



ANÁLISE NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DO FRESAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS EM FUNÇÃO DE ÍNDICE DE PLASTICIDADE E ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE

Seriacopi, V.^{1*}; Bordinassi, E.C.¹; Farias, A.¹; Santos, M.O.¹; Paschoalinoto, N.W.¹;
Machado, I.F.²

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Mauá de Tecnologia. Praça Mauá 01, São Caetano do Sul, SP, Brasil, CEP: 09580-900.

² Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Mello Moraes 2231, São Paulo, SP, Brasil, CEP: 05508-030

*Autor para correspondência: vanessa.seriacopi@maua.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho consistiu em abordar definições de materiais e projeto relacionadas às superfícies engenheiradas, via a elaboração de uma metodologia numérica-experimental aplicada ao fresamento. Usinagem a seco por fresamento, em acabamento, dos aços AISI 303 e 304 foram desenvolvidas. As caracterizações experimentais foram: microscopia óptica e eletrônica de varredura; composição química; ensaios mecânicos de tração e microdureza Vickers; e topográfica. Modelagens por MEF no software DEFORM 3D implementaram a previsão da energia específica na manufatura. Os resultados indicaram o efeito das propriedades mecânicas e heterogeneidades na topografia e no índice de plasticidade. As simulações numéricas permitiram comparar os mecanismos de deformação e remoção de material no fresamento, forças de corte e energia dissipadas. Para concluir, os resultados se mostraram afetados pelas propriedades dos materiais como, por exemplo, a razão módulo de elasticidade / dureza, que tende a influenciar a geração de superfícies e esforços no corte.

Palavras-chaves: Fresamento, Aços inoxidáveis austeníticos, Índice de Plasticidade, Topografia, Energia de Corte

INTRODUÇÃO

A investigação por um conjunto de informações sobre a microestrutura e o desempenho mecânico de materiais é essencial para a tomada de decisões em processos de fabricação, sendo envolvidos aspectos que abrangem a seleção de materiais para peças e ferramentas, requisitos geométricos e superficiais, e aspectos de solicitações termomecânicas responsáveis por alterar o funcionamento do sistema como um todo. Um dos parâmetros para relacionar 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 se trata do índice de plasticidade, que é descrito de forma a prover uma relação entre as propriedades mecânicas do material usinado (em termos de módulo elástico e dureza) e as características geométricas referentes às distribuições de asperezas da superfície em análise (HUTCHINGS;

SHIPWAY, 2017). Em adição, relações entre esse parâmetro e propriedades termofísicas dos materiais, com foco em processos de fabricação como o brunimento e a retificação foram reportadas por Pawlus; Grabon; Czach (2019).

Além disso, em processos de remoção de material, tem-se o parâmetro energia específica, que pode incluir os efeitos de deformação plástica, de propriedades de dano e/ou ruptura, e de resistência ao contato por meio do coeficiente de atrito, determinado pela razão entre as forças tangencial e normal do sistema tribológico. Portanto, a energia específica de corte pode ser designada como uma propriedade indicativa da resistência de materiais durante processos de manufatura por usinagem (MEZGHANI et al., 2013; HE; XU, 2016).

Por sua vez, a investigação do ponto de vista microestrutural é importante para avaliar o histórico e as consequências do produto final decorrentes dos processos de usinagem. Os estudos para os aços inoxidáveis foram direcionados à adição de elementos químicos à matriz do aço austenítico, resultando em um material heterogêneo, possibilitando estudar como esses elementos modificam suas propriedades e influenciam a formação de 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, identificando-se melhorias referentes à usinabilidade do aço, por meio da redução dos esforços de corte.

Outra literatura descrita em Vishwakarma e Sharma (2020) empregou elementos finitos, por meio do software DEFORM 3D, e reportou as respostas de rugosidade média (Ra) após fresamento periférico do alumínio, com uma fresa de metal duro (WC+15% Co), e mostraram a influência da velocidade e da profundidade de corte na rugosidade da peça, fixando-se um determinado avanço da ferramenta. Os autores verificaram que o aumento na velocidade de corte tende a reduzir a rugosidade da peça, e indicaram uma possível instabilidade da ferramenta ao longo da superfície usinada. Contudo, a comparação entre os valores de Ra numéricos e experimental denotaram um erro percentual entre 20 e 55%, corroborando a dificuldade e o grau de complexidade da modelagem computacional de remoção de material.

Portanto, a resposta em processos de usinagem pode ser delineada por meio dos materiais e suas propriedades, com avaliações de fenômenos e mecanismos resultam das características e desempenho mecânico dos materiais em multiescala. A caracterização e o entendimento das relações entre variáveis do sistema submetido às solicitações, termomecânicas por exemplo, podem ser aplicados para alimentar plataformas digitais, e propiciar treinamentos com tecnologias ferramentas inteligentes de modelagem e aprendizagem de máquina (BOIDI et al., 2020), provendo base para desenvolvimentos direcionados ao design de materiais. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi conduzir uma metodologia híbrida numérica-experimental aplicada ao fresamento dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 (heterogêneo) e 304 (homogêneo), avaliando o índice de plasticidade e a energia de corte.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterizações microestrutural e de composição química em corpos de prova de aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e 304 foram realizadas previamente aos testes de usinagem por fresamento. As amostras foram submetidas ao procedimento de preparação metalográfica segundo a norma ASTM E3-11 (2017), e ataque eletrolítico em uma área de 1 cm² com 10% de ácido oxálico em solução aquosa (BARBOSA, 2014). Utilizou-se o microscópio óptico Olympus BX60M para a observação das microestruturas resultantes. Em adição, a composição química dos aços foi feita por meio da técnica de fluorescência de raios X por energia dispersiva, empregando-se o método *Standardless* (flúor ao urânio) e o equipamento Zetium (Malvern Panalytical).

Ensaio de tração em corpos de prova dos aços AISI 303 e 304 foram executados em uma máquina universal de ensaios Losenhausen UPM com capacidade máxima de 40 tonf. Os corpos de prova possuíam forma cilíndrica e dimensões padronizadas pela norma ASTM E8-E8M-16a (2016), com diâmetro inicial de ensaio de 12,5 mm e comprimento útil inicial de 50 mm. A velocidade de deformação correspondeu a 1 mm.min⁻¹. Para as medidas de microdureza Vickers, utilizou-se o microdurômetro Vickers – Mitutoyo HM-100, aplicando-se a carga de 50 gf, sendo a determinação de distintas regiões e o afastamento da borda de modo a atender a norma ASTM E92 – 17 (2017).

Na sequência, conduziu-se o fresamento das amostras embutidas de aços inoxidáveis AISI 303 e 304 com Ø30 mm e 15 mm de espessura no Centro de Usinagem Romi Discovery 560, utilizando-se cinco insertos de metal duro Sandvik Coromill modelo R245-12T3 K-MM 2030, classe M, revestidas com nitreto de titânio (TiAlN+TiN) em um cabeçote de faceamento com 63 mm de diâmetro. A fim de padronizar as nomenclaturas, definiu-se o número 303 ou 304 para identificar o tipo de aço, e as letras L e T indicando seção longitudinal ou transversal, respectivamente. Por exemplo, 303T indica a amostra de aço AISI 303 – seção transversal.

O fresamento foi realizado com base nos respectivos parâmetros, recomendados pelo fornecedor para a ferramentas de corte especificada (SANDVIK COROMANT, 2024): (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; (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. Depois do fresamento, as superfícies foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV modelo: Tescan Vega 4 LMS).

Em adição, a rugosidade das amostras dos aços 303 e 304, ST e SL, foi medida por interferometria óptica (método sem contato), utilizando-se o equipamento CCI-MP Taylor Hobson. A área base de medição consistiu em 0,86 x 0,86 mm², aplicando-se uma lente de 20X.

Com base nas caracterizações experimentais descritas, calculou-se o índice de plasticidade (ψ) designado de acordo com a **Eq. (1)**, e que se apresenta resultante de uma razão entre as propriedades mecânicas dos materiais e as propriedades das asperezas das superfícies em contato para aplicações de Engenharia.

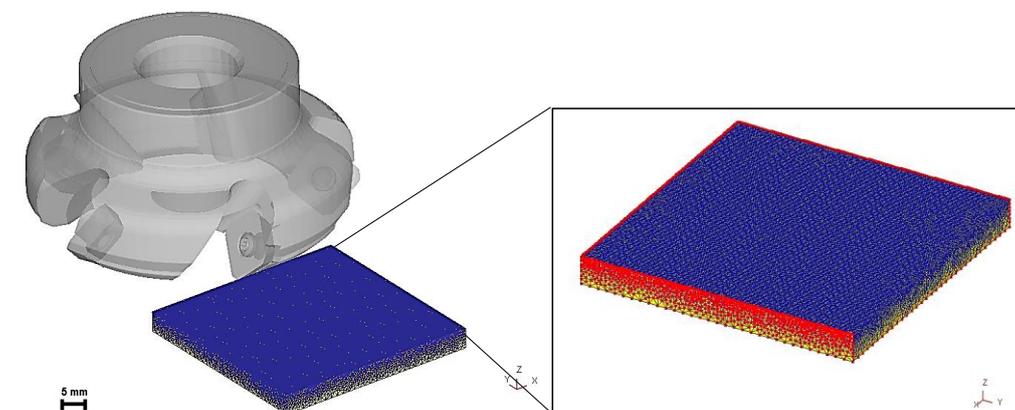
$$\psi = \frac{E^*}{H} \left(\frac{\sigma^*}{r} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Na qual: E^* e H são, respectivamente, o módulo elástico e a dureza (medida de deformação plástica das asperezas) 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; THOMAS, 2001; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A modelagem via Método dos Elementos Finitos (MEF) do fresamento de topo dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e AISI 304 foi desenvolvida no software Deform 3D, fazendo-se uso do módulo de usinagem (*Machining*), adquirido com recursos deste projeto de pesquisa do IMT. O modelo simplificado visou reproduzir as condições dos ensaios experimentais reportados previamente, considerando-se as devidas geometrias de ferramenta e peça, materiais, condições de contorno e carregamento deste processo de fabricação. Na **Figura 1**, notam-se as geometrias consideradas e a malha de elementos finitos discretizada para a peça. Conforme o detalhe da peça observado na **Figura 1**, as laterais e a base (em vermelho) foram engastadas ($U_x = U_y = U_z = 0$), de modo a representar um sistema de fixação da peça (morsa) na máquina. Porém, a superfície da peça na qual se verifica a entrada da ferramenta está sem restrições, de modo a propiciar o avanço inicial desta ferramenta.

Para a geração da malha da peça, fez-se uma análise de convergência. A malha final foi designada em 209.392 elementos, com um total de 46.644 nós. Durante a simulação do processo de fresamento, a partir do grau crítico de deformação dos elementos, o software conduz um remalhamento dedicado (*remeshing rules*).

Figura 1 – Sistema de fresamento modelado por elementos finitos no software Deform 3D: cabeçote de facear e peça



De forma geral, as propriedades dos materiais e modelos foram designados no banco de dados do software na temperatura de 20 a 800 °C, no que diz respeito às propriedades mecânicas, térmicas e de dano dúctil (Cockcroft-Latham) consideradas na simulação computacional de fresamento dos aços 303 e 304, sendo que foram levadas em consideração a variação com a temperatura e a taxa de deformação, importante para reproduzir processos de fabricação por usinagem. Para a ferramenta

de corte tida como rígida, considerou-se o material dos insertos de metal duro, conforme a especificação do fabricante em R245-12T3 K-MM 2030, classe M, revestidas com TiAlN+TiN. No software Deform 3D, selecionou-se a propriedade do revestimento em sua biblioteca sendo apontado como “Coating TiAlN”.

A ferramenta foi posicionada inicialmente com duas profundidades de corte (0,35 e 1,00 mm), conforme indicado na **Tabela 1**. Foram impostos seus movimentos de rotação e avanço sobre a peça na análise do movimento de modo simultâneo, a fim de simular as condições de laboratório. O contato peça-ferramenta a seco foi simulado numericamente, considerando-se o modelo por cisalhamento (*shear model*) com um coeficiente (m) igual a 0,6 para reproduzir o processo de usinagem. Por sua vez, o coeficiente de transferência de calor foi atribuído constante no valor de 40 W/(m².K) (NAGARAJ et al., 2018).

Tabela 1 – Síntese das condições experimentais do processo de fresamento que foram simuladas pelo MEF.

Condição	Material da Peça	Meio Interfacial	Velocidade de corte (V_c) [m/min]	Profundidade de Corte (a_p) [mm]	Avanço por rotação (f_r) [mm/rev]	Rotação (n) [rpm]
01- moderada	Aço 304	Sem Fluido	170	0,35	0,1	429,47
02- severa	Aço 304	Sem Fluido	170	1,00	0,2	858,93
03- moderada	Aço 303	Sem Fluido	170	0,35	0,1	429,47
04- severa	Aço 303	Sem Fluido	170	1,00	0,2	858,93

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química resultante para os aços AISI 303 e 304 é fornecida na **Tabela 2**. A porcentagem dos elementos presentes nas amostras está dentro do previsto pela norma ISO15510:2014, com ligeira variação em termos do teor de enxofre no aço AISI 303.

Tabela 2 – Resultados da composição química dos aços inoxidáveis austeníticos [% massa].

Elemento	Aço AISI 303	Aço AISI 304
C	0,058	0,061 ± 0,001
Cr	15,97 ± 0,04	16,79 ± 0,03
Ni	9,13 ± 0,02	9,10 ± 0,02
Mn	2,11 ± 0,03	1,87 ± 0,01
S	0,32 ± 0,01	0,031 ± 0,002
Si	0,463 ± 0,002	0,54 ± 0,02
P	0,024 ± 0,001	0,027 ± 0,002
Mo	0,58	0,409 ± 0,008
N	-	-
Outros	< 0,4 (Cu)	< 0,4 (Cu)
Fe	Em balanço	Em balanço

A **Figura 2** mostra as microestruturas das amostras dos aços AISI 303 e 304 (SL e ST) após 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). Nota-se que a fração volumétrica de MnS é maior no aço 303, sendo que os sulfetos são vistos alongados em função da direção de laminação da matéria-prima; porém, existem pites do ataque em ambos os materiais.

As propriedades mecânicas médias, decorrentes dos ensaios de tração dos aços inoxidáveis austeníticos, são fornecidas na **Tabela 3**. De acordo com os dados, o limite de resistência à tração do aço 303 resultou ser por volta de 3,5% superior ao valor do limite de resistência do aço 304, uma vez que o MnS no aço 303 desfavorece a movimentação das discordâncias nesse material, por meio do mecanismo de endurecimento por precipitação incoerente. Em contrapartida, a ductilidade do aço 303 foi menor quando comparado ao aço 304, pois 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).

Figura 2 – Micrografias, obtidas por microscopia óptica, de amostras das seções longitudinal e transversal dos aços 303 e 304 (com ataque - 10% ácido oxálico): aumento de 200X.

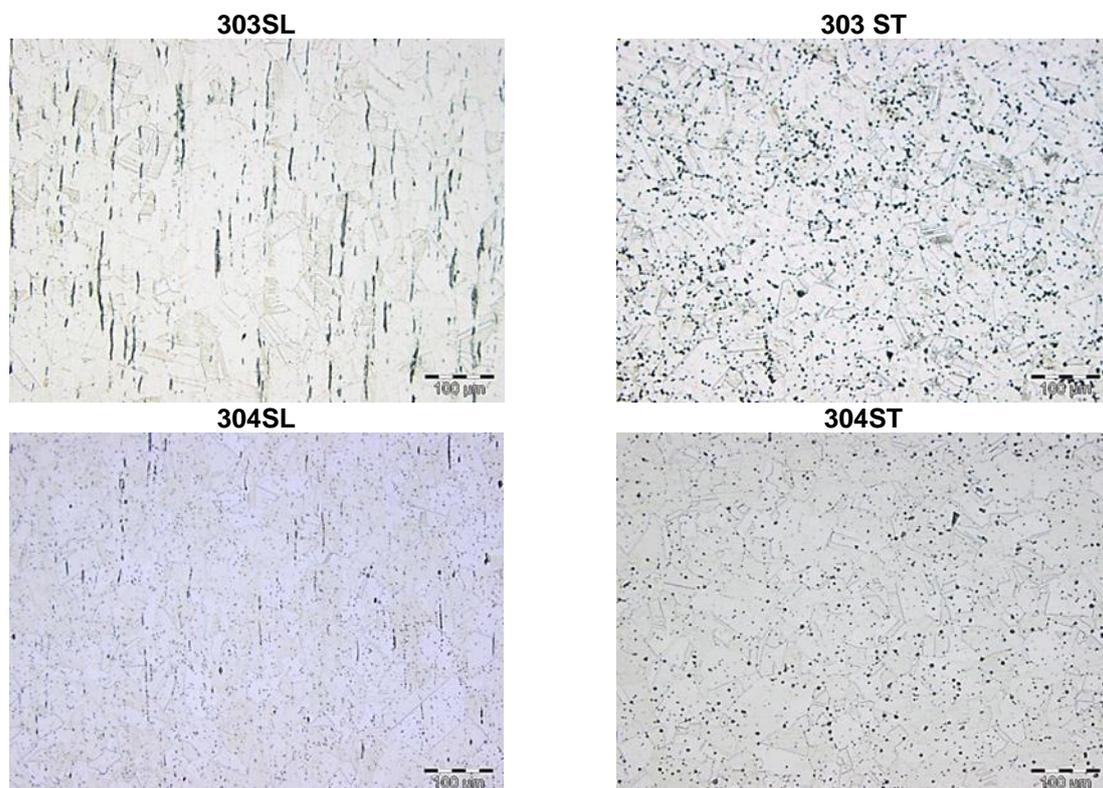


Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços 303 e 304 obtidas de ensaios de tração.

Aço	Módulo de Elasticidade - E [GPa]	Tensão de Escoamento - σ_s [MPa]	Limite de Resistência à Tração [MPa]	Alongamento - ϵ_{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

Os valores médios e de dispersão de 10 medidas de microdureza Vickers referentes às amostras dos aços inoxidáveis 303 e 304, antes do processo de usinagem, são visualizados na **Tabela 4**. Os resultados obtidos são coerentes com resultados do substrato constituído de aço AISI 304, obtidos por Kumar; Das (2021), e Barbosa (2014).

Tabela 4 - Microdureza Vickers de amostras pré- usinagem, considerando-se a carga de 50 gf.

Aço 303 - SL [HV _{0,05}]	Aço 303 - ST [HV _{0,05}]	Matriz Austenítica –Aço 304 [HV _{0,05}]
208 ± 10	217 ± 6	190 ± 3

Após a caracterização de rugosidade, estimou-se os parâmetros de asperezas e, em seguida, conduziram-se os cálculos do índice de plasticidade. A **Tabela 5** mostra os resultados das superfícies engenheiradas por fresamento: (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.

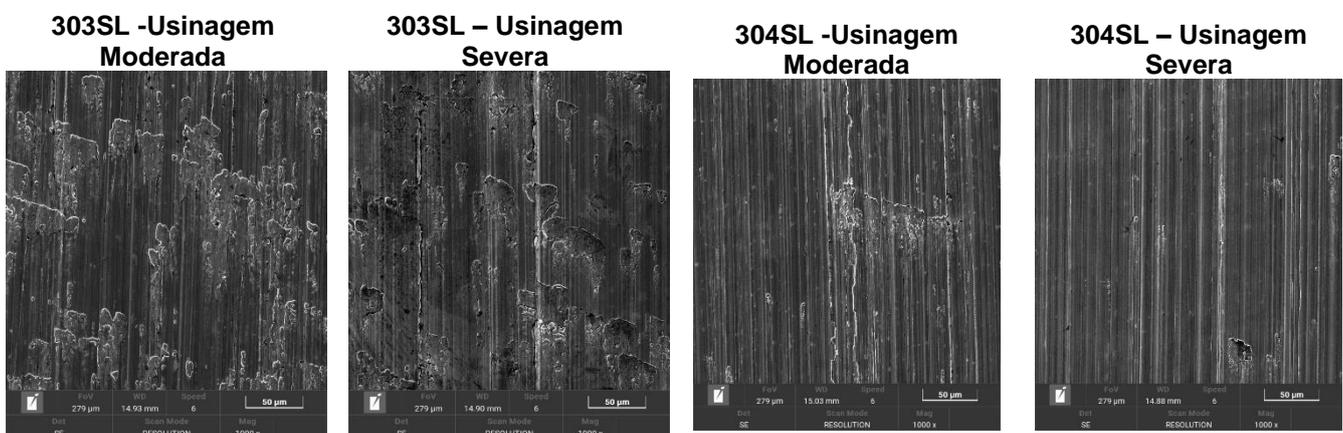
Tabela 5 – Resultados dos parâmetros de asperezas e do índice de plasticidade previstos para as distintas condições de materiais e superfícies.

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		0,55	18,43	16,5
303ST	Usinagem	0,67	18,89	18,7
304SL	Severa	0,39	35,29	11,5
304ST		0,66	31,98	15,6
303SL		0,39	16,91	14,5
303ST	Usinagem	0,36	18,09	14,0
304SL	Moderada	0,45	27,73	13,9
304ST		0,40	30,75	12,4
303SL		0,07	37,07	4,1
303ST	Pré-	0,11	20,95	7,2
304SL	Usinagem	0,06	46,93	3,9
304ST		0,06	35,44	4,5

Na **Figura 3**, tem-se a comparação entre os aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e 304, nas condições de acabamento (moderada) e de desbaste (severa)

usinagem. No caso do aço 303 (heterogêneo), notam-se para ambas as condições de fresamento, a deformação dos sulfetos de manganês com a matriz austenítica, gerando efeitos intensificados de adesão e rasgamento na superfície do material. 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. Vale ressaltar que, na condição severa, as marcas de usinagem são mais pronunciadas do que na condição severa, e tende-se a formar mais trincas em partes da superfície, que resultam na remoção de material na forma de cavacos. Por outro lado, no caso do aço 304 (homogêneo), os resultados em termos de adesão e rasgamento na superfície são atenuados, formando trilhas ou marcas de usinagem mais uniformes quando comparadas às do aço 303 em condições de acabamento e desbaste. Neste caso do material homogêneo, espera-se uma menor tendência à remoção de material (CHAGAS; MACHADO, 2015) como consequência das diferenciações de mecanismos de deformação e formação de cavaco, originando distintas superfícies engenheiradas por fresamento.

Figura 3 – Micrografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (elétrons secundários), das superfícies usinadas dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e 304, nas condições de fresamento.



Por sua vez, a **Tabela 6** indica a comparação do modelo computacional desenvolvido para a análise do fresamento de aços inoxidáveis austeníticos. Os resultados de rugosidade média (R_a) foram obtidos como resposta do modelo, e comparados com as caracterizações experimentais realizadas. Nota-se que o erro da modelagem em contraste ao experimental variou por volta da faixa entre 3 e 30%.

Tabela 6 – Comparação entre os resultados de simulação numérica via MEF e experimentos previamente conduzidos, com ênfase no estudo da topografia e parâmetros de rugosidade. A rugosidade média (R_a) foi tomada como dado comparativo.

Condição de Usinagem	Material da Peça	R_a [μm] - Numérico	R_a [μm] - Experimental	Diferença Numérico x Experimental [%]
Moderada	Aço 304	0,303	0,295	2,7
Severa	Aço 304	0,576	0,487	18,3
Moderada	Aço 303	0,367	0,357	2,8
Severa	Aço 303	0,988	0,759	30,2

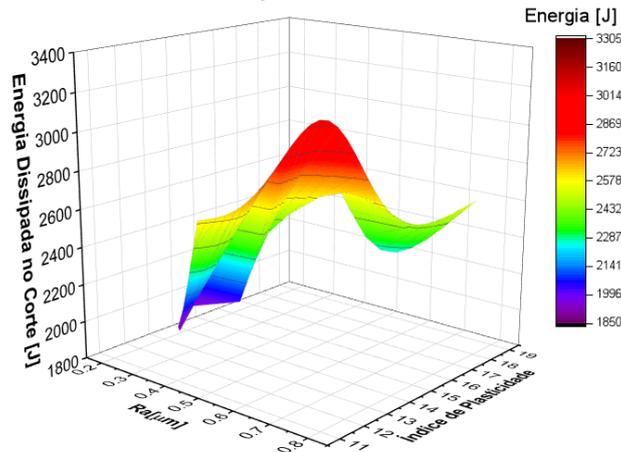
No caso do aço 304, as medidas de dispersão das forças de corte, propiciadas na forma de desvio padrão na **Tabela 7**, são mais elevadas, visto que há uma maior resistência em gerar volume removido do que no aço 303, o que ocasiona picos locais nos gráficos das forças do processo de fresamento.

Tabela 7 – Resultados obtidos da modelagem computacional em termos de forças de corte e energia total dissipada, tendo em vista um curso de 25 mm da ferramenta sobre a peça.

Condição	Material da Peça	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	Energia Dissipada [J]
Moderada	Aço 304	55 ± 19	124 ± 43	188 ± 84	1991
Severa	Aço 304	105 ± 28	126 ± 46	196 ± 57	2615
Moderada	Aço 303	35 ± 8	86 ± 9	122 ± 16	1894
Severa	Aço 303	99 ± 15	117 ± 7	184 ± 22	2340

A **Figura 4** sintetiza na forma de uma superfície os resultados provenientes dos procedimentos experimentais e numéricos das análises do fresamento dos aços inoxidáveis, incorporando as variações de rugosidade média, índice de plasticidade e energia dissipada no processo de fabricação. Nota-se que, a partir desta superfície, condições de usinagem podem ser mapeadas de modo a definir parâmetros ótimos e críticos de processamento. Em linhas gerais, para as faixas em estudo, rugosidades mais elevadas são decorrentes de condições mais severas de usinagem. No entanto, há um valor máximo de índice de plasticidade que gera uma energia máxima dissipada no sistema tribológico. Em subsequência, com o aumento do índice de plasticidade, a energia do processo tende a ser reduzida, o que indica a tendência de que o corte e a remoção de cavaco tendem a ser predominantes em relação à deformação plástica a partir deste ponto crítico, conforme informado na literatura (HE; XU, 2016; MEZGHANI et al., 2016; LEE; MALKIN, 1993).

Figura 4 – Superfície resultante da metodologia híbrida numérica-experimental, envolvendo o índice de plasticidade, a rugosidade e a energia dissipada no processo de fresamento para todas as condições avaliadas.



CONCLUSÕES

Os resultados permitiram apontar as conclusões que se seguem:

- 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 pós-usinagem, a existência de precipitados incoerentes de MnS 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;
 - Os ensaios de tração possibilitaram observar a atuação das partículas de MnS, resultando em endurecimento por precipitação (aumento do limite de resistência à tração) no aço 303, e reduzindo a ductilidade deste aço em relação ao material homogêneo de referência (aço 304). O estudo com base em microdureza Vickers complementou a hipótese de incremento na dureza local em função das inclusões;
 - As superfícies decorrentes do fresamento 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 aços 303 e 304. O índice de plasticidade vem a apresentar uma definição de superfícies engenheiradas, com a incorporação de aspectos e tratamentos das asperezas, sendo que as faixas de índice de plasticidade foram estimadas de modo a aumentar gradativamente em função da severidade do processo de fresamento
 - As forças de corte e energia específica dissipada no processo de fresamento resultantes da simulação via MEF propiciaram o estudo adicional da influência da rotação, da velocidade de corte, do avanço e da adesão nos casos de usinagem moderada e severa dos materiais. Por sua vez, a energia gasta tende a aumentar da condição moderada para a severa de fresamento; e este parâmetro de saída tende a ser menor no aço AISI 303 em relação ao aço AISI 304, em função da facilidade de usar (usinabilidade) do aço 303.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia e à FAPESP (EMU 2020/09163-3, vinculado à RTI 2019/25707-6) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, P.A. Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, 2014.
- BOIDI, G., DA SILVA, M.R.; PROFITO, F.J.; MACHADO, I.F. Using Machine Learning Radial Basis Function (RBF) Method for Predicting Lubricated Friction on Textured and Porous Surfaces. SURF TOPOGR METROL PROP., v. 8, p. 44002, 2020. <https://doi.org/10.1088/2051-672x/abae13>.
- CHAGAS, G.M.P.; MACHADO, I.F. Numerical Model of Machining Considering the Effect of MnS Inclusions in an Austenitic Stainless Steel. PROCEDIA CIRP, v. 31, p.533–8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.093>.
- CHAGAS, G.M.P. 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, 2015.
- HE, X.; XU, C. Specific energy as an index to identify the critical failure mode transition depth in rock cutting. ROCK MECH ROCK ENG, v. 49, p. 1461–78, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0819-6>.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. Tribology: friction and wear of engineering materials. 2nd ed. UK: Butterworth-Heinemann; 2017.
- KUMAR, A.; DAS, A.K. Evolution of microstructure and mechanical properties of Co-SiC tungsten inert gas cladded coating on 304 stainless steel. ENG. SCI. TECHNOL. AN INT. J., v. 24, p. 591–604, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.001>.
- LEE, J.; MALKIN, S. Experimental Investigation of the Bore Honing Process. J. ENG. IND., v. 115, p. 406–14, 1993. <https://doi.org/10.1115/1.2901783>.
- MEZGHANI, S.; IBRAHIM, D.; EL MANSORI, M.; HASSA, Z. Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system. TRIBOLOGY INTERNATIONAL, v. 59, p. 240–7, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.01.015>.
- NAGARAJ, M. S.; EZHILARASAN, C., KUMAR, A. J.P.; BETALA, R. Analysis of multipoint cutting tool temperature using FEM and CFD. MANUF REV., v. 5, p. 16, 2018. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2018013>.
- PAWLUS, P.; GRABON, W.A.; CZACH, D. Calculation of plasticity index of honed cylinder liner textures. J. PHYS. CONF. SER., v. 1183, 2019. doi.org/10.1088/1742-6596/1183/1/012003.
- ROSÉN, B.G.; THOMAS, T.R. Relationship of the plasticity index to machining parameters. INT. J. MACH. TOOLS MANUF., v. 41, p. 2061–9. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00072-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00072-4)
- SANDVIK COROMANT. COROMILL® 245 insert for milling - R245-12 T3 K-MM 2030 2024. <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=R245-12%20T3%20K-MM%202030> (acesso em 25/02/2024).
- VISHWAKARMA, P; SHARMA, A. 3D Finite Element Analysis of milling process for non-ferrous metal using deform-3D. MATER. TODAY PROC., v. 26, p. 525–8, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.131>.

NUMERICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF MILLING ON STAINLESS STEELS BASED ON PLASTICITY INDEX AND SPECIFIC CUTTING ENERGY

ABSTRACT

This study aimed to address definitions of materials and design related to engineered surfaces by developing a numerical-experimental methodology applied to milling. Dry machining via finishing milling of AISI 303 and 304 steels was conducted. The experimental characterizations included optical and scanning electron microscopy, chemical composition, tensile tests, Vickers microhardness tests, and topographic analysis. Finite Element Modeling (FEM) using DEFORM 3D software was employed to predict cutting energy in manufacturing. The results highlighted the impact of mechanical properties and material heterogeneities on topography and plasticity index. Numerical simulations enabled the comparison of deformation mechanisms and material removal in milling, as well as cutting forces and specific cutting energy. In conclusion, the results were influenced by material properties, such as the modulus of elasticity-to-hardness ratio, which tends to affect surface generation and cutting forces.

Keywords: *Milling, Austenitic stainless steels, Plasticity index, Topography, Cutting Energy*