

MODELAGEM TÉRMICA E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA NO TORNEAMENTO EXTERNO DO AÇO ABNT 1045 COM FERRAMENTA REVESTIDA

Mauricio Nogueira Passador¹, Pedro Henrique Janduzzo Cavaretto², Uéliton Carvalho Alves³, João Gustavo Pereira da Silva², Carlos Eiji Hirata Ventura², Alexandre Tácito Malavolta²

¹Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil
(mauriciopassador@estudante.ufscar.br)

²Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Piracicaba, Brasil

Resumo: Este trabalho desenvolveu um modelo térmico por elementos finitos para o torneamento do aço ABNT 1045 usando ferramenta revestida com AlTiN+TiSiXN. O monitoramento via termopares tipo K foi comparado a simulações no software NX 12. Resultados indicaram temperatura máxima de 1150 °C na interface ferramenta-cavaco. O modelo demonstrou alta fidelidade na predição dos gradientes térmicos, confirmando a eficácia do revestimento como barreira térmica efetiva.

Palavras-chave: Usinagem; Ferramenta revestida; Método dos Elementos Finitos

INTRODUÇÃO

Nos processos de fabricação por usinagem, as cargas térmicas impostas às ferramentas de corte exercem uma influência determinante no desgaste e na eficiência global do processo, especialmente sob condições de altas velocidades de corte (Akbar et al., 2008). A geração de calor ocorre primariamente nas zonas de cisalhamento, onde temperaturas elevadas induzem a plasticidade no material da peça, mas podem simultaneamente comprometer as propriedades mecânicas do substrato da ferramenta ao atingirem patamares superiores a 900 °C (Abukhshim et al., 2005; Brito et al., 2025). No torneamento do aço AISI 1045, material amplamente utilizado na indústria, o controle térmico é vital para mitigar falhas prematuras e garantir a integridade da peça (Abeni et al., 2025; Attanasio et al., 2015).

Para mitigar essa degradação, a aplicação de revestimentos cerâmicos como barreiras isolantes tornou-se uma prática essencial (Zhao et al., 2021). Sistemas baseados em AlTiN e TiSiN têm sido amplamente adotados devido às suas superiores propriedades mecânicas e estabilidade térmica (Alves et al., 2023). De acordo com Kowalczyk e Madej (2025), a arquitetura de multicamadas AlTiN/TiSiXN é capaz de reduzir o coeficiente de atrito em cerca de 10% e aumentar drasticamente a resistência ao desgaste em comparação com ferramentas não revestidas. Tais revestimentos funcionam bloqueando o fluxo de calor que atinge o substrato, permitindo que a ferramenta mantenha sua dureza por períodos

prolongados em condições severas (Zhao e Liu, 2018). Apesar dos avanços nas tecnologias de materiais, a predição precisa do campo de temperaturas através de simulação numérica permanece um desafio. Modelos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) têm avançado significativamente, mas sua precisão depende da correta calibração das condições de interface (Figueiredo et al., 2022; Parolari et al., 2018; Ventura e Malavolta, 2017). Um fator crítico frequentemente negligenciado é a existência de uma resistência térmica de contato nas interfaces entre inserto, calço e porta-ferramenta, que impacta diretamente a dissipação do calor gerado (Courbon et al., 2013; Brito et al., 2025). A utilização de técnicas híbridas que combinam modelos analíticos com simulações MEF permite determinar distribuições de temperatura mais representativas da realidade experimental (Grzesik, 2006).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um modelo térmico de elementos finitos para o conjunto ferramenta e porta-ferramenta durante o torneamento externo a seco do aço ABNT 1045. A proposta integra o monitoramento experimental via termopares estrategicamente posicionados com uma análise numérica detalhada no software NX 12 *Simcenter Thermal*. O estudo contempla as propriedades termofísicas dependentes da temperatura e o efeito protetor do revestimento multicamada Balinit Durana (AlTiN + TiSiXN), visando obter uma representação fidedigna dos gradientes térmicos atuantes no conjunto de corte.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, utilizou-se um inserto de metal duro com geometria quadrada (codificação ISO SNMG 120412), apresentando arestas de 12,5 mm e raio de ponta de 1,2 mm. O substrato da ferramenta é composto por uma liga de carboneto de tungstênio (WC) com 5% de cobalto (Co) em massa.

O inserto possui o revestimento comercial Balinit Durana® (Oerlikon Balzers), caracterizado por uma arquitetura de camadas distintas: uma camada interna de AlTiN, que provê alta ductilidade e adesão ao substrato, e uma camada externa de TiSiXN, responsável pela elevada resistência ao desgaste abrasivo e estabilidade térmica. As principais características geométricas da ferramenta estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações técnicas da ferramenta.

Parâmetro	Valor/Especificação
Formato da ferramenta	Quadrada
Qtd. de arestas de corte	8
Comprimento do lado	12,5 mm
Espessura	4,74 mm
Raio de ponta	1,2 mm
Substrato	95% WC e 5% Co
Revestimento	Balinit Durana® (Oerlikon Balzers)

O porta-ferramenta selecionado para o conjunto de ensaios foi o modelo CSDNN 2525M 12-4 (Sandvik Coromant®), conforme ilustrado na Figura 1. Este suporte apresenta haste quadrada de 25 mm e é projetado para garantir a estabilidade dimensional do inserto durante o corte. As principais especificações técnicas e as propriedades geométricas deste componente estão sintetizadas na Tabela 2.

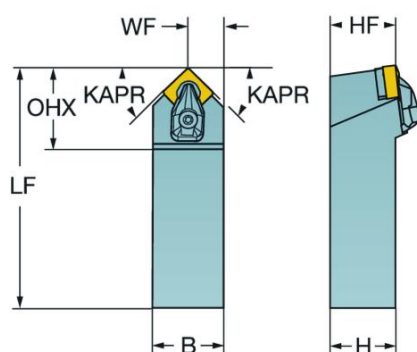


Figura 1. Ilustração técnica do porta-ferramenta.

Tabela 2. Especificações técnicas do porta-ferramenta.

Parâmetro	Valor
Código de Identificação	SNGN 12 07 08
Tipo de Fixação	Grampo superior
Ângulo da aresta de corte (KAPR1/KAPR2)	45°
Ângulo de ataque	45°
Ângulo de saída ortogonal	-6°

Ângulo de inclinação	-6°
Ângulo máx. de usinagem em rampa	40°
Ângulo do corpo (Relação Peça/Máquina)	0°
Altura e Largura da haste (H/B)	25 mm
Comprimento funcional (LF)	150 mm
Largura funcional (WF)	12,8 mm
Balanço máximo	36,5 mm
Torque de aperto	3,9 Nm
Material do corpo	Aço
Massa	0,7142 kg

Os ensaios de usinagem foram realizados em um torno CNC modelo Centur 30D (Indústrias ROMI®), pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação (LPF) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. O equipamento, ilustrado na Figura 2, possui potência de acionamento de 9 kW e rotação máxima de 4000 rpm.



Figura 2. Torno CNC utilizado nos testes de usinagem.

A aquisição dos dados de temperatura foi realizada utilizando-se uma plataforma da National Instruments®, composta por um chassi compacto cDAQ-9178 equipado com um módulo de entrada de temperatura NI 9214. Este módulo dispõe de 16 canais isolados para termopares e conversor analógico-digital de 24 bits, o que assegura alta fidelidade e baixo ruído na digitalização dos sinais coletados durante o processo de usinagem.

Para a etapa de modelagem geométrica e simulação numérica, utilizou-se a plataforma integrada NX 12 (Siemens). O desenvolvimento do modelo baseou-se em uma abordagem CAD-CAE (Computer-Aided Design e Computer-Aided Engineering), garantindo a fidelidade geométrica dos componentes e das ferramentas de corte. As simulações térmicas foram conduzidas através do módulo Simcenter Thermal, selecionado por sua capacidade de processar fenômenos de transferência de calor complexos.

A parte experimental contou com o torneamento externo a seco de uma barra cilíndrica de aço ABNT 1045, com diâmetro inicial de 45,5 mm, visando registrar a evolução das temperaturas no conjunto ferramenta e porta-ferramenta. Para o monitoramento, foram instalados 9 (nove) termopares do tipo K (Cromel-Alumel), sendo oito posicionados estrategicamente no conjunto de corte e um destinado à medição da temperatura ambiente, conforme detalhado na Figura 3.

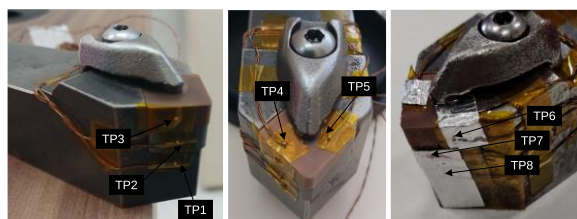


Figura 3. Termopares montados no conjunto ferramenta / porta-ferramenta.

Os sinais foram registrados via sistema de aquisição da *National Instruments®*. Os parâmetros de corte adotados compreenderam uma velocidade de corte (v_c) de 250 m/min, avanço (f) de 0,1 mm/rev e profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm. O percurso de usinagem foi de 130 mm, resultando em um tempo efetivo de corte de 44 s.

Adicionalmente, após a execução da usinagem, a ferramenta foi submetida a uma análise com o microscópio óptico 3D da marca Alicona® modelo Infinite Focus SL. O equipamento utiliza um sistema óptico de varredura vertical que obtém informações topográficas e de cor a partir da variação de foco.

Em relação ao modelo térmico de elementos finitos do conjunto para ajuste com dados experimentais dos termopares e posterior obtenção dos gradientes térmicos, inicialmente elaborou-se a malha priorizando o refinamento local na região da zona de corte. O padrão de refinamento de malha adotado com a indicação do tamanho médio dos elementos em diferentes regiões é ilustrado na Figura 4.

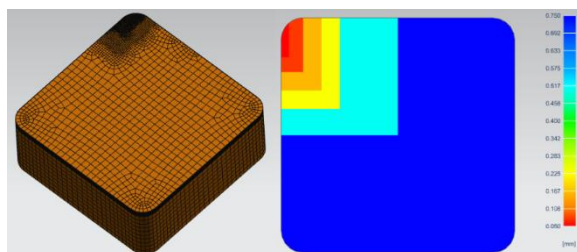


Figura 4. Detalhe da malha da ferramenta com indicação do padrão de refinamento.

A orientação do refinamento da malha nessa região foi demarcada com baseando-se no comprimento de contato ferramenta-cavaco L_c (0,243 mm) o qual foi

estimado por meio da Equação 1, proposta por Iqbal et al. (2009):

$$L_c = 0,09t_1 + 1,56t_2 \quad (1)$$

onde: t_1 representa a espessura do cavaco não deformado e t_2 a espessura do cavaco deformado medida experimentalmente.

Além da malha sólida, a ferramenta também é revestida com elementos do tipo casca multi-camadas (*multi-layer shell*). Esse tipo de elemento permite contemplar no modelo as camadas de TiSiXN e AlTiN com 0,62 μm e 1,23 μm de espessura, respectivamente.

Além da ferramenta, o modelo térmico também contém as malhas do calço e porta-ferramenta com intuito de possuir interfaces para acoplamentos térmicos com maior representatividade (Figura 5).

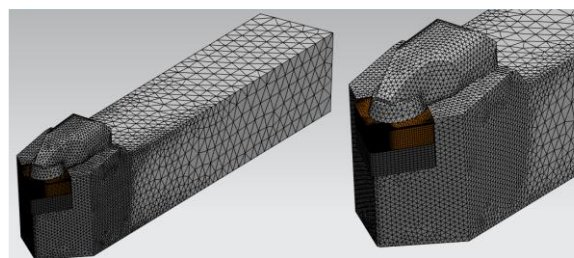


Figura 5. Malha do conjunto.

A Tabela 3 apresenta um resumo da malha com a descrição do tipo de elemento e quantidade de nós-elementos para cada componente do modelo.

Tabela 3. Detalhamento da malha de elementos finitos por componente do conjunto.

Componente	Tipo de elemento	Qtd. Elementos	Qtd. nós
Porta ferramenta	Tetraédricos lineares	108227	21966
Calço	Hexaédricos lineares	3650	4400
Ferramenta	Hexaédricos lineares	53280	58191
	Casca multi camadas	9568	9570
Total		174725	94127

Para os componentes do modelo foram adotadas propriedades termofísicas variando em função da temperatura, visando considerar esse efeito durante o processo de usinagem (Tabela 4). No caso da camada de revestimento interna em AlTiN, o modelo também contempla a variação térmica de suas propriedades, refletindo o comportamento cerâmico da camada. Por outro lado, para a camada externa de TiSiXN, utilizou-se um comportamento simplificado com propriedades constantes, devido à sua baixa espessura e estabilidade térmica na faixa de operação analisada.

Tabela 4. Propriedades termofísicas dos materiais.

Componente	T [°C]	ρ [kg/m ³]	k [W/m ² K]	cp [J/kgK]
Porta ferramenta	20	7820	50	500
	100		45	533
	300		40	613
	500		36	700
	700		31	714
	900		23	720
Substrato e calço	20	14830	110	220
	100		105	244
	300		98	290
	500		90	320
	700		82	328
	900		75	337
Camada AlTiN	25	1892	6,66	596,2
	100		10,29	639,9
	300		14,01	727,3
	500		15,41	769,5
	700		16,81	794,3
	900		18,21	810,7
Camada TiSiXN	-	3520	4,0	926

O carregamento aplicado no modelo corresponde a potência líquida (P_{liq}) absorvida pela ferramenta e calculada como uma fração, dada por um coeficiente de partição de energia φ , da potência de corte P_c (Equação 2):

$$P_{liq} = \varphi P_c = \varphi \frac{K_c a_p f v_c}{60} \quad (2)$$

O valor do coeficiente de partição de calor φ foi estimado com base no trabalho de Hao e Liu (2020). Um resumo com os principais parâmetros para o cálculo da potência líquida é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de corte.

Parâmetro	Valor
Profundidade de corte (a_p)	1 mm
Velocidade de corte (v_c)	250 m/min
Tempo de corte (t)	56,55 s
Pressão específica (K_c)	2949 MPa
Potência de corte (P_c)	1228,8 W
Partição de calor (φ)	5,7%
Potência líquida (P_{liq})	70 W

A potência líquida foi distribuída de maneira uniforme sobre a região de contato ferramenta-cavaco conforme ilustrado em detalhe na Figura 6.

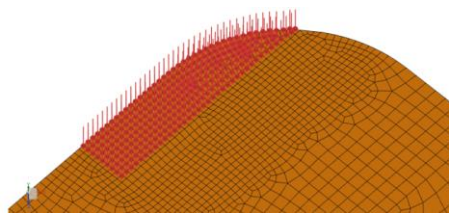


Figura 6. Detalhe da distribuição de potência aplicada na malha.

Como condições de contorno são consideradas a troca de calor por convecção para a temperatura ambiente das superfícies expostas, desconsiderando-se a região de contato ferramenta-cavaco. O valor do coeficiente de troca de calor por convecção h adotado foi de 15 W/m²K com temperatura ambiente de 28,8 °C. Adicionalmente são aplicados acoplamentos térmicos para representar o contato entre os componentes e garantir o fluxo de calor entre eles. O acoplamento é configurado selecionando-se as regiões em contato da malha e atribuindo o valor de um coeficiente de transferência de calor entre elas. As interfaces de contato consideradas no modelo térmico são ilustradas na Figura 7 e os valores utilizados são apresentados na Tabela 6.

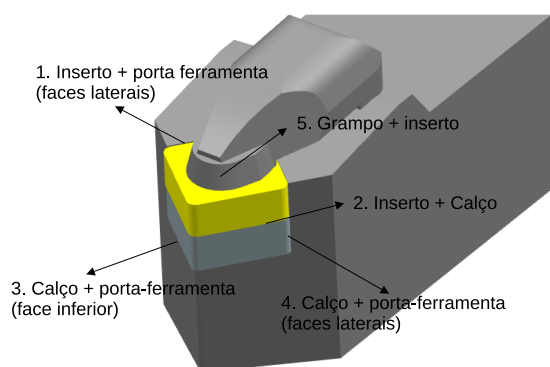


Figura 7. Identificação das interfaces para aplicação de acoplamentos térmicos.

Tabela 6. Coeficientes de transferência de calor por contato (h) entre os componentes do conjunto de corte.

Interface de Contato	Coeficiente h [W/m ² K]
1. Inserto – Porta-ferramenta (faces laterais)	4.000
2. Inserto – Calço	4.000
3. Calço – Porta-ferramenta (face inferior)	14.000
4. Calço – Porta-ferramenta (faces laterais)	14.000
5. Grampo – Inserto	20.000

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O campo de temperaturas simulado para o conjunto ferramenta-suporte, considerando o instante final do ensaio ($t = 44s$), é apresentado na Figura 8. Observa-se que a temperatura máxima atingiu aproximadamente 1150 °C, localizada na região da interface ferramenta-cavaco, nas proximidades da aresta de corte. Este valor é condizente com a literatura para o torneamento do aço ABNT 1045 em velocidades de corte elevadas, onde o plano de cisalhamento primário e o atrito na superfície de saída atuam como as principais fontes de calor. Um detalhe do gradiente térmico é ilustrado na Figura 9.

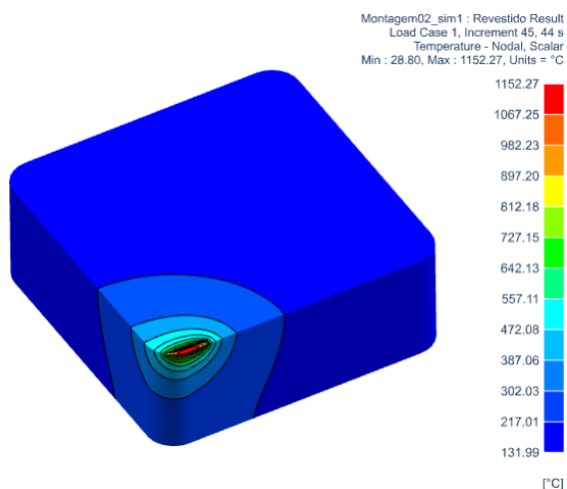


Figura 8. Gradiente de temperatura na ferramenta.

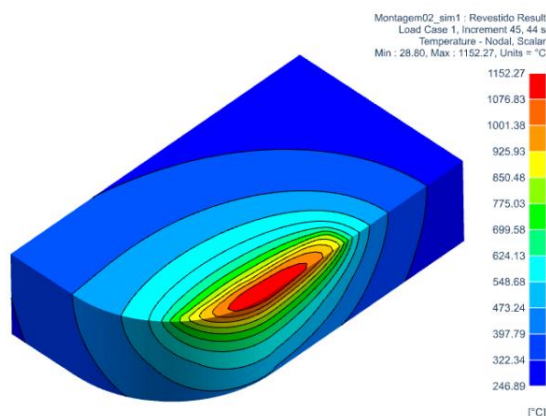


Figura 9. Detalhe do gradiente de temperatura na ferramenta.

A Figura 10 apresenta a comparação entre as curvas de evolução temporal de temperatura obtidas via termopares e as previsões do modelo de elementos finitos (MEF). No caso do modelo numérico as curvas de temperatura foram coletadas em nós correspondentes as posições de montagem dos termopares.

A convergência entre os dados foi alcançada com os valores de coeficientes de transferência de calor por contato nas interfaces apresentados na Tabela 6.

Vale ressaltar que, durante o teste, os termopares 3, 4 e 6 sofreram descolamento prematuro, resultando em leituras inconsistentes. Dessa forma, estes sensores foram descartados da análise comparativa, mantendo-se apenas os sinais que apresentaram integridade durante todo o percurso de corte.

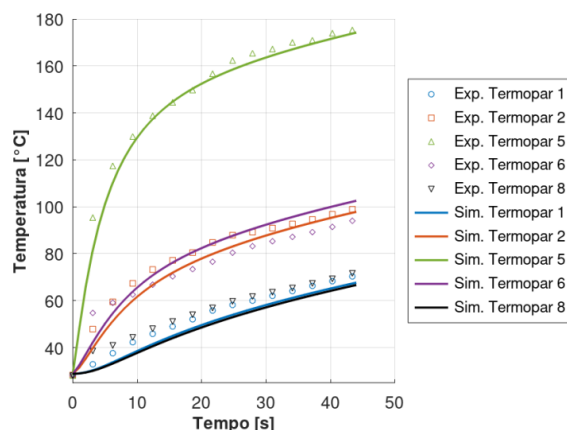


Figura 10. Comparação da evolução de temperatura experimental e numérica.

Os resultados indicam a eficácia do modelo de elementos finitos na predição do comportamento térmico do conjunto de corte. Observa-se que o Termopar 5, posicionado mais próximo à zona de geração de calor, atingiu a temperatura máxima de aproximadamente 175 °C, apresentando a maior taxa de aquecimento nos segundos iniciais. Por outro lado, os Termopares 1 e 8, localizados em regiões mais afastadas da aresta, registraram valores inferiores a 70 °C, evidenciando o gradiente térmico acentuado característico do processo de torneamento.

Outros dados foram extraídos ao longo do caminho geométrico definido pela aresta AB da ferramenta ilustrada na Figura 11. Este percurso, com comprimento total de aproximadamente 5 mm, inicia-se na face lateral do inserto ($u = 0$ mm) e percorre a aresta de corte, englobando o raio de ponta e a região de contato principal da aresta de corte com material em usinagem, finalizando em $u = 5$ mm.

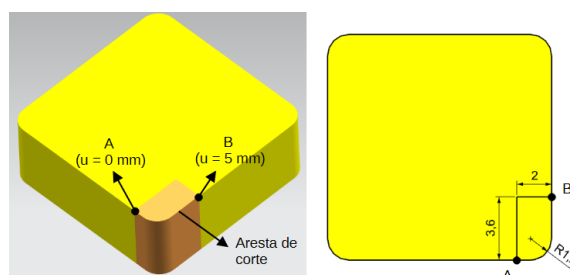


Figura 11. Esquema aresta AB na ferramenta de corte.

A distribuição da temperatura ao longo do caminho AB é detalhada na Figura 12. Observa-se que a temperatura se eleva gradualmente a partir da quina da ferramenta ($u = 0$ mm), atingindo seu patamar máximo na região central do contato ferramenta-cavaco ($u \approx 2,7$ mm).

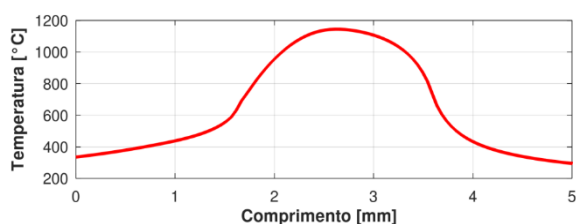


Figura 12. Variação da temperatura ao longo da aresta AB.

A Figura 13 apresenta a imagem da microscopia óptica ilustrando o detalhe da aresta de corte e da superfície de saída da ferramenta. Pode-se observar que para o nível de temperatura atingida a aresta de corte manteve-se preservada.

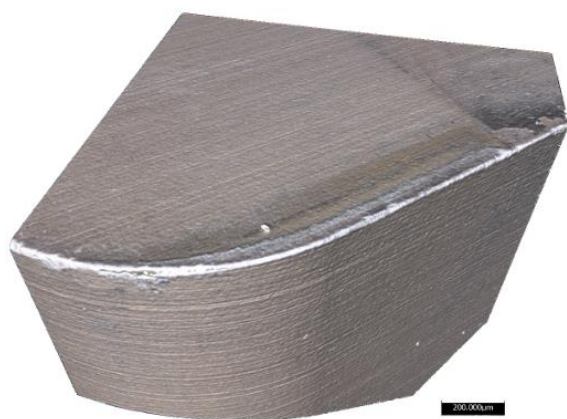


Figura 13. Detalhe da aresta da ferramenta via microscopia óptica.

CONCLUSÃO

O modelo térmico desenvolvido via elementos finitos demonstrou boa correlação na predição do comportamento térmico do conjunto de corte durante o torneamento do aço ABNT 1045. A integração das propriedades termofísicas dependentes da temperatura e a consideração da resistência térmica de contato permitiram uma convergência satisfatória com os dados experimentais obtidos pelos termopares. Concluiu-se que o revestimento Balinit Durana atua efetivamente como barreira térmica, mantendo a integridade do substrato mesmo sob temperaturas de interface na ordem de 1150 °C. O método proposto valida o uso de simulações numéricas para a otimização de processos de usinagem a seco.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

Abeni, Andrea; Metelli, Alessandro; Attanasio, Aldo; Outeiro, José; Poulachon, Gerard. A Predictive Method for Cumulative Tool Wear in Variable

Cutting Speed Turning Operations. Procedia CIRP, volume 133, p. 454-459, 2025.

Abukhshim, N.A.; Mativenga, P.T.; Sheikh, M.A. Investigation of heat partition in high speed turning of high strength alloy steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture, volume 45, p. 1687-1695, 2005.

Akbar, F.; Mativenga, P. T.; Sheikh, M. A. An evaluation of heat partition in the high-speed turning of AISI/SAE 4140 steel with uncoated and TiN-coated tools. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, volume 222, p. 759-771, 2008.

Alves, Uéliton C.; Ricci, Virgílio P.; Mota, Igor G.C.; Koga, Guilherme Y.; Amauri, Hassui; Ventura, Carlos E.H. Mechanical and tribological characterization of TiAlN/TiN and TiSiN/AlTiN coating systems for cutting tools. Journal of Materials Engineering and Performance, volume 32, p. 1390-1401, 2023.

Attanasio, A.; Ceretti, E.; Fiorentino, A.; Cappellini, C.; Giardini, C. Investigation and FEM-based simulation of tool wear in turning operations with uncoated carbide tools. International Journal of Mechanical Sciences, volume 91, p. 33-45, 2015.

Brito, Rogério Fernandes; Teixeira, Ricardo Luiz Perez; Rodrigues, Rafael Thomaz De Camargo; Lacerda, José Carlos De; Brito, Tarcísio Gonçalves De; Guimarães, Paulo Mohallem; Rosa, Henrique Marcio Pereira; Campos, Júlio César Costa. Numerical Analysis of the Thermal Influence of Conduction and Contact Thermal Resistance in Multi-Layered Cutting Tool. Acta Scientiarum. Technology, volume 47, e71286, 2025.

Courbon, C.; Mabrouki, T.; Rech, J.; Mazuyer, D.; D'Eramo, E. On the existence of a thermal contact resistance at the tool-chip interface in dry cutting of AISI 1045: Formation mechanisms and influence on the cutting process. Applied Thermal Engineering, volume 50, p. 1311-1325, 2013.

Figueiredo, Alisson A. A.; Guimaraes, Gilmar; Pereira, Igor Cezar. Heat flux in machining processes: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 120, p. 2827-2848, 2022.

Grzesik, W. Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique. International Journal of Machine Tools and Manufacture, volume 46, p. 651-658, 2006.

Hao, Guangchao; Liu, Zhanqiang. The heat partition into cutting tool at tool-chip contact interface during cutting process: a review. The International



Journal of Advanced Manufacturing Technology,
volume 108, p. 393–411, 2020

Iqbal, S.A.; Mativenga, P.T.; Sheikh, M.A. A comparative study of the tool–chip contact length in turning of two engineering alloys for a wide range of cutting speeds. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 42, p. 30–40, 2009.

Kowalczyk, Joanna; Madej, Monika. Assessment of AlTiN/TiSiXN Coating Characteristics in Selected Tribological Systems. Coatings, volume 15, p. 1279, 2025.

Parolari, N. G. F.; Ventura, Carlos E. H.; Malavolta, Alexandre T.; De Moraes, A. A. U. Finite element model for analyzing temperature gradient during turning process. 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, p. 1-6, 2018.

Ventura, Carlos E. H.; Malavolta, Alexandre T. Análise da evolução da temperatura na ferramenta durante o processo de torneamento. Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, p. 1-9, 2017.

Zhao, Jinfu; Liu, Zhanqiang. Effects of Thermo-physical properties of Ti0.41Al0.59N coating on transient and steady cutting temperature distributions in coated cemented carbide tools. International Communications in Heat and Mass Transfer, volume 96, p. 80-89, 2018.

Zhao, Jinfu; Liu, Zhanqiang; Wang, Bing; Hu, Jianrui; Wan, Yi. Tool coating effects on cutting temperature during metal cutting processes: Comprehensive review and future research directions. Mechanical Systems and Signal Processing, volume 150, p. 107302, 2021.