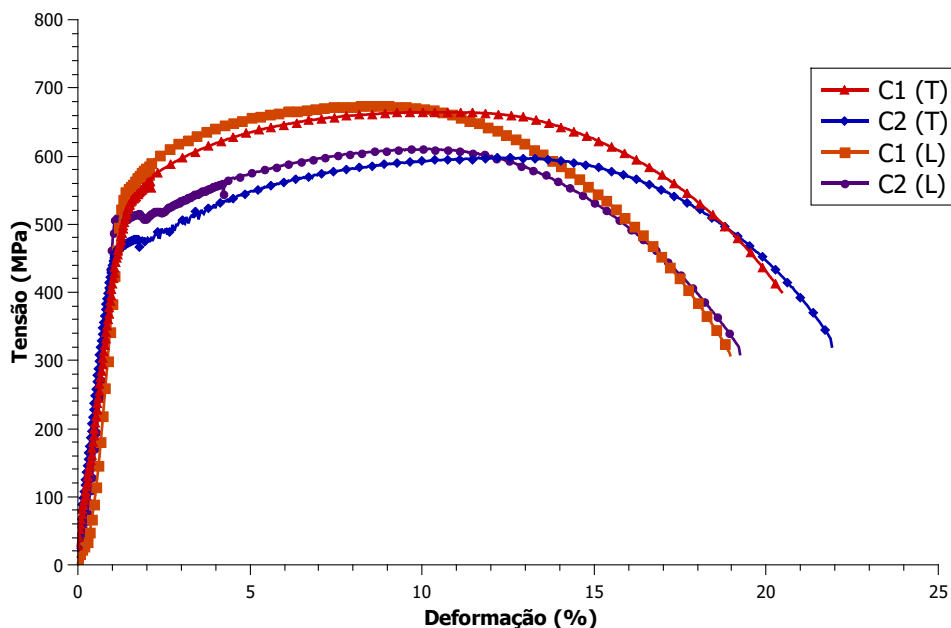
O ensaio de tração foi realizado com velocidade de 1 mm/min, mediante uso de uma Máquina Universal de Ensaio da marca MTS, equipada com extensômetro de comprimento nominal igual a 25 mm e célula de carga de 100 kN. Todo o procedimento foi parametrizado e monitorado pelos softwares *Station Manager* e *TestWorks 4*, proporcionando a obtenção da curva convencional de tração, bem como a exportação dos dados para posterior tratamento.

As superfícies de fratura dos CPs ensaiados foram protegidas com produto desengripante e protetivo, para posterior análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Previamente a estas análises, as amostras foram submergidas em acetona P.A. e limpas por meio de vibração ultrassônica durante 20 minutos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 02 apresenta as curvas tensão (MPa) x deformação (%) dos corpos de prova retirados do centro da espessura de C1 e C2, respectivamente, e ensaiados nas direções transversal (indicada, na legenda do gráfico, pela letra “T”) e paralela (indicada, na legenda do gráfico, pela letra “L”) à de laminação.

Figura 02 – Curvas Tensão x Deformação de C1 e C2 ensaiadas nas direções transversal (T) e paralela (L) à de laminação



Fonte: (Autoria própria)

A partir da Figura 02, foram obtidos os resultados do ensaio de tração do centro da espessura de ambas as chapas e estes estão dispostos na Tabela 02, onde: LE é o limite de escoamento, LR é o limite de resistência e  $\epsilon$  é a deformação percentual sofrida pelos CPs avaliados.

Tabela 02 – Resultados dos ensaios de tração uniaxial para C1 e C2

Material	Orientação	LE		LR (MPa)	LR		LE / LR	$\epsilon$ (%)	Especificação mais adequada
		LE (MPa)	especificado <sup>3</sup> (MPa)		especificado <sup>3</sup> (MPa)				
			Min	Máx	Min	Máx			
C1	T <sup>1</sup>	555,2		651,7		0,85	20,45	API 5L X80	
	L <sup>2</sup>	<b>586,6</b>		<b>673,9</b>		0,87	<b>18,95</b>		
			555	705	625	825			
C2	T	479,9		596,6		0,80	21,91	API 5L X70	
	L	<b>511,0</b>		<b>610,6</b>		0,84	<b>19,24</b>		

**Observações:**

<sup>1</sup> T – indica que o comprimento dos corpos de prova está na direção transversal à de laminação

<sup>2</sup> L – indica que o comprimento dos corpos de prova está na direção longitudinal à de laminação

---

<sup>3</sup> Limites especificados pela norma API 5L (2013) para um tubo grau X80

---

Fonte: (Autoria própria)

---

A partir da Tabela 02, é possível inferir que os corpos de prova retirados do centro da espessura de C2 apresentaram limite de escoamento igual a 479,9 MPa na direção transversal à de laminação e 511,0 MPa na direção paralela à de laminação, valores estes abaixo do limite mínimo especificado pela norma API 5L (2013) para o aço de grau X80 – 555 MPa. A tensão limite de resistência na posição central de C2 ficou abaixo de 625 MPa em ambas as direções ensaiadas, sendo, desta forma, menor que a mínima estabelecida pela norma supracitada. Neste contexto, autores como Araújo (2013) e Silva (2009) também estudaram chapas de aço API 5L X80 fabricadas no Brasil e concluíram que os limites de escoamento dos referidos materiais não atenderam às exigências da norma API 5L.

Nesta conjuntura, é válido ressaltar a influência dos elementos de liga em cada uma das chapas. Possivelmente, os teores de carbono (cerca de 15% menor em C2), nióbio, silício e manganês tiveram um papel fundamental na diferença dos resultados obtidos, haja vista que o carbono, o manganês e o silício são capazes de promover significativos incrementos na resistência mecânica; o nióbio atua no refino de grão e promove endurecimento por precipitação – assim como o titânio – e pode aumentar, em aços ARBL, o limite de escoamento de 70 a 100 MPa (ASM HANDBOOK, 1990; VERVYNCKT; THIBAU; VERBEKEN, 2012).

A razão elástica (dada pela relação LE/LR) foi maior em C1 quando comparada a C2 para a região do centro da espessura das chapas. Maiores valores de razão elástica aumentam a probabilidade de ocorrência do efeito mola, (devido à maior resistência à deformação), aumentando a probabilidade de obtenção de tubos com seções transversais ovalizadas, sendo, portanto, dada preferência para razões elásticas menores nos tubos mais modernos, a fim de evitar problemas operacionais (GORNI; SILVEIRA; REIS, 2006).

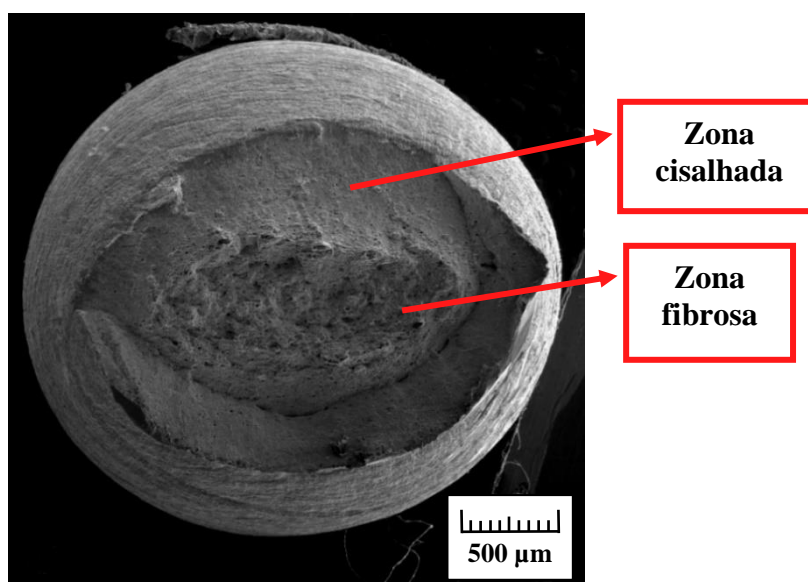
No tangente ao alongamento percentual sofrido pelos corpos de prova retirados do centro da espessura de C1 (mínimo igual a 18,95%) e C2 (mínimo igual a 19,24%) foi superior ao alongamento mínimo estipulado pela norma API 5L (2013) – sendo esse igual a aproximadamente 13,62% para corpos de prova nas dimensões utilizadas no presente estudo.

Análises da morfologia de fratura dos corpos de prova de ambas as chapas evidenciaram que os CPs apresentaram estrição. Todavia, devido à não homogeneidade microestrutural – e, conseqüentemente, à não homogeneidade da deformação –, o local de fratura do corpo de prova apresentou formato elíptico. Nesse contexto, a ocorrência de delaminações tem origem na

combinação ou na ação isolada de diferentes fatores, dentre os quais é possível citar: bandeamento da microestrutura pela ação da laminação; inclusões; e/ou falhas no contornos de grão da austenita prévia (SHIN et al., 2009).

A Figura 03 apresenta a superfície fraturada com formato elíptico, obtida por MEV, do corpo de prova retirado de C2. Na referida figura, evidenciam-se as regiões características de um modo de fratura dúctil, e são destacadas as zonas fibrosa e cisalhada. A zona fibrosa apresentou-se no centro do corpo de prova, pois, uma vez que esta região apresenta maior triaxialidade de tensão, a trinca iniciou por nucleação, crescimento e coalescimento de vazios na mesma. Uma vez iniciada a fratura e a propagação, com consequente perda de triaxialidade de tensão do corpo de prova, a região mais externa – zona cisalhada – rompeu com inclinação próxima a 45°, formando lábios de cisalhamento, em tensão plana (STROHAECKER, 2012).

Figura 03 – Superfície fraturada de C2. Aumento de 70x.

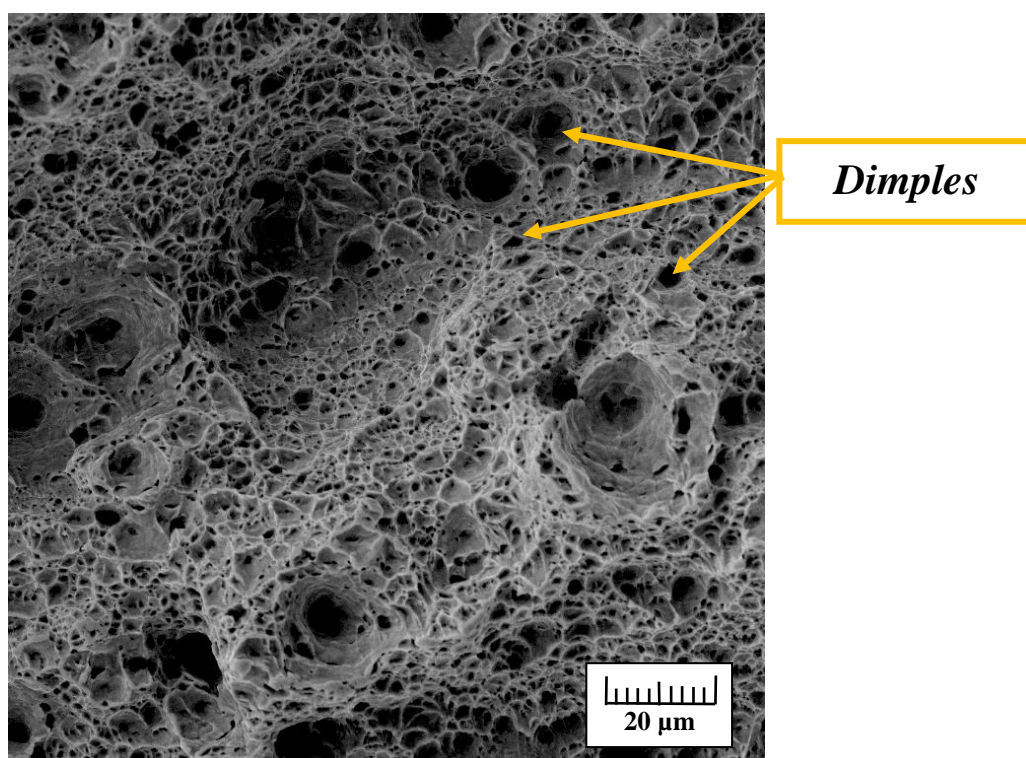


Fonte: (Autoria própria)

Com 1500x de aumento, a Figura 04 apresenta em maior detalhe a zona fibrosa do CP e permite observar o modo de fratura por formação e coalescimento de vazios, mais uma vez caracterizando o caráter dúctil da fratura. Os diferentes tamanhos e formatos dos vazios na fratura por *dimples* decorrem dos diferentes processos de nucleação de microvazios, uma vez que estes podem ocorrer por decoesão da interface partícula-matriz ou por fratura de partículas de segunda fase e, assim, são determinados por fatores como formato e tamanho de partículas de segunda fase, estado de tensões, coesão interfacial, fração volumétrica de partículas e resistência da matriz do material. Ademais, a deformação plástica sofrida no ensaio de tração

permite que os microvazios formados primeiro expandam seu volume e coalesçam com vazios formados posteriormente por partículas menores (GARRISON JR; MOODY, 1987).

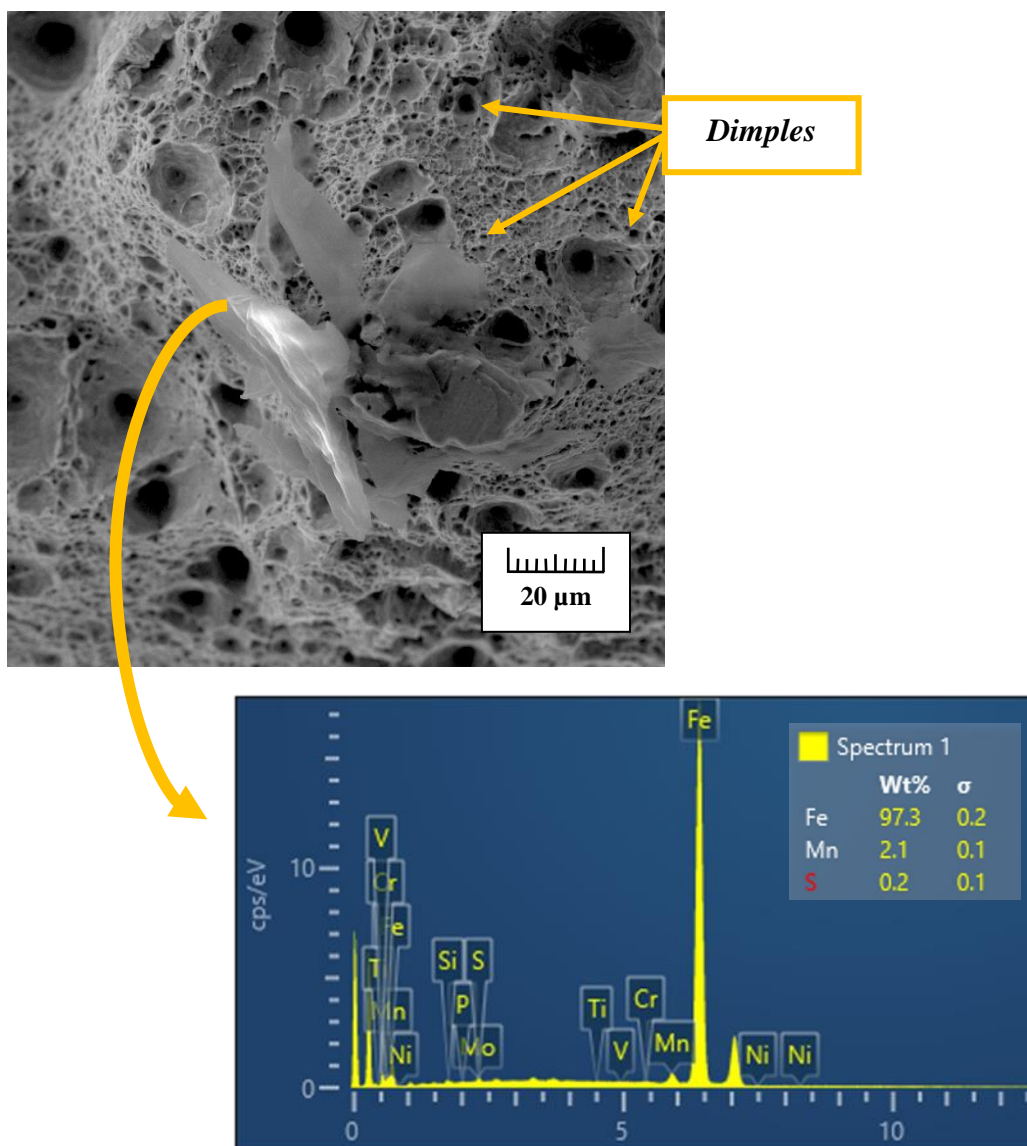
Figura 04 – Formação de *dimples* na zona fibrosa do corpo de prova da C2. Aumento de 1500x.



Fonte: (Autoria própria)

As análises de fratura de C1 apresentaram aspecto de fratura semelhantes ao já exibidos para C2. Entretanto, na Figura 05 visualiza-se uma inclusão com formato ligeiramente alongado, a qual foi posteriormente caracterizada, por espectroscopia por energia dispersiva (EDS), como sendo de FeMnS. É relatado na literatura corrente que inclusões globulares de MnS podem ser fortes aliadas às propriedades do material, uma vez que atuam como substratos para a nucleação de ferrita acicular (MADARIAGA; GUTIÉRREZ, 1997) – microestrutura capaz de aliar resistência mecânica e tenacidade com considerável eficiência (KRAUSS; THOMPSON, 1995) – e, além disso, podem evitar a fragilização à quente do metal (pelo combinação do Mn com o S). Todavia, inclusões com morfologia alongada de sulfeto de manganês podem ter efeitos deletérios, haja vista que são potenciais sítios de início de propagação de trincas induzidas pelo hidrogênio em aços utilizados em meio *sour* – como, por exemplo, o aço API 5L X80 (TAIRA et al., 1981).

Figura 30 – Análise da superfície de fratura de C1. Aumento de 1500x.



Fonte: (Autoria própria)

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente pesquisa, as propriedades mecânicas de chapas de aço API 5L X80 fabricadas no Brasil, com diferentes espessuras e composições químicas, e utilizadas no setor de petróleo e gás foram investigadas. Ademais, as superfícies de fratura foram analisadas e caracterizadas por MEV. Os resultados mostraram que a chapa de maior espessura – devido aos menores teores de alguns elementos de liga e, possivelmente, às características do processo de fabricação (como condições de laminação e resfriamento) – apresentou limite de escoamento e de resistência inferiores àqueles estipulados pela norma API 5L para o grau X80, indicando que a especificação mais adequada para tal chapa é o grau X70. Os corpos de prova apresentaram



fratura em formato elíptico, com características de fratura dúctil. A chapa de menor espessura apresentou inclusões de sulfeto de manganês com formato alongado, a qual pode ser prejudicial às aplicações em ambientes contendo hidrogênio, evidenciando a necessidade do uso de técnicas de globulização de inclusões na rota de fabricação.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora – DT Nível 2 (bolsa nº 308251 / 2020-2), e à Agência de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para concessão de bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

API 5L. Specification for Line Pipe. **American Petroleum Institute**, v. 42, n. July 1, 2013, p. 153, 2013. DOI: 10.1520/G0154-12A.

ARAÚJO, Bruno Allison. Avaliação do Nível de Tensão Residual e Susceptibilidade à Fragilização Por Hidrogênio em Juntas Soldadas de Aços API 5L X80 Utilizados para Transporte de Petróleo e Gás. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande**, 2013.

ASM HANDBOOK. Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. **ASM International**, p. 1063, 1990.

ASTM E8/E8M-16A. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, p. 1–30, 2016. DOI: 10.1520/E0008.

BRUSCHI, Roberto; GENTILE, Manuela; TORSALLETTI, Enrico. Sour Service Challenges. **Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference**. Abu Dhabi, UAE Society of Petroleum Engineers, 2017. DOI: 10.2118/188300-MS.

GARRISON JR, W. M.; MOODY, N. R. Ductile fracture. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 48, n. 11, p. 1035–1074, 1987.

GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D.; REIS, J. S. S. Um panorama do desenvolvimento recente de chapas grossas e suas aplicações. **Corte e Conformação de Metais**, v. 2, p. 78–93, 2006.

HIPPERT JR, E. Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e

aplicação de curvas de resistência  $J$ - $\Delta a$  para previsão de colapso em dutos. **Tese (Doutorado)** - **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2004.

HOYOS, J. J.; MASOUMI, M.; PEREIRA, V. F.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; PAES, M. T. P.; AVILA, J. A. Influence of hydrogen on the microstructure and fracture toughness of friction stir welded plates of API 5L X80 pipeline steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 41, p. 23458–23471, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.210>.

KRAUSS, George; THOMPSON, Steven W. Ferritic Microstructures in Continuously Cooled Low- and Ultralow-carbon Steels. **ISIJ International**, v. 35, n. 8, p. 937–945, 1995. DOI: [10.2355/isijinternational.35.937](https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.937).

LI, Xue; XIE, Fei; WANG, Dan; XU, Changhao; WU, Ming; SUN, Dongxu; QI, Jianjing. Effect of residual and external stress on corrosion behaviour of X80 pipeline steel in sulphate-reducing bacteria environment. **Engineering Failure Analysis**, v. 91, p. 275–290, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.016>.

MADARIAGA, I.; GUTIÉRREZ, I. Nucleation of acicular ferrite enhanced by the precipitation of CuS on MnS particles. **Scripta Materialia**, v. 37, n. 8, p. 1185–1192, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(97\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00229-7).

SHIN, Sangyong; HONG, Seokmin; BAE, Jin; KIM, Kisoo; LEE, Sunghak. Separation Phenomenon Occurring during the Charpy Impact Test of API X80 Pipeline Steels. **Metallurgical and Materials Transactions A-physical Metallurgy and Materials Science - Metall Mater Trans A**, v. 40, p. 2333–2349, 2009. DOI: [10.1007/s11661-009-9943-9](https://doi.org/10.1007/s11661-009-9943-9).

SILVA, Maurício de Carvalho. Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80. p. 144, 2009.

STROHAECKER, Telmo Roberto. Mecânica da fratura. **Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)**, p. 99, 2012.

TAIRA, T.; TSUKADA, K.; KOBAYASHI, Y.; INAGAKI, H.; WATANABE, T. Sulfide Corrosion Cracking of Linepipe for Sour Gas Service. **CORROSION**, v. 37, n. 1, p. 5–16, 1981. DOI: [10.5006/1.3593840](https://doi.org/10.5006/1.3593840).

VERVYNCKT, Stephanie; THIBAU, Philippe; VERBEKEN, Kim. Effect of Niobium on the Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Microalloyed Steels After Recrystallization-Controlled Rolling. **Metals and Materials International**, v. 18, p. 37–46, 2012. DOI: [10.1007/s12540-012-0005-2](https://doi.org/10.1007/s12540-012-0005-2).