

**ANÁLISE DA TEMPERATURA E RUGOSIDADE EM PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX 2205**Vinicius Gonçalves Pereira<sup>1</sup> (IC), Rogério Fernandes Brito (PQ)<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira.**Palavras-chave:** Aço inoxidável duplex 2205, Ciclo inverso de calor, DOE, Torneamento.**Introdução**

O presente estudo busca analisar a eficiência de modelos experimentais e numéricos na previsão do comportamento térmico e da rugosidade superficial durante o torneamento do aço inoxidável duplex 2205, validando os resultados experimentais por meio de simulação computacional. Especificamente, pretende-se medir a temperatura no processo de usinagem utilizando termopares do tipo K instalados e câmera termográfica, realizar medições de rugosidade superficial e utilizar um planejamento de experimentos (DOE) para otimizar o processo. De acordo com Montgomery *et al.* (2017), o Planejamento de Experimentos (DOE - Design of Experiments) é uma metodologia estatística amplamente utilizada na Engenharia para analisar de forma estruturada e eficiente os efeitos das variáveis de entrada sobre uma resposta ou variável de saída. A escolha do material deve-se à sua elevada resistência à corrosão e excelente desempenho mecânico, embora sua alta dureza e baixa condutividade térmica representem desafios significativos na usinagem, gerando temperaturas elevadas e acelerando o desgaste da ferramenta (García-Martínez *et al.*, 2022). Dessa forma, este trabalho integra análise térmica, problemas inversos de transferência de calor e DOE para compreender e otimizar o torneamento do aço inoxidável duplex 2205, promovendo maior eficiência, redução de custos e melhor qualidade das peças, alinhando-se às demandas da indústria moderna.

**Metodologia**

A pesquisa foi conduzida seguindo uma metodologia experimental estruturada em várias etapas. Inicialmente, realizou-se a preparação dos tarugos de aço inoxidável 2205 com diâmetro de 56 mm e um

comprimento de usinagem de 50 mm, como pode ser visto na figura 1, utilizando os equipamentos do Laboratório de Usinagem da UNIFEI - Campus Itabira.

Figura 1 – Preparação dos corpos de prova para usinagem



O equipamento utilizado neste estudo se trata de um torno CNC (Controle Numérico Computadorizado), modelo CY-K6136/750, fabricado pela EUROSTEC apresentado na figura 2. A escolha dessa máquina CNC, é justificada pelo modo de operação e funcionamento, Segundo Dimitrov e Szecsi (2016), a programação CNC permite que o dimensionamento das peças seja obtido automaticamente, eliminando a necessidade de ajustes manuais frequentes e possíveis erros humanos associados. As pastilhas de corte utilizadas na usinagem foram fabricadas pela SANDVIK Coromant, com código ISO TNMG 16 04 04 – MF 2220, sendo constituídas de metal duro com revestimento obtido pelo processo Chemical Vapor Deposition (CVD). O revestimento

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

multicamadas é composto por  $TiCN+Al_2O_3+TiN$ , conferindo maior resistência ao desgaste e durabilidade. O porta-ferramentas empregado possui código ISO DTJNR 2020K 16, destinado a operações de desbaste à esquerda, com ângulo da aresta de corte de  $93^\circ$  e ângulos de inclinação e saída de  $-6^\circ$ .

Figura 2 – Máquina – ferramenta CNC



Proseguiu-se com a calibração dos instrumentos de medição, contemplando os termopares tipo K. Para tal, realizou-se uma comparação entre o sensor de resistência de platina, pertencente ao equipamento da Armfield, e o sensor de temperatura tipo K utilizado no presente trabalho. Na determinação da temperatura de ebulição da água, verificou-se um desvio percentual de aproximadamente 2% entre as medidas obtidas. Também foi feita a determinação da emissividade para a câmera termográfica. Em seguida, efetuou-se uma revisão da literatura recente para identificar trabalhos experimentais com o mesmo material, de modo a selecionar parâmetros de usinagem adequados para aplicar ao Planejamento de experimentos (DOE), que permite avaliar tanto os efeitos principais quanto as interações entre múltiplos fatores simultaneamente. Esse método facilita a identificação do impacto individual de cada variável independente e possibilita compreender como essas variáveis interagem, otimizando as informações extraídas dos dados experimentais. Neste estudo, as variáveis de entrada (fatores de controle) consideradas foram a velocidade de corte ( $V_c$ ), o avanço ( $f_z$ ) e a profundidade de corte ( $A_p$ ). As variáveis de saída (respostas do processo) a serem analisadas incluem a temperatura, a rugosidade

superficial e a potência elétrica consumida. Os valores das variáveis de entrada gerados pelo software Minitab são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros para usinagem

**Results for: Worksheet 2**

**Full Factorial Design**

Factors: 3 Base Design: 3; 8  
Runs: 11 Replicates: 1  
Blocks: 1 Center pts (total): 3

All terms are free from aliasing.

| Worksheet 2 *** |          |          |          |        |       |       |      |
|-----------------|----------|----------|----------|--------|-------|-------|------|
| ↓               | C1       | C2       | C3       | C4     | C5    | C6    | C7   |
|                 | StdOrder | RunOrder | CenterPt | Blocks | Vc    | fz    | ap   |
| 1               | 1        | 1        | 1        | 1      | 80.0  | 0.060 | 0.30 |
| 2               | 2        | 2        | 1        | 1      | 275.0 | 0.060 | 0.30 |
| 3               | 3        | 3        | 1        | 1      | 80.0  | 0.250 | 0.30 |
| 4               | 4        | 4        | 1        | 1      | 275.0 | 0.250 | 0.30 |
| 5               | 5        | 5        | 1        | 1      | 80.0  | 0.060 | 1.40 |
| 6               | 6        | 6        | 1        | 1      | 275.0 | 0.060 | 1.40 |
| 7               | 7        | 7        | 1        | 1      | 80.0  | 0.250 | 1.40 |
| 8               | 8        | 8        | 1        | 1      | 275.0 | 0.250 | 1.40 |
| 9               | 9        | 9        | 0        | 1      | 177.5 | 0.155 | 0.85 |
| 10              | 10       | 10       | 0        | 1      | 177.5 | 0.155 | 0.85 |
| 11              | 11       | 11       | 0        | 1      | 177.5 | 0.155 | 0.85 |

A etapa seguinte, destinada à realização dos ensaios de torneamento sob diferentes condições de corte, coleta, análise e interpretação dos resultados não pôde ser concluída até o momento devido ao atraso no processo de compra dos materiais. Além disso, a elevada demanda de outras pesquisas e projetos no laboratório contribuiu para o atraso no desenvolvimento deste trabalho.

### Resultados e discussão

Os resultados obtidos até o momento referem-se aos pré-testes realizados, uma vez que, conforme mencionado anteriormente, não foi possível executar o experimento final. Esses testes preliminares demonstraram precisão na aquisição dos valores de temperatura para a condição crítica de corte. As medições

## “Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

registraram temperaturas de até 168 °C, obtidas diretamente durante o processo de usinagem. Foi feito um teste de repetibilidade no qual foi mantido as condições de corte durante a usinagem, os parâmetros usados foram  $V_c - 230$  m/mm,  $A_p - 1,5$  mm e  $f_z - 0,25$  mm/rev.

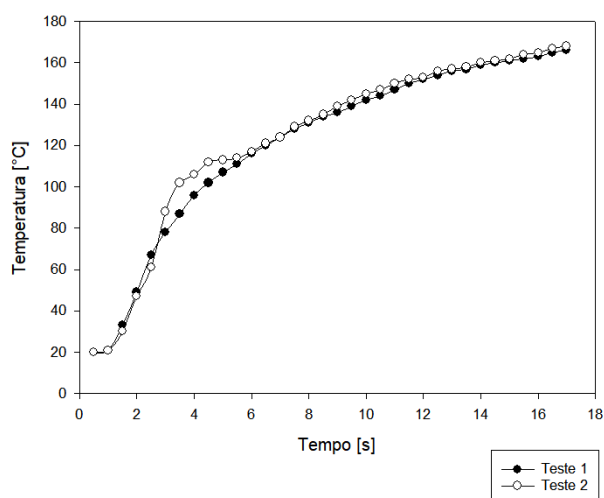
A primeira etapa da pesquisa foi efetivamente concluída, consistindo na soldagem do termopar a uma distância conhecida de 3 mm da ponta da ferramenta. Esse sensor foi conectado ao módulo de aquisição de temperatura Agilent 34970A, o qual, por sua vez, foi ligado a um notebook, permitindo a coleta e exportação dos dados para planilhas de análise. O teste realizado pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Montagem teste experimental



Após a realização do experimento prático, os dados de temperatura coletadas possibilitaram plotar as curvas características dos valores de temperatura em função do tempo, e podem ser vistas no gráfico 1.

Gráfico 1 – Temperatura X Tempo



Como pode ser observado no gráfico acima ocorreu um aumento rápido da temperatura nos instantes iniciais, seguido por uma elevação gradual até a estabilização, ao final do intervalo analisado. A diferença entre os valores de pico obtidos nos dois testes foi inferior a 2%, indicando elevada reprodutibilidade experimental e conferindo confiabilidade aos procedimentos adotados.

Caso o experimento pudesse ser realizado, conforme observado nos estudos de referência, seria possível determinar valores das variáveis de entrada capazes de gerar condições otimizadas de temperatura e rugosidade. Dessa forma, seria viável produzir peças usinadas com bom acabamento superficial e, simultaneamente, baixo desgaste das ferramentas de corte.

### Conclusões

A pesquisa desenvolvida buscou investigar o processo de torneamento do aço inoxidável duplex 2205, com foco na análise das variáveis temperatura e rugosidade, por meio da aplicação do planejamento de experimentos (DOE). Apesar de a etapa experimental final não ter sido realizada devido às limitações externas, como a demora na liberação de recursos e a elevada demanda de equipamentos no laboratório, os pré-testes executados forneceram resultados relevantes para a avaliação inicial do estudo. Os ensaios preliminares confirmaram a viabilidade do método de medição da temperatura, atingindo valores de até 168 °C em condições críticas de corte, o que válida a metodologia empregada para monitoramento térmico. Entretanto, a variável rugosidade não pôde ser medida, visto que depende da realização do processo completo de usinagem.

Assim, mesmo com as restrições enfrentadas, a pesquisa contribuiu para consolidar os procedimentos metodológicos e confirmar a adequação dos equipamentos e ferramentas utilizados. Até a data de apresentação do VIII Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica, será realizado o experimento completo, de modo que os resultados de temperatura e rugosidade possam ser obtidos e inseridos no pôster, possibilitando demonstrar a geração de peças com melhor acabamento superficial e maior eficiência no uso das ferramentas de corte.

### Agradecimentos

Este trabalho não seria possível sem o apoio de

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

diversas pessoas e instituições, às quais expresso minha sincera gratidão. Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por guiar meus caminhos e me dar forças para superar os desafios deste período.

Agradeço à minha família, meus pais, Eliana e Vanilson, meus irmãos, Izabela e Diego, e meus avós, Maria Alves e Domingos Gonçalves, Maria da Conceição, por sempre me motivarem, apoiarem minhas decisões e serem exemplos de vida. Agradeço, em especial, à minha namorada Thalyta, pelo carinho, paciência e apoio contínuo durante toda a realização deste trabalho.

Expresso minha gratidão aos meus professores orientadores, Dr. Rogério Fernandes Brito, Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito, Dr. Bruno Silva Cota e Dr. Carlos Henrique de Oliveira, pelo conhecimento, orientação e incentivo fornecidos. Agradeço também aos técnicos de laboratório, Nayara Nunes e Deivyson Augusto, pelo auxílio e compartilhamento de seu conhecimento teórico e prático.

Agradeço aos meus amigos da faculdade e das equipes de competição Baja e Iron Racers pelo apoio, assim como pelo empréstimo de espaço e ferramentas da oficina. Agradeço também ao meu amigo Rafael dos Santos Martino pelo suporte prestado durante o desenvolvimento do projeto.

Agradeço ao CNPq pelo apoio a bolsa, e à FAPEMIG que apoiou o trabalho, Processo n°. APQ-02317-18-Reg.:42/2019, pelo apoio financeiro, que possibilitou a aquisição de materiais, ferramentas de corte e a continuidade das atividades experimentais. Minha gratidão se estende à Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, pelos recursos, equipamentos e infraestrutura disponibilizados, essenciais para a realização deste estudo.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste projeto de pesquisa, seja por apoio acadêmico, técnico, institucional ou pessoal, tornando possível a realização desta Iniciação Científica.

GARCÍA-MARTÍNEZ, E.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, A.; MANJABACAS-TENDERO, M. C.; MIGUEL-EGUÍA, V. **Proposal of a combined experimental-simulation methodology for the evaluation of machining temperature in turning processes.** Measurement, [S.l.], v. 189, fev. 2022.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais.** 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. 408 p. ISBN 978-85-212-0846-4.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments.** 9. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. 734 p. ISBN 978-1119113478.

SANDVIK COROMANT. **TNMG 16 04 04-MF 2220: T-Max® P, insert for turning.** Disponível em: *Sandvik Coromant – Product Details*. Acesso em: 19 ago. 2025.

### Referências

DIMITROV, D.; SZECSI, T. **Machining accuracy on CNC lathes under the lack of unity of the process and design data.** In: 48th CIRP International Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS 2015), 2016. Procedia CIRP, v. XX (Proceedings), p. 824–828, 2016.