

# MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DO FRESAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Luiz Renato Brumati <sup>1</sup>; Vanessa Seriacopi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

<sup>2</sup> Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

**Resumo.** *A modelagem computacional por elementos finitos de processos de fabricação por usinagem contribui para a avaliação das respostas dos materiais, em função das solicitações termomecânicas impostas na manufatura. Em adição, as superfícies geradas podem ser investigadas de modo eficiente e aprimorado, permitindo prever o comportamento mecânico e planejar aplicações em sistemas de Engenharia. Neste panorama, o objetivo deste trabalho foi realizar simulações numéricas do fresamento em aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e 304, obtendo como resultados os campos de tensões e deformações atuantes, e características topográficas das peças, para comparação com experimentos previamente conduzidos. A metodologia foi focada, portanto, na utilização do módulo de usinagem do software DEFORM 3D, incorporando estudos e pesquisas de parâmetros e banco de dados da literatura. Portanto, como resultados, obteve-se um procedimento sistemático baseado na aplicação do Método dos Elementos Finitos empregado ao fresamento de peças de aços inoxidáveis, possibilitando expandir as discussões no que tange mecanismos de remoção de material por usinagem; dissipação energética; encruamento destes materiais; e considerações tribológicas no quesito atrito no contato peça-ferramenta.*

## Introdução

O projeto de componentes estruturais e mecânicos envolve a determinação das dimensões, da geometria e a escolha de seus materiais de forma a assegurar que estes componentes operem com segurança sob certas condições termomecânicas, ambientais e por longos períodos de tempo. A previsão do comportamento mecânico de elementos, a partir de um modelo matemático ancorado por resultados experimentais, permite estudos e análises aprimoradas em termos de estimativa de mecanismos de falhas ou defeitos, que possam ser provenientes dos processos de fabricação ou de eventos externos.

Neste panorama, surgem questões referentes aos processos de usinagem e suas consequências. O fresamento é um dos métodos de usinagem mais utilizados na indústria para trabalhar superfícies prismáticas, por exemplo. Em linhas gerais, é um processo de usinagem convencional que se caracteriza por sua ferramenta denominada fresa, composta de arestas dispostas simetricamente em torno de um eixo, sendo que o movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo, e o movimento de avanço da ferramenta sobre a peça. Esse processo permite a geração de peças com diferentes formatos, podendo ser classificado de diferentes formas, tais como: o fresamento tangencial, quando o eixo da peça é paralelo à superfície que está sendo gerada; e o fresamento de topo, quando o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada (Diniz, Marcondes e Coppini, 2013).

Portanto, o fresamento trata-se de um processo complexo, no qual são passíveis abordagens em termos de força de corte, temperatura, contato tribológico, materiais e geometrias complexas, desgaste da ferramenta, entre outros aspectos. Como resultado, a análise computacional tem um papel importante como ferramenta de estudo numérico do processo de fresamento, envolvendo condições referentes à deformação elastoplástica da peça, com deformação permanente e remoção de material na forma de cavacos; modelos de dano; atribuições de contato entre peça e ferramenta; e termodinâmica, por exemplo (Wang, Hu e Zhu, 2014).

Vale ressaltar que as análises por simulação computacional isoladas não são suficientes para aceitação de suas respostas. Assim sendo, essas soluções precisam ser validadas por resultados experimentais consistentes. Deve-se levar em consideração diversas técnicas de solução existentes,

sendo que uma das que mais se destacam consiste no MEF (Método dos Elementos Finitos), por conta de sua versatilidade e abrangência conceitual, que pode ser aplicado à fabricação de componentes com formas geométricas e materiais distintos. O MEF é uma ferramenta numérica para solução aproximada de equações diferenciais, que descrevam problemas de engenharia, por meio da divisão do domínio em um número finito de elementos de geometria simples que juntos se aproximam à forma do domínio (contínuo) (Alves Filho, 2009).

Vishwakarma e Sharma (2020) empregaram elementos finitos, por meio do software DEFORM 3D, e investigaram as respostas de rugosidade média (Ra) após fresamento periférico (tangencial) 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.

Em termos de aços inoxidáveis austeníticos, Chagas *et al.* (2013) modelaram por MEF no software DEFORM, e estudaram efeitos térmicos na formação de cavacos do aço AISI 304 durante o processo de corte ortogonal, e analisaram condições de alterações microestruturais como a formação de martensita induzida por deformação, decorrente das solicitações termomecânicas do processo de manufatura. Modelos de dano foram apontados como importantes nas definições de remoção de material e mecanismos de deformação do material da peça em análise. Em adição, Chagas e Machado (2015) avaliaram os efeitos de inclusões de MnS na usinagem por torneamento do aço inoxidável AISI 303, fazendo uso do software de elementos finitos Abaqus, e constataram que estas partículas tendem a atuar como concentradores de tensão, modificando o campo de deformações e facilitando a remoção de material, sendo que esta pode ser intensificada também dependendo da morfologia das inclusões.

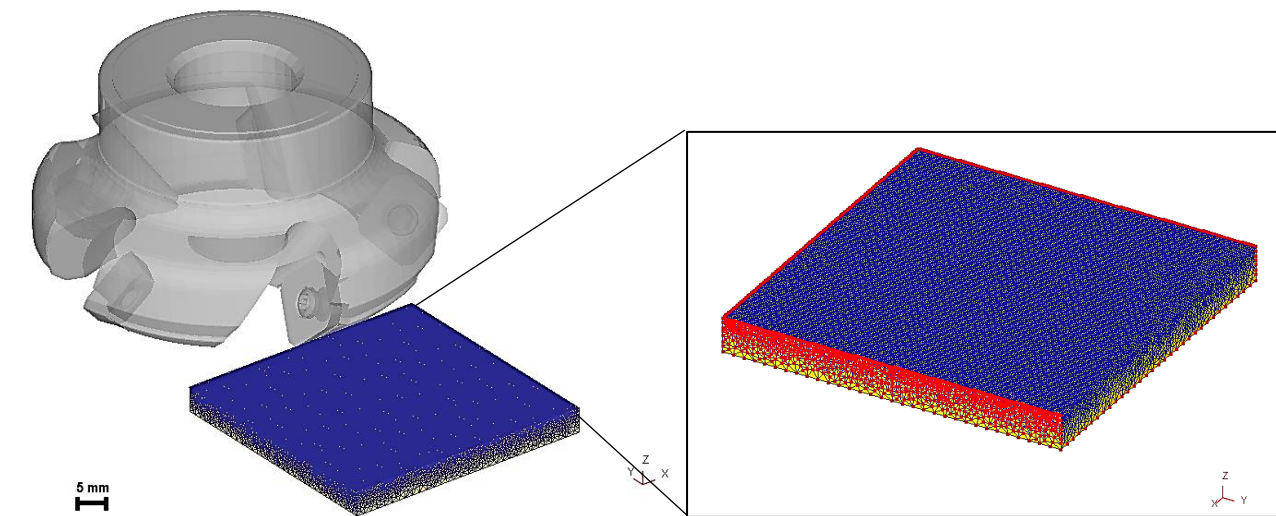
No que diz respeito à parte experimental, Polastro e Seriacopi (2021) investigaram as diferenças entre as respostas em fresamento de topo dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 (homogêneo) e AISI 303 (heterogêneo com partículas de MnS). Os resultados indicaram diferenças microestruturais que afetaram a usinabilidade dos materiais; variações da rugosidade da peça em decorrência do comportamento mecânico reportado pela relação E/H (módulo elástico / dureza), conforme literatura prévia (Kumar e Li, 2022; Seriacopi *et al.*, 2020), e condições de remoção distinguidas entre moderada e severa nas seções transversal e longitudinal das amostras.

Portanto, tendo em vista este *background*, o objetivo desse trabalho consistiu em conduzir simulações computacionais por elementos finitos do fresamento de aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e 304, fornecendo a avaliação e resultados sobre o campo de tensões, deformações, forças de corte e características de acabamento superficial resultantes do referido processo de usinagem. Os resultados obtidos por simulação numérica são comparados com o trabalho experimental prévio realizado por Polastro e Seriacopi (2021) para proporcionar discussões no que tange o comportamento mecânico dos materiais.

## **Material e Métodos**

A modelagem via 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*). O modelo simplificado visou reproduzir as condições dos ensaios experimentais reportados em Polastro e Seriacopi (2021), 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. Na sequência, relatam-se as etapas envolvidas na modelagem computacional do fresamento:

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



(i-) Geometria do modelo: A peça de trabalho foi modelada com uma geometria prismática simplificada nas dimensões de  $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}^3$  (Figura 1), objetivando reduzir recursos computacionais. Assim, a peça de trabalho foi selecionada próxima à parte da superfície de processamento usada como objeto de análise. Por sua vez, de modo a simular o processo real, a ferramenta consistiu no cabeçote de facear que foi importado em um formato “.stl”, com base em consulta do modelo Coromill R245 no catálogo do respectivo fabricante (Sandvik Coromant, 2022). De acordo com a Figura 1, o diâmetro do cabeçote de faceamento foi especificado com 63 mm e 5 insertos foram aplicados de modo a permitir a consistência com os experimentos.

(ii-) Modelos constitutivos dos materiais: Nos dias atuais, pesquisas baseiam-se no modelo constitutivo do material, bem como o critério de falha, para expandir os conhecimentos, e possibilitar críticas sobre a validação do modelo de usinagem (Malakizadi *et al.*, 2019). Para tal entrada do modelo computacional, a peça foi considerada com comportamento elastoplástico e a ferramenta do fresamento foi tomada como rígida na análise.

No caso da peça, os materiais simulados foram os aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e 304. Na biblioteca do software Deform 3D, encontrou-se disponível apenas dados referentes ao aço 304. Para o aço 303, as propriedades mecânicas da curva tensão-deformação foram adaptadas a partir dos resultados experimentais de ensaios de tração listados em Polastro e Seriacopi (2021). Na Tabela 1, indicam-se de forma geral algumas faixas trabalhadas e modelos designados no banco de dados do software, no que diz respeito às propriedades mecânicas, térmicas e de dano dúctil consideradas na simulação computacional de fresamento para os materiais estudados, sendo que foram levadas em consideração a variação com a temperatura e a taxa de deformação, importante para reproduzir processos de fabricação por usinagem. Cabe o comentário que a microestrutura do aço 303 não foi modelada diretamente, mas sim o seu efeito no comportamento deste material como peça fresada.

Para a ferramenta de corte, 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 (Sandvik Coromant, 2022). No software Deform 3D, selecionou-se a propriedade do revestimento em sua biblioteca sendo apontado como “Coating TiAlN”.

(iii-) Condições de contorno: 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.

Em adição, a ferramenta foi posicionada inicialmente com duas profundidades de corte (0,35 e 1,00 mm), conforme indicado na Tabela 2. 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.

Tabela 1 – Panorama geral dos modelos das propriedades dos materiais da peça, empregados como entradas na simulação via MEF do fresamento. A biblioteca do software foi utilizada no caso do aço 304, e adaptações foram elaboradas para o aço 303 com base no trabalho experimental prévio de Polastro e Seriacopi (2021).

Propriedade	Modelo e Variáveis	Faixas de Aplicação
Módulo Elástico (E - GPa)	Variação em função da temperatura (T)	T → 20 – 1200 °C
Coefficiente de Poisson	Constante	0,30
Plasticidade (Curvas de Escoamento - MPa)	Modelo: von Mises, com encruamento isotrópico. Variação em função da temperatura (T) e da taxa de deformação ( $\dot{\epsilon}$ )	T → 20 – 800 °C $\dot{\epsilon} \rightarrow 0 - 10^5 s^{-1}$
Coefficiente de Expansão Térmica ( $\alpha - ^\circ C^{-1}$ )	Variação em função da temperatura (T)	T → 20 – 815 °C
Condutividade Térmica [k – W/(m.K)]	Variação em função da temperatura (T)	T → 20 – 550 °C
Calor Específico [c <sub>p</sub> – J/(kg.°C)]	Variação em função da temperatura (T)	T → 20 – 960 °C
Densidade ( $\rho - kg/m^3$ )	Constante	8000 kg/m <sup>3</sup>
Emissividade	Constante	0,70
Parcela de deformação plástica convertida em calor	Constante	0,90
Dano	Modelo: Cockcroft-Latham	Definições em termos de fratura dúctil

(iv-) Simulação da usinagem por fresamento no software Deform 3D: De acordo com a Tabela 2, considerou-se duas condições do processo de fabricação para a modelagem da usinagem de cada material, totalizando 4 configurações distinguidas em: condição moderada (aços 303 e 304) - 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; e condição severa (aços 303 e 304) - velocidade de corte de 170 m/min; profundidade de corte de 1,00 mm; avanço correspondente a 0,2 mm/rev; rotação igual a 858,93 rpm; e condições de usinagem a seco (Polastro e Seriacopi, 2021).

Tabela 2 – 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 ( $f_n$ ) [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

(v-) Condições de atrito e transferência de calor no contato peça-ferramenta: o contato 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/(m<sup>2</sup>.K) (Nagaraj *et al.*, 2018). O desgaste da ferramenta não foi investigado no presente estudo.

(vi-) Geração da malha: 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. De acordo com a Figura 1, atribuiu-se uma malha mais refinada à região da superfície da peça (área de contato com a ferramenta), e uma malha mais grosseira à base da mesma. Durante a simulação do processo de fresamento, a partir do grau crítico de deformação dos elementos, o software conduz um remalhamento dedicado (*remeshing rules*).

## Resultados e Discussão

A Tabela 3 indica o grau de validação 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 por Polastro e Seriacopi (2021). Conforme a comparação discorrida, nota-se que o erro da modelagem em contraste ao experimental variou por volta da faixa entre 3 e 30%. Em casos de usinagem moderada, os valores destas diferenças numéricas x experimental foram inferiores do que os casos de usinagem severa, permitindo uma melhor reprodução / validação dos dados experimentais. Possivelmente, essa maior divergência dos resultados numéricos nos casos de usinagem severa se deva a questões de calibração do modelo de dano, que é responsável direto pelas regras de remoção de material. Em adição, a modelagem computacional do aço 303 apresentou uma diferença numérico x experimental superior à do aço 304; uma possível justificativa para tal resultado consiste nas simplificações do modelo do aço 303, incluindo a parte tribológica (atrito e desgaste) no contato com a ferramenta, que não levou em conta de forma direta a simulação da microestrutura com as inclusões afetando a topografia do material, estando sobressalente na matriz austenítica nos experimentos práticos.

Apesar das variações entre as simulações computacionais e os experimentos laboratoriais, o modelo pode ser assumido como validado. De acordo com o reporte de Vishwakarma e Sharma (2020), erros entre os resultados numéricos e experimentais de acabamento superficial por fresamento variaram em torno de  $\pm 50\%$  no caso de alumínio, abrindo vertentes de otimização dos modelos. Então, no presente trabalho, tendo em vista o modelo validado, possibilitou-se delinear discussões a respeito dos seus resultados e trazer contribuições adicionais aos experimentos, visto que resultados como forças de corte, por exemplo, não foram medidas e avaliadas em trabalho discorrido na literatura (Polastro e Seriacopi, 2021).

Tabela 3 – Comparação entre os resultados de simulação numérica via MEF e experimentos previamente conduzidos (Polastro e Seriacopi, 2021), 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	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] - Numérico	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] - 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

Na Figura 2, são fornecidos os resultados dos campos de tensão equivalente para todas as condições de materiais de peça e processo em estudo (Tabela 2). A distribuição de tensões foi obtida após um curso de, aproximadamente, 25 mm da ferramenta de fresamento sobre a peça. Nesta abordagem, parte do material da peça já foi removido na forma de cavacos, de acordo com o critério de dano estabelecido, e os elementos foram apagados da malha (*element deletion*). No entanto, a intensidade de remoção de material é definida conforme os parâmetros do processo de usinagem, sendo que a situação tida como moderada tende a focar em acabamento, e a severa tende a ser compreendida como um início de desbaste dos materiais. Além disso, na Figura 3, podem ser notados os campos de deformação plástica equivalente da peça nos quatro estudos de caso conduzidos (Tabela 2).

Na condição de usinagem moderada (profundidade de corte, avanço e rotação reduzidas), observa-se que os campos de tensão não apresentaram diferenças significativas entre os aços AISI 304 e AISI 303 (Figuras 2a e 2c, respectivamente), sendo que os pontos máximos de valores de tensão são vistos na região de contato peça-ferramenta com intensa sollicitação termomecânica e formação de zonas de cisalhamento complexas (Zhuo, Lu-fang e Li-juan, 2015). Em contrapartida, com o foco no campo de deformações na condição de usinagem moderada, notam-se regiões ou áreas ligeiramente mais deformadas plasticamente, indicadas em vermelho, no aço AISI 304 (Figura 3a) em comparação ao aço AISI 303 (Figura 3c). Tal resultado pode ser atribuído à diferença entre as propriedades mecânicas de ambos os aços, alimentadas no modelo de elementos finitos, uma vez que o aço 303 possui defeitos na forma de inclusões, que geram barreiras à movimentação de discordâncias de modo a aumentar sua tensão de escoamento e variações de suas respostas em encruamento (Polastro e Seriacopi, 2021). Portanto, pode-se induzir que, com as devidas ressalvas e simplificações, a modelagem por elementos finitos do fresamento levou em consideração de forma indireta o caráter microestrutural dos materiais, por meio do comportamento mecânico inserido no software Deform 3D.

Já na condição de usinagem severa (profundidade de corte, avanço e rotação maiores), há suaves diferenças nos resultados dos aços 303 e 304 em termos de tensão (Figuras 2b e 2d), e de deformação plástica (Figuras 3b e 3d). Nos campos de tensão, embora o aço AISI 304 (Figura 2b) apresente pontos mais intensos (em vermelho), o aço AISI 303 (Figura 2d) tende a acumular mais material à frente da ferramenta. Este fenômeno que se inicia com o sulcamento, seguido formação de proa, possuem semelhança aos mecanismos de remoção de material por abrasão (Seriacopi *et al.*, 2020), com deformação plástica acentuada, tendendo a se intensificar em função dos estados triaxiais complexos de tensão, e podem evoluir e gerar o corte com formação de cavacos. Nesta condição severa, e adicionando-se a observação da distribuição de deformação plástica, pode-se verificar que o aço 303 possui uma tendência maior de remoção de material (áreas isoladas e de intensa deformação plástica – Figura 3d) quando contrastado com o comportamento em deformação do aço 304 (Figura 3b). Esse resultado pode ser decorrente da maior usinabilidade do aço AISI 303 (Chagas *et al.*, 2013; Chagas e Machado, 2015). Em termos experimentais, foram caracterizadas que as inclusões têm o papel de concentradores de tensão e podem também se deformar em paralelo à matriz austenítica, incrementando a usinabilidade do aço 303 em relação ao aço 304 (homogêneo) (Seriacopi *et al.*, 2020). Portanto, é importante utilizar dados de ensaios mecânicos para alimentar a simulação numérica, com o intuito de inserir tais comportamentos característicos e tornar o modelo aprimorado.

Figura 2 – Distribuição de tensão equivalente (MPa) na peça, considerando-se um curso de 25 mm da ferramenta (cabecote de faceamento), para todas as condições estudadas.

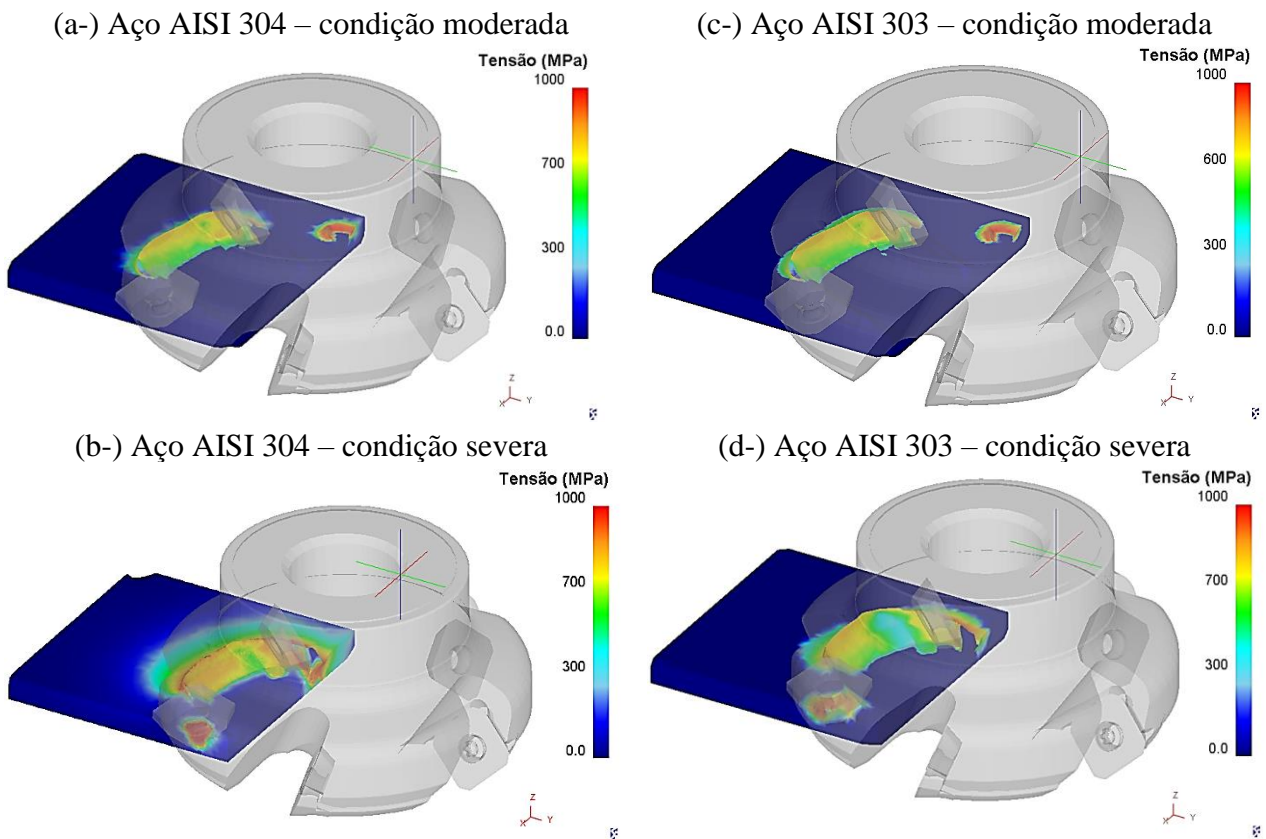


Figura 3 – Distribuição de deformação plástica equivalente na peça, considerando-se um curso de 25 mm da ferramenta (cabecote de faceamento), para todas as condições estudadas.

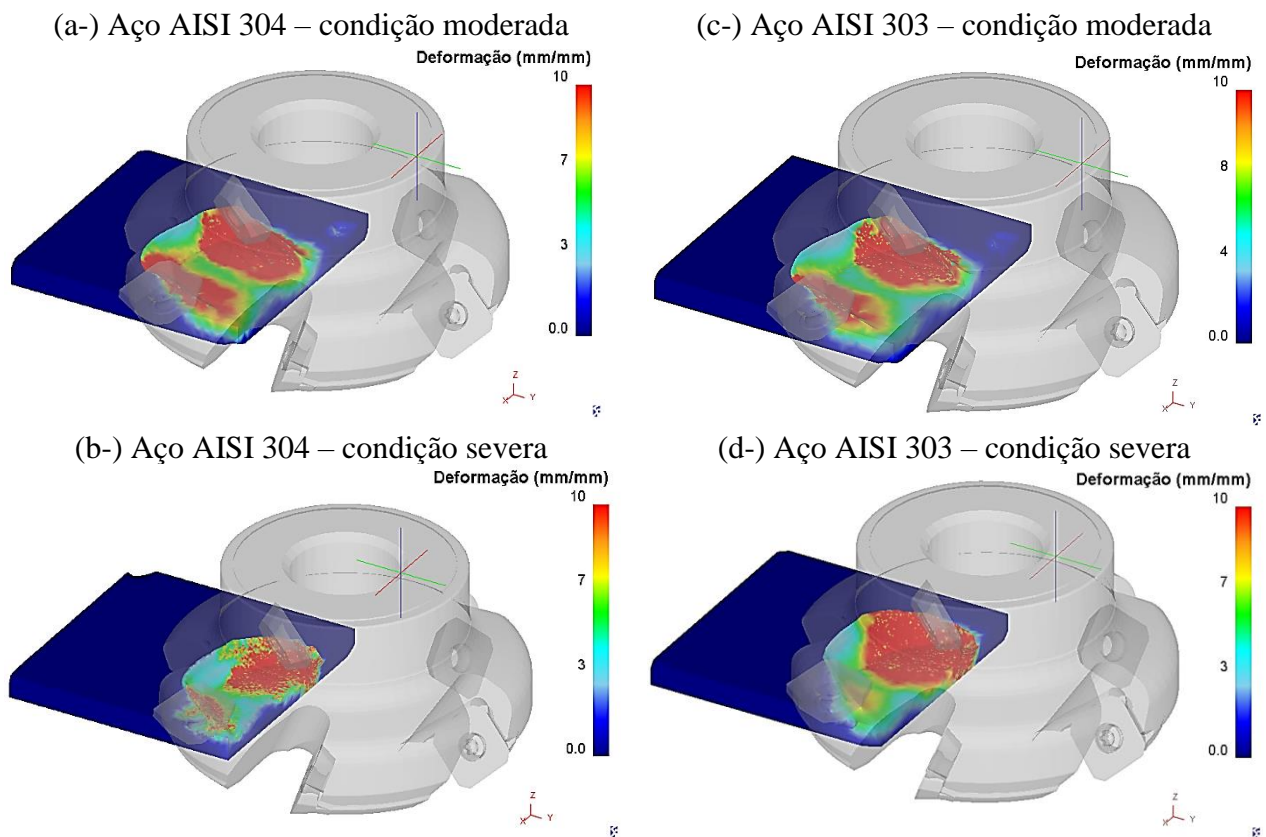


Tabela 4 – Resultados obtidos da modelagem computacional em termos de forças de corte e energia total dissipada, tendo em vista um curso de 25 mm da ferramenta sobre a peça.

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

Em adição, os resultados de simulação numérica de forças de corte e energia total gasta no processo, vistos na Tabela 4, corroboram as hipóteses descritas no que diz respeito às tensões e deformações. Em função da melhor usinabilidade do aço AISI 303, as forças e a energia dissipada tendem a ser menores em relação ao aço AISI 304. A condição severa pode ser aproximada como um caso de desgaste com forças de corte e energia intensificadas em contraste ao acabamento (usinagem moderada).

No caso do aço 304, as medidas de dispersão das forças de corte, propiciadas na forma de desvio padrão na Tabela 4, 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.

Por fim, confirma-se a consistência na escala das forças de corte provenientes da modelagem computacional (Tabela 4), sendo que a força  $F_z$  é a maior em decorrência dos efeitos principais de rotação da ferramenta; a força  $F_y$  decorre dos efeitos principais do avanço da ferramenta, sendo a segunda colocada em termos de intensidade; e a força  $F_x$  tende a apresentar efeitos principais de adesão na direção axial, atingindo os menores valores.

## Conclusões

Pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram atingidos, uma vez que foi possível o desenvolvimento de uma modelagem computacional por elementos finitos do processo de fresamento dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 303 e 304.

As entradas referentes ao comportamento mecânico do modelo via MEF foram incorporadas com dados reais, obtidos de ensaios de tração conduzidos em trabalhos anteriores, em adição à biblioteca do software Deform 3D. Em termos de saída, a rugosidade média ( $R_a$ ) consistiu no parâmetro de comparação entre a simulação numérica e os experimentos reportados em literatura. Verificou-se uma diferença na faixa entre 3 e 30% nesta comparação, o que permitiu validar a modelagem com as devidas ressalvas e simplificações no que tange o modelo de dano/fratura, e às microestruturas dos materiais da peça que tende a afetar a topografia pós-usinagem da peça.

As avaliações dos campos de tensão e deformação plástica equivalentes possibilitaram a diferenciação entre as respostas dos materiais e das condições de usinagem moderada (acabamento) e severa (desbaste). Hipóteses foram levantadas na tentativa de justificar mecanismos de deformação e remoção de material, em função do encruamento e da influência indireta das inclusões no fresamento do aço 303 (heterogêneo) em contraste ao aço 304 (homogêneo). Esse tipo de abordagem apenas foi possível visto que os dados experimentais de entrada incorporam tensões de escoamento distintas aos materiais, decorrentes dos efeitos de defeitos (inclusões) como barreiras à movimentação de discordância.

Para finalizar, forças de corte e energia dissipada no processo de fresamento resultantes da simulação 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, sendo definida uma tendência no sistema cartesiano considerado  $F_z > F_y > F_x$ . 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 usinar (usinabilidade) do aço 303.



## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo suporte financeiro, por meio da bolsa de Iniciação Científica do aluno no decorrer do ano de 2022.

## Referências Bibliográficas

- Alves Filho, A. (2009) *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE*. 6ª. edição. São Paulo, Érica.
- Chagas, G. M. P.; Barbosa, P. A.; Barbosa, C. A.; Machado, I. F. (2013) Thermal Analysis of the Chip Formation in Austenitic Stainless Steel. *Procedia CIRP*, **8**, 293 – 298.
- 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.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. (2013) *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8ª. edição. São Paulo, Artliber.
- 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.
- Nagaraj, M.S.; Ezhilarasan, C.; Kumar, A.J.P.; Betala, R. (2018) Analysis of Multipoint Cutting Tool Temperature using FEM and CFD. *Manufacturing Rev.*, **5**, 16-23.
- Polastro, A.L.; Seriacopi, V. (2021) Análise Microestrutural e Caracterização Mecânica de Aços Inoxidáveis submetidos à Usinagem, *Anais do 13º Seminário de Iniciação Científica do IMT*, São Caetano do Sul.
- Sandvik Coromant (2022) *CoroMill® 245*. [https://www.sandvik.coromant.com/en-us/coromill\\_245](https://www.sandvik.coromant.com/en-us/coromill_245). Acesso em: 25 setembro 2022.
- 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.
- Vishwakarma, P.; Sharma, A. (2020) 3D Finite Element Analysis of Milling Process for Non-Ferrous Metal using Deform-3D. *Materials Today: Proceedings*, **26**, 525–528.
- Wang, Z.; Hu, Y.; Zhu, D. (2014) DEFORM-3D Based on Machining Simulation during Metal Milling. *Key Engineering Materials*, **579-5780**, 197-201.
- Zhuo, C.; Lu-fang, Q.; Li-juan, Y. (2015) Cutting Force Simulation of Titanium based on DEFORM-3D. *3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015)*, **1**, 1846-1849.