

APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE PLASTICIDADE EM CARACTERIZAÇÕES DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS SUBMETIDOS AO FRESAMENTO

Vanessa Seriacopi

Amanda Leite Polastro

Éd Claudio Bordinassi

Adalto de Farias

Marcelo Otavio dos Santos

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia (CEUN-IMT), Praça Mauá, 1 - Mauá, São Caetano do Sul - SP, Brasil, CEP: 09580-900

vanessa.seriacopi@maua.br

amandaleitepolastro@gmail.com

ecb@maua.br

adalto.farias@maua.br

marcelo.santos@maua.br

Izabel Fernanda Machado

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Butantã, São Paulo - SP, Brasil, CEP: 05508-030
machadoi@usp.br

Resumo: Em processos de usinagem, a resposta dos materiais aparece resultante de aspectos microestruturais, presença de heterogeneidades, propriedades mecânicas e/ou termofísicas, por exemplo. No caso específico dos aços inoxidáveis austeníticos, as aplicações são definidas em função da composição química e características, resultando em condições diferenciadas de resistência à corrosão, à fadiga e à remoção de material, ocorrência de mecanismos de endurecimento, e requisitos adequados em termos de comportamento termomecânico. Com base neste contexto, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar os efeitos do comportamento mecânico e da topografia de aços inoxidáveis austeníticos, fabricados por processos de fresamento, em termos do índice de plasticidade, que tende a incorporar as definições de materiais e parâmetros de asperezas e possibilitando investigações de superfícies engenheiradas por usinagem. Foram utilizadas, técnicas de caracterização microestrutural, análise da composição química (fluorescência de raios X), e ensaios mecânicos (tração e microdureza Vickers) para examinar os mecanismos de deformação, e categorizar as superfícies. Em adição, usinagem a seco por fresamento dos aços AISI 304 (matriz austenítica) e AISI 303 (matriz austenítica com a presença de MnS) e subsequentes caracterizações foram desenvolvidas, de modo a permitir a avaliação das superfícies devido às condições impostas pelo processo. No centro de usinagem Romi Discovery 560, empregou-se um cabeçote de facear com Ø63 mm e 5 insertos. Como parâmetros de corte, estabeleceu-se: velocidade de corte de 170 m/min; profundidades de corte de 0,35 - 1,0 mm; avanços de 0,1 - 0,2 mm/rev; e rotações de 429,47 - 858,93 rpm. Os resultados decorrentes do procedimento desenvolvido permitiram concluir que as avaliações da topografia, obtidas com base nas superfícies decorrentes do fresamento de ambos os aços, tendem a sofrer influência da distribuição de inclusões de MnS que, por sua vez, têm efeitos sobre a relação E/H dos materiais estudados. O índice de plasticidade apresentou definição mais completa de superfícies, com a incorporação de aspectos e tratamentos das asperezas, sendo que faixas deste parâmetro foram determinadas de modo a aumentar gradativamente em função da severidade do processo de fresamento.

Palavras-chave: Fresamento; Aços Inoxidáveis Austeníticos; Microestrutura; Topografia; Índice de Plasticidade

1. INTRODUÇÃO

Investigações direcionadas à microestrutura e ao comportamento mecânico de materiais são importantes para a tomada de decisões em processos 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. Desse modo, surgem parâmetros que relacionam a análise e classificação do tipo de deformação e as consequências no contato sofridas por um material submetido a processos de usinagem. Um dos parâmetros em questão é o índice de plasticidade, que é descrito de forma a prover uma relação entre o comportamento mecânico do material usinado (em termos de módulo elástico e dureza) e as características geométricas referentes às distribuições de asperezas da superfície em análise (Hutchings e Shipway, 2017).

Adicionalmente, a análise do índice de plasticidade é relatada em estudos de geração de superfícies engenheiradas, com objetivos distintos como, por exemplo, a descoberta e proposta de novos métodos e técnicas de cálculo desse parâmetro (Pawlus, Grabon e Czach, 2019), ou até mesmo a descoberta de relações entre esse índice e propriedades termofísicas dos materiais, com foco em analisar parâmetros relevantes aos processos de fabricação com remoção de material como o brunimento e a retificação.

Avaliações e desenvolvimentos científicos e tecnológicos voltados a engenheirar superfícies e projetar materiais que atendam aplicações em sistemas mecânicos podem ser baseadas em modelamento de processos de fabricação em adição aos conjuntos de propriedades mecânicas, microestrutura e aspectos superficiais do material para sua determinação, o que gera um contexto em multiescala (da micro à macroestrutura) e multidisciplinar (Chegdani e El Mansori, 2018) com abrangência nos campos de materiais e técnicas de caracterização diferenciadas (Boidi *et al.*, 2020); Processos de Fabricação com incorporação de simulações computacionais como suporte para compreensão de fenômenos e mecanismos (Souza *et al.*, 2020); e Tribologia para prever condições de aplicações do contato de superfícies em aplicações para a Engenharia (Machado *et al.*, 2021), como sistemas automotivos (conjuntos de transmissão / motores) e produtos biomédicos, por exemplo (Cousseau, Ruiz Acero e Sinatora, 2016).

De modo específico, tratando-se da análise microestrutural, entende-se que o estudo da microestrutura é necessário para avaliar o histórico e as consequências do produto final decorrentes dos processos de usinagem. No caso dos aços inoxidáveis, os estudos envolveram a análise da adição de outros componentes químicos à matriz do aço austenítico, obtendo-se um material heterogêneo, e almejando verificar como esses elementos modificam suas propriedades e influenciam os processos e o cavaco resultante da usinagem desse material. 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. Além disso, observou-se melhorias referentes à 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, sendo verificados que os modelos dos processos de usinagem, baseados em relações físicas e micromecânicas, fornecem informações adicionais em relação às superfícies usinadas.

Em síntese, a resposta em processos de manufatura pode ser descrita em função dos materiais empregados e suas propriedades, sendo que as avaliações de fenômenos e mecanismos resultam das características e comportamento mecânico dos materiais nas distintas escalas de análise.

Portanto, o objetivo deste trabalho consistiu em conduzir caracterizações microestrutural, mecânica e topográfica de aços inoxidáveis austeníticos, incorporando análises sobre o efeito do processo de usinagem em superfícies provenientes do processo de fresamento. O objeto de estudo foi o aço AISI 303, propiciando dados e discussões a respeito da influência de inclusões de 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. Como fechamento da metodologia experimental, pretendeu-se determinar o índice de plasticidade como fator representativo de superfícies engenheiradas por processos de fresamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterizações microestrutural e de composição química

A microestrutura 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.

Conforme a norma ASTM E3-11 (ASTM, 2017a), para a realização dos experimentos, as amostras foram primeiramente cortadas e separadas de uma barra cilíndrica de Ø1", e identificadas por meio da diferenciação nas respectivas regiões longitudinal e transversal. Em seguida, as amostras de aço foram embutidas a quente em baquelite. Posteriormente, essas amostras foram submetidas ao lixamento úmido com lixas de carbeto de silício (SiC), nas granulometrias #200, #320, #400, #600, #800 e #1200. O polimento foi conduzido com pasta de diamante nas sequências 3 µm e 1 µm.

As amostras foram limpas em banho ultrassônico, e submetidas à observação microestrutural na condição sem ataque. Em uma segunda abordagem, as amostras foram expostas, durante 60 segundos, a um ataque eletrolítico com 10% de ácido oxálico em solução aquosa, segundo recomendado por Barbosa (2014). A observação das amostras, com as considerações sem e com ataque metalográfico, foi realizada por meio do microscópio óptico Olympus BX60M.

A composição química dos aços foi mensurada fazendo uso da técnica de fluorescência de raios X por energia dispersiva.

2.2. Análises do comportamento mecânico dos materiais

Macroescala: os ensaios de tração em corpos de prova dos aços inoxidáveis austeníticos foram realizados, utilizando-se a máquina universal de ensaios Losenhausen UPM 40 (Fig. 1a), com capacidade máxima de 40 tonf. Nesse tipo de ensaio, são definidos corpos de prova com forma cilíndrica e dimensões padronizadas pela norma ASTM E8-E8M-16a (ASTM, 2016): diâmetro inicial de ensaio de 12,5 mm e comprimento útil inicial de 50 mm (Fig. 1b).

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^{-1} . Os corpos de prova dos aços AISI 303 e 304 foram fixados no equipamento por castanhas (Fig. 1c), e um extensômetro (Fig. 1d) foi acoplado às amostras para a definição precisa do módulo elástico. A extensometria foi mantida até atingir e ultrapassar com segurança o escoamento do material, e retirada antes de atingir a carga máxima suportada.

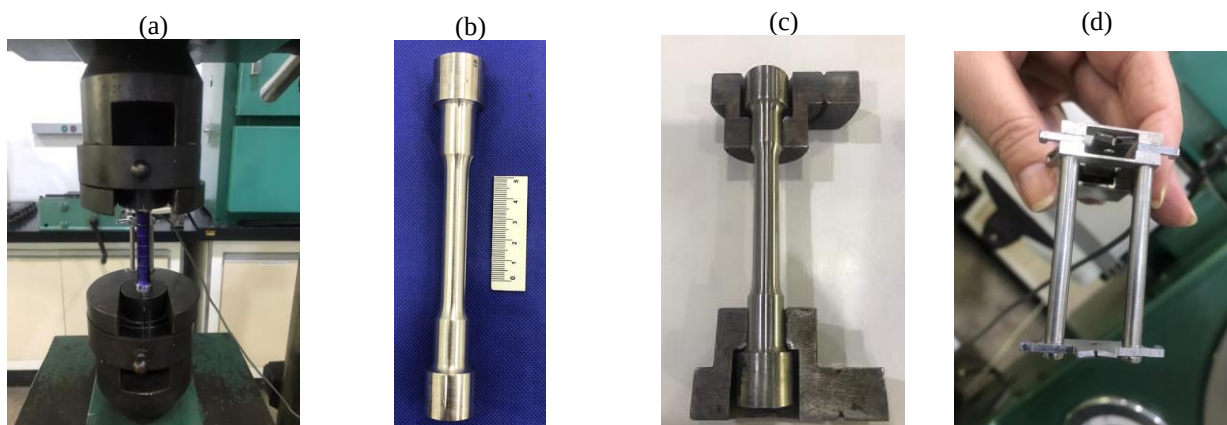


Figura 1. (a) Máquina universal de ensaios utilizada para conduzir os ensaios de tração nos corpos de prova de aços inoxidáveis austeníticos. Em detalhe: (b) Corpo de prova padronizado; (c) Castanha de sustentação do corpo de prova; e (d) Extensômetro.

Microescala: medidas de microdureza Vickers foram conduzidas 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. Para avaliar as propriedades do aço AISI 304, foram selecionadas regiões da matriz austenítica do aço AISI 303 isentas de inclusões, visto que as matrizes dos aços são admitidas como similares conforme examinado pela literatura (Seriapopi *et al.*, 2020).

Em adição, o espaçamento entre as marcas de dureza ($2,5 \times$ 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, 2017b).

2.3. 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 ($\text{TiAlN}+\text{TiN}$). Um cabeçote de faceamento–modelo Coromill 245, Sandvik – com 63 mm de diâmetro e 5 insertos foram empregados.

O fresamento foi realizado com base nos parâmetros recomendados pelo fabricante das ferramentas (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 usinagem a seco;

(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 usinagem a seco.

Para as operações de acabamento dos corpos de prova embutidos, foram utilizadas 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.

2.4. Caracterização topográfica dos corpos de prova nas condições pré e pós-usinagem

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 inicial e após serem executadas as operações de usinagem,

para investigar a superfície usinada. A área base de medição consistiu em 0,86 x 0,86 mm², aplicando-se uma lente de 20X, aplicando-se interferometria por luz verde.

2.5. Cálculos do índice de plasticidade

A partir dos dados de caracterização topográfica dos corpos de prova usinados, foram efetuados cálculos iniciais direcionados à distribuição estatística e dos parâmetros de rugosidade, por meio da utilização do software SUMMITS (*open-source*) (Profíto, 2010). Com base nos dados experimentais da superfície 3D, estimou-se os parâmetros das asperezas – raio e distribuição de alturas das asperezas (*summits*) - calculados a partir do modelo clássico de Greenwood e Williamson (1966), que tem como premissa que as asperezas são aproximadas como esferas.

Conforme previamente apontado, o índice de plasticidade (ψ), designado de acordo com a Eq. (1), resulta em uma relação entre o comportamento mecânico do material e as propriedades das asperezas das superfícies em contato para aplicações de Engenharia.

$$\psi = \frac{E^*}{H} \left(\frac{\sigma^*}{r} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Na qual: E^* e H são, respectivamente, o módulo de elasticidade e a dureza da superfície mais macia [ambos em GPa]; σ^* é o desvio padrão da distribuição das alturas das asperezas [μm]; e r é o raio médio das asperezas [μm]. A razão σ^*/r diz respeito à inclinação média das asperezas, que pode ser obtida por meio do processamento dos dados de caracterização por perfilometria das superfícies manufaturadas (Rosén e Thomas, 2001).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Composição química e caracterização microestrutural

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

A composição química resultante para os aços AISI 303 e 304 são reportadas na Tab. 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 limite aceito pelas normas. Adicionalmente, para o aço 304, a porcentagem dos componentes presentes nas amostras analisadas está dentro do previsto pela mesma norma.

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	$\leq 0,12$	$0,061 \pm 0,001$	$\leq 0,07$
Cr	$15,97 \pm 0,04$	17,0 – 19,0	$16,79 \pm 0,03$	17,5 – 19,5
Ni	$9,13 \pm 0,02$	8,0 -10,0	$9,10 \pm 0,02$	8,0 -10,5
Mn	$2,11 \pm 0,03$	$\leq 2,00$	$1,87 \pm 0,01$	$\leq 2,00$
S	$0,32 \pm 0,01$	$\geq 0,15$	$0,031 \pm 0,002$	$\leq 0,03$
Si	$0,463 \pm 0,002$	1,00	$0,54 \pm 0,02$	$\leq 1,00$
P	$0,024 \pm 0,001$	$\leq 0,060$	$0,027 \pm 0,002$	$\leq 0,04$
Mo	0,58	-	$0,409 \pm 0,008$	-
N	-	-	-	$\leq 0,10$
Outros	< 0,4 (Cu)	$\leq 0,10$	< 0,4 (Cu)	-
Fe	Em balanço	Em balanço	Em balanço	Em balanço

As micrografias ópticas das amostras do aço AISI 303 sem ataque químico são fornecidas na Fig. 2, nas seções longitudinal e transversal respectivamente. Pode-se observar que, no caso da amostra 303SL (Fig. 2a), há a presença de inclusões dispersas na matriz, conforme reportado por Chagas e Machado (2015). Estas inclusões representam as partículas de sulfeto de manganês precipitadas no aço 303. Em função do processo de fabricação do material, tais partículas assumem o formato alongado decorrente do processamento do material. Na Figura 2b, pode-se visualizar que as partículas de MnS adicionadas à matriz do aço assumem um formato pontual / esférico no caso 303ST.

Em contrapartida, na Fig. 3, podem ser visualizadas as amostras do aço AISI 304, sob as mesmas condições anteriores, ou seja, seção longitudinal 304SL (Fig. 3a) e seção transversal 304ST (Fig. 3b), ambas sem o ataque. Para as duas considerações, são visíveis apenas pequenas regiões pontuais de inclusões quase imperceptíveis, visto que a fração

volumétrica de MnS presente nesse aço 304 é inferior de modo significativo, em relação à fração presente no aço 303. Tal fato é condizente com a redução expressiva de enxofre no aço 304 quando comparado ao aço 303 (Tab. 1).

Figuras 4 e 5 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 (Barbosa, 2014; Chagas, 2015).

Comparando-se as micrografias de ambos os aços, de forma semelhante à condição anteriormente analisada (Figs. 2 e 3), pode-se concluir que a fração volumétrica de MnS é maior no aço 303, conforme esperado. Nas Figs. 4b e 5b, os sulfetos são vistos alongados em função da direção de laminação da matéria-prima. Além disso, tanto no aço 303 (Fig. 4) quanto no caso do aço 304 (Fig. 5), foram observados pites devido ao processo de ataque eletrolítico (Barbosa, 2014).

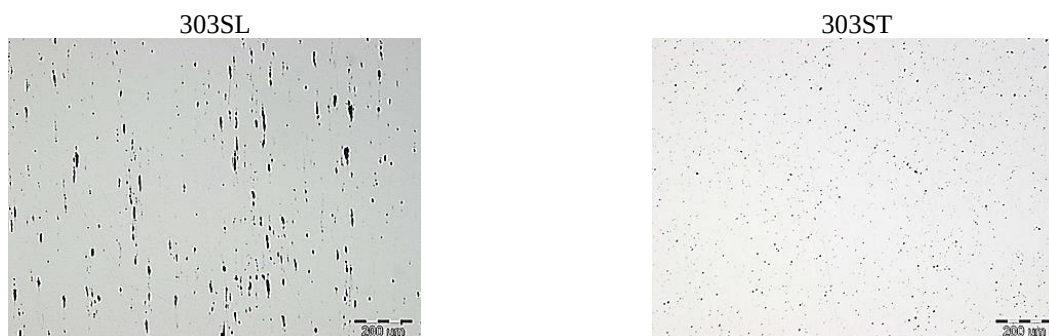


Figura 2. Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 303 (sem ataque químico): aumento de 100X.

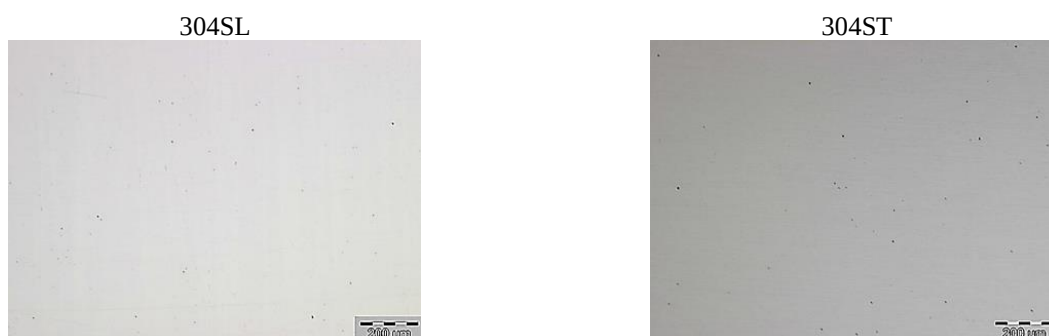


Figura 3. Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 304 (sem ataque químico): aumento de 100X.

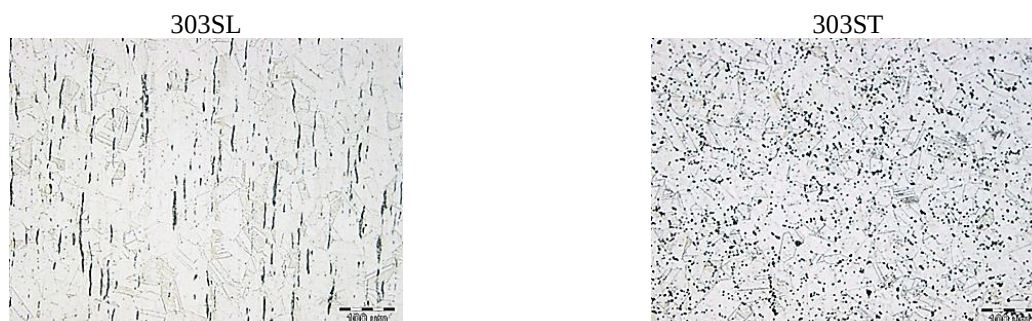


Figura 4. Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 303 (com ataque - 10% ácido oxálico): aumento de 200X.

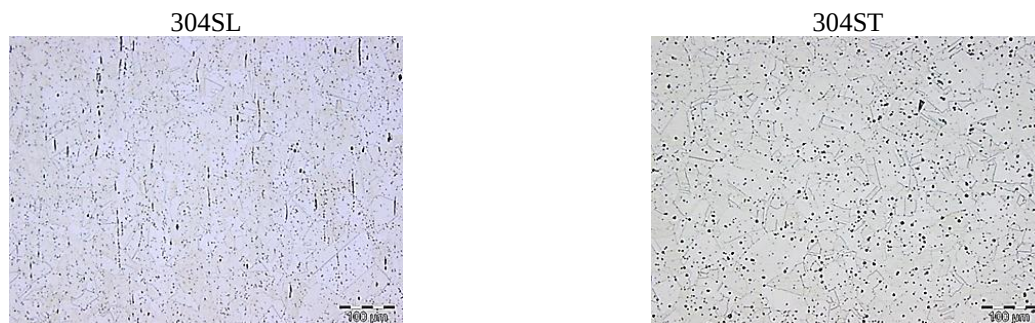


Figura 5. Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal do aço 304 (com ataque - 10% ácido oxálico): aumento de 200X.

3.2. Comportamento mecânico dos materiais em macroescala – ensaios de tração

As curvas tensão-deformação para os aços 303 e 304 são vistas na Fig. 6. Esses dados foram calculados a partir de dados de força e deslocamento. De modo visual, o início da curva tensão-deformação tende a se aproximar para os dois materiais, confirmando a proximidade de propriedades elásticas da matriz austenítica em ambos os casos.

As propriedades mecânicas médias, providas pelos ensaios de três corpos de prova de cada material, são incluídas na Tab. 2. Conforme mostram os dados, o limite de resistência à tração do aço 303 (material heterogêneo) resultou ser por volta de 3,5% superior ao valor do limite de resistência do aço 304 (material homogêneo). A ductilidade do aço 303, fornecida em termos de alongamento e/ou redução de área, também foi 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 pode ser observado o detalhe da Fig. 6: sendo a matriz dos aços apresentando comportamento mecânico equivalente, a inclusão de MnS não tende a afetar o modo de falha macroscópico do aço 303 à temperatura ambiente.

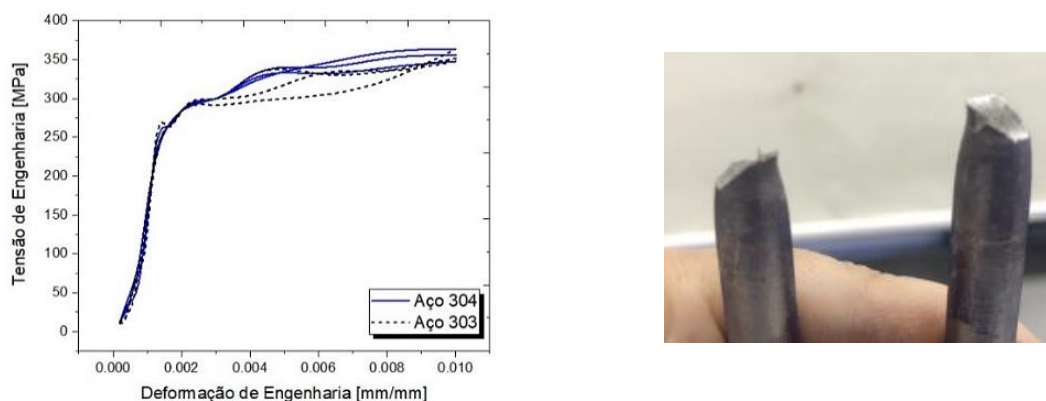


Figura 6. Curvas tensão-deformação e propriedades mecânicas dos aços 303 e 304, obtidas de ensaios de tração. No detalhe, nota-se a fratura dúctil do aço AISI 303 (“taça e cone”).

Tabela 2. Dados obtidos com extensometria durante os ensaios de tração, antes de atingir a tensão máxima.

Aço	Módulo Elástico [GPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]	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

3.3. Comportamento mecânico dos materiais em microescala – ensaios de microdureza Vickers

Para a análise da microdureza Vickers, os valores resultantes do procedimento experimental para as amostras do aço inoxidável AISI 303 SL e ST, antes do processo de usinagem, podem ser visualizadas na Tab.3.

Tabela 3. Microdureza Vickers de amostras das seções longitudinal (SL) e transversal (ST) do aço AISI 303 pré-usinagem, considerando-se as cargas de 10 e 50 gf.

Aço 303 - SL		Aço 303 - ST		Matriz Austenítica – Aço 303	
50 gf [HV _{0,05}]	10 gf [HV _{0,01}]	50 gf [HV _{0,05}]	10 gf [HV _{0,01}]	50 gf [HV _{0,05}]	10 gf [HV _{0,01}]
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 Desvio Padrão Amostral		208 ± 10	195 ± 7	217 ± 6	205 ± 8
				190 ± 3	189 ± 3

Realizou-se a Análise de Variância (ANOVA) *One-Way*, com base nos dados do aço AISI 303 agrupados por seção transversal e longitudinal. Nas condições de carga de 10 gf, os resultados da ANOVA são exemplificados na Tabela 4. Pode-se observar que as médias de microdureza Vickers são estatisticamente diferentes ao longo das seções SL e ST, sendo a hipótese nula rejeitada em ambos os casos.

Tabela 4. ANOVA *One-Way* aplicada para a microdureza Vickers (HV_{0,01}) do aço AISI 303 nas seções longitudinal (SL) e na transversal (ST). SQ = soma de quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = média dos desvios quadráticos, F e F_{crítico} são os parâmetros que indicam se a hipótese de as médias serem estatisticamente iguais, para um nível de significância de 5%, é sustentável.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
303 SL	10	1941	194,1	48,1
303 ST	10	2046	204,6	64,0

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico
Entre grupos	551,25	1	551,25	9,83	4,41
Dentro dos grupos	1009,3	18	56,07		
Total	1560,55	19			

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 medições de microdureza Vickers foram conduzidas apenas em regiões de matriz austenítica na seção longitudinal aço AISI 303, que facilita a localização de regiões sem inclusões. Os resultados são fornecidos nas últimas colunas da Tab. 3. Esses resultados obtidos para a matriz austenítica do aço AISI 303 são coerentes com os 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 confirma a similaridade entre o aço 304 e a matriz do aço 303 em termos de propriedades mecânicas. Outros fatores que devem ser considerados nas medidas 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).

3.4. Caracterização microestrutural nas condições pós-usinagem

Em termos de usinagem, espera-se 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 (Seriocopi *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 remoção de material, sem sofrer rupturas ou trincas. De modo complementar, a morfologia das inclusões (alongadas ou pontuais) afetam o campo de tensões resultantes no corte do material (Chagas e Machado, 2015). Por essa razão, avaliou-se as seções longitudinal e transversal dos materiais por meio dos corpos de prova específicos.

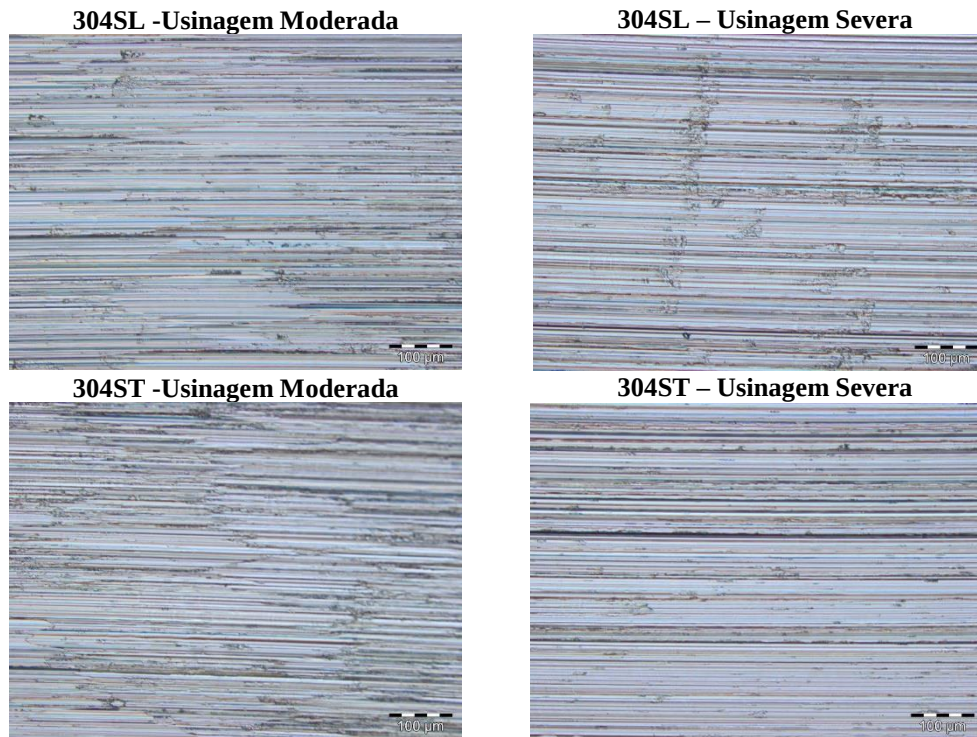


Figura 7. Micrografias, obtidas por microscopia óptica, das superfícies usinadas do aço 304: aumento de 200X.

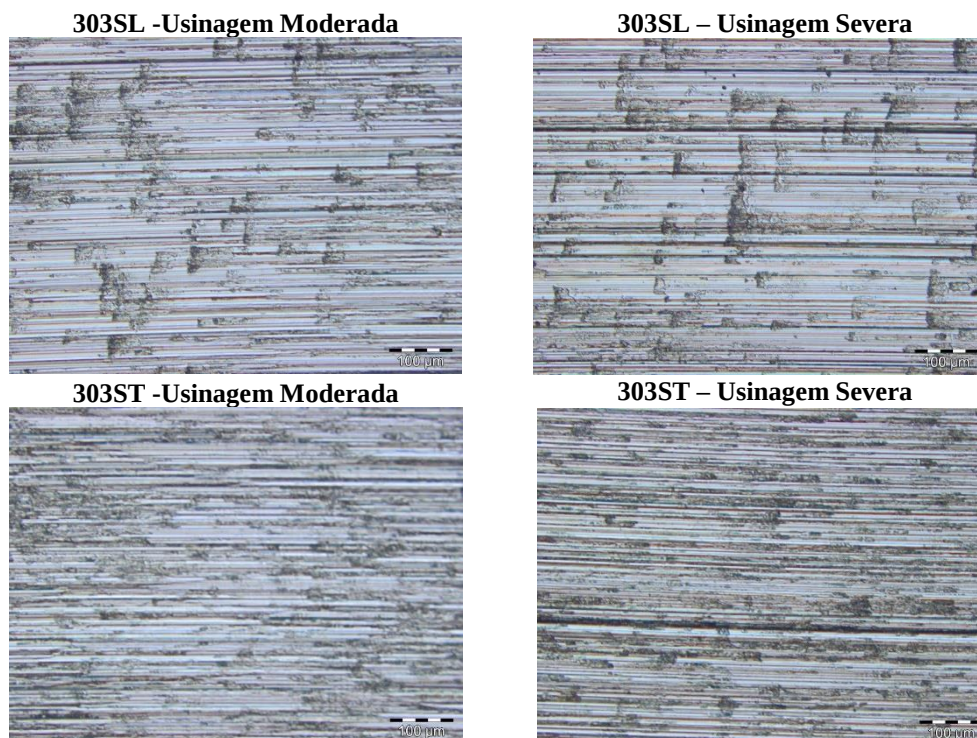


Figura 8. Micrografias, obtidas por microscopia óptica, das superfícies usinadas do aço 303: aumento de 200X.

Figuras 7 e 8 mostram 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 (Fig. 8), 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 (Fig. 8) a deformação plástica dos sulfetos com a matriz austenítica nas trilhas usinadas. Por outro lado, na Figura 7, que trata do aço 304, tem-se a resposta do material homogêneo usinado. Esses resultados são corroborados pela literatura na remoção de material por torneamento e remoção de material por abrasão (Chagas, 2015; Seriacopi *et. al*, 2020).

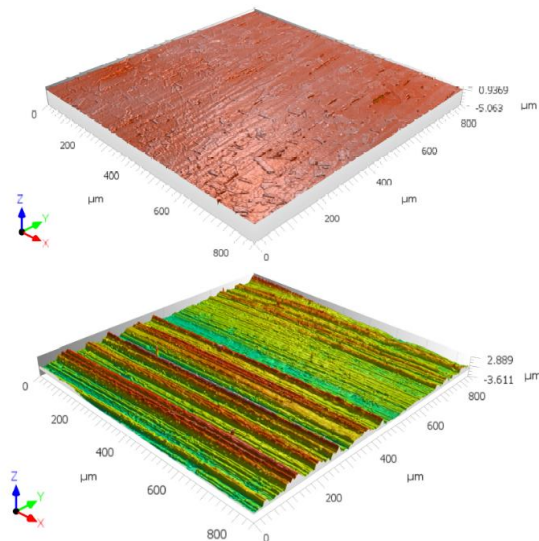
Adicionalmente, a comparação entre as Figs.7 e 8 permitem investigar que, para os parâmetros de usinagem mais severos próximos às condições de desbaste, as trilhas resultantes do contato entre a superfície e a ferramenta de corte foram mais evidentes e ocorrem em maior intensidade em relação ao acabamento, havendo sulcos mais pronunciados que as considerações de acabamento, que afetam a rugosidade final das peças e as superfícies engenheiradas em ambos os aços inoxidáveis.

3.5. Caracterização topográfica e índice de plasticidade: pré-usinagem x pós-usinagem

Para as condições experimentais de pré e pós-usinagem, foram obtidas as caracterizações de rugosidade fornecidas na Fig. 9. Os valores são mostrados em função do parâmetro de rugosidade média S_a , obtido da média de 512 perfis traçados perpendicularmente às marcas de usinagem, sendo que pode ser verificada que a rugosidade é mais elevada após as amostras serem usinadas, quando comparada às superfícies das amostras antes do fresamento (Fig. 9a). O valor de rugosidade também tende a ser maior para o aço 303 em relação ao aço 304, utilizando-se as mesmas seções ST e SL de comparação (Fig. 9b). Os resultados de rugosidade obtidos estão de acordo com as caracterizações topográficas, realizadas em condições equiparáveis de usinagem do aço inoxidável austenítico 316L, analisado em Tarasco, Castanheira e Costa (2020).

Os dados experimentais obtidos são sintetizados no gráfico da Fig. 9b, que mostra: (i) a influência das propriedades mecânicas, por meio do índice E/H - Módulo elástico [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, é possível concluir que a microestrutura e as propriedades mecânicas dos aços avaliados afetaram 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.

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



(b) Valores de rugosidade em relação às condições severas de usinagem:

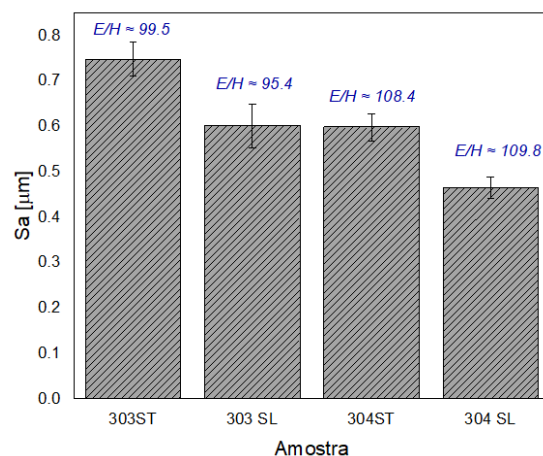


Figura 9. Resultados da caracterização topográfica dos materiais estudados no presente trabalho: parâmetros de rugosidade média 3D (S_a).

Embora a relação E/H propicie uma primeira indicação sobre a resposta ao corte dos materiais, o cálculo do índice de plasticidade, baseado na Eq. (1), fornece uma informação completa e mais complexa a respeito da caracterização da superfície usinada. Neste último caso, a resposta das asperezas é levada em consideração em termos de aspectos geométricos, morfológicos e de distribuição estatística de alturas.

Com o objetivo de ter uma maior representatividade da superfície fresada, caracterizações topográficas foram ampliadas para uma área de 7,15 x 7,15 mm², de acordo com os resultados exemplificados na Fig. 10 para as condições

severas de usinagem em 303ST e 304ST. O avanço da ferramenta sobre a peça é notado de forma aprimorada nesta nova área.

Por meio do emprego do código *SUMMITS*, os parâmetros de asperezas foram investigados e, na sequência, os cálculos do índice de plasticidade foram desenvolvidos. Tabela 5 lista os resultados desta metodologia. Nesta previsão inicial das superfícies engenheiradas, tem-se: (a) em termos de condições de superfícies, três faixas definidas para a condição de usinagem severa ($11,5 \leq \Psi \leq 19,0$); condição de usinagem moderada ($12,0 \leq \Psi \leq 14,5$); e condição pré-usinagem ($3,5 \leq \Psi \leq 7,5$). O ajuste fino é promovido pelo material e sua microestrutura. Com base nestes resultados, pode-se apontar um indicio que a metodologia teve êxito em definir condições de superfícies, que tendem a gerar diferentes respostas à sustentação de carga no contato em serviço (Rosén e Thomas, 2001; Pawlus, Grabon e Czach, 2019).

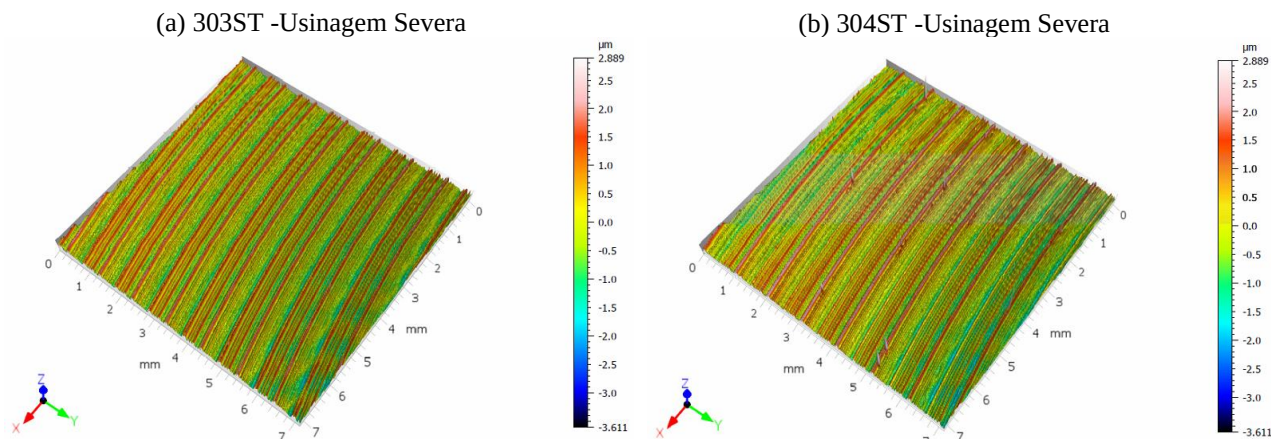


Figura 10. Topografia em 3D dos materiais avaliados por interferometria óptica, tendo em conta uma área de análise de $7,15 \times 7,15 \text{ mm}^2$.

Tabela 5. Resultados dos parâmetros de asperezas e do índice de plasticidade previstos para as distintas condições de materiais e superfícies.

Condição de Material	Condição da Superfície	σ^* - Desvio Padrão da Distribuição de Alturas das Asperezas [μm]	r – Raio Médio das asperezas [μm]	Ψ – Índice de Plasticidade
303SL	Usinagem Severa	0,55	18,43	16,5
303ST		0,67	18,89	18,7
304SL		0,39	35,29	11,5
304ST		0,66	31,98	15,6
303SL	Usinagem Moderada	0,39	16,91	14,5
303ST		0,36	18,09	14,0
304SL		0,45	27,73	13,9
304ST		0,40	30,75	12,4
303SL	Pré-Usinagem	0,07	37,07	4,1
303ST		0,11	20,95	7,2
304SL		0,06	46,93	3,9
304ST		0,06	35,44	4,5

4. CONCLUSÕES

Os resultados permitiram delinear as conclusões e comentários que se seguem:

- Composição química e caracterização microestrutural: a composição química dos aços estudados está de acordo com as normas e literatura reportada, sendo o teor de enxofre o fator determinante na diferenciação dos aços 304 (homogêneo) e 303 (heterogêneo). Na categoria pré-usinagem, a caracterização da microestrutura desses materiais possibilitou distinguir a morfologia das inclusões de MnS nas seções longitudinal (alongadas) e transversal (pontuais), que aparece decorrente do processamento da matéria-prima. Na categoria pós-usinagem, a existência desses precipitados incoerentes afeta localmente os mecanismos de deformação durante a usinagem, sendo que houve variações nos parâmetros de corte de modo a propiciar intensidades moderada e severa de fresamento;
- Comportamento mecânico em multiescala: os ensaios de tração possibilitaram observar efeito do MnS no aço 303, reduzindo a ductilidade deste aço em relação ao material homogêneo de referência (aço 304). Em microescala, o

estudo com base em microdureza Vickers complementou a hipótese de incremento na dureza e sustentou a questão de similaridades de propriedades mecânicas da matriz austenítica dos aços;

- Topografia e índice de plasticidade: caracterizações da topografia em 3D propiciaram abordar a influência do comportamento mecânico nas respostas referentes à remoção de material por usinagem. Os experimentos realizados foram suportados por dados apontados na literatura. Assim, 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. O índice de plasticidade vem a apresentar uma definição mais completa de superfícies engenheiradas por usinagem, com a incorporação de aspectos e tratamentos geométricos/estatísticos das asperezas. Nesta pesquisa inicial, faixas de índice de plasticidade foram estimadas de modo apresentar um aumento gradual em função da intensidade (severidade) do processo de fresamento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - 2020/10653-5) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento da presente investigação.

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM), 2016. *ASTM E8 / E8M-16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA (USA): ASTM Int.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 2017a. *ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM Int., p.1–12.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 2017b. *ASTM E92-17: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. ASTM Int., p.1–27.
- Barbosa, P.A. (2014). Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Boidi, G., Tertuliano, I.S., Profito, F.J., de Rossi, W. e Machado, I.F., 2020. Effect of laser surface texturing on friction behaviour in elastohydrodynamically lubricated point contacts under different sliding-rolling conditions. *Tribology International*, 149:105613.
- Broitman, E. (2017). Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview. *Tribology Letters*, 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 da Universidade de São Paulo.
- Chagas, G.M.P. e Machado, I.F., 2015. Numerical Model of machining considering the effect of mns inclusions in an austenitic stainless steel. *Procedia CIRP*, 31:533–8.
- Chegdani, F. e El Mansori, M., 2018. New multiscale approach for machining analysis of natural fiber reinforced bio-composites. *J Manuf Sci Eng.*, 141(1): 011004.
- Cousseau, T., Ruiz Acero, J.S., Sinatora, A., 2016. Tribological response of fresh and used engine oils: The effect of surface texturing, roughness and fuel type. *Tribology International*, 100:60–9.
- Greenwood, J.A. e Williamson, J.B.P. (1966). Contact of nominally flat surfaces. *Proc R Soc London Ser A Math Phys. Sci.*, 295:300–19.
- Hutchings, I. e Shipway, P., 2017. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann, UK, 2nd edition.
- International Organization for Standardization (ISO) (2014). *ISO 15510:2014: Standard Stainless steels — Chemical composition*.
- Kumar, A. e 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. e 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.
- Machado, I.F., Boidi, G., Fukumasu, N.K., Tertuliano, A.J.O., Seriacopi, V. e Souza, R.M., 2021. Effect of sintering densification on micro-scale mechanical and tribological behaviour of niobium carbide. *Wear*, 482–483:203958.
- Malakizadi, A., Oberbeck, J.N., Magnevall, M. e Krajnik, P., 2019. A new constitutive model for cutting simulation of 316L austenitic stainless steel. *Procedia CIRP*, 82:53–8.
- Pawlus, P., Grabon, W.A., Czach, D., 2019. Calculation of plasticity index of honed cylinder liner textures. *J Phys Conf. Ser.*; 1183, 012003.
- Profito, F.J. (2010). Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicada a superfícies texturizadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Rosén, B.G. e Thomas, T.R. (2001). Relationship of the plasticity index to machining parameters. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 41:2061–9.
- Sandvik Coromant. CoroMill® 245 insert for milling - R245-12 T3 K-MM 2030 2021. <<https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx?c=R245-12 T3 K-MM 2030>>. 10 Agost. 2021.
- Seriacopi, V., Fukumasu, N.K., Souza, R.M. e Machado, I.F. (2016). Analysis of abrasion mechanisms in the AISI 303 stainless steel: Effect of Deformed Layer. *Procedia CIRP*, 45:187–90.
- Seriacopi, V., Prados, E.F., Fukumasu, N.K., Souza, R.M. e 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.
- Souza, R.M., Ordoñez, M.F.C., Mezghani, S., Crequy, S., Fukumasu, N.K., Machado, I.F. e El Mansori, M., 2020. Orthogonal cut of SPS-sintered composites with ferrous matrix and FeMoS particles: Numerical and experimental analysis. *Tribology International*, 149:105750.

Tarasco, B. S., Castanheira, G.M., Costa, R. 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.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

PLASTICITY INDEX STUDIES APPLIED TO THE CHARACTERIZATION OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL IN MILLING PROCESS

Vanessa Seriacopi

Amanda Leite Polastro

Éd Claudio Bordinassi

Adalto de Farias

Marcelo Otavio dos Santos

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia (CEUN-IMT), Praça Mauá, 1 - Mauá, São Caetano do Sul - SP, Brasil, CEP: 09580-900

vanessa.seriacopi@maua.br

amandaleitepolastro@gmail.com

ecb@maua.br

adalto.farias@maua.br

marcelo.santos@maua.br

Izabel Fernanda Machado

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Butantã, São Paulo - SP, Brasil, CEP: 05508-030

machadoi@usp.br

Abstract. Material response during machining processes can be resulted of microstructural aspects, heterogeneities, mechanical and/or thermal-physics properties, for instance. Focusing on austenitic stainless steels, their applications are defined as a function of chemical composition and features, which result in distinguished conditions of corrosion, fatigue and material removal resistances, the occurrence of hardening mechanisms, and proper requirements in terms of thermomechanical behavior. Based on this context, the aim of this work consisted of evaluating the effects of the mechanical behavior and topography of austenitic stainless steels, providing by milling process, in view of the plasticity index that tends to incorporate the material features and parameters of asperities, which allow investigating with respect to engineered surfaces due to machining. To achieve this objective, microstructural characterizations, chemical composition analyzes (X-ray fluorescence) and mechanical tests (tensile and Vickers microhardness) were performed to assess the deformation mechanisms and to categorize the surfaces. Furthermore, dry milling of the AISI 304 (austenitic matrix) and AISI 303 (austenitic matrix with MnS presence) steels, and posterior characterizations were developed, providing the surface evaluation as a consequence of the conditions imposed by the manufacturing process. A facing milling cutter with Ø63 mm and 5 inserts was used in the Romi Discovery 560 machining center. The cutting parameters were established as follows: cutting speed of 170 m/min; depths of cut of 0.35 – 1.0 mm; feeds corresponding to 0.1 – 0.2 mm/rev; and spindle speeds of 429.47 – 858.93 rpm. The results allowed concluding that the topography evaluation, obtained from the surfaces milled of the both steels, tends to show the influence of the distribution of MnS inclusions that, in turn, present consequences on the E/H ratio of the studied materials. The plasticity index contributed to provide a more detailed definition about the surfaces, with the incorporation of the aspects and asperity treatments, since the ranges of this parameter were calculated and denoted a gradual increase as a function of the severity of the milling process.

Keywords: Milling; Austenitic Stainless Steels; Microstructure; Topography; Plasticity Index

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.