

PROCEDIMENTO NUMÉRICO PARA O ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS NA PEÇA DURANTE O CORTE ORTOGONAL

Luísa de Amorim Makhoul Gomes, luisa.makhoul@mecanica.coppe.ufrj.br²

Lívia Mendonça Nogueira, livia.nogueira@cefet-rj.br^{1,2}

Adriane Lopes Mougo, adriane.mougo@cefet-rj.br¹

Fabio da Costa Figueiredo, fabiofigueiredo@mecanica.coppe.ufrj.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, RJ, Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo: Neste trabalho será apresentado o estudo das tensões residuais na zona de cisalhamento terciário, a fim de obter uma análise comparativa das tensões geradas em diferentes condições de corte. Para a análise das tensões residuais foi utilizado o ANSYS que utiliza como base o método de elementos finitos (FEM) para solução numérica. Foi utilizado a toolbox Explicit Dynamics que permite representar problemas com alta não linearidade, como no processo de conformação mecânica. Uma análise dinâmica do processo de corte ortogonal foi realizada a partir dos parâmetros de entrada da ferramenta, do material da peça, das restrições e condições de contorno, sendo possível realizar o estudo do processo de corte desde o início do mecanismo de formação dos cavacos em deformação elástica até seu processo de ruptura e desprendimento junto a superfície de saída da ferramenta de corte. Com isso, foi possível então analisar as tensões durante o corte e verificar a relação entre os parâmetros do processo e as tensões residuais geradas. Para as simulações, as seguintes etapas foram desenvolvidas: modelagem 3D da geometria do problema com auxílio do Design modeler; definição das hipóteses; inserção de dados referentes aos materiais da pastilha de corte e da peça; definição das condições de contorno e de contato para considerar o fenômeno do atrito para a formulação do corte ortogonal. O avanço da ferramenta é definido com uma velocidade constante ao longo do eixo X, não permitindo deslocamentos relativos nos eixos Y e Z. Duas faixas de rotação foram utilizadas para realização dos ensaios, 500 e 800 rpm. Para 800 rpm as tensões, deformações e tensões residuais obtidas foram maiores. O aumento da velocidade de corte diminuiu as forças de usinagem que atuam na dinâmica do corte. Porém, essa diferença refletiu nos resultados gerados. Os valores máximos obtidos para as tensões residuais foram de 918,37 MPa para a rotação de 800 rpm e 571,33 MPa para a rotação de 500 rpm, uma diferença de 60,74%. Em relação à peça, na velocidade de 800 rpm ocorreu a intensificação do encruamento deste material, aumentando a sua resistência mecânica. Por outro lado, essa configuração resulta numa menor estabilidade dimensional, gerando o aumento da rugosidade da peça. A velocidade de 500 rpm apresentou melhor qualidade da superfície pois tem uma distribuição mais uniforme e menores magnitudes de tensões, deformações e tensões residuais geradas.

Palavras-chave: corte ortogonal, simulação numérica, tensão residual, aço inoxidável.

1. INTRODUÇÃO

A tensão residual pode ser definida como a tensão que atua no material após todas as forças que estão agindo sobre a peça serem removidas (Prayogi and Zulkarnain, 2015). Para Outeiro (2018), as tensões residuais podem ser divididas em dois tipos: causadas por uma tensão de tração, que geram efeitos indesejáveis a camada superficial, podendo induzir a fadiga e a falhas por corrosão; ou causadas por tensões de compressão, que são benéficas uma vez que tendem a aumentar as resistências a fadiga e a corrosão. Para o projeto e fabricação de componentes, é necessário levar em consideração as tensões residuais que podem causar instabilidade geométrica, mudanças nas propriedades magnéticas e diminuição da força estática e dinâmica que afetam a vida útil em fadiga, resistência a corrosão e a tensão de fratura do produto.

O processo de corte é dividido em quatro etapas que configuram o mecanismo de formação dos cavacos. Na primeira etapa, ocorre a deformação elástica em que a configuração inicial da peça é recuperada caso seja interrompido o processo de carregamento. Devido à alta intensidade das forças envolvidas no processo de corte, a partir da segunda etapa deste mecanismo, são verificadas as deformações plásticas, não recuperáveis. Por fim, nas etapas seguintes, verifica-se a ruptura na região de cisalhamento e o escoamento do cavaco. Um dos resultados desse procedimento é a qualidade superficial da peça usinada que impacta diretamente na confiabilidade do produto e é decorrente das tensões residuais geradas durante a deformação plástica. Esta deformação é resultado da combinação dos fenômenos térmicos e mecânicos gerados durante

a usinagem.

Os fenômenos térmicos estão diretamente ligados ao calor gerado durante o processo de corte, produzido pela deformação plástica e pelo atrito. No entanto, apenas a parte do calor conduzida para a peça pode gerar tensões residuais devido à contribuição das tensões de tração que ocorrem principalmente pelos efeitos de dilatação térmica (Outeiro, 2018). Por isso, há uma alteração na geometria da peça após o processo de usinagem que culmina na instabilidade geométrica, e os fenômenos mecânicos induzem a deformação plástica heterogênea devido a ação mecânica da ferramenta sobre a peça. A origem das tensões residuais baseando-se no ciclo de carregamento durante o processo de corte ocorre inicialmente pela deformação por compressão da peça em que o material se localiza na frente da ferramenta de corte. Em seguida, há a deformação por tração no momento em que a ponta da ferramenta passa pela peça. Esse processo cíclico faz com que surjam tensões residuais dependentes da magnitude das tensões, do material e do processo de formação dos cavacos (Outeiro, 2018).

Um fenômeno que pode ser destacado durante o corte é o atrito que ocorre devido as irregularidades microscópicas das superfícies na interface cavaco-ferramenta pois, além de impactar significativamente a vida útil ferramenta devido ao desgaste causado, o coeficiente de atrito é de difícil previsão devido à falta de domínio sobre os fatores que influenciam na variação do comprimento de contato cavaco-ferramenta e a área efetiva de pressão do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

Para determinar as tensões residuais há diferentes abordagens como medições experimentais, modelos analíticos e procedimentos numéricos. Os métodos puramente experimentais são custosos e demorados, visto que há a necessidade de usar muitos corpos de provas e depender de equipamentos específicos. Os métodos analíticos buscam estimar este fenômeno por meio de deduções matemáticas e análises do meio físico e das condições de contorno, sendo o método mais rápido. Por fim, os métodos numéricos por meio de simulações computacionais são dados principalmente para entendimento do mecanismo de formação dos cavacos, da geração de calor nas zonas de corte, das características do atrito no contato cavaco-ferramenta e da integridade superficial da peça usinada, como as tensões residuais e a rugosidade superficial (Özel and Zeren, 2005). Uma das ferramentas mais utilizadas neste processo é o método de elementos finitos que, através de programas computacionais, simulam o processo de corte diminuindo a necessidade de custosos procedimentos experimentais para descrição dos fenômenos da usinagem.

Para a análise das tensões residuais utilizou-se o programa comercial ANSYS que utiliza como base o método de elementos finitos (FEM) para solução numérica. Para a finalidade da pesquisa, foi utilizado a *toolbox Explicit Dynamics* que permite representar problemas com alta não linearidade, como os processos de corte e estudos de impacto. Essa ferramenta permite analisar processos por meio de iterações em um curto espaço de tempo, o que foi indicado para estudar o processo de torneamento. O objetivo deste trabalho foi analisar as tensões residuais no torneamento do aço superduplex UNS S32760 baseado na formulação do corte ortogonal. Inicialmente foi realizado o procedimento experimental do corte ortogonal no torneamento mecânico e calculado o coeficiente de atrito pela clássica lei de atrito de Coulomb. Após esta etapa, realizou-se a simulação numérica pela dinâmica explícita utilizando os dados de entrada e o coeficiente de atrito calculado.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material da peça utilizada neste estudo foi o aço superduplex UNS S 32760, cujas propriedades mecânicas seguem apresentadas na Tab. 1. O processo de torneamento foi realizado com um torno convencional Nardini, modelo MS 205 X 1000. Para aquisição das forças de corte, foi utilizado um dinamômetro marca Kistler, modelo 9257BA. Este dinamômetro tem capacidade de emissão de forças nos eixos x, y e z com sensibilidade de 10 mV/N para x, y e 5,0 mV/N para z. Com este sensor é possível medir a força de avanço F_f (direção x), a força passiva F_p (direção y) e a força de corte F_c (direção z). Os sinais do dinamômetro são transferidos para um condicionador de sinais Kistler modelo 5233A1, com 3 canais, sinal de saída de $\pm 5V$ e filtro embutido com frequência de corte de 200 Hz.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos aços.

Aço	Dureza (HB)	Limite de resistência à tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)
UNS S32760	247	680	591

Para realizar o processo de corte foi utilizada uma ferramenta de corte (pastilhas) recomendada para torneamento de aços inoxidáveis. O porta-ferramenta utilizado foi o S16R STFCR-11. A pastilha escolhida foi de metal duro TCMT110204 VP15TF da Mitsubishi Materials, com raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de ponta de 60° , ângulo de saída de 0° e espessura de 2,381 mm.

A Tabela 2 apresenta os dados experimentais para velocidade de rotação (n) e avanço (f) que foram utilizados em cada etapa do experimento.

Tabela 2. Limite das variáveis de entrada.

	Parâmetro	Nível 1	Nível 2
P1	Velocidade de rotação (rpm)	500	800
P2	Avanço da ferramenta (mm)	0,091	0,199

A ordem dos testes precisa garantir a aleatoriedade dos experimentos. Este fato é relevante para certificar que os resultados obtidos não são influenciados pelo desgaste da ferramenta, mas unicamente pelas variáveis de entrada. Considerando um planejamento experimental com 2 fatores, 2 níveis cada e 3 repetições de cada experimento, tem-se um total de 4 experimentos e 12 testes.

3. CÁLCULO DO ATRITO

As forças que ocorrem durante o processo de usinagem são divididas em três pares e cada par é relacionado com uma zona de cisalhamento. O primeiro par é formado pela força tangencial (F_r) e normal (F_N) na zona de cisalhamento secundária (ZCS), o segundo par é formado pela força tangencial (F_z) e força normal (F_{NZ}) na zona de cisalhamento primária (ZCP) e o terceiro é dado na zona de cisalhamento terciária (ZCT) formado pela força na direção do corte (F_c) e de avanço (F_f) na aresta de corte da ferramenta, como representado na Fig. 1.

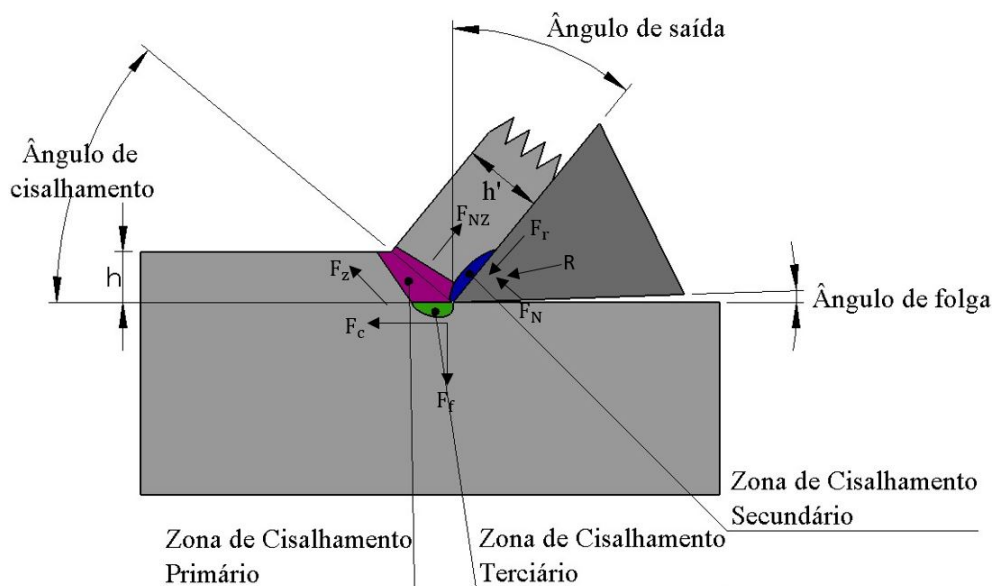


Figura 1. Mecanismo de formação do cavaco com as zonas de cisalhamento.

Na zona de cisalhamento secundária, o atrito tende a dificultar o escoamento do cavaco, a formar o desgaste de cratera e a contribuir para a diminuição da vida útil da ferramenta de corte. Utilizando o modelo desenvolvido por Merchant (Araujo *et al.*, 2020; Groover, 2012) para o corte ortogonal, o cálculo do ângulo de atrito β , coeficiente de atrito μ e as forças F_r e F_N são apresentadas nas Eq. 1, 2 e 3, em que γ representa o ângulo de saída da ferramenta.

$$\tan(\beta) = \mu = \frac{F_r}{F_N} \quad (1)$$

$$F_r = F_c \sin(\gamma) + F_f \cos(\gamma) \quad (2)$$

$$F_N = F_c \cos(\gamma) - F_f \sin(\gamma) \quad (3)$$

4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

Para a análise das tensões residuais será utilizado o programa comercial ANSYS que utiliza como base o método de elementos finitos (FEM) para solução numérica. Para a finalidade da pesquisa, será utilizado a *toolbox Explicit Dynamics*, em que uma análise dinâmica do processo de corte ortogonal é então, realizada a partir dos parâmetros de entrada da ferramenta, do material da peça, das restrições e condições de contorno, sendo possível realizar o estudo do processo de corte desde o início do mecanismo de formação dos cavacos em deformação elástica até seu processo de ruptura e desprendimento junto a superfície de saída da ferramenta de corte. Com isso, é possível então analisar as tensões durante todo o procedimento de corte e verificar a relação entre os parâmetros do processo e as tensões residuais geradas.

A ferramenta de dinâmica explícita utiliza para solucionar os problemas o método arbitrário Lagrange-Euler (ALE) permitindo resolver problemas dinâmicos com materiais sujeitos a altas deformações em eventos em um curto espaço temporal, utilizando os métodos de resolução de problemas por energia. Durante a realização das simulações são feitas inúmeras iterações que são chamados de ciclos, esses ciclos são realizados para solucionar o problema físico utilizando

pequenos incrementos do tempo, sendo essa parcela temporal alterada apenas com a proximidade dos resultados nas iterações. Para a simulação, os materiais foram idealizados como materiais dúcteis de comportamento elástico-linear com elasticidade isotrópica. Foram inseridas as seguintes informações para caracterizar o material: densidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de resistência última.

A classificação ortogonal do corte se refere ao processo de usinagem em que a ferramenta avança sobre a peça com o ângulo de inclinação da aresta de corte de 90° . Com isso, estabelece-se a velocidade de corte com direção longitudinal da peça e mantém-se fixos o avanço e a profundidade de corte. Para esse estudo foi utilizado os dados do arranjo experimental (Tab. 2) da seção 2 com a profundidade de corte de 0,25 mm.

Para as simulações, as seguintes etapas foram desenvolvidas: modelagem 3D da geometria realizada com auxílio do *Design modeler*; definição das hipóteses; inserção de dados referentes aos materiais da pastilha de corte e da peça; definição das condições de contorno e de contato para introduzir o fenômeno do atrito na simulação.

Para diminuição do custo computacional, a geometria foi simplificada retirando-se o porta ferramenta e reduzindo o tamanho do corpo de prova. Essa idealização foi possível, pois não é considerada sua flexão durante o corte. Além disso, a pastilha foi considerada como corpo rígido e extremamente afiada, não ocorrendo o desgaste durante o processo. Sendo assim, o modelo não considera o raio de ponta da ferramenta.

A definição das condições de contorno foi estabelecida a partir das restrições que seriam impostas a peça, como pode ser visto na Fig. 2.

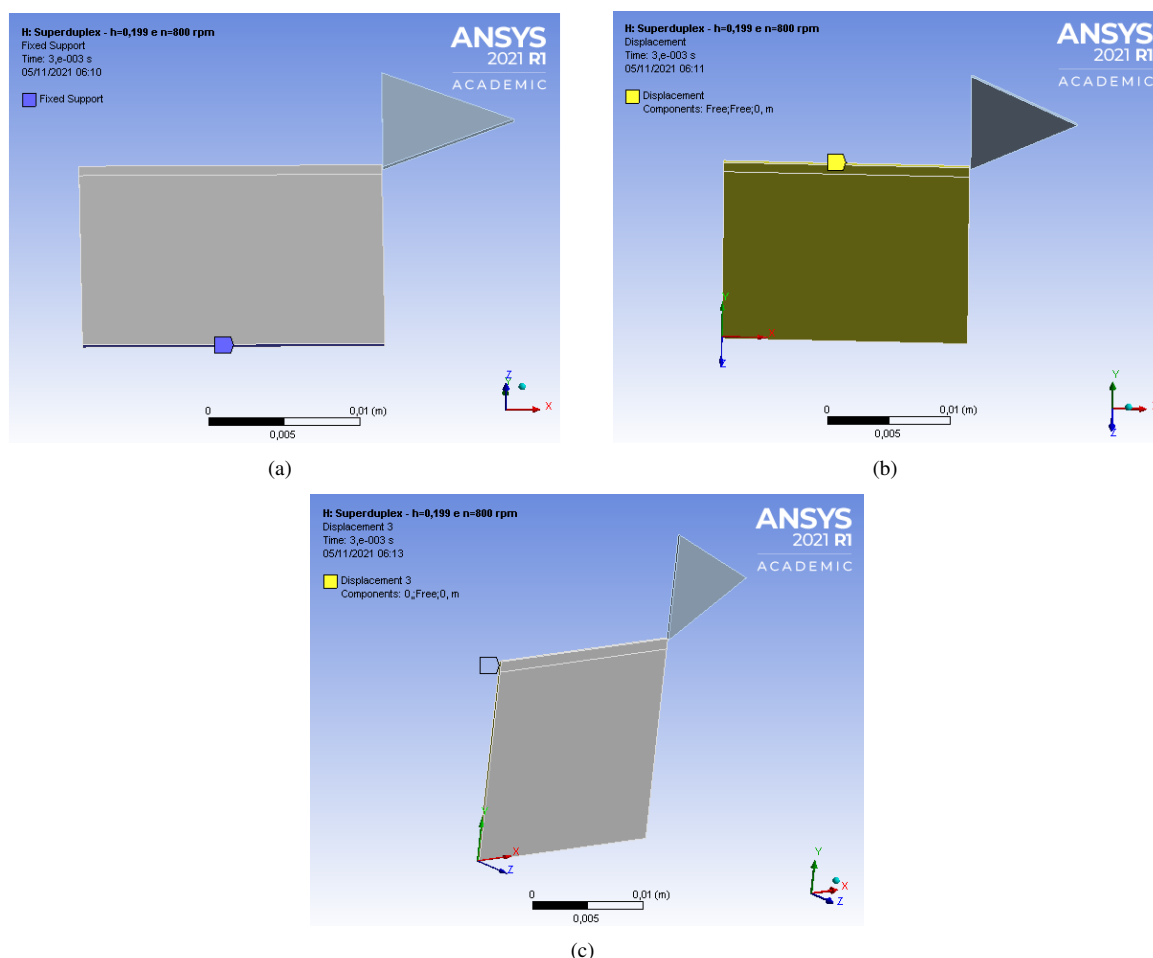


Figura 2. Condições de contorno impostas para a peça usinada: a) apoio fixo; b) restrição de deslocamento em Z; c) restrição de deslocamento em X e Z.

O apoio fixo na base da peça deve restringir seus deslocamentos e rotações (Fig. 2(a)); nas faces superior, frontal, posterior e na face de contato peça ferramenta restringiu-se apenas o movimento de translação no eixo Z (Fig. 2(b)); e, por fim, na face lateral esquerda foi imposta a restrição de deslocamento em X e Z (Fig. 2(c)). A interação friccional da peça com a ferramenta foi definida utilizando o coeficiente de atrito constante dos resultados experimentais. Este contato ocorre devido a movimentação de avanço da ferramenta em direção à peça, visto que a peça está fixada no torno. Como a ferramenta foi considerada um corpo rígido foi utilizado o comando de interação entre corpos, *body interaction*, na seção de conexões.

O avanço da ferramenta é definido com uma velocidade constante ao longo do eixo X, não permitindo deslocamentos relativos nos eixos Y e Z. Duas faixas de rotação foram utilizadas para realização dos ensaios, 500 e 800 (Fig. 3(a)). Um apoio que restringe o deslocamento relativo aos eixos Y e Z, permitindo apenas o deslocamento em direção X. Essa restrição foi utilizada pois a pastilha é fixada num porta ferramenta que permite apenas movimentos no sentido

longitudinal e transversal durante o processo de corte, como para essa simulação há apenas a movimentação longitudinal, apenas a movimentação na direção do comprimento da peça é permitida (Fig. 3(b)).

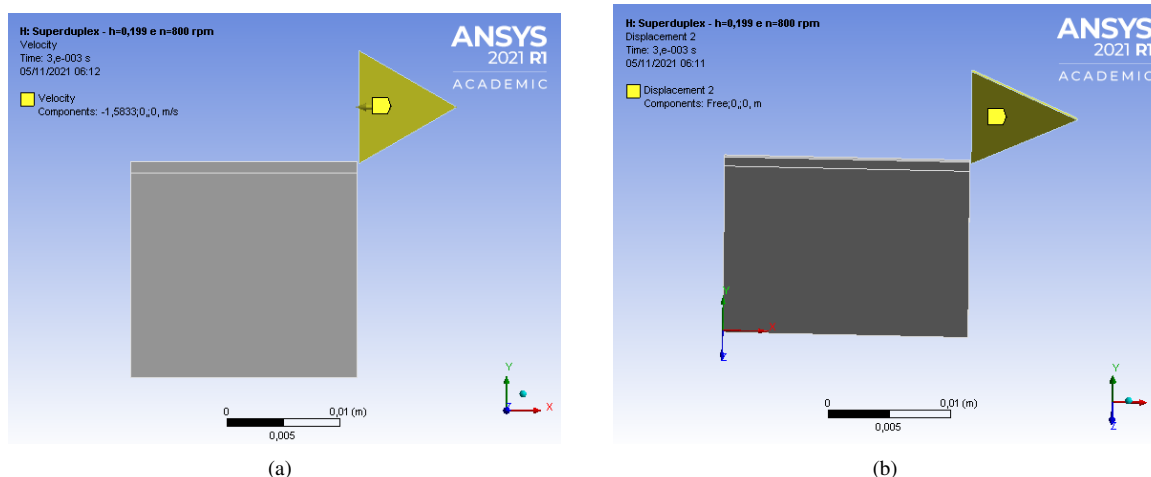


Figura 3. Condições de contorno impostas para a ferramenta de corte: a) velocidade de avanço; b) restrição de deslocamento em Y e Z.

O processo de discretização foi realizado pela definição da malha de elementos finitos. A malha utilizada foi criada a partir de elementos de ordem linear. Nesse processo, notou-se a necessidade de refino para redução dos erros de discretização durante o processo de solução, principalmente na região de contato entre a peça e a ferramenta, onde ocorre intensificação das tensões durante o processo de corte. Esse aumento na quantidade de elementos visa diminuir as imprecisões numéricas durante as simulações e foi realizado utilizando as ferramentas *face sizing* e *edge sizing*. Durante a alteração da malha foi considerado o tempo computacional para gerar a solução e a restrição no número de elementos na versão utilizada. A Figura 4(a) mostra a malha adotada na peça e na ferramenta e a Fig. 4(b) apresenta um destaque na região superficial onde houve o processo de refino.

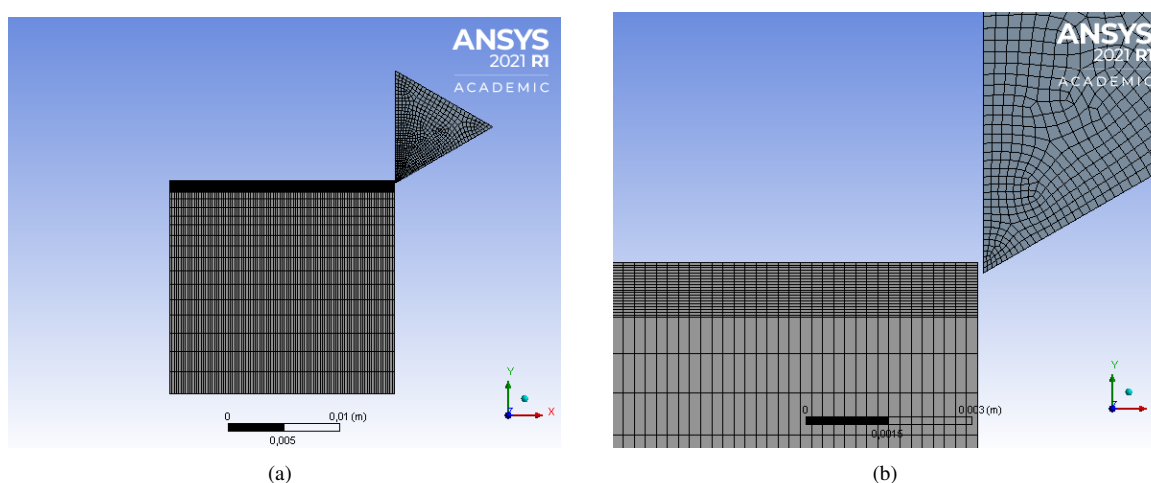


Figura 4. Configuração da malha utilizada: a) malha; b) destaque para área superficial da peça.

Por fim, foi definido o controle das iterações pelo fato da análise por dinâmica explícita ser obtida a partir das iterações por integração no tempo. Portanto, foi necessário estipular o tempo de análise do processo de corte em 3×10^{-3} s. Foi estabelecido o controle de erosão para determinar o comportamento do material após ocorrer a fratura e a falha do material quando as tensões obtidas são acima da tensão última de resistência do material. A partir das definições e condições descritas, foi possível gerar os resultados que serão apresentados na próxima seção.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados do procedimento experimental do torneamento do aço superduplex, o cálculo do atrito e o procedimento numérico para a simulação das tensões residuais na usinagem.

5.1 Procedimento experimental e Cálculo do Atrito

Após realizadas as etapas experimentais, foram obtidas as forças de usinagem para a mesma ferramenta de corte, com dois níveis de velocidade de corte e de avanços para o aço UNS S32760. A Figura 5 apresenta um exemplo das forças

nas direções de corte (F_c), passiva (F_p) e de avanço (F_f), obtida a partir do torneamento com avanço de 0,094 mm e velocidade de rotação de 500 rpm.

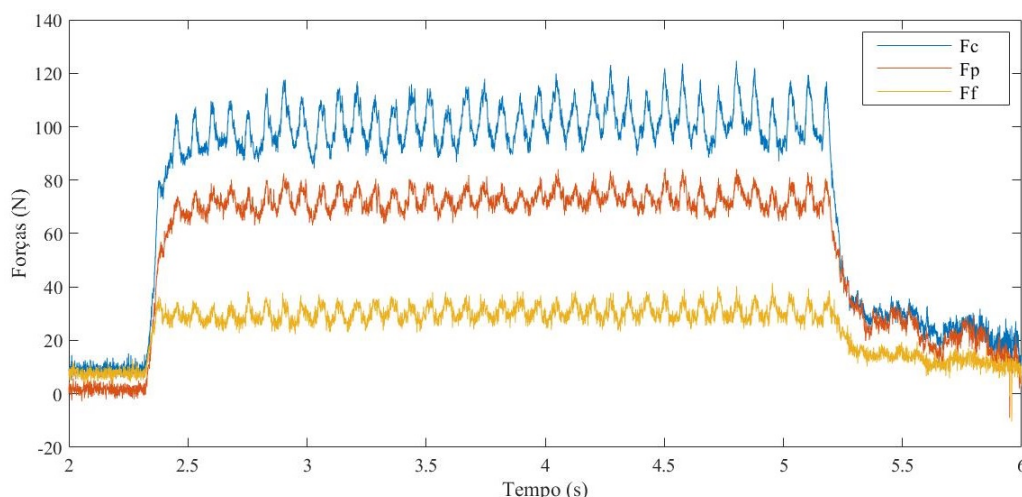


Figura 5. Forças de usinagem no torneamento do aço UNS S36720.

Por meio dos resultados experimentais foram calculadas as médias das forças para as três repetições de cada arranjo. A Tabela 3 apresenta esses resultados para as três médias das forças. Com esses valores, foi possível calcular as forças na superfície de saída (Eq. 1 e 2) e determinar o coeficiente de atrito (Eq. 3), mostrado na Tab. 4.

Tabela 3. Resultados experimentais para as forças de usinagem.

Experimento	f (mm)	n (rpm)	F_c (N)	F_p (N)	F_f (N)
A	0,091	500	67,84	48,08	28,99
B	0,199	500	107,26	72,04	31,75
C	0,091	800	68,14	50,56	30,71
D	0,199	800	101,63	72,90	30,39

Tabela 4. Resultado do cálculo do coeficiente de atrito.

Experimento	f (mm)	n (rpm)	μ_{SD}
A	0,091	500	0,4273
B	0,199	500	0,2960
C	0,091	800	0,4507
D	0,199	800	0,2990

5.2 Procedimento Numérico

Nesta seção serão apresentados os resultados da análise das tensões residuais para o corte ortogonal obtidos a partir do software ANSYS com a toolbox *Explicit Dynamics*. Foram utilizados os dados experimentais para os aços presentes na Tab. 1 e dados presentes em literatura (Bello *et al.*, 2007; Torres, 2009) acerca do aço superduplex e da pastilha de metal duro. Foram analisados dois resultados para o aço superduplex mantendo constante o avanço (f) de 0,199 mm e a velocidade de rotação (n) de 500 rpm e 800 rpm. Para calcular a velocidade de corte foi utilizada a equação:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n}{1000} \quad (4)$$

em que D_m representa o diâmetro da peça, considerado 38 mm como do corpo de prova utilizado nos procedimentos experimentais.

Para análise dinâmica do corte ortogonal, o tipo de interação friccional foi relacionado ao coeficiente de atrito obtido como resultado na Seção 5.1. Por isso, foram utilizados os resultados do experimento B e D, sendo o valor do coeficiente de atrito igual a 0,2960 e 0,2990, respectivamente, como pode ser visto na Tab. 4.

As Figuras 6(a) e 6(b) mostram a distribuição de tensões equivalentes utilizando o critério de von Mises para velocidades de corte 500 rpm e 800 rpm. Analisando essa solução, é possível perceber que há concentração de tensões próximo a ponta da ferramenta, o que ocorre devido as forças de usinagem aplicadas serem extremamente altas, fazendo com que o material seja removido à frente da aresta da ponta da ferramenta. As magnitudes das tensões máximas para as simulações

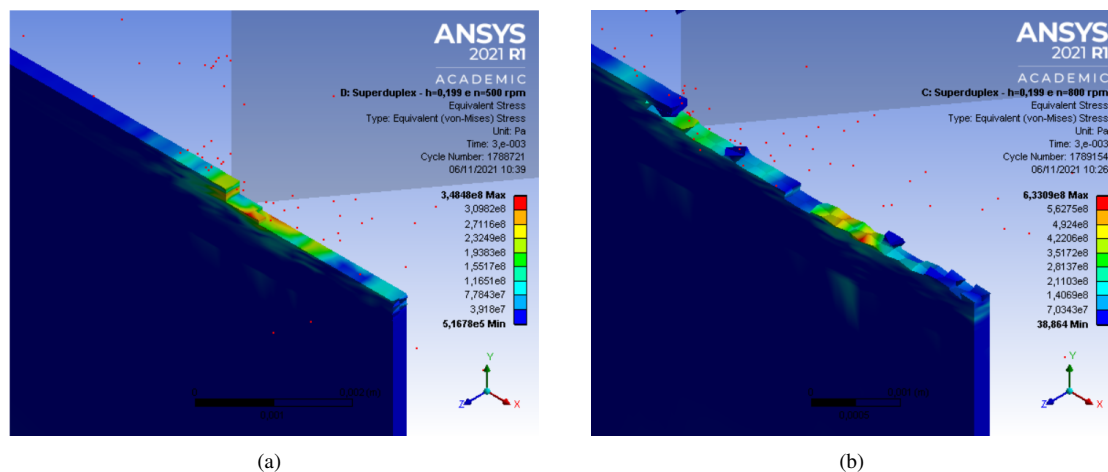


Figura 6. Distribuição de tensões equivalentes de von Mises avaliadas para avanço de 0,199 mm e rotação: a) 500 rpm; b) 800 rpm.

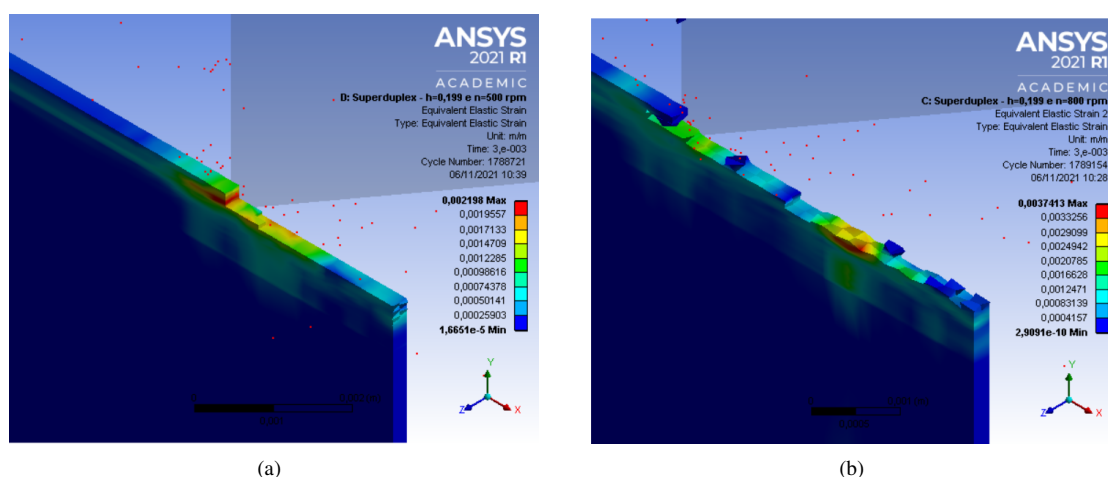


Figura 7. Deformação elástica avaliada para avanço de 0,199 mm e rotação: a) 500 rpm; b) 800 rpm.

de 500 rpm e 800 rpm foram de 348,48 MPa e 633,09 MPa, respectivamente. Nota-se que o aumento da velocidade de corte elevou as tensões geradas durante o processo, em que a tensão máxima registrada a 800 rpm teve um aumento de 81,67% em relação a tensão máxima obtida para a velocidade de 500 rpm.

Outro resultado analisado foi o da distribuição de deformações elásticas que seguiram a mesma tendência das tensões, em que as maiores magnitudes ocorreram na região da ponta e da face de saída da ferramenta devido o processo de formação dos cavacos. A Figura 7(a) mostra para a rotação de 500 rpm, um crescimento uniforme das deformações durante o processo de corte, em que a máxima magnitude obtida foi de 0,002198 e a região de maior deformação se concentra na superfície da peça. Para a rotação de 800 rpm, nota-se que os resultados obtidos para deformações são maiores e a deformação máxima registrada foi de 0,003741. A deformação elástica é distribuída em regiões devido a forma com que o material é removido da peça, já que o aumento da V_c faz com que o material seja de certa forma arrancado, diminuindo sua qualidade superficial.

Por fim, foram gerados os resultados para as tensões residuais superficiais para as duas rotações, conforme mostrado na Fig. 8. A maior tensão residual obtida para a configuração de menor rotação foi de 571,33 MPa e para de maior rotação foi registrada em 918,37 MPa. Nota-se que o aumento na velocidade de corte levou a um aumento de 60,74% na tensão residual máxima. Com a menor velocidade de corte, há uma melhor distribuição e uma menor incidência das tensões residuais, o que leva a uma menor alteração das propriedades mecânicas do material após o processo de fabricação. O aumento das tensões residuais pode ser relacionado ao encruamento do material, aumentando sua dureza e resistência mecânica. Por outro lado, a forma com que ocorre a remoção do material no processo de corte interfere diretamente na sua qualidade superficial.

A comparação entre estes resultando revela que o aumento da velocidade de corte altera a qualidade superficial da peça pois gera tensões residuais mais altas devido à influência da intensificação das forças e tensões durante o processo de corte. Além disso, a instabilidade dimensional da peça gera um acabamento superficial de menor qualidade, pois ocorre retirada desigual de material, gerando uma superfície mais irregular, como pode ser visto na Fig. 6(b). Isso prejudica o processo de fabricação pois altera as dimensões do projeto, e pode até mesmo inviabilizar sua utilização, dependendo da tolerância do projeto. Além disso, os custos de produção podem se elevar devido a necessidade de processos extra de lixamento ou polimento para alcançar o resultado final desejado.

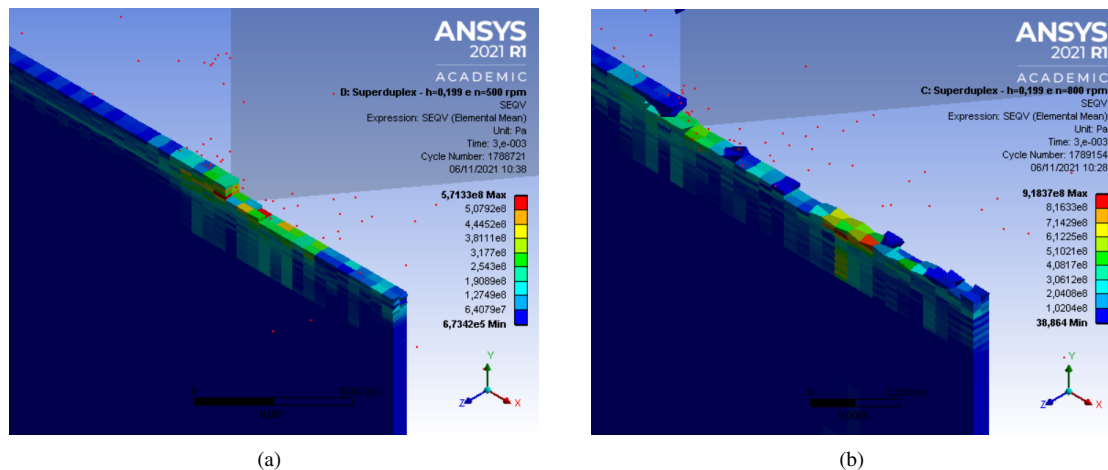


Figura 8. Distribuição das tensões residuais avaliadas para avanço de 0,199 mm e: a) rotação de 500 rpm; b) rotação de 800 rpm.

6. CONCLUSÕES

Na indústria, a qualidade superficial da peça ou equipamento após a fabricação é um fator importante para aprovar a utilização deste componente devido aos requisitos de tolerância. O surgimento de tensões residuais durante o processo de usinagem atuam nas alterações da qualidade superficial da peça. É um fenômeno que ocorre devido a dois processos: mecânico e térmico, sendo o último diretamente relacionado ao atrito gerado durante o corte. Para isso, foram utilizados coeficientes de atrito calculados a partir de resultados experimentais. As consequências das tensões residuais são relacionadas a redução de vida em fadiga, corrosão e dureza, além de causar instabilidade geométrica.

O estudo das tensões residuais no torneamento foi desenvolvido utilizando o método de elementos finitos (FEM) com a formulação dinâmica explícita, via ANSYS. Utilizando a hipótese do corte ortogonal foi possível desenvolver a dinâmica do processo de corte e o procedimento experimental desenvolvido foi explorado na aquisição dos dados de entrada para o problema. O material escolhido para a análise foi o superduplex e a velocidade de corte foi o parâmetro selecionado para ser avaliado.

Para a velocidade de rotação de 800 rpm as tensões, deformações e tensões residuais obtidas foram maiores que para a velocidade de 500 rpm. O aumento da velocidade de corte intensifica as forças de usinagem que atuam na dinâmica do corte, refletindo nos resultados gerados. Os valores máximos obtidos para as tensões residuais foram de 918,37 MPa para a rotação de 800 rpm e 571,33 MPa para a rotação de 500 rpm. A diferença entre os resultados obtidos foi de 60,74%;

Em relação à peça, na velocidade de 800 rpm ocorre o encruamento deste material, aumentando a sua resistência mecânica. Por outro lado, essa configuração resulta numa menor estabilidade dimensional pois durante o processo de corte o material removido não é devidamente cortado, mas arrancado da superfície, gerando o aumento da rugosidade da peça e diminuindo a qualidade superficial. A velocidade de 500 rpm apresentou uma melhor qualidade da superfície usinada pois tem uma distribuição mais uniforme e menores magnitudes de tensões, deformações e tensões residuais geradas após o processo de corte.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERJ pela bolsa de Iniciação Tecnológica que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

- Araujo, A.C., Mougo, A.L. and Campos, F.O., 2020. *Usinagem para engenharia: um curso de mecânica do corte*. E-papers.
- Bello, J., Wood, R. and Wharton, J., 2007. "Synergistic effects of micro-abrasion-corrosion of uns s30403, s31603 and s32760 stainless steels". *Wear*, Vol. 263, No. 1-6, pp. 149–159.
- Groover, M.P., 2012. *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- Outeiro, J., 2018. *Residual Stresses in Machining Operations*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–13. ISBN 978-3-642-35950-7.
- Özel, T. and Zeren, E., 2005. "Finite element method simulation of machining of aisi 1045 steel with a round edge cutting tool". pp. 533–542.
- Prayogi, S. and Zulkarnain, 2015. "Analysis of residual stress and strain on the formation of workpiece based ansys 12.1". *Journal of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 19–24.
- Torres, C.d.S., 2009. "Estudo da moagem de alta energia e sinterização de metal duro wc-ni". *Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação*.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL PROCEDURE FOR THE STUDY OF RESIDUAL STRESS IN THE WORKPIECE DURING THE ORTHOGONAL CUTTING

Luísa de Amorim Makhoul Gomes, luisa.makhoul@mecanica.coppe.ufrj.br²

Lívia Mendonça Nogueira, livia.nogueira@cefet-rj.br^{1,2}

Adriane Lopes Mougo, adriane.mougo@cefet-rj.br¹

Fabio da Costa Figueiredo, fabiofigueiredo@mecanica.coppe.ufrj.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, RJ, Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Abstract: In this work, the study of residual stress in the tertiary shear zone will be presented, in order to obtain a comparative analysis of the stress generated in different cutting conditions. For the analysis of the residual stress, ANSYS was used, based on the finite element method (FEM) for numerical solution. The toolbox Explicit Dynamics was used, which allows to represent problems with non-linearity, as in the mechanical forming process. A dynamics analysis of orthogonal cutting process was performed based on the input parameters of the tool, the workpiece material, constraints and boundary conditions, making it possible to study the cutting process from the beginning of the chip formation in elastic deformation until the rupture process and chip flow in the rake tool face. With this, it was possible to analyze the stress during cutting and verify the relationship between the process parameters and the residual stress generated. For the simulations, the following steps were developed: 3D modeling of the problem geometry with the help of Design modeler; definition of hypotheses; input of data to the materials of the insert and the workpiece; definition of contour and contact conditions to consider the phenomenon of friction for the formulation of the orthogonal cut. The feed rate of the tool is defined with a constant speed along the X axis, not allowing relative displacements in the Y and Z axis. Two rotation ranges were used for the test, 500 and 800 rpm. For the 800 rpm the stresses, strains and residual stresses obtained were higher. The cutting speed increase decreased the machining forces that act on the cutting dynamics. However, this difference reflected on the generated results. The maximum values obtained for the residual stresses were 918.37 MPa for the rotation of 800 rpm and 571.33 MPa for the rotation of 500 rpm, the difference between the results obtained was 60.74%. In relation to the workpiece, at a speed of 800 rpm, there was an intensification of the hardened material, increasing its mechanical strength. On the other hand, this configuration results in less dimensional stability, generating the increase in the roughness of the part. The speed of 500 rpm showed better surface quality as it has a more uniform distribution and lower magnitudes of stresses, deformations and residual stresses generated.

Keywords: turning, cutting forces, numerical simulation, stainless steel.