

# ANÁLISE MICROESTRUTURAL E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE AÇOS INOXIDÁVEIS SUBMETIDOS À USINAGEM

Amanda Leite Polastro <sup>1</sup>; Vanessa Seriacopi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *As respostas dos materiais, no que diz respeito a processos de usinagem e acabamento superficial, podem aparecer decorrentes de propriedades mecânicas, aspectos microestruturais e heterogeneidades, por exemplo. No caso de aços inoxidáveis austeníticos, as aplicações, desde implantes até componentes aeroespaciais, são definidas em função da composição química e características, que resultam em resistência à corrosão, à fadiga e à remoção de material, e requisitos adequados em termos de comportamento termomecânico. Neste trabalho, o objetivo foi investigar a influência da microestrutura e das propriedades mecânicas na topografia gerada durante o fresamento de aços inoxidáveis. Para isso, conduziram-se experimentos como análise da composição química, caracterizações microestruturais; ensaios de tração e microdureza Vickers nos aços AISI 303 e 304; usinagem a seco por fresamento destes aços e posteriormente, caracterização microestrutural após essas operações de usinagem e avaliação dos parâmetros de rugosidade devido às condições de processo impostas. Os resultados mostraram o efeito das propriedades mecânicas e heterogeneidades dos materiais na topografia final obtida.*

## Introdução

A busca por um conjunto amplo de informações a respeito da microestrutura e do comportamento mecânico de materiais é essencial para a tomada de decisões em processo de fabricação, sendo envolvidos aspectos que abrangem desde a seleção de materiais para peças e ferramentas, passando por requisitos geométricos e superficiais, e atingindo aspectos de solicitações termomecânicas responsáveis por alterar o funcionamento do sistema como um todo.

Nesta abordagem, surgem índices que relacionam a análise e classificação do tipo de deformação (plástica ou elástica) e as consequências no contato sofridas por um material submetido a processos de usinagem. Recentemente, a análise do índice de plasticidade é relatada em alguns estudos, com objetivos distintos como, por exemplo, a descoberta e proposta de novos métodos e técnicas de cálculo desse parâmetro (Pawlus et al., 2019), ou até mesmo a descoberta de relações entre esse índice e outras propriedades dos materiais, buscando-se analisar parâmetros relevantes aos processos de usinagem.

Tratando-se da análise microestrutural, entende-se que seu estudo é bastante relevante aos processos de usinagem. Estudos atuais nessa área envolvem a análise da adição de outros componentes químicos à matriz do aço austenítico, obtendo-se um material heterogêneo e buscando verificar como esses elementos modificam suas propriedades e influenciam os processos e o cavaco resultante da usinagem desse material. Assim sendo, Chagas e Machado (2015) concluíram, por meio de simulações dos processos de usinagem e da microestrutura, que a adição de sulfeto de manganês (MnS) melhora as condições de atrito e resistência ao desgaste da ferramenta de usinagem quando atua na interface com a peça a ser usinada e a usinabilidade do aço, reduzindo as forças de corte. Malakizadi *et al.* (2019) descreveram um modelo constitutivo para a análise das forças atuantes durante os processos de usinagem. Nesse artigo, foram investigados que os modelos dos processos de usinagem baseados em relações físicas e micromecânicas fornecem informações adicionais em relação às superfícies usinadas.

Neste cenário, a análise e desenvolvimentos científicos e tecnológicos voltados a engenheirar superfícies e projetar materiais que atendam aplicações em sistemas mecânicos pode ser baseada em modelamento de parâmetros de processos de fabricação, com conjuntos de propriedades mecânicas, microestrutura e aspectos superficiais do material para sua determinação.

O objetivo deste trabalho consistiu em conduzir caracterizações microestrutural, mecânica e topográfica do aço inoxidável austenítico AISI 303, incorporando análises sobre o efeito do processo de usinagem por fresamento, propiciando dados e discussões de efeitos de inclusões (MnS) e deformações neste material heterogêneo. Para tanto, o aço inoxidável austenítico AISI 304, tido como homogêneo, foi utilizado como base de comparação para o estudo da influência de características microestruturais.

## **Material e Métodos**

Para atingir os objetivos propostos, as seguintes etapas de procedimentos metodológicos foram estabelecidas:

(i) Caracterização microestrutural e composição química: A microestrutura inicial e a composição química dos corpos de prova de aços inoxidáveis austeníticos foram caracterizadas antes dos testes de usinagem, com o intuito de examinar as diferenças entre os aços AISI 303 e 304. Para a realização dos experimentos, as amostras foram primeiramente cortadas e separadas de uma barra cilíndrica de Ø1” nas regiões longitudinal e transversal, além de ter sido executado embutimento a quente em baquelite. Posteriormente, essas amostras foram submetidas a um lixamento úmido com lixas de carbetto de silício (SiC), nas granulometrias #200, #320, #400, #600, #800 e #1200. O polimento foi conduzido com pasta de diamante nas sequências 3µm e 1µm. As amostras foram limpas em banho ultrassônico, e submetidas à observação microestrutural. Em uma segunda abordagem, as amostras foram submetidas durante 60 segundos a um ataque eletrolítico com 10% de ácido oxálico em solução aquosa. A observação dessas amostras foi realizada por meio do microscópio óptico Olympus BX60M. Por sua vez, a composição química dos aços foi mensurada fazendo uso da técnica de fluorescência de raios-X por energia dispersiva;

(ii) Ensaio de microdureza: foram conduzidos em um microdurômetro Vickers – Mitutoyo HM-100, na seção transversal e longitudinal do aço inoxidável AISI 303, aplicando-se as cargas de 10 e 50 gf. Medidas de microdureza Vickers foram realizadas em cada condição. Além disso, o espaçamento entre as marcas de dureza (2,5 x medida da diagonal), a escolha de distintas regiões e o afastamento da borda foram considerados de modo a atender a norma ASTM E92 – 17 (ASTM International, 2017);

(iii) Ensaio de tração: utilizando-se a máquina universal de ensaios Losenhausen UPM 40, configurada para as condições de tração. Nesse tipo de ensaio, corpos de prova com forma cilíndrica e dimensões padronizadas (diâmetro inicial de ensaio de 12,5 mm e comprimento inicial de 50 mm) pela norma ASTM E8 (ASTM International, 2016). Os corpos de prova foram submetidos a uma força uniaxial contínua e crescente, enquanto foram feitas observações simultâneas de deslocamento. Os ensaios foram desenvolvidos sob uma velocidade de deformação de 1 mm.min<sup>-1</sup>. Os corpos de prova dos aços AISI 303 e 304 foram fixados no equipamento por castanhas, e um extensômetro foi acoplado às amostras para a definição precisa do módulo de elasticidade. A extensometria foi mantida até atingir e ultrapassar com segurança o escoamento do material, e retirada antes de atingir a carga máxima suportada pelos materiais;

(iv) Usinagem dos corpos de prova: amostras, obtidas de barras cilíndricas de aços inoxidáveis AISI 303 e 304, foram submetidas ao processo de fresamento. Foram empregados o Centro de Usinagem Romi Discovery 560, e insertos de metal duro Sandvik Coromill modelo R245-12T3 K-MM 2030, classe M, revestidas com nitreto de titânio (TiAlN+TiN).

O fresamento foi realizado com base nos respectivos parâmetros, recomendados para a ferramentas de corte especificada (Sandvik Coromant, 2021): (a) condição severa - velocidade de corte de 170 m/min; profundidade de corte de 1,0 mm; avanço correspondente a 0,2 mm/rev; rotação igual a 858,93 rpm; e condições de usinagem a seco; e (b) condição moderada - velocidade de corte de 170 m/min; profundidade de corte de 0,35 mm; avanço correspondente a 0,1 mm/rev; rotação igual a 429,47 rpm; e condições de usinagem a seco. Em adição, um cabeçote de faceamento com 63 mm de diâmetro e 5 insertos foram empregados. Portanto, para as operações de faceamento dos corpos de prova embutidos, foram tidas em consideração duas amostras para cada tipo de aço (AISI 303 e 304), e duas amostras para cada tipo de seção da barra da qual foi obtida o corpo de prova, longitudinal ou transversal. Assim sendo, estabeleceu-se nomenclaturas, nas quais o número 303 ou 304 indica o tipo de aço, e as letras L e T indicam longitudinal ou transversal, respectivamente. Por exemplo, 303T indica a amostra de aço AISI 303 – seção transversal;

(v) Medições de rugosidade: a rugosidade das amostras dos aços 303 e 304, seções transversal e longitudinal, também foi medida por interferometria óptica (método sem contato), utilizando-se o equipamento CCI-MP Taylor Hobson. Esses resultados foram obtidos para ambos os aços na condição experimental após serem executadas as operações de usinagem, para investigar quesitos de superfície usinada com a influência das considerações de projeto de materiais. A área de medição consistiu em 0,86 x 0,86 mm<sup>2</sup>, aplicando-se uma lente de 20X.

## Resultados e Discussão

### Composição química

Foi realizada a análise da composição química dos dois aços estudados nesse trabalho (AISI 304 e 303). Para cada aço, foram analisadas 3 amostras e o valor médio da composição química (% massa) dessas amostras foi comparado com os valores previstos na norma ISO 15510:2014 (International Standard Organization, 2014).

Para o aço 303, obteve-se a composição química reportada na Tabela 1. Apesar da porcentagem de Mn encontrada na amostra ser superior à prevista pelas normas, ela não descaracteriza o aço 303, visto que o S é um elemento limitante para a formação de MnS e sua composição está dentro do aceite pelas normas. Por sua vez, para o aço 304, os resultados da análise química podem ser observados na Tabela 1. Nesse caso, a porcentagem dos componentes presentes nas amostras analisadas está dentro do previsto pelas mesmas normas. Além disso, a composição química medida para essas amostras aproxima-se também da composição química desses mesmos materiais especificada segundo o fabricante (Dalsteel, 2021).

Tabela 1 – Composição química dos aços AISI 303 e AISI 304 [% massa].

Elemento	Aço AISI 303		Aço AISI 304	
	Resultado – 3 medições	Norma ISO 15510:2014	Resultado – 3 medições	Norma ISO 15510:2014
C	0,058	≤ 0,12	0,061 ± 0,001	≤ 0,07
Cr	15,97 ± 0,04	17,0 – 19,0	16,79 ± 0,03	17,5 – 19,5
Ni	9,13 ± 0,02	8,0 -10,0	9,10 ± 0,02	8,0 -10,5
Mn	2,11 ± 0,03	≤ 2,00	1,87 ± 0,01	≤ 2,00
S	0,32 ± 0,01	≥ 0,15	0,031 ± 0,002	≤ 0,03
Si	0,463 ± 0,002	1,00	0,54 ± 0,02	≤ 1,00
P	0,024 ± 0,001	≤ 0,060	0,027 ± 0,002	≤ 0,04
Mo	0,58	-	0,409 ± 0,008	-
N	-	-	-	≤ 0,10
Outros	< 0,4 (Cu)	≤ 0,10	< 0,4 (Cu)	-
Fe	Em balanço	Em balanço	Em balanço	Em balanço

### *Caracterização microestrutural pré-usinagem*

As micrografias das amostras do aço AISI 303 sem ataque químico são fornecidas na Figura 1, seções longitudinal e transversal respectivamente, com um aumento de 100X no microscópio óptico. Pode-se observar que, no caso da amostra 303SL (Figura 1a), há a presença de inclusões dispersas na matriz, conforme reportado por Chagas e Machado (2015). Elas representam as partículas de sulfeto de manganês (MnS) precipitadas no aço 303. Em função do processo de fabricação do material, tais partículas assumem o formato alongado. Na Figura 1b, pode-se visualizar que as partículas de MnS adicionadas à matriz do aço assumem um formato pontual / esférico no caso 303ST.

Por sua vez, na Figura 2 podem ser visualizadas as amostras do aço AISI 304, sob as mesmas condições anteriores, ou seja, seção longitudinal 304SL (Figura 2a) e seção transversal 304ST (Figura 2b), ambas sem o ataque com 100X de aumento. Nesse caso, para as duas considerações, é visível apenas pequenas regiões pontuais de inclusões quase imperceptíveis, visto que a fração volumétrica de MnS presente nesse aço 304 não é muito menor em relação à fração presente no aço 303. É relevante também notar que, nesta condição experimental, não são visíveis maclas de recozimento, nem os grãos austeníticos presentes na matriz dos aços analisados devido a não realização do ataque metalográfico.

Figura 1 – Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 303 (sem ataque químico): aumento de 100X.

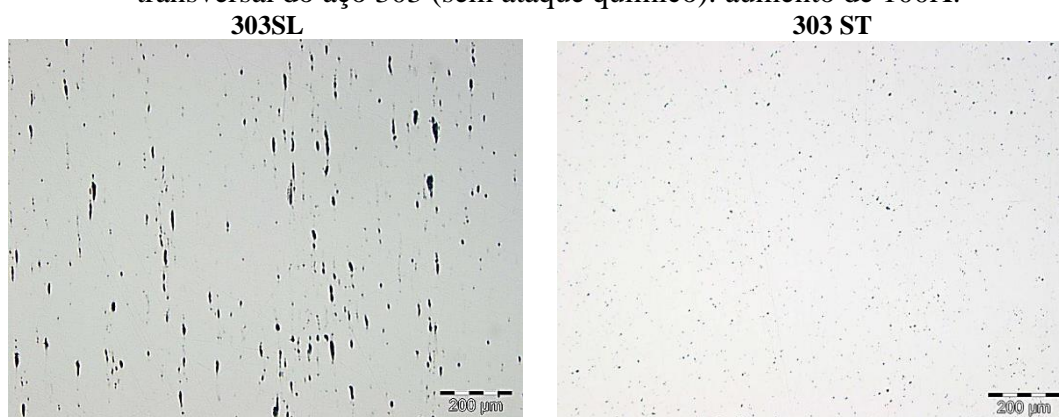
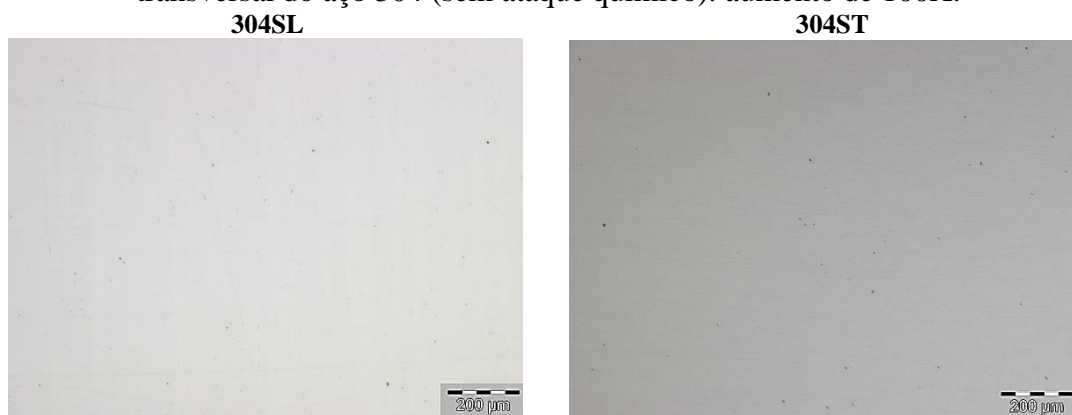


Figura 2 – Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 304 (sem ataque químico): aumento de 100X.



As Figuras 3 e 4 são direcionadas às microestruturas das amostras dos aços AISI 303 e 304 (SL e ST) respectivamente, porém com a realização do ataque com ácido oxálico e aumento de 200X. Devido a esse procedimento, é possível visualizar os contornos de grão e maclas de recozimento presentes na matriz de ambos os aços em estudo. Assim sendo, por

meio das micrografias apresentadas, identifica-se a microestrutura típica de aços inoxidáveis austeníticos.

Comparando-se as micrografias de ambos os aços com o aumento de 200X, de forma semelhante à condição anteriormente analisada (aumento de 100X, sem o ataque), pode-se concluir que a fração volumétrica de MnS é maior no aço 303, conforme esperado. Nas Figuras 3b e 4b, os sulfetos são vistos alongados em função da direção de laminação da matéria-prima. Além disso, tanto no aço 303 (Figura 3) quanto no caso do aço 304 (Figura 4), foram observados pites devido ao processo de ataque eletrolítico (Barbosa, 2014).

Figura 3 – Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 303 (com ataque - 10% ácido oxálico): aumento de 200X.

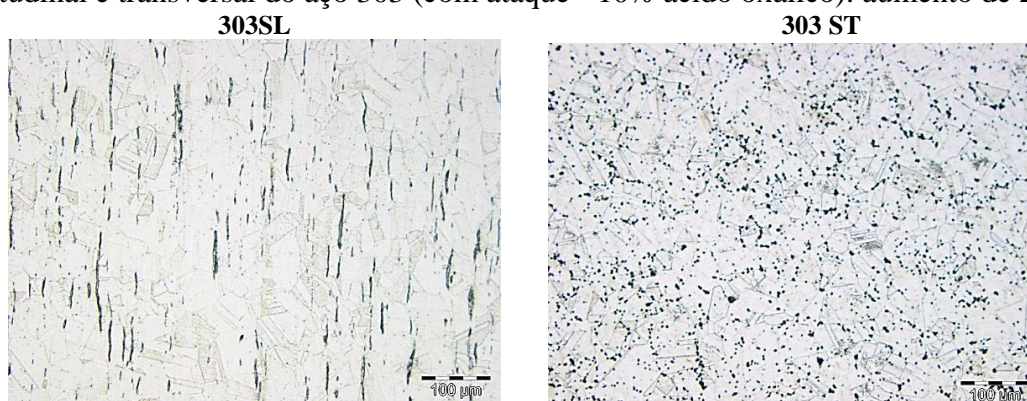
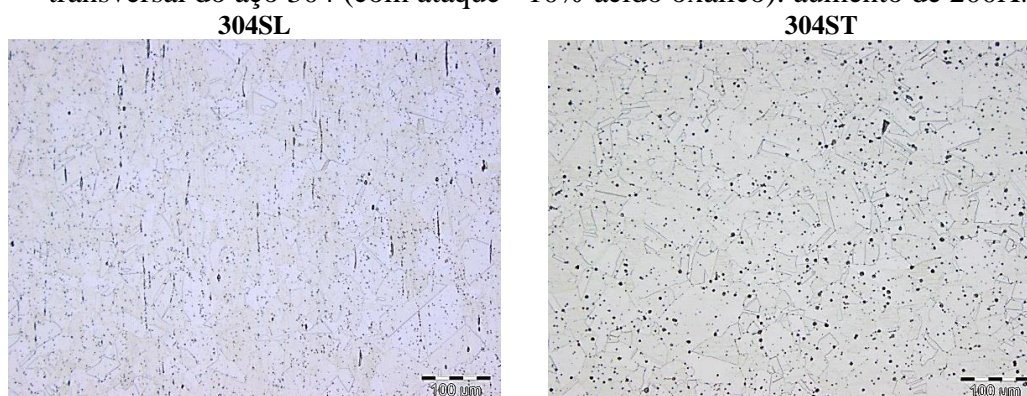


Figura 4 – Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 304 (com ataque - 10% ácido oxálico): aumento de 200X.



Em termos de usinagem, é esperado que as amostras de aço 303 com adição de partículas de MnS apresentem maior facilidade para serem usinadas em função de atuarem como concentradores de tensão (Seriacopi *et al.*, 2016). As partículas de MnS também permanecem fixas à matriz do aço e se deformam com ela, quando esse material é submetido a processos de usinagem, sem sofrer rupturas ou trincas. Por sua vez, a morfologia das inclusões (alongadas ou pontuais) afetam o campo de tensões resultantes no corte do material (Chagas, 2015). Por isso, avaliou-se as seções longitudinal e transversal dos materiais por meio dos corpos de prova específicos.

#### *Microdureza Vickers*

Tratando-se da análise da microdureza Vickers, essas medidas para as amostras do aço inoxidável AISI 303 SL e ST, antes do processo de usinagem, foram obtidas e podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Microdureza Vickers de amostras das seções longitudinal (SL) e transversal (ST) do aço AISI 303 antes da usinagem.

	Aço 303 - SL		Aço 303 - ST		Matriz Austenítica – Aço 303 / Aço 304	
	50 gf [HV <sub>0,05</sub> ]	10 gf [HV <sub>0,01</sub> ]	50 gf [HV <sub>0,05</sub> ]	10 gf [HV <sub>0,01</sub> ]	50 gf [HV <sub>0,05</sub> ]	10 gf [HV <sub>0,01</sub> ]
	206	190	224	218	187	185
	200	190	217	219	190	194
	198	188	212	201	185	188
	188	189	211	200	186	189
	214	186	223	198	188	190
	220	195	210	208	189	185
	221	195	214	201	193	186
	209	206	224	198	190	191
	216	205	224	205	195	193
	208	197	210	198	193	190
Valores Médios e Dispersão	208 ± 10	195 ± 7	217 ± 6	205 ± 8	190 ± 3	189 ± 3

Conforme discutido neste trabalho, na seção longitudinal, os sulfetos são alongados de modo a ocupar regiões mais espaçadas na microestrutura; por outro lado, na seção transversal, eles aparecem arredondados e ocupam uma área maior na microestrutura. Portanto, com base nos resultados, pode ser feita a hipótese que o MnS tende a influenciar os resultados de microdureza Vickers, nas condições de carregamento avaliadas, visto que tendem a aumentar a dureza localmente.

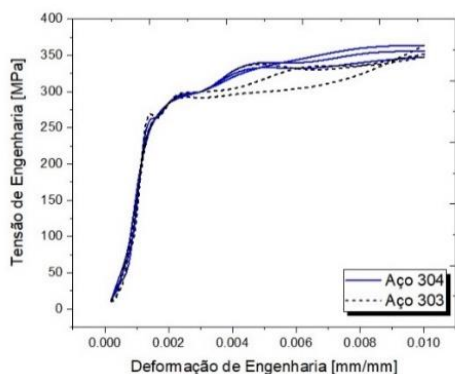
Para corroborar a hipótese feita, novas medidas de microdureza Vickers foram realizadas apenas em regiões de matriz austenítica na seção longitudinal aço AISI 303. Os resultados são fornecidos nas últimas colunas da Tabela 2. Esses resultados obtidos para a matriz austenítica do aço AISI 303 são coerentes com resultados do substrato constituído de aço AISI 304, obtidos por Kumar e Das (2021), e os valores de microdureza Vickers do aço 304 consolidados por Barbosa (2014), o que sugere similaridade entre o aço 304 e a matriz do aço 303 em termos de propriedades mecânicas. Outros fatores que devem ser considerados nas medida de dureza são, por exemplo: a influência dos grãos e partículas de segunda de fase; a área da impressão e geometria do penetrador com a variação de carga aplicada; e a escala em que a dureza é medida, que pode ser macro, micro ou nanoescala (Broitman, 2017).

### *Ensaio de tração*

As curvas tensão-deformação de engenharia para ambos os aços 303 e 304 podem ser visualizadas na Figura 5. Esses dados foram calculados a partir de dados de força e deslocamento em condições de uso de extensometria. As propriedades mecânicas médias, providas pelos ensaios de três corpos de prova de cada material, são disponibilizadas em uma tabela incluída na Figura 5.

Conforme mostra a Figura 5, o limite de resistência à tração do aço 303 foi de 639 MPa e, para o aço 304, correspondeu a 617 MPa. A presença do MnS no aço 303 desfavorece a movimentação das discordâncias nesse material, por meio do mecanismo de endurecimento por precipitação incoerente, o que elevou um pouco a resistência à tração desse aço em relação ao aço 304. A ductilidade do aço 303 também é menor quando comparado ao aço 304. Isso ocorre porque as inclusões de MnS favorecem a ruptura quando o material é submetido a tensões trativas, tendendo a se romper e facilitando o processo de quebra (Chagas, 2015). Apesar da redução da ductilidade, de forma semelhante ao esperado para o aço 304, o aço 303 apresentou também fratura dúctil, conforme o detalhe da Figura 5: Isso ocorre porque a matriz austenítica de ambos os aços é similar, de forma que a inclusão de MnS não tende a afetar o modo de falha macroscópico do aço 303 à temperatura ambiente.

Figura 5 – Curvas tensão-deformação e propriedades mecânicas dos aços 303 e 304, obtidas de ensaios de tração. No detalhe, nota-se a fratura dúctil do aço AISI 303 (“taça e cone”).



Aço	Módulo de Elasticidade - E [GPa]	Tensão de Escoamento - $\sigma_s$ [MPa]	Limite de Resistência à Tração [MPa]	Alongamento - $\epsilon_{\text{total}}$ [%]	Redução de Área [%]
AISI 303	202,9 ± 0,9	304 ± 15	639 ± 4	31 ± 3	59 ± 2
AISI 304	202,3 ± 0,8	308 ± 4	617 ± 2	35 ± 4	73,4 ± 0,7



\*Dados obtidos com extensometria – antes de atingir a tensão máxima.

(a) Castanha: (b) Extensômetro: (c) Fratura Dúctil:  
CP antes do Ensaio. Detalhe Imagem do aço 303.

### Caracterização microestrutural pós-usinagem

Nas Figuras 6 e 7 são vistas as micrografias das superfícies usinadas dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e 303, respectivamente. Nas condições de usinagem severa, os parâmetros podem ser assumidos como de desbaste; ao passo que nas condições de usinagem moderada, os parâmetros são tomados como acabamento. Observa-se que, para o aço 303 (Figura 7), as inclusões de MnS permanecem fixas à matriz do aço e se deformam com ela, sem sofrer rupturas ou trincas durante a usinagem. Neste caso, em função da usinagem a seco, os efeitos térmicos tendem a ser acentuados e incrementados devido ao atrito no decorrer do fresamento e deformação plástica da peça, o que facilita a deformação das inclusões de sulfeto de manganês. Em função da morfologia das inclusões e do menor espaçamento entre elas na seção transversal (ST), nota-se com maior nitidez nesta seção do aço 303 (Figura 7) a deformação plástica dos sulfetos com a matriz austenítica nas trilhas usinadas. Por outro lado, na Figura 6, que trata do aço 304, tem-se a resposta do material homogêneo usinado. Esses resultados são corroborados pela literatura de remoção de material por torneamento e desgaste (Chagas, 2015; Seriacopi *et al.*, 2020).

Não obstante, a comparação entre as Figuras 6 e 7 permitem investigar que, para os parâmetros de usinagem mais severos próximos às condições de desbaste, as trilhas resultantes do contato entre a superfície e a ferramenta de corte foram mais evidentes e ocorrem em maior intensidade em relação ao acabamento, havendo sulcos mais pronunciados que as considerações de acabamento, que afetam a rugosidade final das peças em ambos os aços inoxidáveis.

### Caracterização topográfica – rugosidade

Para a condição experimental pós-usinagem, foram obtidos os resultados de rugosidade informados na Figura 8. Todos os valores obtidos são médios. Analisando-se o parâmetro de rugosidade média quadrática  $R_q$ , obtido da média de 512 perfis traçados perpendicularmente às marcas de usinagem, e que avalia com maior precisão o distanciamento entre as medidas de altura das amostras e a linha média, pode ser concluído que a rugosidade em todas as condições experimentais é mais elevada após as amostras terem passado pela usinagem, quando comparada às superfícies das amostras antes do fresamento. O valor de rugosidade também tende a ser maior para o aço 303 em relação ao aço 304, utilizando-se as mesmas seções de comparação (amostra 303SL com 304SL; e amostra 303ST com 304ST).

Figura 6 – Micrografias, obtidas por microscopia óptica, das superfícies usinadas do aço 304: aumento de 200X.

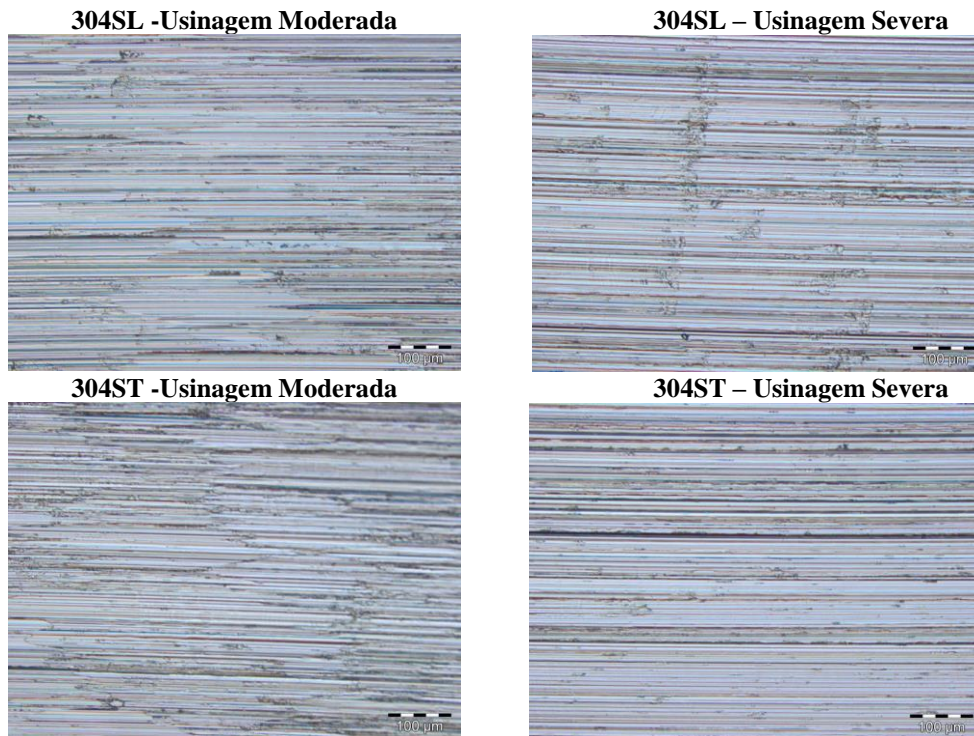
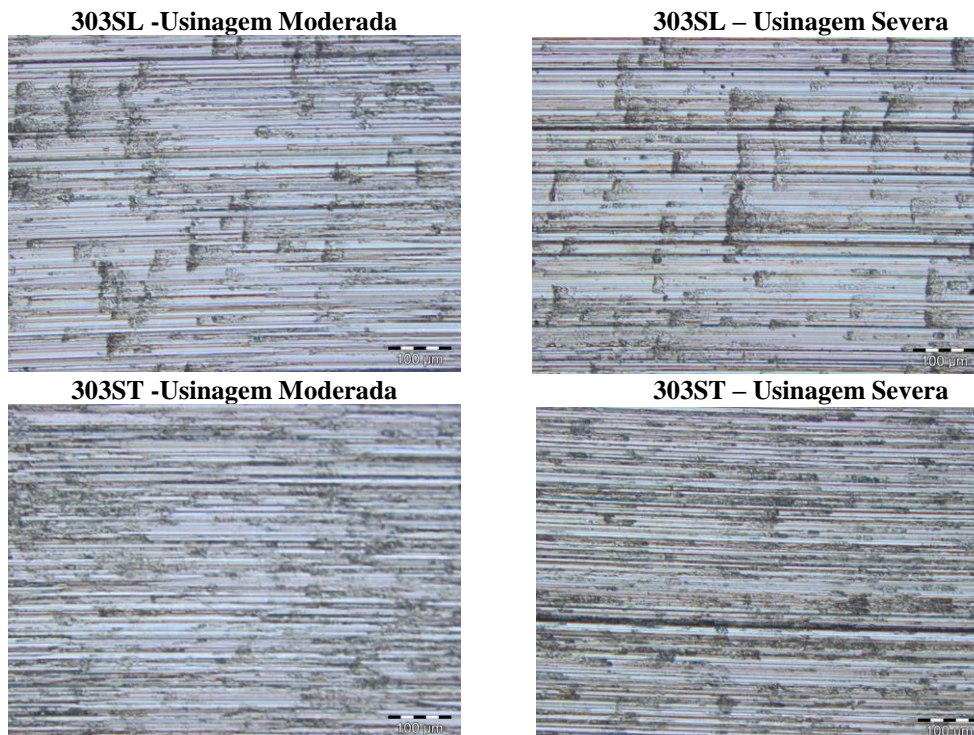


Figura 7 – Micrografias, obtidas por microscopia óptica, das superfícies usinadas do aço 303: aumento de 200X.



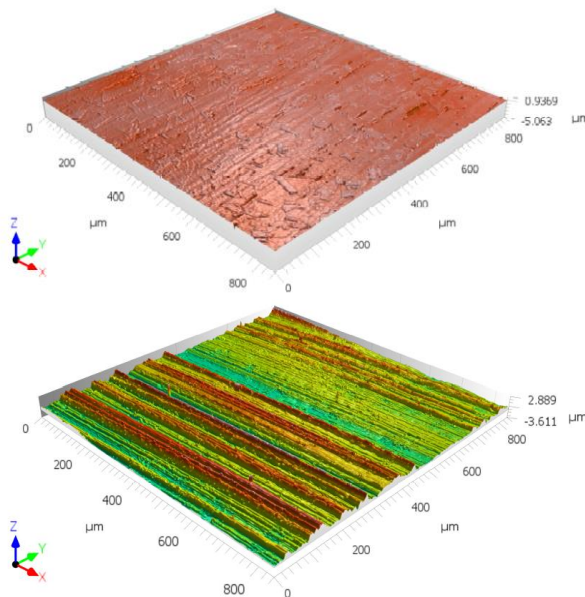
Os resultados de rugosidade obtidos no presente trabalho estão de acordo com as caracterizações topográficas, realizadas em condições equiparáveis de usinagem do aço inoxidável austenítico 316L, cuja amostra foi proveniente de manufatura aditiva e na consideração de baixa porosidade (maior potência de laser), analisado em (Tarasco et al., 2020).



Para finalizar, os dados experimentais obtidos neste trabalho são sintetizados e suas devidas comparações conduzidas no gráfico da Figura 8b, que mostra: (i) a influência das propriedades mecânicas, por meio do índice E/H - Módulo de elasticidade [GPa] / microdureza [convertida para GPa]; (ii) o efeito da microestrutura (com e sem a presença de MnS – aços 303 e 304, respectivamente); e (iii) o contraste das seções longitudinal e transversal dos materiais no parâmetro de rugosidade média 3D ( $S_a$ ). Assim sendo, é possível concluir que a microestrutura e as propriedades mecânicas dos aços avaliados afetam a resposta do acabamento superficial dos corpos de prova dos materiais, submetidos ao fresamento, sendo que indica-se que a susceptibilidade ao corte aparece como dependente da relação E/H, tendo efeitos do encruamento do material, de acordo com estudos de remoção de material desenvolvidos na literatura (Kumar e Li, 2022). É importante salientar que a razão E/H indica a eficiência ao corte, sendo que as propriedades mecânicas dos materiais (em especial, a dureza com contribuições das fases presentes) podem sofrer modificações a partir dos efeitos térmicos locais, que tendem a ser acentuados por processos de usinagem a seco.

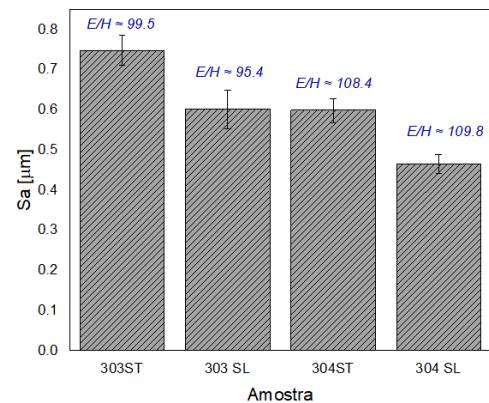
Figura 8 – Resultados da caracterização topográfica dos materiais estudados no presente trabalho: parâmetros de rugosidade média 2D e 3D.

(a) Exemplos de superfícies do aço 303 (SL) pré e pós-usinagem:



(b) Exemplos dos valores de rugosidade em relação às condições severas de usinagem:

Condição	Pré-Usinagem				Pós-Usinagem			
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]
303SL	0,050	0,112	0,065	0,134	0,561	0,683	0,602	0,730
303ST	0,068	0,102	0,078	0,116	0,759	0,885	0,748	0,886
304SL	0,042	0,056	0,053	0,069	0,431	0,525	0,467	0,562
304ST	0,047	0,062	0,055	0,072	0,487	0,609	0,600	0,754



## Conclusões

Os objetivos do trabalho foram atingidos, uma vez que os aços 303 e 304 foram comparados e caracterizados experimentalmente em relação a aspectos microscópicos e topográficos antes e após fresamento, como por exemplo:

- Composição química: compatível com a norma ISO 15510:2014, sendo o teor de enxofre diferenciado para os aços 304 (homogêneo) e 303 (heterogêneo);
- Microestrutura: caracterizações denotando as condições iniciais de inclusões com morfologias distintas nas seções, e os mecanismos de deformação após o processo de usinagem;
- Microdureza Vickers: permitiu a verificação de influências locais da microestrutura, sob considerações de duas cargas;
- Rugosidade: caracterizações de parâmetros possibilitaram abordar a influência do comportamento mecânico nas respostas referentes à remoção de material por usinagem.

As propriedades mecânicas desses aços também foram analisadas e caracterizadas pelos seguintes procedimentos experimentais: ensaios de tração e operações de usinagem (moderada e severa).

Todos os experimentos realizados foram suportados por dados apontados na literatura. Assim sendo, concluiu-se que as avaliações da topografia e dos parâmetros de rugosidade, obtidos com base nas superfícies decorrentes do fresamento de ambos os aços, tendem a sofrer influência da fração volumétrica de inclusões de MnS que, por sua vez, têm efeitos sobre a relação E/H e consequências na usinagem dos materiais estudados.

## Referências Bibliográficas

- ASTM International (2017) *Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. ASTM E92-17. <https://doi.org/10.1520/E0092-17>. Acesso em: 15 ago. 2021.
- ASTM International (2016) *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM E8/E8M-16. [https://doi.org/10.1520/E0008\\_E0008M-16](https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16). Acesso em: 07 jul. 2021.
- Barbosa, P.A. (2014) *Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica.
- Broitman, E. (2017) Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. *Tribol. Lett.*, **65**, 1–18.
- Chagas, G.M.P. (2015) *Estudo do processo de formação do cavaco durante o torneamento e sua relação com a microestrutura utilizando o método dos elementos finitos*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica.
- Chagas, G.M.P., Machado, I.F. (2015) Numerical Model of Machining Considering the Effect of MnS Inclusions in an Austenitic Stainless Steel. *Procedia CIRP*, **31**, 533–538.
- Dalsteel (2021) *Stainless Steel - Grade 303 (UNS S30300)*. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=964>. Acesso em: 15 set. 2021.
- International Standard Organization (2014) *Stainless steels — Chemical composition*. ISO 15510:2014. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15510:ed-2:v1:en>. Acesso em: 13 set. 2021.
- Kumar, A., Das, A.K. (2021) Evolution of microstructure and mechanical properties of Co-SiC tungsten inert gas cladded coating on 304 stainless steel. *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, **24**, 591–604.
- Kumar, A., Li, D.Y. (2022) Can the H/E ratio be generalized as an index for the wear resistance of materials? *Mater. Chem. Phys.*, **275**, 125245.
- Malakizadi, A., Oberbeck, J.N., Magnevall, M., Krajnik, P. (2019) A new constitutive model for cutting simulation of 316L austenitic stainless steel. *Procedia CIRP*, **82**, 53–58.
- Pawlus, P., Grabon, W.A., Czach, D. (2019) Calculation of plasticity index of honed cylinder liner textures. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1183**, 1-8.
- Sandvik Coromant (2021) *CoroMill® 245 insert for milling - R245-12 T3 K-MM 2030*. [https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx?c=R245-12\\_T3\\_K-MM\\_2030](https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx?c=R245-12_T3_K-MM_2030). Acesso em: 22 maio 2021.
- Seriacopi, V., Fukumasu, N.K., Souza, R.M., Machado, I.F. (2016) Analysis of Abrasion Mechanisms in the AISI 303 Stainless Steel: Effect of Deformed Layer. *Procedia CIRP*, **45**, 187–190.
- Seriacopi, V., Prados, E.F., Fukumasu, N.K., Souza, R.M., Machado, I.F. (2020) Mechanical behavior and abrasive mechanism mapping applied to micro-scratch tests on homogeneous and heterogeneous materials: FEM and experimental analyses. *Wear*, **450–451**, 203240.
- Tarasco, B. de S., Castanheira, G.M., Costa, R. de S. (2020) *Análise de rugosidade, resistência à corrosão e formação de rebarba em peças fabricadas por manufatura híbrida em aço inoxidável ABNT 316L*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica - Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.