

# Estudo da influência das geometrias da ferramenta nas tensões residuais geradas na usinagem por torneamento do aço SAE 1050

Maria Cindra Fonseca<sup>1</sup>, Mateus Campos<sup>1</sup>, Eduardo Tavares<sup>1</sup>, Tatiane Chuvas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMEC), Escola de Engenharia, Niterói, RJ, Brasil. E-mail: mariacindra@id.uff.br

<sup>2</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca/CEFET/RJ, Brasil. E-mail: tatiane.chuvas@cefet-rj.br

## Resumo

Nos processos de fabricação por usinagem, as tensões residuais advêm da combinação dos esforços mecânicos do contato ferramenta/peça e do calor gerado no processo. Os parâmetros de corte, bem como a geometria das ferramentas de corte empregadas resultam em diferentes campos de tensões residuais. Assim sendo, o processo de torneamento introduz tensões residuais nos componentes fabricados, que dependendo da natureza, distribuição e magnitude, podem ser benéficas ou deletérias influenciando a vida em serviço e a resistência à fadiga da peça. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes geometrias de ferramenta de corte nas tensões residuais, nas forças de corte e na integridade superficial geradas no torneamento do aço SAE 1050 com insertos de metal duro (*cemented carbide tool*). A análise das tensões residuais foi realizada por difração de raios-X (*XRD*), pelo método do  $\sin^2\psi$ . Por fim, foi desenvolvida uma Rede Neural Artificial (RNA), que demonstrou eficiência na predição das tensões residuais e da rugosidade para o material estudado. Os resultados indicaram que o torneamento gerou tensões residuais de maiores magnitudes na direção de corte (tangencial) e que o avanço foi o parâmetro de corte de maior influência nas tensões residuais, na qualidade da superfície usinada e nas forças de usinagem. Notou-se que um melhor acabamento superficial pode ser obtido empregando-se ferramentas de corte *wiper* com avanços elevados.

**Palavras-chave:** tensões residuais; torneamento; difração de raios-X; Rede Neural Artificial.

## Abstract

In machining manufacturing processes, residual stresses arise from the combination of mechanical efforts from the tool/piece contact and the heat generated in the process. The cutting parameters, as well as the geometry of the cutting tools used, influence the achievement of different residual stress fields. Therefore, the turning process introduces residual stresses into the manufactured components, which depending on the nature, distribution and magnitude, can be beneficial or harmful, influencing the service life and fatigue resistance of the part. The present work aims to evaluate the influence of using different cutting tool geometries on residual stresses, cutting forces and surface integrity generated in the turning of SAE 1050 steel with cemented carbide tool inserts. The analysis of residual stresses was carried out by X-ray diffraction (XRD), using the  $\sin^2\psi$  method. Finally, an Artificial Neural Network (ANN) was developed, which demonstrated efficiency in predicting residual stresses and roughness for the studied material. The results indicated that turning generated residual stresses of greater magnitudes in the tangential direction to the feed of the cutting tool and that feed was the cutting parameter with the greatest influence on residual stresses, the quality of the machined surface and machining forces. It was noted that a better surface finish could be obtained using wiper cutting tools with high feeds.

**Keywords:** residual stresses; turning; X-ray diffraction, Artificial Neural Network.

## 1. Introdução

As tensões residuais, bem como a integridade da superfície dos componentes usinados, são os fatores mais importantes que afetam a confiabilidade, a precisão e a vida útil das peças acabadas. O aumento da tensão residual final, assim como a rugosidade

superficial nas peças produzidas pode reduzir a vida útil dos componentes usinados [1].

Na usinagem, as tensões residuais são introduzidas principalmente pela deformação plástica e pela geração de calor produzida na interação entre a ferramenta de corte e a peça usinada. Durante os processos de torneamento as tensões residuais geradas podem afetar

a qualidade e o desempenho dos produtos usinados, dependendo de sua direção e magnitude.

As tensões residuais podem ser altamente prejudiciais, pois podem levar à fadiga e à nucleação de trincas por corrosão sob tensão. O estado final das tensões residuais depende do material da peça, da geometria/revestimento da ferramenta de corte, das condições de resfriamento e dos parâmetros do processo, incluindo velocidade de corte, profundidade de corte e taxa de avanço [2].

Entretanto, tensões residuais de compressão nas camadas superficiais são geralmente benéficas e desejáveis, pois retardam a nucleação e propagação de trincas, incluindo o trincamento por corrosão sob tensão [3].

Atualmente, existem diversas técnicas de medição de tensões residuais e entre as técnicas não destrutivas, uma das mais bem estabelecidas é a difração de raios-X [4].

Na usinagem, os fluidos de corte também possuem função importante, atuando no resfriamento da área de corte, lubrificação e arraste do cavaco. Entretanto, o uso dos fluidos da forma convencional, conhecida como abundância ou jorro, representa um custo significativo nas operações de usinagem, além de caracterizarem um problema ambiental e de saúde, devido aos desafios no manejo e descarte. Dessa forma, o uso da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) representa uma alternativa à forma convencional, mas que ainda não há consenso na comunidade científica, pois apesar dos aparentes ganhos com relação à segurança do operador, ao meio

produtividade sem comprometer a qualidade final da superfície usinada (D'ADDONA & RAYKAR, 2016). A principal diferença dos insertos convencionais para os alisadores (*wipers*) é a geometria da ponta da ferramenta. Os insertos convencionais apresentam somente um raio na ponta da ferramenta, enquanto os insertos *wiper* possuem uma geometria de multirraios. A utilização de diferentes insertos, bem como os fluidos de corte e a escolha dos parâmetros de usinagem, vão resultar em diferentes forças de corte. Desta forma, o monitoramento das forças de corte é de grande importância para otimizar o processo de usinagem, conhecer a influência de novas geometrias e como estas afetam as forças de corte [8].

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para a compreensão da influência nas tensões residuais, no acabamento superficial e nas forças de usinagem dos modos de aplicação dos fluidos de corte e da utilização de insertos convencional e *wiper* no torneamento do aço SAE 1050. O desenvolvimento de modelos numéricos por meio de redes neurais artificiais, para a predição das tensões residuais e da rugosidade na usinagem, complementa o trabalho.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Material

Foram estudadas amostras do aço AISI 1050 (médio teor de carbono), laminado, produzido pela empresa Aperam, na forma de barra redonda de 50,8 mm de diâmetro, cujas propriedades mecânicas estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Propriedades mecânicas do aço SAE 1050.

$\sigma_{LE}$ (MPa)	$\sigma_{LR}$ (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
415	725	20	240

Fonte: O Fabricante.

ambiente, aos custos de usinagem e à vida da ferramenta de corte, há dúvidas em relação à influência desta técnica nas tensões residuais e nas propriedades finais do material usinado [5], [6].

Além das tensões residuais, a rugosidade tem um efeito significativo na vida em fadiga e em outras propriedades superficiais de uma peça. Em muitos casos, a rugosidade final é um dos principais critérios de aceitação de um produto usinado, sendo altamente influenciada pela variação do avanço na usinagem [7]. Dessa forma, se busca o desenvolvimento de novos modelos de ferramentas que possibilitem um melhor acabamento superficial nos componentes usinados. Nos processos de torneamento, os insertos *wiper* possibilitam a usinagem de peças com maiores avanços sem perder a capacidade de gerar uma boa qualidade superficial, garantindo, desta forma, uma maior

### 2.2. Fluxograma dos Experimentos e Experimentos

Foram selecionados os parâmetros de corte ( $V_c$  - velocidade de corte,  $f$  - avanço e  $a_p$  - profundidade de corte), ferramentas de corte e modo de aplicação de fluido de corte conforme apresentado no fluxograma da Figura 1 que configuram os dados de entrada. Dentre os dados de saída estão as tensões residuais, as medidas de rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ), as forças de usinagem, o estudo estatístico dos resultados, realizado pelo teste ANOVA e pelos gráficos de efeito, e o desenvolvimento de uma rede neural artificial.

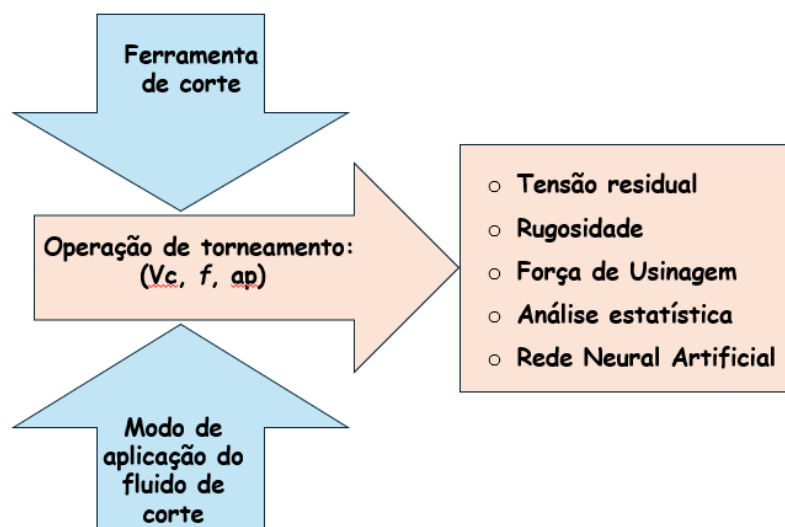


Figura 1 – Fluxograma dos experimentos. Fonte: Elaboração própria.

Foram empregadas 16 condições de corte. Para todos os ensaios, a velocidade de corte  $V_c$  foi mantida constante a 390 m/min, utilizando a rotação de 2500 rpm. A Tabela 2 mostra um resumo dos parâmetros empregados e a Tabela 3 apresenta as condições de corte utilizadas em cada amostra.

O torneamento das amostras foi realizado no LABUS/CEFET-RJ com o torno Nardini modelo Mascote MS205 usando ferramentas de corte de insertos de metal duro convencional e *wiper*, modelo TNMG 160404FN KCP05 e TNMG 160404FW KCP10 respectivamente, ambas com recobrimento MTCVD –  $\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3$ , com porta-ferramentas

Tabela 2 – Parâmetros de corte empregados na usinagem das amostras.

Insertos	Aplicação de fluido de corte	Avanço - $f$ (mm/rev)	Profundidade de corte – $a_p$ (mm)
Convencional e <i>wiper</i>	Jorro e MQL	0,053 e 0,15	0,4 e 1,2

Fonte: Elaboração própria.

Foram produzidas 8 amostras com comprimento total de 125 mm, diâmetro de 50 mm e três regiões de 30 mm (Figura 2), das quais foram usinados 16 segmentos (2 em cada amostra). Após a pré-usinagem, as amostras foram tratadas a 650 °C por 2 horas e resfriadas no forno a fim de aliviar as tensões residuais pré-existent.

modelo MTJNR 2020K 16M1, da marca Sandvik e ângulo de saída ( $\gamma$ ) de -6°, ângulo incidência ( $\alpha$ ) de 0° e ângulo de cunha ( $\beta$ ) de 96°. Cada condição de usinagem foi realizada com uma aresta de corte nova. O fluido de corte utilizado foi óleo solúvel semissintético ME-I, com modo de aplicação em jorro,

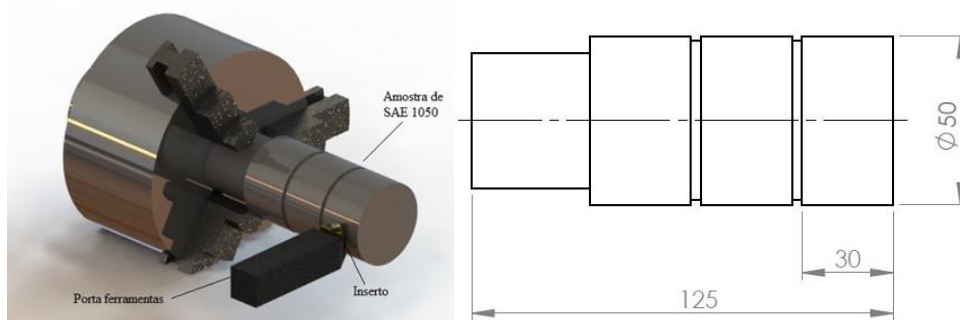


Figura 2 – Sistema de fixação e amostra preparada para usinagem (Unidades: mm). Fonte: Elaboração própria.

com vazão de 2,5 L/min, e MQL com vazão de 85 mL/h e 0,6 MPa de pressão.

As forças de corte do torneamento foram medidas por um dinamômetro de cristais piezoelétricos KISTLER 9257BA em conjunto com uma unidade de controle modelo 5233A1 com filtro de passa-baixa, responsável por eliminar os ruídos dos dados 9257BA e uma placa de aquisição de dados da National Instruments modelo NI USB-6221 9257BA.

Para visualização das forças de corte foi utilizado o *Software* no Labview Signal Express, 2011, do LABUS/CEFET-RJ. O dinamômetro mede as três componentes ortogonais  $F_f$ ,  $F_p$  e  $F_c$  das forças de usinagem, que correspondem às forças de avanço, força passiva e a força principal de corte, respectivamente.

Após o torneamento, a rugosidade das amostras foi analisada usando um rugosímetro da marca Taylor Hobson Brasil, modelo Surtronic25, disponibilizado pelo Laboratório de Metrologia Dimensional e Computacional (LMDC) da UFF. Foi usado um comprimento de medição  $L_m = 4,00$  mm e um comprimento de amostragem ou *cut-off*  $L_e = 0,80$  mm.

O apalpador possui uma ponta com raio de 5  $\mu\text{m}$  que fornece uma resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ , com precisão de 2% do valor medido. A medição da rugosidade média ( $R_a$ ) e da rugosidade total ( $R_t$ ) foi feita em 10 regiões distintas de cada amostra no sentido de avanço da ferramenta de corte.

A análise das tensões residuais foi realizada no Laboratório de Análise de Tensões (LAT/ UFF), com o analisador de tensões Xstress3000 apresentado na Figura 2.3, por difração de raios-X e pelo método do  $\sin^2\psi$ , usando radiação  $\text{CrK}\alpha$  ( $\lambda = 2,29092$  Å) e difratando o plano (211) da ferrita. O *software* XTronic V1-0 Standard foi usado para o cálculo das tensões.

Para prever o comportamento das tensões residuais e dos parâmetros  $R_a$  e  $R_t$  nas condições experimentais investigadas foi elaborado um algoritmo de redes neurais artificiais (RNA) de tipo perceptron multicamadas usando o método de aprendizado supervisionado *backpropagation* utilizando o *software* R. A rede neural gerada é composta com um neurônio para cada variável independente na camada de entrada, uma camada oculta intermediária e uma camada de saída com as variáveis de resposta. A conexão entre os

**Tabela 3** – Condições de corte empregadas.

Amostras usinadas	Insertos	Aplicação de fluido de corte	Avanço - <i>f</i> (mm/rev)	Profundidade de corte – <i>ap</i> (mm)
A	Convencional	Jorro (2,5 L/min)	0,053	0,4
B	<i>Wiper</i>			
C	Convencional	MQL (100 mL/h)		
D	<i>Wiper</i>			
E	Convencional	Jorro (2,5 L/min)	0,15	0,4
F	<i>Wiper</i>			
G	Convencional	MQL (100 mL/h)		
H	<i>Wiper</i>			
I	Convencional	Jorro (2,5 L/min)	0,053	1,2
J	<i>Wiper</i>			
K	Convencional	MQL (100 mL/h)		
L	<i>Wiper</i>			
M	Convencional	Jorro (2,5 L/min)	0,15	1,2
N	<i>Wiper</i>			
O	Convencional	MQL (100 mL/h)		
P	<i>Wiper</i>			

Fonte: Elaboração própria.

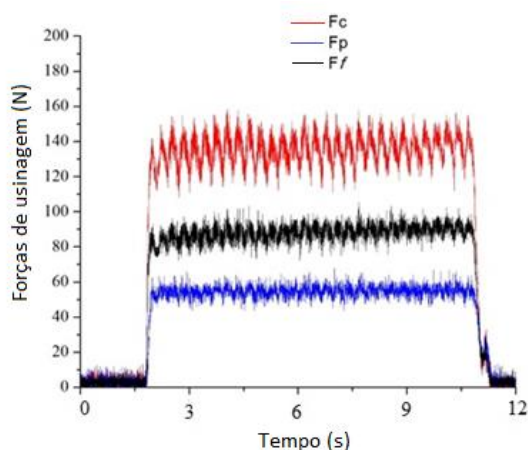
neurônios da camada de entrada e da camada oculta se dá por uma função de ativação sigmoide, e os neurônios de camada oculta estão ligados aos neurônios da camada de saída por uma função de ativação linear. A quantidade de neurônios da camada oculta é determinada por simulação computacional a fim de minimizar o erro dos resultados. 80% dos dados experimentais foram utilizados no aprendizado supervisionado.

### 3. Resultados e Discussão

A força resultante de usinagem  $F_U$  foi calculada por meio da Equação 1.

$$F_U = \sqrt{F_C^2 + F_f^2 + F_P^2} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

A Figura 3 apresenta as componentes da força de usinagem em função do tempo para uma determinada amostra.

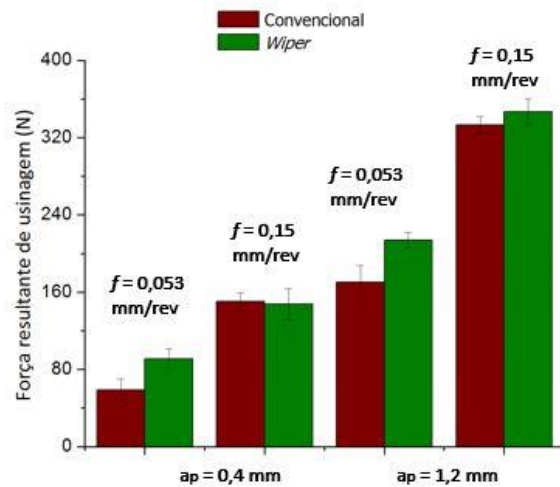


**Figura 3** - Forças de usinagem:  $f = 0,053$  mm/rev,  $a_p = 1,2$  mm, fluido em jorro e inserto convencional. Fonte: Elaboração própria.

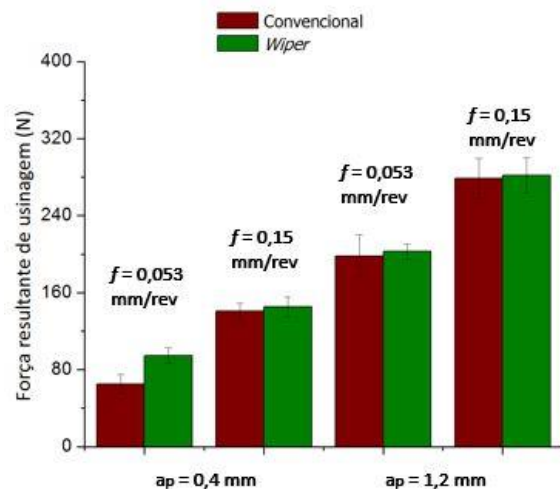
A partir do monitoramento das forças de usinagem foi possível calcular os valores médios da força resultante  $F_U$  para cada amostra, que são apresentados nas Figuras 4 e 5.

A maior força resultante de usinagem de cerca de 350 N foi obtida na amostra usinada com avanço  $f = 0,15$  mm/rev, profundidade de corte  $a_p = 1,2$  mm, inserto *wiper* e fluido de corte em jorro.

É possível constatar que a profundidade de corte e o avanço representaram influência significativa nas forças de usinagem, assim como observado por Jerold e Kumar (2011) e Suresh *et al.* (2012), visto que o aumento desses parâmetros de corte modifica as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, gerando um aumento das forças de usinagem.



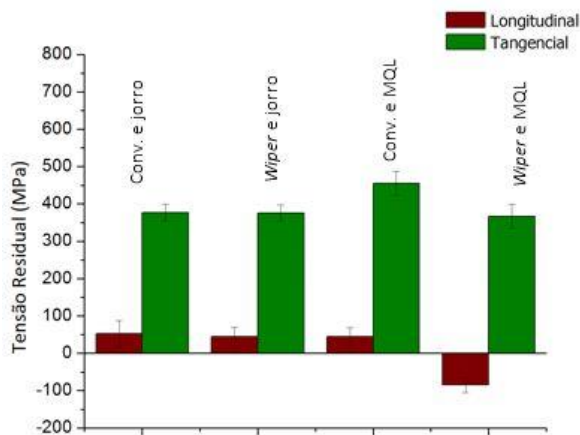
**Figura 4** – Força de usinagem resultante das amostras utilizando jorro. Fonte: Elaboração própria.



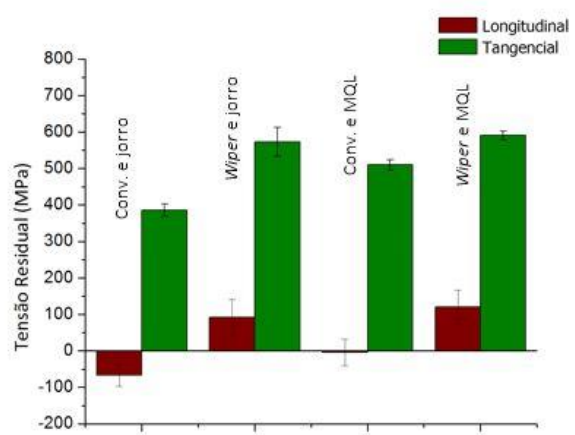
**Figura 5** – Força de usinagem resultante das amostras utilizando MQL. Fonte: Elaboração própria.

Em relação às amostras usinadas com MQL, percebeu-se uma redução das forças de usinagem em relação ao jorro, semelhante aos resultados obtidos por Hadad e Sadeghi (2013) e Ekinovic *et al.* (2015). A única condição de corte quando este comportamento não foi observado ocorreu com avanço  $f = 0,053$  mm/rev e profundidade de corte  $a_p = 0,4$  mm.

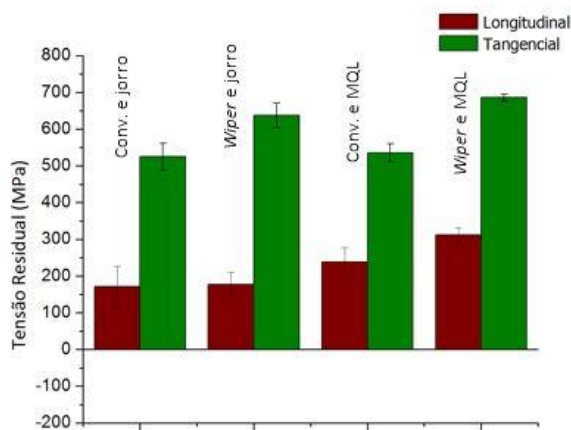
Os resultados das análises das tensões residuais médias, após o torneamento, com profundidade de corte  $a_p = 0,4$  mm e diferentes avanços, geometrias de ferramenta e modos de aplicação de fluido de corte estão apresentados nas Figuras 6 e 7.



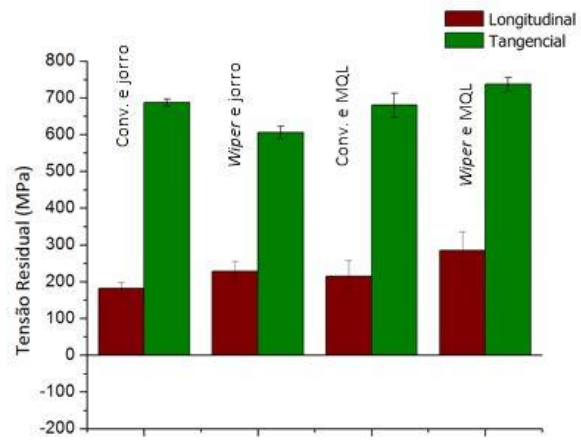
**Figura 6** – Tensões residuais médias com  $a_p = 0,4$  mm e  $f = 0,053$  mm/rev. Fonte: Elaboração própria.



**Figura 8** – Tensões residuais médias com  $a_p = 1,2$  mm e  $f = 0,053$  mm/rev. Fonte: Elaboração própria.



**Figura 7** – Tensões residuais médias com  $a_p = 0,4$  mm e  $f = 0,15$  mm/rev. Fonte: Elaboração própria.



**Figura 9** – Tensões residuais médias com  $a_p = 1,2$  mm e  $f = 0,15$  mm/rev. Fonte: Elaboração própria.

Nas Figuras 8 e 9 estão apresentadas as tensões residuais médias geradas nas amostras torneadas com  $a_p = 1,2$  mm e diferentes avanços, geometrias de ferramenta e modos de aplicação de fluido de corte. Analisando as Figuras 7 e 8 é possível notar que o aumento do avanço ocasionou o surgimento de tensões residuais trativas mais elevadas em ambas as direções medidas, portanto prejudiciais à superfície usinada. Conforme o avanço aumenta, a condição de corte se torna mais severa, gerando maiores gradientes de temperatura na região de corte, predominando assim o efeito térmico na peça. Esses resultados estão coerentes com o mesmo comportamento encontrado por El-Axir *et al.*, (2017) no torneamento de aços similares. Em relação à geometria da ferramenta de corte, verificou-se que os insertos *wiper* geraram tensões residuais um pouco mais elevadas em relação aos insertos convencionais para as mesmas condições de corte.

Quanto ao modo de aplicação de fluido de corte, os resultados mostraram que as amostras usinadas com MQL apresentaram tensões residuais ligeiramente mais elevadas, visto que nessa condição o efeito refrigerante do fluido de corte é menos eficiente. Verificou-se também que o aumento da profundidade de corte não influenciou de maneira significativa a magnitude das tensões residuais longitudinais, o que está coerente com o trabalho de Capello (2005). É possível perceber que o maior valor de tensão residual encontrado (740 MPa), de natureza trativa, ocorreu na direção de corte (tangencial). Este valor é correspondente à configuração de corte mais severa adotada no trabalho, ou seja, com avanço (0,15 mm/rev) e profundidade de corte (1,2 mm) elevados, utilizando inserto *wiper* e MQL como modo de aplicação de fluido de corte. Já o menor valor de tensão residual, compressiva de -85 MPa, foi gerado na direção longitudinal, ou seja, na direção do avanço, empregando pequeno avanço (0,053 mm/rev) e profundidade de corte (0,4 mm), além de inserto *wiper* e MQL. Em todas as condições de corte as tensões residuais tangenciais (ao avanço) apresentaram maiores magnitudes em relação às tensões residuais longitudinais (mesmo sentido do avanço), o que



também foi observado por Huang e Yang (2016) no torneamento de aço AISI 1045. Esse comportamento foi explicado considerando que as deformações foram maiores na direção de corte (tangencial), visto que a força de corte foi maior do que a força de avanço em todas as amostras.

Para a validação dos resultados de tensões residuais médias obtidos, foram verificadas a normalidade dos resíduos e a homoscedasticidade das variâncias, para em seguida, aplicar a estatística paramétrica na apresentação dos resultados (ANOVA), usando o *software Statistica*. É possível observar nas Tabelas 4 e 5 que os resultados dos testes de a normalidade dos resíduos e a homoscedasticidade das variâncias, para as tensões residuais longitudinais e tangenciais apresentaram valor-p superior a 0,05.

Pela análise de variância, observou-se os efeitos de

(Figuras 10 e 11), mostrando a influência de cada parâmetro nos resultados de tensões residuais em ambas as direções. Nestas figuras fica claro que o avanço é o parâmetro que mais influenciou no comportamento das tensões residuais, enquanto o impacto do modo de aplicação de fluido de corte e o tipo de inserto é pequeno.

As Figuras 12 e 13 mostram as médias dos parâmetros de avaliação de rugosidade Ra medidas em cada uma das condições de ensaio.

**Tabela 4** - Teste de normalidade dos resíduos e homoscedasticidade para as tensões residuais longitudinais.

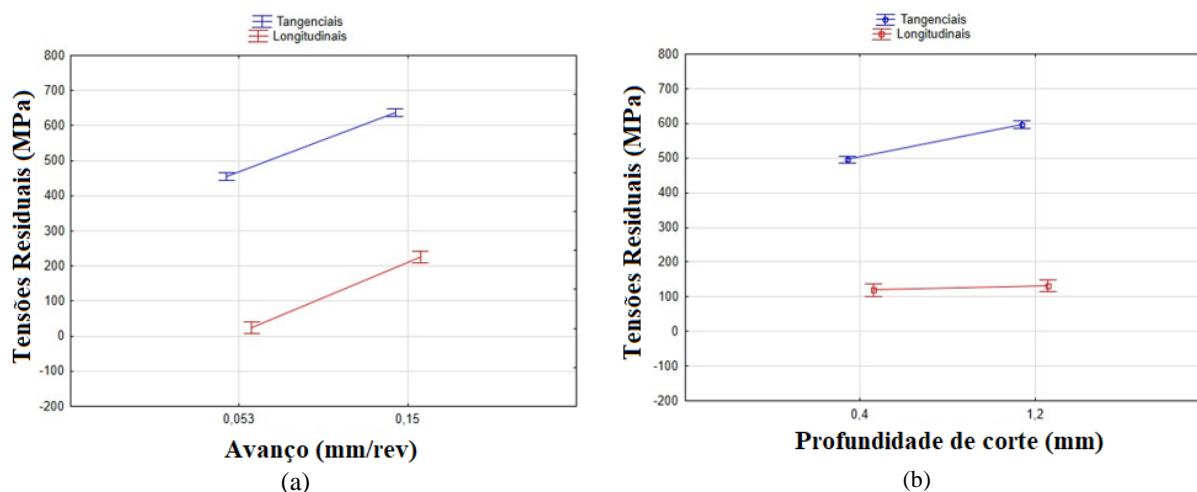
Testes de normalidade dos resíduos	Valor-p	Teste de homoscedasticidade	Valor-p
Shapiro-Wilks	0,16	Cochran Barlett	0,526011
Kolmogorov-Smirnov	0,20		

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 5** - Teste de normalidade dos resíduos e homoscedasticidade para as tensões residuais tangenciais.

Testes de normalidade dos resíduos	Valor-p	Teste de homoscedasticidade	Valor-p
Shapiro-Wilks	0,06	Cochran Barlett	0,893432
Kolmogorov-Smirnov	0,20		

Fonte: Elaboração própria.



**Figura 10** – Efeitos: (a) avanço, (b) profundidade de corte, para as tensões residuais em ambas as direções.

cada um dos parâmetros e de suas combinações no comportamento das tensões residuais longitudinais e tangenciais. Foram elaborados os gráficos de efeito

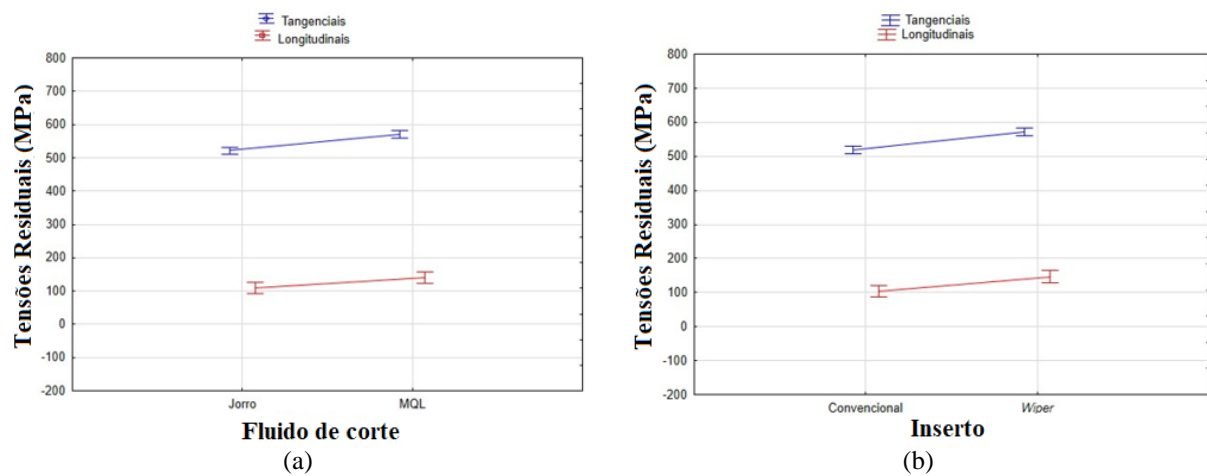


Figura 11 – Efeitos: (a) fluido de corte, (b) inserto, para as tensões residuais em ambas as direções.

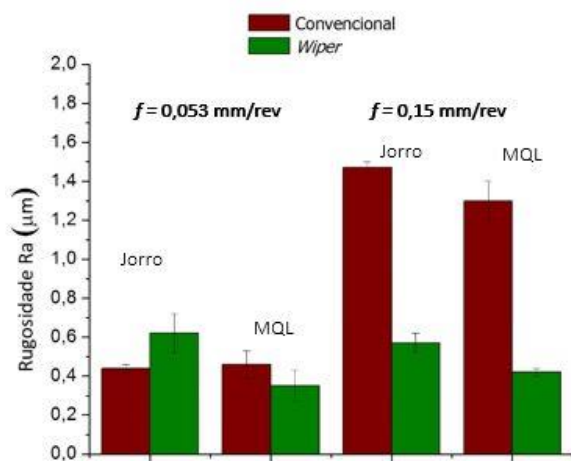


Figura 12 - Rugosidades Ra com  $a_p = 0,4 \text{ mm}$ .

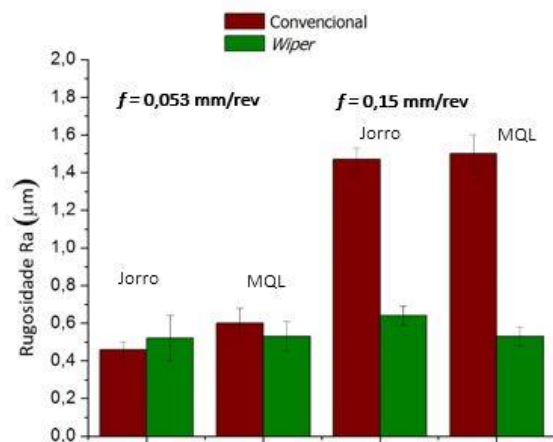
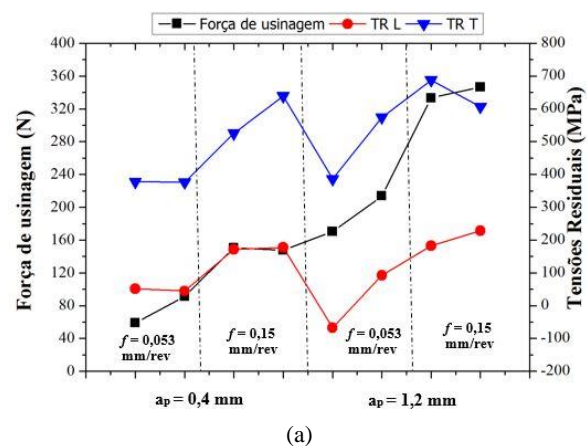


Figura 13 - Rugosidades Ra com  $a_p = 1,2 \text{ mm}$ .

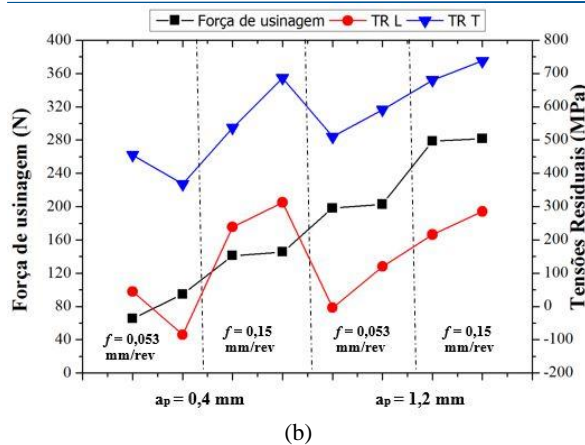
Analisando as Figuras 12 e 13, é possível perceber que o aumento do avanço, quando utilizados inserts convencionais, foi prejudicial para a qualidade

superficial do material. Porém, quando empregado o inserto *wiper* e com o maior valor de avanço ( $0,15 \text{ mm/rev}$ ), o acabamento superficial é melhorado, visto que as amostras usinadas com  $a_p = 0,4 \text{ mm}$  e inserto *wiper*, apresentaram valores de Ra de  $0,56 \mu\text{m}$  e  $0,42 \mu\text{m}$  respectivamente, enquanto nas amostras usinadas com inserto convencional, Ra de  $1,48 \mu\text{m}$  e  $1,34 \mu\text{m}$ , respectivamente. Percebe-se que esse padrão também se repetiu nos regimes de corte com avanço elevado e  $a_p = 1,2 \text{ mm}$ , já que as amostras usinadas com inserto *wiper* obtiveram Ra de  $0,64 \mu\text{m}$  e  $0,56 \mu\text{m}$ , respectivamente. Por outro lado, as amostras usinadas com inserto convencional geraram Ra igual a  $1,46 \mu\text{m}$  e  $1,52 \mu\text{m}$ , respectivamente.

Sabe-se que a força de usinagem depende dos efeitos mecânicos presentes durante o corte do material. Assim, é interessante avaliar sua correlação com o surgimento das tensões residuais. Na Figura 14 são apresentadas as correlações entre a força de usinagem e as tensões residuais longitudinais e tangenciais.



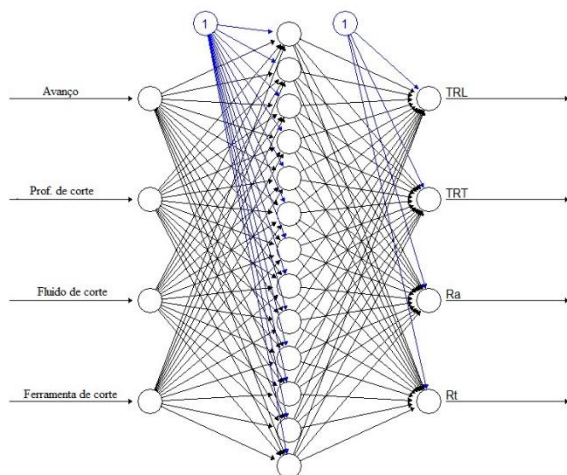




**Figura 14** - Força de usinagem vs tensões residuais, utilizando: (a) jorro (b) MQL.

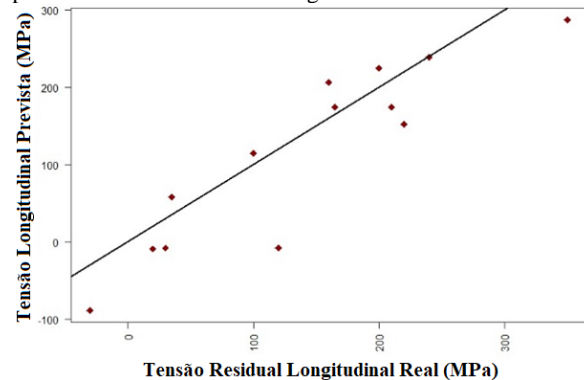
Pode-se observar que à medida que a força de usinagem aumenta, as tensões residuais em ambas as direções tendem a ser tornar mais trativas. Este comportamento é esperado, visto que o emprego de maiores avanço e profundidade de corte incrementa a força de usinagem e as tensões residuais. Este comportamento não foi observado apenas nas amostras com menor avanço e maior profundidade de corte, permitindo inferir que a profundidade de corte influencia mais no aumento da força de usinagem que no avanço. Enquanto nas tensões residuais o incremento do avanço é o parâmetro mais significativo, como mostrado na Figura 10.

A rede neural artificial (RNA) concebida utilizou 80% dos resultados experimentais de tensões residuais, de  $R_a$  e  $R_t$ , para treinamento supervisionado a fim de prever os outros 20% dos experimentos. Na camada de entrada da rede neural foram consideradas como variáveis de entrada o avanço, a profundidade de corte, o tipo de ferramenta de corte e o modo de aplicação de fluido. Na camada de saída, as tensões residuais longitudinais e tangenciais.  $R_a$  e  $R_t$  foram definidas como variáveis de resposta. A rede neural artificial elaborada é mostrada na Figura 15. Com uso de um algoritmo de otimização do número de neurônios na camada oculta a fim de reduzir o erro da rede neural, chegou-se a um total de 13 neurônios.

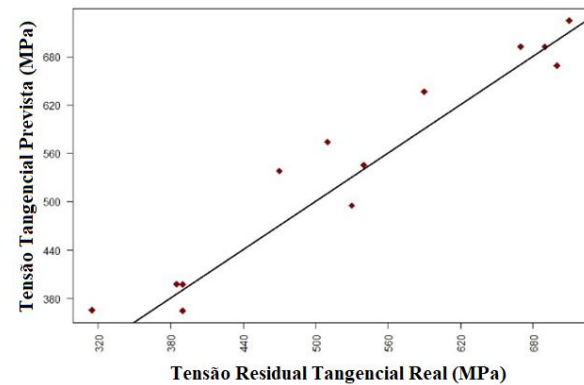


**Figura 15** - Rede neural artificial desenvolvida.

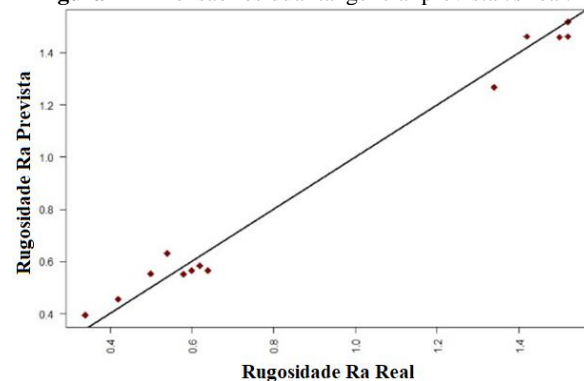
As Figuras 16, 17 e 18 mostram a correlação entre os resultados experimentais e a previsão gerada pela rede neural para as tensões residuais e a rugosidade  $R_a$ .



**Figura 16** - Tensão residual longitudinal prevista vs real.



**Figura 17** - Tensão residual tangencial prevista vs real.



**Figura 18** - Rugosidade  $R_a$  prevista vs real.

A correlação entre os resultados preliminares das tensões residuais obtidos experimentalmente com os valores previstos pela rede neural artificial mostrou previsões bem satisfatórias para as tensões residuais em ambas as direções (Figuras 16 e 17). Os coeficientes de correlação foram de 0,91 para a tensão residual longitudinal (na direção do avanço), 0,96 para a tensão residual tangencial (na direção de corte) e 0,99 para rugosidade média,  $R_a$ .

#### 4. Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo analisar o comportamento das tensões residuais, a rugosidade superficial e a força de usinagem geradas no

torneamento do aço SAE 1050 com diferentes parâmetros e permite fazer as seguintes conclusões:

1. O torneamento gerou tensões residuais trativas na maioria das condições de corte estudadas, apresentando tensões residuais compressivas apenas na direção do avanço (longitudinal) quando utilizado menor avanço.
2. O avanço é o parâmetro que se mostrou mais importante no experimento, pois seu aumento introduziu tensões trativas de elevada magnitude, além de elevar as forças de usinagem e piorar a qualidade superficial da peça torneada.
3. O emprego de inserto *wiper*, associado com avanço elevado, provocou melhoria substancial do acabamento superficial, porém, não houve grandes diferenças entre a rugosidade gerada por esse inserto em relação ao inserto convencional quando utilizado menor avanço.
4. A aplicação de mínima quantidade de fluido de corte (MQL) reduziu as forças de usinagem e gerou melhor qualidade superficial em relação às amostras usinadas com fluido em jorro.
5. A rede neural artificial elaborada conseguiu prever as tensões residuais em ambas as direções e os parâmetros de rugosidade Ra de maneira satisfatória.
6. A melhor condição encontrada após os experimentos foi a combinação de inserto *wiper* com avanço elevado, pois melhorou o acabamento superficial das amostras e não modificou o estado das tensões residuais em relação às amostras usinadas com inserto convencional.

## 5. Agradecimentos

Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código Financeiro 001. Os autores agradecem também às agências de pesquisa, CNPq (Processo: 304327/2021-2) e FAPERJ, pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

## 6. Referências

- [1] Mohsen Soori, Behrooz Arezoo. “Minimization of Surface Roughness and Residual Stress in Grinding Operations of Inconel 718” JMEPEG (2023) 32:8185–8194 - <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07721-4>
- [2] Ammar H. Elsheikh, S. Shanmugan, T. Muthuramalingam, Amrit Kumar Thakur, F. A. Essa, Ahmed Mohamed Mahmoud Ibrahim, Ahmed O. Mosleh. “A comprehensive review on residual stresses in turning”. Adv. Manuf. (2022) 10:287–312 <https://doi.org/10.1007/s40436-021-00371-0>
- [3] Joona Vaara, Aleks Kunnari, Tero Frondelius. “Literature review of fatigue assessment methods in residual stressed state” Engineering Failure Analysis (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104379>.
- [4] Cindra Fonseca, M., Souza, M.F., Martins, M.C., Tomaz, I.V., Silveira, R.J.E., “Abordagem teórica dos princípios da tensometria por difração de Raios-X”, VIII ECTM, 2017.
- [5] Das, R. K.; Sahoo, A. K.; Mishra, P. C.; Kumar, R.; Panda, A. “Comparative machinability performance of heat treated 4340 Steel under dry and minimum quantity lubrication surroundings”. Procedia Manufacturing, v. 20, p. 377–385, 2018.
- [6] Í. V. Tomaz, J. M. Pardal, M. Cindra Fonseca. “Influence of minimum quantity lubrication in the surface quality of milled maraging steel”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2019) 104:4301-4311. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04262-4>
- [7] Hassanpour, H.; Sadeghi, M. H.; Rasti, A.; Shajari, S. “Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication”. Journal of Cleaner Production, v. 120, p. 124–134, 2016.
- [8] D’Addona, D. M.; Raykar, S. J. Analysis of Surface Roughness in Hard Turning Using Wiper Insert Geometry. Procedia CIRP, v. 41, p. 841–846, 2016.
- [8] V. Sousa, F. J. G. Silva, J. S. Fecheira, H. M. Lopes, R. P. Martinho, R. B. Casais. “Assessing the cutting forces in machining processes: An overview”. Procedia Manufacturing 51 (2020) 787–794.
- [9] Jerold B.D., Kumar M.P., “Experimental investigation of turning AISI 1045 steel using cryogenic carbon dioxide as the cutting fluid”, Journal of Manufacturing Processes, 13, p. 113–119, 2011.
- [10] Suresh R., Basavarajappa S., Samuel G.L., “Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool”, Measurement, 45, p.1872-1884, 2012.
- [11] Hadad M., Sadeghi B., “Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy”, 54, p.332-343, 2013.
- [12] Ekinovic S., Prcanovic H., Begovic E., “Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3”, The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015, 132, p.608-614, 2015.
- [13] El-Axir, M. H., Elkhabeery M. M., Okasha, M. M., “Modeling and Parameter Optimization for Surface Roughness and Residual Stress in Dry Turning Process”, Engineering, Technology & Applied Science Research 7, n. 5, p.2047-2055, 2017.
- [14] Capello, E., “Residual stresses in turning Part I: Influence of process parameters”, Journal of Materials Processing Technology 160, p.221-228, 2005.
- [15] Huang, K., Yang, W., “Analytical modeling of residual stress formation in workpiece material due to cutting”, International Journal of Mechanical Sciences, 114, p.21-34, 2016.