

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PROPRIEDADES DE ENGENHARIA E VERDADEIRAS DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750

Vinycius Tavares Heuser, vinyciusth24@gmail.com¹
Bruno da Silva de Paiva, bruno0paiva22@gmail.com¹
André Rocha Pimenta, andre.pimenta@ifrj.edu.br¹⁻²

¹ Laboratório de Instrumentação e Simulação Computacional – LISCOMP, Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ, Rua Sebastião Lacerda, s/nº, Centro, Paracambi – RJ, Brasil,

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPG- EM, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rua Fonseca Teles, 121, São Cristóvão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil,

Resumo. Este estudo investiga o comportamento mecânico do aço inoxidável super duplex UNS S32750 após tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, com foco na análise comparativa entre propriedades de engenharia e verdadeiras. Corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, e os dados obtidos permitiram a construção das curvas tensão-deformação correspondentes. A partir dessas curvas, foram calculadas propriedades verdadeiras utilizando relações logarítmicas clássicas. Os resultados mostraram que as propriedades verdadeiras fornecem uma descrição mais precisa do comportamento plástico do material, principalmente após o limite de escoamento, revelando diferenças significativas em relação às propriedades de engenharia tradicionalmente utilizadas. A análise das superfícies de fratura por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou mecanismos de fratura predominantemente dúctil, com presença de dimples. O estudo destaca a importância da consideração das propriedades verdadeiras para aplicações que envolvem maior precisão em projetos estruturais e industriais que utilizam este tipo de aço.

Palavras chave: Superduplex. Solubilização. Envelhecimento. Tensão-Deformação Verdadeira

Abstract. This study investigates the mechanical behavior of super duplex stainless steel UNS S32750 after solution and aging heat treatments, focusing on a comparative analysis between engineering and true properties. Test specimens were subjected to tensile tests, and the obtained data allowed the construction of the corresponding stress-strain curves. From these curves, true properties were calculated using classical logarithmic relationships. The results showed that true properties provide a more accurate description of the material's plastic behavior, especially after the yield limit, revealing significant differences compared to traditionally used engineering properties. Fracture surface analysis by scanning electron microscopy (SEM) revealed predominantly ductile fracture mechanisms, with the presence of dimples. The study highlights the importance of considering true properties for applications requiring greater precision in structural and industrial designs using this type of steel.

Keywords: Superduplex. Solution. Aging. True Stress-Strain.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os aços inoxidáveis (AI) tem se tornado o objeto de diversas pesquisas de desenvolvimento e inovação, isso se dá pelo crescimento das indústrias petroquímicas, nucleares, químicas e alimentícias. O meio industrial possui uma demanda muito grande de melhoria de processo, devido a competitividade do mercado e as exigências em projetos cada vez mais complexos, para garantia de uma maior produtividade a empregabilidade dos AI foi fundamental para o desenvolvimento da indústria.

Com o crescimento da produção e do estudo dos AI, surgiram os aços inoxidáveis duplex (AID), que consistem em ligas metálicas bifásicas, compostas pelas fases ferrita (α) com microestrutura cubica de corpo centrado (CCC) e austenita (γ) com a microestrutura cubica de face centrada (CFC) em proporções aproximadamente iguais (50% ferrita e 50% austenita), as frações volumétricas das fases e dos elementos de liga, resultam em mudanças significativas na resistência mecânica e, principalmente, na resistência à corrosão por pite. Estas ligas foram desenvolvidas com o objetivo de combinar as propriedades desejáveis dos aços inoxidáveis ferríticos e dos austeníticos em um único material. Sua composição química é caracterizada por elevados teores de cromo (Cr), molibdênio (Mo) e níquel (Ni), podendo conter

outros elementos de liga. Como resultado, os AID apresentam excelente resistência mecânica, uma boa tenacidade e uma notável resistência à corrosão (Anschau & Tamiasso, 2009).

Uma variação aprimorada desses materiais são os aços inoxidáveis super duplex (AISD), também chamados de aços austeno-ferríticos que se distinguem por conter teores ainda maiores de elementos de liga, especialmente Cr, Mo, Ni e, em alguns casos, o tungstênio (W). Essa composição mais rica garante aos AISD uma maior resistência à corrosão por pite, melhor desempenho mecânico e maior resistência ao escoamento, tornando-os altamente adequados para aplicações severas, como na indústria petrolífera (Tavares et al., 2010). O desempenho à corrosão é comumente avaliado pelo índice de resistência equivalente à corrosão por pite, PRE (Pitting Resistance Equivalent), cuja fórmula varia conforme a presença de tungstênio na liga:

$$PRE_N = \%Cr + 3,3 * (\%Mo) + 16 * (\%N) \quad (1)$$

$$PRE_W = \%Cr + 3,3 * (\%Mo + (0,5\% * W)) + 16 * (\%N) \quad (2)$$

As equações Eq.(1) e Eq.(2) são estabelecidas conforme a norma ASTM A890. Para serem classificados como super duplex, os aços devem apresentar PREN superior a 40. A utilização do PREN ou do PREW é comumente usada para ranquear diversos tipos de aços inoxidáveis, quanto a resistência à corrosão localizada como por pites. No caso de aços duplex, o PRE é usado para diferenciar os aços ditos duplex

Embora ligas à base de níquel apresentem propriedades superiores em resistência à corrosão e em propriedades mecânicas, seu custo é bem mais elevado o que restringe bastante sua aplicação. Nesse contexto, os AISD oferecem uma alternativa com excelente custo-benefício, sendo amplamente utilizados em tubulações e equipamentos sujeitos a ambientes agressivos (Lima et al., 2005).

No entanto, os AISD possuem microestrutura metaestável, o que os torna suscetíveis à formação de fases deletérias quando expostos a temperaturas entre 300 e 1000 °C. Durante tratamentos térmicos indevidos, essas fases secundárias podem precipitar, principalmente devido ao alto teor de elementos de liga e à maior taxa de difusão da fase ferrita, favorecida pela estrutura CCC (Nóbrega, 2022).

O tratamento térmico por solubilização, geralmente realizado entre 1000 e 1150 °C, visa dissolver precipitados, reduzir o encruamento que é utilizado como mecanismo de endurecimento e equilibrar a proporção entre as fases, promovendo mudanças e até mesmo melhorias nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão (Silva, 2011). Contudo, para o envelhecimento se faz necessário a exposição a temperaturas intermediárias entre 400°C e 475°C que para este trabalho favorece a formação de fases como a alpha linha (α'), que afeta negativamente o desempenho do material gerando mudanças significativas nas propriedades mecânicas desses materiais diminuindo o alongamento, a resistência ao impacto e, principalmente, a resistência à corrosão por pites.

A presença dessa fase promove o empobrecimento local de cromo (sensitização) podendo ocorrer dentro ou no contorno de grão da matriz ferrítica, reduzindo a resistência à corrosão localizada, especialmente por pites (Lopez et al., 1999; Ribeiro, 2016). Além disso, a tenacidade e a resistência mecânica também são afetadas uma vez que esses elementos são retirados da matriz da liga para formar as fases intermetálicas, estudos também mostram que a formação da fase α' , resulta na fragilização do aço duplex pela fragilização da ferrita, associada a um aumento de dureza.

O estudo da chamada “fragilização de 475°C” é comumente realizada por diversas pesquisas afim de compreender esse fenômeno na ferrita nos AID, esse efeito e associado a precipitação da fase α' , conforme o trabalho de (Steudel, 2018). Segundo o trabalho a tendência é que após a solubilização do aço, tenha uma diminuição do seu limite de resistência a tração e na tensão limite de ruptura, quando envelhecidas já a tendência é que para os tempos maiores de envelhecimento ocorre o aumento dos limites de escoamento e da tensão limite de ruptura, com oscilação na tensão na ruptura.

Diversos estudos relatam as mudanças do comportamento dos aços duplex e super duplex devido à presença dessa fase deletéria, como por exemplo o trabalho de Silva (2023) que estudaram amostras de um aço inoxidável duplex envelhecidos a 475°C com diferentes tempos de permanência variando de 60 minutos até 2000 horas, os autores observaram que houve um aumento na microdureza Vickers, em função do tempo de envelhecimento, também foi avaliado que a energia de impacto Charpy diminuiu bruscamente, fatores que foram atribuídos pelos autores à precipitação da fase alfa linha.

A dissertação de mestrado de Valentim (2013) teve como principal objetivo o estudo do tempo de tratamento térmico de envelhecimento e suas influências nas propriedades mecânicas no AISD UNS S32750, concluiu que quanto mais tempo de envelhecimento maior é o ganho em resistência mecânica e no limite de escoamento de escoamento do material, relacionado de forma diretamente proporcional. Esse ganho foi atribuído a uma maior precipitação da fase α' , gerando um amento da dureza do material, foi observado que mesmo com o aumento da fragilidade do material, o mecanismo de fratura era basicamente dimples com uma mínima redução dos seus tamanhos, que é um comportamento característico da fragilização do material.

Mediante aos diversos tipos de impactos que essa fase deletéria pode causar, torna-se fundamental compreender o que o tratamento térmico de envelhecimento pode oferecer de mudanças nas propriedades mecânicas do material. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar e discutir as propriedades mecânicas do aço super duplex, que sofreu os efeitos dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, avaliando mudanças na fragilidade, no

limite de escoamento, no alongamento uniforme e na resistência mecânica do material, considerando os diferentes tempos e temperaturas de exposição dos materiais tratados.

2. METODOLOGIA

Para este trabalho de estudo das propriedades mecânicas do aço inoxidável super duplex, foram realizados ensaios no material e que por meio destes se tornou possível as discussões deste estudo. Através dos resultados obtidos pelo processo experimental pode-se comparar as propriedades dos aços nas condições solubilizado e envelhecido, com o intuito de comparar, analisar e compreender suas diferentes propriedades mecânicas.

Todas as amostras foram submetidas ao tratamento de térmico de solubilização, após isso foi realizado também o tratamento térmico de envelhecimento em algumas amostras, para que fosse realizado o ensaio de tração e como última etapa a análise da fratura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2.1. Material

O material utilizado para a realização deste trabalho, foi um aço super duplex UNS S32750. Os corpos de prova utilizados foram retirados, do material que foi recebido em forma de um tubo, fabricado pelo processo de *Mannesmann* de diâmetro externo de 115,0 mm e espessura de 7,5 mm.

2.2. Preparação dos corpos de prova

A primeira etapa realizada para este estudo foi o corte dos corpos de prova, foram feitos cortes transversais no tubo afim de obter-se as amostras para a fabricação dos corpos de prova (CP), para esse trabalho utilizamos 6 amostras. Após o processo de corte, foi realizado o tratamento térmico de solubilização a 1050 °C por 30 minutos em todas as amostras, com o intuito de reduzir o encruamento do material e manter o balanceamento na estrutura bifásica do duplex.

A próxima etapa foi realizar o tratamento térmico de envelhecimento a 400 °C em 4 amostras, sendo dividido em dois pares com tempos de permanência no forno diferentes, um par das amostras foi tratado termicamente por 4 horas e o outro par com o tempo de permanência de 8 horas. Assim foram definidas as três condições dos CPs, solubilizado 30 min, envelhecidos 4 h e envelhecidos 8 h, cada condição com dois corpos de prova.

Como etapa final da preparação dos corpos de prova, a fabricação por meio da usinagem para que os CPs seguissem recomendações das medidas do espécime 4 conforme prevê a norma ASTM E8, foram realizados 6 ensaios de tração. Os corpos de prova foram denominados com base na condição do tratamento térmico, sendo elas: SOL-1 e SOL-2 somente solubilizados; 400-4h-1 e 400-4h-2 envelhecidos durante 4 horas; 400-8h-1 e 400-8h-2 envelhecidos durante 8 horas.

2.3. Ensaios

Os ensaios de tração uniaxial, foram realizados na máquina eletromecânica universal de ensaios da marca Shijin, do modelo WDW-100E com capacidade máxima de 100 KN. Os CPs foram submetidos a ensaio de tração com a taxa de carregamento de 0,5 mm/min, velocidade prevista em norma para a realização do ensaio.

Com os corpos de prova fraturados, iniciou-se a etapa de caracterização e análise da fratura, a fractografia é um método importantíssimo para a avaliação e análise das causas da fratura, para isso foi utilizado a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi utilizado um microscópio da marca Hitachi, modelo TM4000, operando em médio vácuo, usando o detector de elétrons secundários (SE), para obter imagens topográficas detalhadas da superfície e dos mecanismos de fraturas, foram feitas imagens com ampliação variando entre as ampliações de 30x a 2000x, visando identificar melhor dos mecanismos de fraturas.

Por fim com as imagens das superfícies de fraturas obtidas pela análise de MEV, foi calculado a área transversal de cada corpo de prova da região fraturada, para que fosse possível analisar a redução de área de cada amostra, foi o utilizado software para as medições foi o Fiji.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dada a exposição aos tratamentos térmicos do aço inoxidável super duplex UNS S32750, para a realização do estudo sobre a mudança do comportamento das propriedades do material ao ser exposto a temperatura de 400 °C, foram obtidos os resultados quantitativos das propriedades mecânicas de resistência a tração. Através dos dados foi possível gerar os gráficos para a análise e os cálculos das propriedades mecânicas do aço, a análise do gráfico Tensão x Deformação foi realizada por meio do software OriginLab, através dos dados foi possível a análise e os cálculos das propriedades mecânicas do aço.

Os dados apresentados na Tab. 1 são os valores de média e desvio padrão das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração, sendo elas: Tensão Limite de Escoamento (σ_E); Tensão Limite de Resistência (σ_R); Deformação Uniforme ($\epsilon_{\text{Uniforme}}$); Deformação Total (ϵ_{Total}); Redução de Área (RA). Observa-se um comportamento muito semelhante

das propriedades dos CPs que sofreram envelhecimento, as tensões de escoamento com a diferença de aproximadamente 2%, nota-se também que o alongamento uniforme foi próximo aproximadamente 8%, isso mostra que a diferença do tempo de permanência entre as duas condições não contribuiu com o aumento substancial da fragilidade (Moreira e Waldemar, 2009).

A fragilização do aço pode ter seus efeitos observados na redução dos alongamentos e na redução da área, a precipitação da fase alfa linha também tem seu efeito no aumento da resistência mecânica dos CPs que foram envelhecidos, para melhor visualização das propriedades foram gerados gráficos para esboçar o comportamento da curva, nas Fig. 1, Fig. 2 e Fig. 3 são apresentados respectivamente os gráficos de Tensão x Deformação dos corpos de prova SOL-2, 400-4h-2 e 400-8h-2.

Tabela 1. Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração (Próprio Autor)

Condição	σ_E (MPa)		σ_R (MPa)		$\epsilon_{\text{Uniforme}}$		ϵ_{Total}		RA (%)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
SOL	571,8	26,2	827,5	23,4	0,488	0,007	0,673	0,012	22,0	0,01
400 - 4h	655,6	32,7	850,5	20,6	0,315	0,002	0,486	0,022	9,0	0,007
400 - 8h	642,4	14,9	881,9	16,8	0,342	0,018	0,515	0,027	4,5	0,012

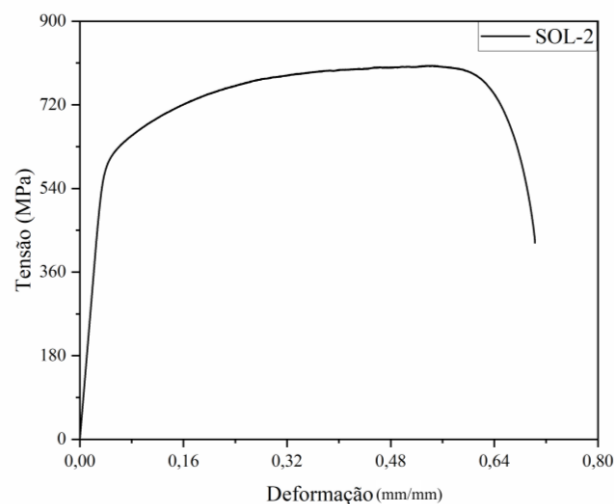


Figura 1. Gráfico TensãoxDeformação CP: SOL-2 (Próprio Autor)

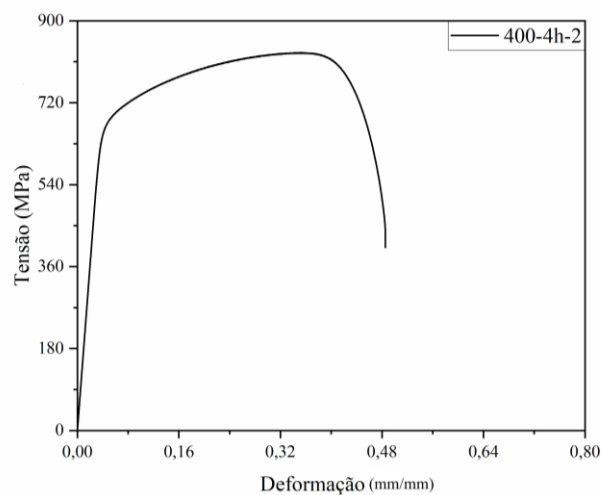


Figura 2. Gráfico TensãoxDeformação CP: 400-4h-2 (Próprio Autor)

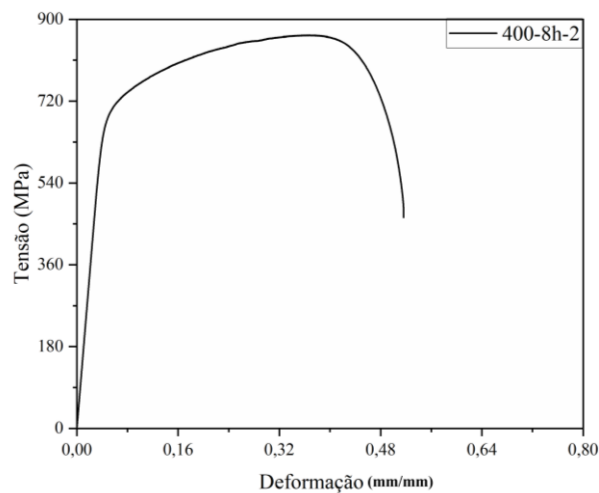


Figura 3. Gráfico TensãoxDeformação CP: 400 - 8h - 2 (Próprio Autor)

Para a análise da tensão e deformação verdadeiras foram utilizadas para a modelagem três equações para a aproximação da curva real, as equações são: Eq. 3 Hollomon (Hollomon, 1945), a Eq. 4 Ludwik (Ludwik, 1909) e a Eq.5 Voce (Voce, 1948). Os resultados da modelagem são apresentados na Tab. 2, onde os parâmetros são determinados a partir dos modelos sendo o σ_0 é o limite de proporcionalidade obtido pela análise dos dados do ensaio de tração e os outros parâmetros K, n, P1, P2 e P3 são constantes do material respectivamente chamadas de coeficiente de resistência, coeficiente de encruamento, coeficiente de rigidez, coeficiente de rigidez, coeficiente de endurecimento por deformação e o expoente de endurecimento por deformação.

$$\sigma = K_H * \varepsilon_H^n \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 + K_L * \varepsilon_L^n \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 + P_1 * \varepsilon_T + P_2 (1 - \exp(-P_3 * \varepsilon_T)) \quad (5)$$

Tabela 2. Parâmetros para curva Tensão x Deformação Verdadeira (Próprio Autor)

Condição	K _H	n _H	R ²	K _L	n _L	R ²	P ₁	P ₂	P ₃	R ²
SOL	1408,629	0,231	0,939	1231,237	0,702	0,999	1328,282	126,970	25,317	0,998
400 - 4h	1281,612	0,160	0,922	1146,162	0,693	0,998	1430,635	86,303	49,768	0,998
400 - 8h	1352,119	0,166	0,930	1188,093	0,658	0,998	1501,726	106,823	53,134	0,998

A curva modelada que apresentou melhores resultados nesse estudo foi a curva modelada com a equação que Ludwik, possuindo um coeficiente de determinação de 0,999, no modelo de Ludwik o valor de “n” mede a capacidade de um material se deformar plasticamente indicando sua ductilidade e sua tendência ao sofrer encruamento, valores mais próximos de 1 significa que o material se deforma de maneira mais uniforme, o que está de acordo com os resultados oriundos do ensaio, mostrando que o aço solubilizado possui um valor de “n” maior que o aço envelhecido (Dieter, et al., 1986)

Na equação de Voce os valores de P1 correspondem a um coeficiente de rigidez médio, maiores em aços com durezas mais altas, o que novamente corresponde bem as propriedades já encontradas. Os valores de P3 influenciam na transição do regime elástico para o plástico, já os valores de P2 estão relacionados a diferença entre os limites de escoamento e de proporcionalidade (Lemaitre e Chaboche, 1990).

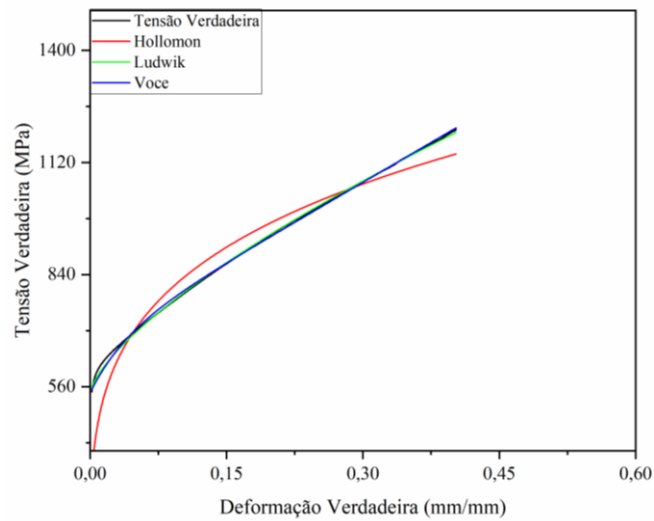


Figura 4. Gráfico Tensão x Deformação Verdadeira CP: SOL-2 (Próprio Autor)

As Figuras 5, 6 e 7, mostram a superfície de fratura que foram obtidas através do ensaio de tração, as amostras foram analisadas no MEV e que foram utilizadas também para o cálculo da redução de área dos corpos de prova, Fig. 8 e 9 são as imagens da fratura do CP SOL – 2, Fig. 10 e 11 são referentes ao CP 400 – 4h – 2, e por fim as Fig. 12 e 13 são as imagens da fratura do CP 400 – 8h – 2.

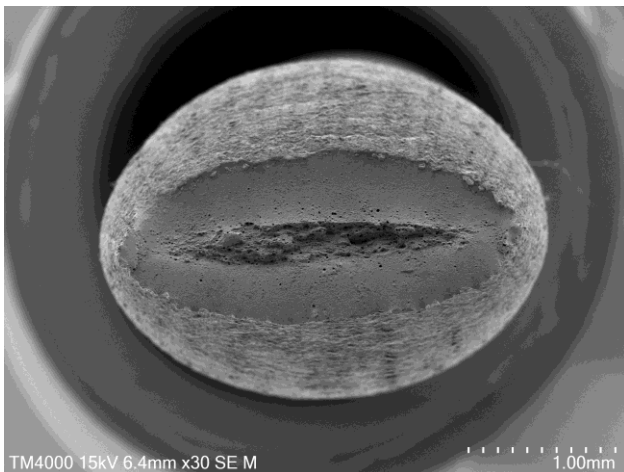


Figura 5. Superfície de fratura CP: SOL-2 (Próprio Autor)

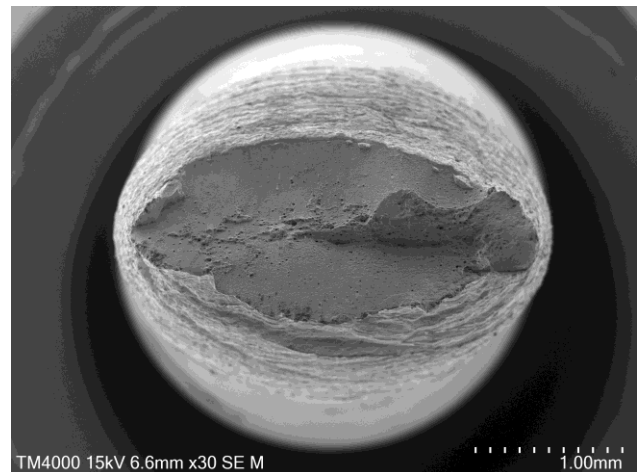


Figura 6. Superfície de fratura CP: 400-4h-2 (Próprio Autor)

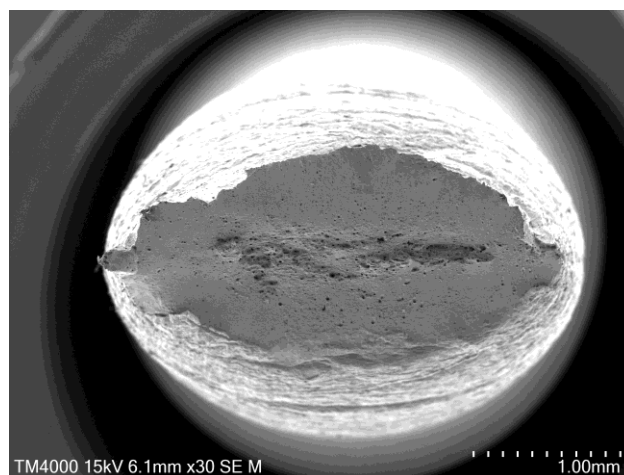


Figura 7. Superfície de fratura CP: 400-8h-2 (Próprio Autor)

Figura 7. Superfície de fratura CP: 400-8h-2 (Próprio Autor)

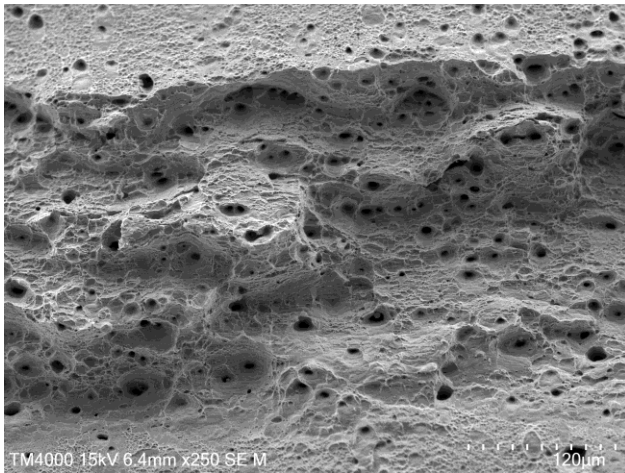


Figura 8. Fratura x250 CP: SOL-2 (Próprio Autor)

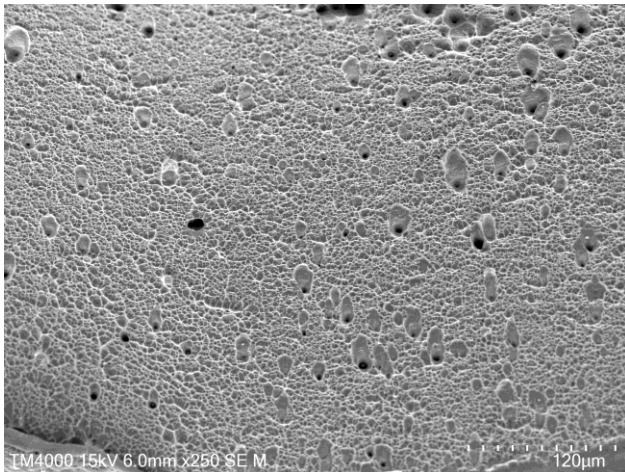


Figura 10. Fratura x250 CP: 400-4h-2 (Próprio Autor)

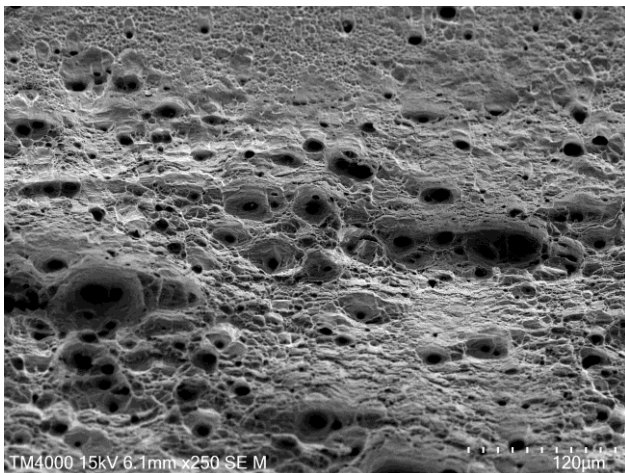


Figura 12. Fratura x250 CP: 400-8h-2 (Próprio Autor)

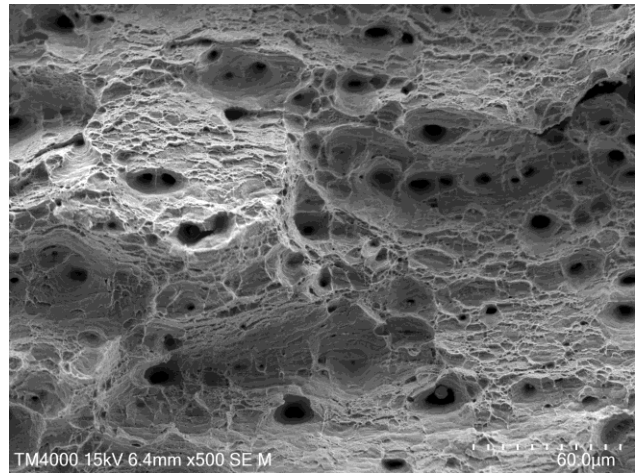


Figura 9. Fratura x500 CP: SOL-2 (Próprio Autor)

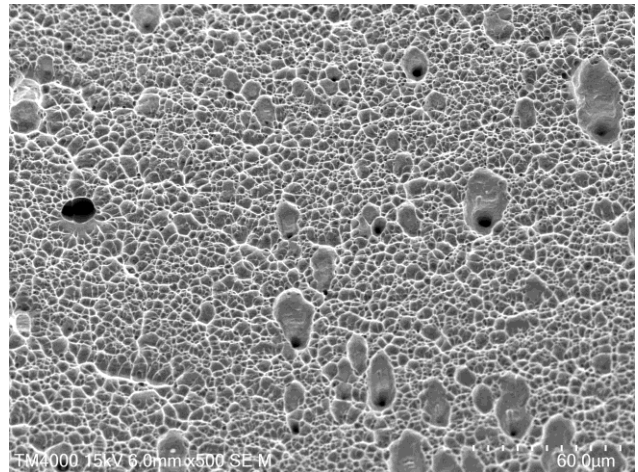


Figura 11. Fratura x500 400-4h-2 (Próprio Autor)

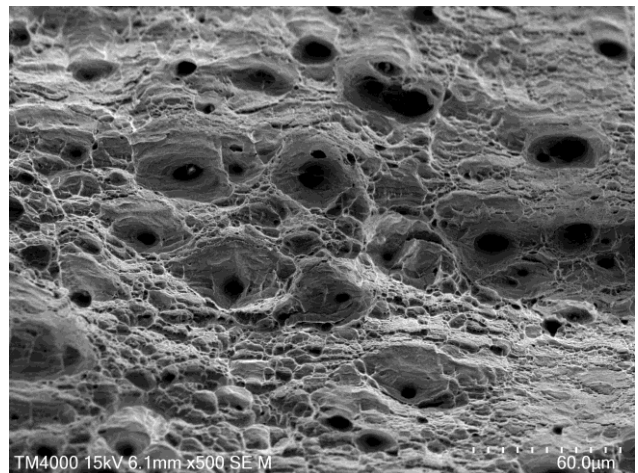


Figura 13. Fratura x500 400-8h-2 (Próprio Autor)

As imagens obtidas pela análise fractográfica indicam que em todas as condições e todos os CPs, apresentaram somente fraturas dúcteis, com empescoamento da região da fratura gerando uma redução da área e alongamento do

material. Apresentando basicamente dimples com diferentes diâmetros mostrando que houve uma pequena fragilização, mas não o suficiente para uma fratura mista ou frágil.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho de analisar as propriedades mecânicas do aço inoxidável super duplex UNS S32750, que foi tratado termicamente em diferentes condições, teve seus resultados dos experimentais apresentados, averiguados, discutidos e com base na revisão bibliográfica da literatura já conhecida, pode-se concluir que:

- Os tratamentos térmicos de envelhecimento a 400 °C, nos tempos de 4 horas e 8 horas induziram à precipitação da fase α' no aço super duplex UNS S32750.
- O aço estudado apresentou suaves mudanças nas suas propriedades, obteve-se um ganho de propriedades mecânicas nos aços envelhecidos apesar da perda da propriedade de deformação, mesmo abaixo da temperatura de fragilização de 475°C.
- O tratamento de solubilização e o de envelhecimento não tiveram influência na mudança do comportamento da fratura, visto em todas as condições dos CPs as fraturas apresentaram comportamento dúctil, em sua totalidade dimples.

5. REFERÊNCIAS

- ASTM A890/A890M. Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel-Molybdenum Corrosion-Resistant, Duplex (Austenitic/Ferritic) for General Application. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- ASTM E8/E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.
- Anschau, L.S.N e Tamiasso, M.C., 2009. “Avaliação quantitativa das fases presentes no aço inoxidável duplex UNS S32304”. Projeto de graduação, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Dieter, G. E.; Bacon, D. J. Mechanical Metallurgy. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- Hollomon, J, H. Tensile deformation TransAIME 162:268–290, 1945.
- Lemaitre, J.; Chaboche, J. L. Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press, 1990. (Cap. 5: Modelos de plasticidade).
- Lima, et al., 2005. “Efeito da temperatura na inter-relação microestrutura / propriedades mecânicas de um superduplex 2507”. 60º Congresso Anual da ABM – Internacional. Belo Horizonte, MG.
- Lopes, J. A. M., Macedo, W. A. A. M. “Estudo da fragilização a 475 °C de um aço AISI 444”. CONGRESSO ANUAL DA ABM, XX., 2009, Belo Horizonte.
- Lopez, N., Cid, M., Puiggali, M., 1999. “Influence of α -phase on mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steels”. *Corrosion Science*, Vol. 41, n. 8, p. 1615-1631.
- Ludwik P Element der Technologischen Mechanik. Springer, Berlin, 1909.
- Nóbrega, B.M.C. 2022. “Avaliação do aço inoxidável duplex e superduplex mediante aplicações de ensaios não destrutivos”. Trabalho de Conclusão de Curso II, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Silva, A., 2011. “Efeito da temperatura de solubilização na precipitação de fase sigma de um aço superduplex”. Dissertação de pós-graduação, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- Silva, V. G. “Propriedades mecânicas e de resistência à corrosão das juntas de aços inoxidáveis duplex e superduplex soldadas por processos a arco elétrico: uma revisão na literatura”. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Campus de Russas, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2023.
- Steudel, G. “Estudo da cinética de “fragilização de 475°C” e seus efeitos nas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis AISI 430 e SAF 2507”. 2018. [X] f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.
- Tavares, S.S.M., et al., 2010. “Influence of microstructure on the corrosion resistance of hyperduplex stainless steel”. *Materials and Corrosion*, Vol. 61, n. 4.
- Valentim, B. L. “Estudo da influência do tempo de tratamento térmico a 475°C nas propriedades mecânicas do aço inoxidável superduplex UNS S32750”. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.
- Voce, E. The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. *J Inst Met* 74:537–562, 1948.