



# ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA MAQUINAGEM DO TITÂNIO E SUAS LIGAS – CORTE ORTOGONAL (2D) E TRIDIMENSIONAL (3D)

GONÇALO NEVES, J. PAULO DAVIM

Universidade de Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

*(Recibido 14 de diciembre de 2012, para publicación 6 de mayo de 2013)*

**Resumo** – Actualmente, o titânio e suas ligas é aplicado em indústrias avançadas, nomeadamente na indústria aeronáutica, automóvel e biomédica. No presente artigo apresenta-se uma análise pelo método dos elementos finitos da maquinagem do titânio e suas ligas (corte ortogonal-2D e corte tridimensional-3D). As simulações numéricas foram efectuadas utilizando o software AdvantEdge®. Foi efectuada validação das simulações numéricas com base em resultados disponíveis na literatura.

**Palavras-chave** – FEM-método dos elementos finitos, simulação numérica, maquinagem, corte ortogonal-2D, corte tridimensional-3D, titânio e suas ligas.

## 1. INTRODUÇÃO

O titânio devido a sua óptima razão resistência mecânica/peso, alta dureza a quente, excelentes características anti-corrosivas e biocompatibilidade, surgiu como uma nova alternativa para a indústria moderna no intuito de não só substituir os metais mais correntes mas também obter melhorias no desempenho dos produtos obtidos [1-3].

Na indústria aeroespacial, o titânio e suas ligas tem sido bastante aplicado, devido à sua alta resistência e baixa densidade [1]. Na indústria médica é um dos materiais constituintes de próteses. No sector automóvel, a sua aplicação em diversos componentes permite entre outros aspectos uma maior economia de combustível. Deste modo, com a crescente procura destes materiais, surge a necessidade de conhecer a seu comportamento perante os processos tecnológicos, definindo parâmetros processuais de forma a tornar possível atingir os requisitos do produto final sem deixar de parte a necessidade de obter rentabilidade.

A maquinagem é cada vez mais um processo de fabrico necessário para o processamento do titânio e suas ligas, principalmente devido às inúmeras e crescentes exigências de precisão dimensional do projeto, que geralmente não são possíveis de obter por outros processos tecnológicos [4-6].

O titânio e suas ligas está classificado como um material de difícil maquinabilidade devido a apresentar elevada taxa de desgaste de ferramenta, que é observada para todas as velocidades de corte, mas torna-se crítica mesmo para velocidades de corte relativamente baixas, na gama de [15 - 60] m/min [7]. São materiais que têm baixa condutividade térmica, de modo que quando maquinados geram altas temperaturas na região de corte [8]. Associado a este facto, a elevada afinidade química deste material com os materiais vulgarmente utilizados para ferramentas de corte estimula o desgaste por difusão.

O titânio e suas ligas têm baixa condutividade térmica (cerca de 17% valor dos aços) e a sua alta reactividade química, pode tornar o corte deste material impreciso e ineficiente, causando elevadas tensões residuais na superfície maquinada [9-10]. Consequentemente as altas temperaturas concentram-se em zonas muito próximas da aresta de corte da ferramenta, podendo ocorrer deformação plástica, que pode levar à sua inutilização prematura [11]. Outro fenómeno é a natureza cíclica do processo de formação da

apara, responsável pela indução de vibrações indesejáveis às forças de corte, podendo assim prejudicar o acabamento de superfície.

Actualmente é possível prever o comportamento à maquinagem usando software de simulação numérica pelo método dos elementos finitos, sem a necessidade de investir em material, ferramentas ou máquinas, aumentando a qualidade da previsão dos parâmetros processuais a utilizar numa determinada operação e reduzindo gastos em ensaios experimentais.

## 2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS -ADVANTEDGE®

Neste trabalho foi realizada a validação de simulações numéricas obtidas através do software *AdvantEdge5.5®* como forma de garantir a fiabilidade nos resultados do software comparando com os resultados de testes de maquinagem de titânio e suas ligas realizados por vários autores. Os testes são replicados com a definição dos parâmetros de entrada e os seus resultados comparados com os obtidos nos testes experimentais.

O *AdvantEdge®* é um software desenvolvido pela *Third Wave Systems®*, constituído por um pacote explícito/dinâmico de modelação por elementos finitos, especializado em processos de corte em metal para previsão do comportamento termo mecânico. Detém as características necessárias para modelar o processo de corte, através de capacidades adaptativas de renovação da malha para resolução de múltiplas escalas de comprimento. São exemplo a redução do tamanho do elemento finito na aresta de corte da ferramenta, na zona de corte primária e secundária e na apara, Fig.1.

Para modelar o comportamento termo plástico dos materiais da peça, o software utiliza como equação constitutiva, a lei Johnson-Cook, que pode ser representada pela equação:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{amb}}{T_f - T_{amb}}\right)^m\right) \quad (1)$$

sendo  $\varepsilon$  a deformação plástica,  $\dot{\varepsilon}$  a taxa de deformação plástica,  $\dot{\varepsilon}_0$  a taxa de deformação plástica de referência, T a temperatura do material da peça,  $T_f$  a temperatura de fusão do material da peça,  $T_{amb}$  a temperatura ambiente e A, B, C, n e m constantes do material.

O software *AdvantEdge®*, foi concebido especificamente para simular o corte por arranque de apara, incorporando módulos de maquinagem 2D e 3D, para operações como torneamento, fresagem, furação, roscagem entre outros. Possui uma interface muito intuitiva, com janelas simples para a introdução dos parâmetros e definição das geometrias de corte, bastando poucos passos para iniciar uma simples simulação. A malha de elementos finitos adaptativa é gerada automaticamente, mas é deixado ao utilizador o controlo sobre o seu refinamento. Adicionalmente, é disponibilizada uma extensa biblioteca de metais e ligas comumente utilizados em engenharia, incluindo materiais utilizados na indústria aeronáutica.

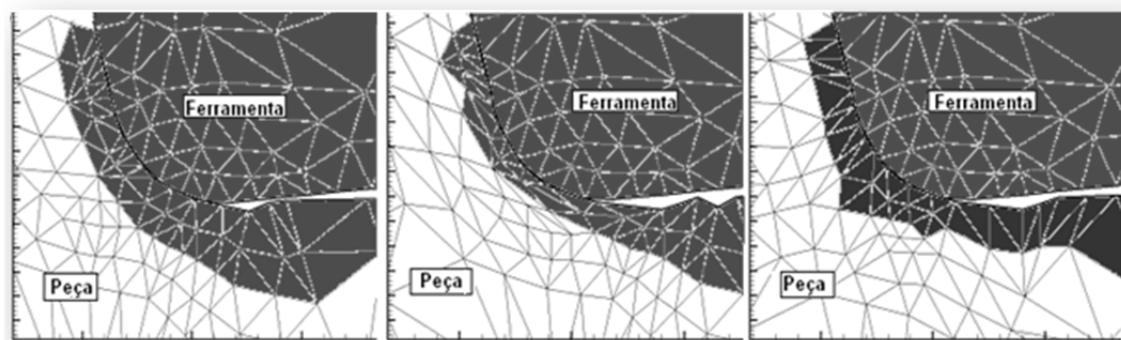


Fig. 1. Processo de adaptação e redefinição da malha no software *AdvantEdge®*.

Diversos autores efectuaram trabalho de simulação numérica e validação com anteriores versões do software *AdvantEdge®*, para as ligas de titânio. Liu, 2006, [12] recorreu ao software FEM *AdvantEdge4.7®* como meio de previsão do processo de formação da apara para o torneamento ortogonal da liga Ti6Al4V, fazendo posterior validação com resultados experimentais obtidos por Barry *et al.*, 2001 [7] que descreveram uma evidente transição da apara serrilhada aperiódica para periódica com o aumento da velocidade de corte e do avanço. Do estudo feito por Liu, 2005, [12] com recurso ao software FEM, o autor afirmou a ausência de dentado serrilhado para baixos valores de velocidade de corte e de avanço, surgindo apenas para valores superiores onde se verificou o aparecimento de dentado serrilhado periódico, estando assim de acordo com os registos experimentais de Barry *et al.* [7]. Os autores verificaram também similaridades na distância entre as segmentações da apara com os valores experimentais.

Li & Shih, 2005, [13] levaram a cabo testes de torneamento para o titânio CP de classe 2, com uma ferramenta de WC-Co não revestida, para dois avanços de 0,254 e 0,381 mm/rev, uma largura de corte de 0,254 a 1,02 mm e com uma gama de velocidades de corte entre 24,4 e 195m/min. Posteriormente procederam à validação experimental através do software FEM *AdvantEdge® 4.5*, onde reproduziram os testes em ambiente 3D. Estes autores, verificaram que a discrepância entre os valores experimentais e os obtidos pela simulação numérica agrava-se com o aumento do avanço e com a diminuição da velocidade de corte. No entanto, concluem que o software apresenta uma concordância razoável com os resultados experimentais para forças de corte, tipo e espessura de apara, assim como a direcção de escoamento e a periodicidade da apara, sobretudo para baixas larguras de corte.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

#### 3.1. Corte ortogonal-2D

Barry *et al.* [7] estudaram o mecanismo de formação da apara serrilhada no torneamento ortogonal da liga Ti6Al4V, usando ferramentas em carbonetos sinterizados P10/20. As simulações numéricas efectuadas no âmbito do presente trabalho, tiveram em conta as forças de corte, a forma da apara e o grau de recalque, registados pelos autores. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros experimentais usados por Barry *et al.* [7] bem como os dados utilizados no software FEM.

Com base nos dados experimentais da força de corte obtidas por Barry *et al.* [7] utilizou-se o modelo de Coulomb, e obtiveram-se valores para o coeficiente de atrito próximos de 0,9 para os testes de avanço de 0,06 mm/rev. Para os restantes testes (avanço de 0,08 a 0,1mm/rev) este valor decresceu, para valores próximos de 0,7. Foram ajustados valores de entrada no software do coeficiente de atrito na gama de valores entre 0,6 e 0,8.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores das forças de corte obtidos por Barry *et al.* [7] e pela simulação numérica, bem como, os respectivos desvios.

Os resultados da simulação numérica revelaram valores de força de corte em geral inferiores aos experimentais apresentando um desvio abaixo dos 22,7%.

Barry *et al.* [7] registaram a ocorrência de uma queda dos valores da força de corte que antecipa a mudança da forma da apara de serrilhado aperiódico para periódico. Afirmaram que para baixos avanços essa ocorrência verificou-se para valores de velocidade de corte elevados, que gradualmente diminuem com o aumento dos avanços utilizados. Estes autores concluíram que a formação de apara serrilhada periódica ocorre quando são usados valores elevados de velocidade de corte e de avanço.

Na Fig. 2 apresenta-se a análise da força de corte em função da velocidade de corte. Estão indicadas com setas as condições de corte onde foi produzida apara serrilhada periódica.

Para os testes de Barry *et al.* [7] verifica-se que a transição da geometria da apara serrilhada aperiódica para periódica ocorre para valores de velocidade de corte cada vez menores à medida que se aumenta o avanço. Verifica-se também que a magnitude das forças de corte aumenta com o aumento do valor do avanço utilizado.

As forças de corte resultantes da simulação numérica revelam um comportamento semelhante às da validação para os testes com avanço de 0,1 mm/rev. Para ambos os casos, é verificada a diminuição acentuada desses valores para velocidades de corte de 60 m/min.

Tabela 1. Parâmetros de entrada do software FEM e dados experimentais.

Parâmetros		FEM	Barry <i>et al.</i> , (2001)
Peça	<b>Comprimento [L]</b>	5 mm	-
	<b>Altura [h]</b>	3 mm	-
	<b>Material</b>	Ti6Al4V	Ti6Al4V
Ferramenta	<b>Comprimento da face de ataque [q]</b>	2 mm	-
	<b>Comprimento da face de saída [p]</b>	2 mm	-
	<b>Raio de gume [r]</b>	10 µm	5 a 10 µm
	<b>Material</b>	Carb P	Carb P10/20
Processo	<b>Largura de corte [doc]</b>	1,1 mm	1,1 mm
	<b>Comprimento de corte [loc]</b>	4,1 mm	-
	<b>Avanço [f]</b>	0,06; 0,08; 0,1 mm/rev	0,06; 0,08; 0,1 mm/rev
	<b>Velocidade de corte [V]</b>	15; 30; 60; 120; 180 m/min	15; 30; 60; 120; 180 m/min
	<b>Coeficiente de atrito</b>	0,6 a 0,8	-
Simulação	<b>Número máximo de nós</b>	24000	-
	<b>Max. tamanho do elemento</b>	0,1 mm	-
	<b>Míni. tamanho do elemento</b>	0,02 mm	-

Tabela 2. Valores de força de corte em Nobtidos por Barry *et al.* [7] e obtidos pela simulação numérica acompanhados pelo respectivo desvio.

		Velocidade de corte (m/min)				
		15	30	60	120	180
0,06 mm/rev	Barry <i>et al.</i> (2001)	195	190	194	195	195
	FEM	175	170	155	150	146
	Desvio (%)	10,3	10,5	20,1	22,7	21,1
0,08 mm/rev	Barry <i>et al.</i> (2001)	245	246	248	232	229
	FEM	240	222	195	187	181
	Desvio (%)	2	9,7	21,4	19,4	20,9
0,1 mm/rev	Barry <i>et al.</i> (2001)	290	288	284	260	255
	FEM	240	245	242	222	220
	Desvio (%)	17,2	14,9	14,8	14,6	13,7

Para avanços de 0,08 mm/rev, as simulações numéricas, apresentam uma constante diminuição dos valores da força de corte com o aumento da velocidade de corte. Contrariamente, as forças de corte registradas experimentalmente para esse avanço mantiveram-se constantes até uma velocidade de corte de 60m/min onde ocorreu uma diminuição acentuada desses valores.

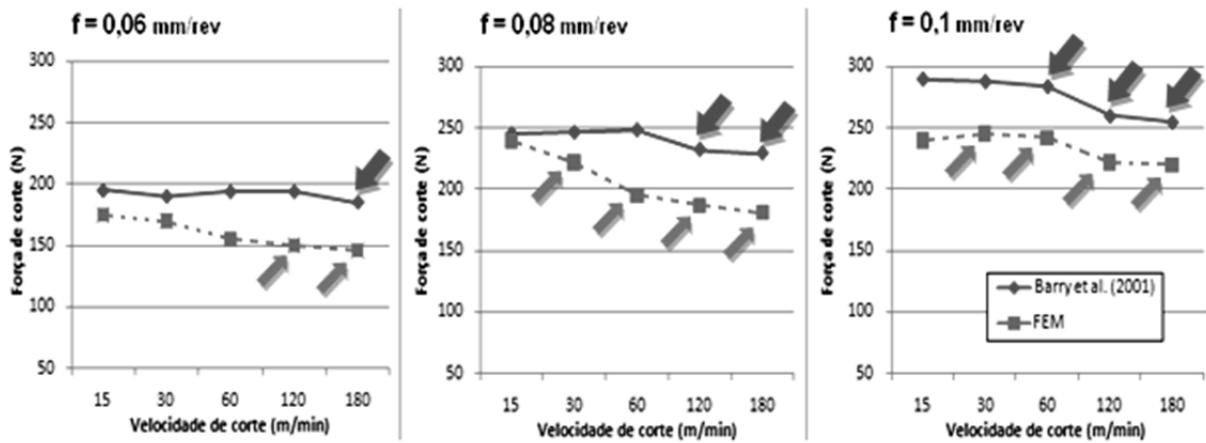


Fig. 2. Valores experimentais de Barry *et al.*, [7] e valores simulados das forças de corte em função da velocidade de corte, para diferentes avanços.

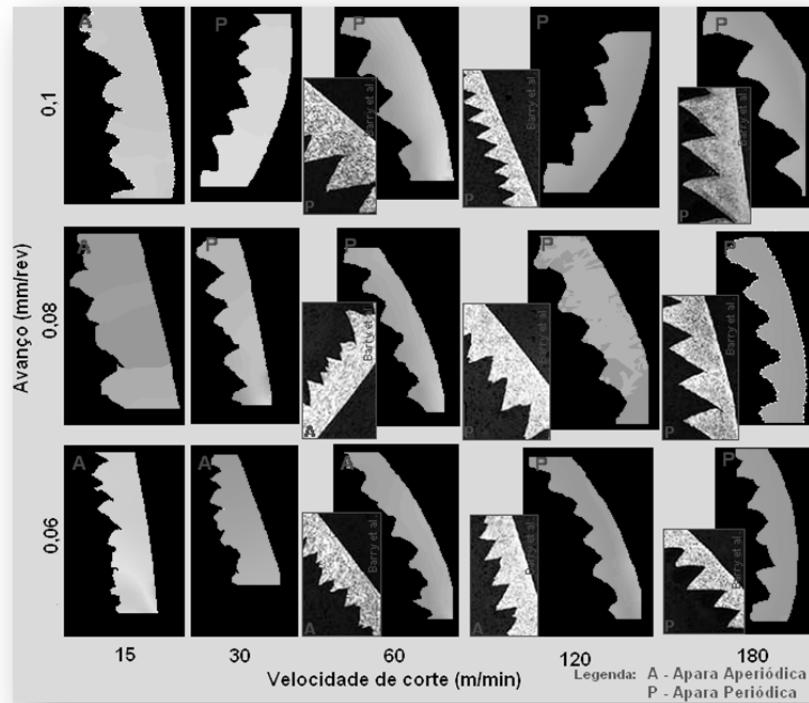


Fig. 3. Comparação entre a forma das aparas obtidas na simulação com as obtidas experimentalmente por Barry *et al.* [7].

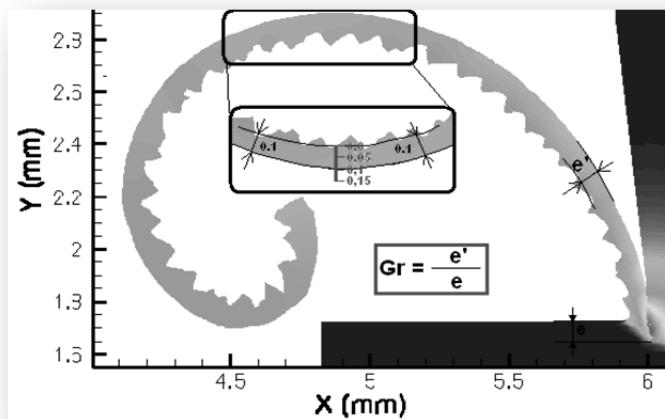
As simulações numéricas para avanços de 0,06 mm/rev previram uma tendência de diminuição menos acentuada das forças de corte com o aumento das velocidades de corte. As forças de corte registadas por Barry *et al.* [7] para o mesmo avanço, apresentam pouca variação com o aumento das velocidades de corte até aos 120 m/min onde ocorre uma diminuição acentuada desse valor.

A comparação entre as aparas obtidas experimentalmente com as da simulação, na Fig. 3, revela que em ambos os casos existe efectivamente uma dependência da periodicidade com o aumento da velocidade de corte e do avanço.

As simulações numéricas revelam o aparecimento prévio da apara serrilhada periódica (indicadas na Fig. 3, assim como no gráfico da Fig. 2). Registou-se assim a formação de apara serrilhada periódica para

Tabela 3. Grau de recalque observado por Barry *et al.* [7] e pela simulação numérica bem como o respectivo desvio.

		Velocidade de corte (m/min)				
		15	30	60	120	180
0,06 mm/rev	Barry <i>et al.</i> (2001)	1,57	1,49	1,42	1,31	1,27
	FEM	1,66	1,55	1,5	1,33	1,17
	Desvio (%)	5,4	3,9	5,3	1,5	8,5
0,08 mm/rev	Barry <i>et al.</i> (2001)	1,51	1,44	1,36	1,29	1,27
	FEM	1,7	1,5	1,37	1,25	1,27
	Desvio (%)	11,2	4	0,72	3,2	0
0,1 mm/rev	Barry <i>et al.</i> (2001)	1,5	1,43	1,33	1,29	1,27
	FEM	1,7	1,4	1,4	1,3	1,3
	Desvio (%)	11,8	2,1	15	0,7	2,3

Fig. 4. Recolha dos valores de espessura da apara pós o corte, ( $f=0,08 \text{ mm/rev}$ ;  $V_c=120 \text{ m/min}$ ).

uma velocidade de corte de 30 m/min nos testes com avanço de 0,1 e 0,08 mm/rev. Para o teste de avanço de 0,06 mm/rev este fenómeno ocorreu para uma velocidade de corte de 120 m/min.

De referir que o teste similar levado a cabo por Liu [12] com uma anterior versão do software AdvantEdge®, não foi verificada a formação de apara serrilhada para as baixas velocidades de corte, surgindo apenas para as altas velocidades de corte apara serrilhada periódica.

No que respeita ao grau de recalque da apara, os valores experimentais registados por Barry *et al.* [7] assim como os previstos por simulação numérica podem ser observados na Tabela 3. Os desvios associados aos dados recolhidos na simulação numérica FEM, assumem valores menores que 11,8%.

A determinação destes valores na simulação numérica, a título de exemplo, está representada na Fig. 4, onde se mediu a espessura da apara após o corte, para o teste com avanço de 0,08 mm/rev e velocidade de corte de 120 m/min.

Na Fig. 5 estão apresentados os valores do grau de recalque em função da velocidade de corte, para diferentes avanços.

Tal como para Barry *et al.* [7] os valores do grau de recalque medidos através do software de simulação numérica tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte e não apresentam dependência significativa com o aumento do avanço. Em geral, verificou-se uma razoável aproximação dos valores do grau de recalque apresentados pelo software com os experimentais.

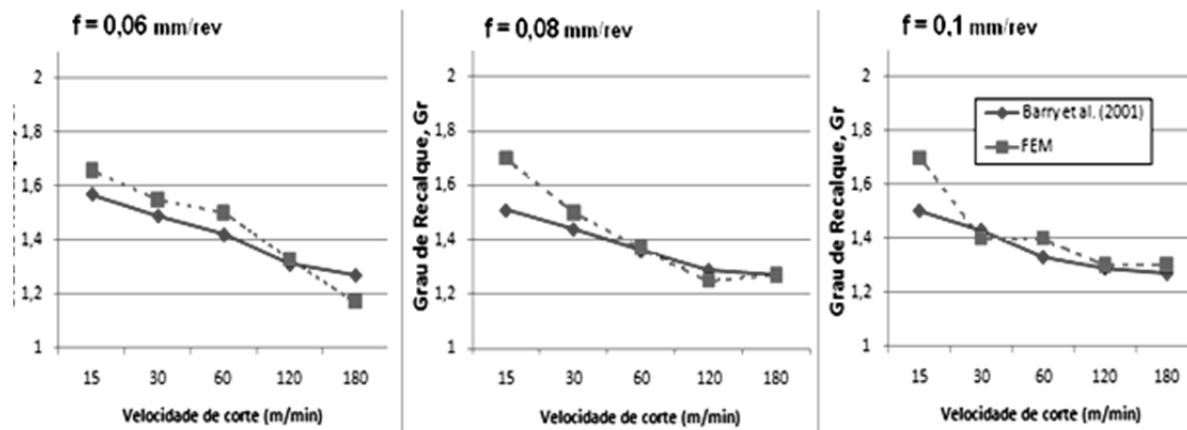


Fig. 5. Valores experimentais comparados com os simulados do grau de recalque médio em função da velocidade de corte.

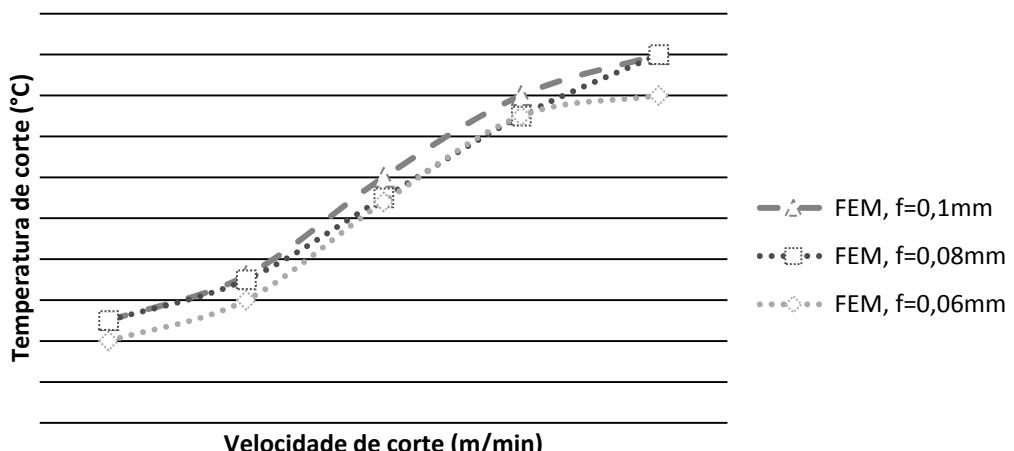


Fig. 6. Máxima temperatura de corte em função da velocidade de corte para diferentes avanços.

Foi ainda obtida da simulação numérica FEM a distribuição das temperaturas para os testes aqui referidos. Os valores máximos de temperatura registados em cada teste mostram-se na Fig. 6, que apresentam uma nítida dependência da temperatura de corte com a velocidade de corte usada. Também se verifica um maior valor de temperatura com o aumento dos avanços.

Em todas as simulações executadas, verificou-se reduzida dissipação do calor gerado pela apara, resultando na concentração de elevadas temperaturas na face de ataque da ferramenta, fruto da baixa condutividade térmica da liga Ti6Al4V.

Na Fig. 7 é mostrada a distribuição da temperatura prevista pela simulação numérica para os testes com velocidade de corte de 15, 60 e 180 m/min, para avanços de 0,06, 0,08 e 0,1 mm/rev.

Para os testes com velocidade de corte de 15 m/min, verificou-se que na zona de corte, as maiores temperaturas se concentram principalmente na apara com valores próximos de 400°C. Os testes posteriores realizados com crescentes valores de velocidade de corte, mostraram não só um aumento da magnitude das temperaturas como a ocorrência de um deslocamento progressivo da região de máxima temperatura da apara para a ponta ferramenta de corte. Também se verificou um aumento dessa mesma região na aresa de corte para as maiores velocidades de corte (180 m/min).

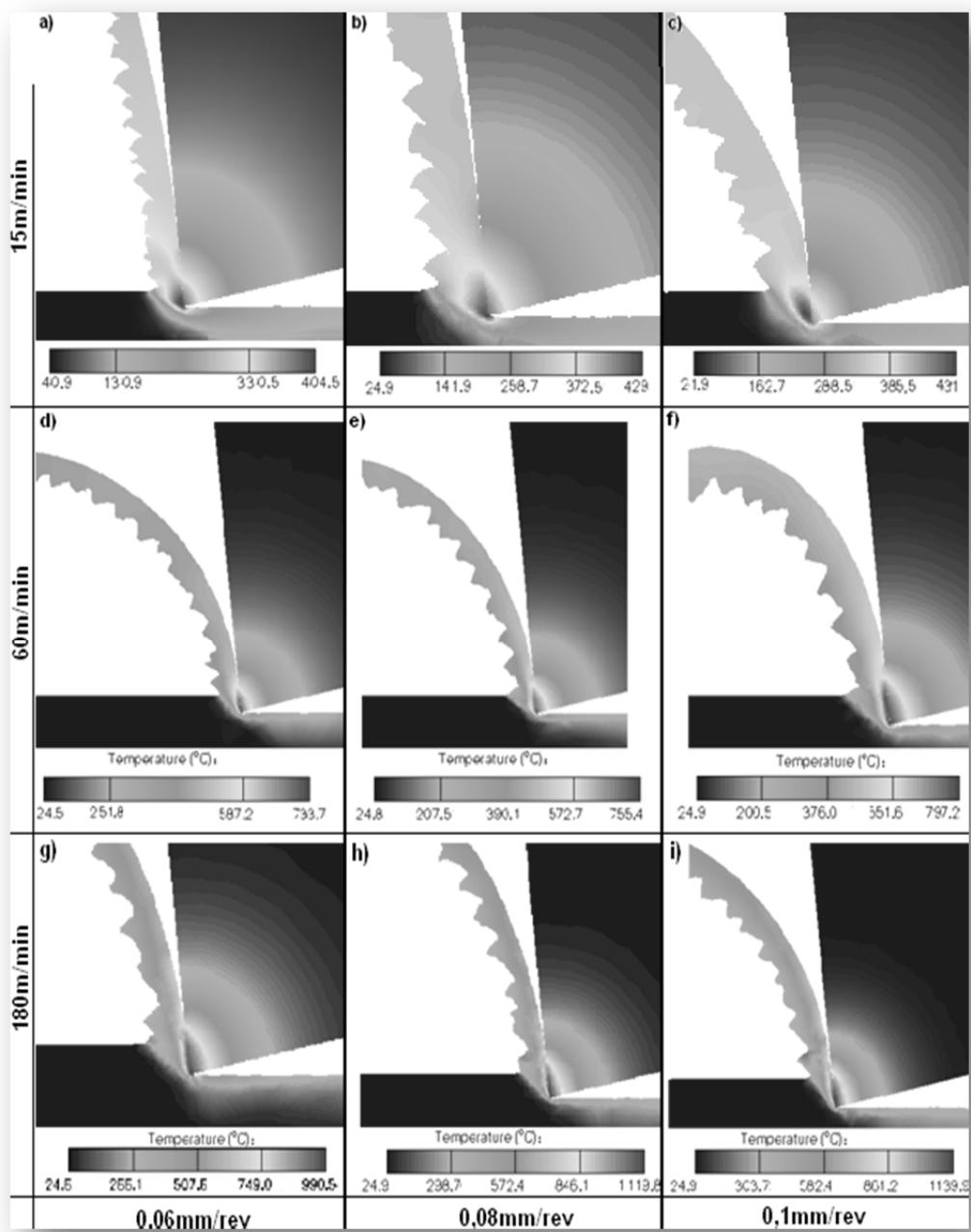


Fig. 7. Previsão da distribuição da temperatura para as simulações com velocidade de corte de 15 m/min, avanços de, a) 0,06 mm/rev, b) 0,08 mm/rev e c) 0,1mm/rev, para velocidade de corte de 60 m/min, com avanços de, d) 0,06 mm/rev, e) 0,08 mm/rev e f) 0,1 mm/rev e para velocidades de corte de 180 m/min, com avanços de, g) 0,06 mm/rev, h) 0,08 mm/rev e i) 0,1 mm/rev.

O aumento do valor dos avanços também mostrou um ligeiro aumento dos valores das temperaturas de corte.

A distribuição da temperatura na apara gerada, revelou-se uniforme para velocidades de corte desde os 15 m/min (com valores próximos de 250°C) até aos 60 m/min (com valores próximos de 400°C). Nos testes com velocidades de corte superiores, verifica-se uma distribuição não uniforme da temperatura na apara, onde as menores temperaturas (cerca de 300°C) se localizam nos dentes serrilhados, e as maiores (cerca de 550°C) na zona que contactou directamente a ferramenta de corte.

Tabela 4. Parâmetros utilizados por Li & Shih, [13] e alguns dados de entrada inseridos no *AdvantEdge*<sup>®</sup>.

Parâmetros		FEM	Li & Shih (2006)
Peça	<b>Comprimento [L]</b>	16 mm	-
	<b>Altura [h]</b>	2 mm	-
	<b>Material</b>	Ti Cp (grau 2)	Ti Cp (grau 2)
Ferramenta	<b>Inserto</b>	T - triangular	
	<b>Raio de gume</b>	20µm	
	<b>Material</b>	Carboneto	
Processo	<b>Largura de corte [doc]</b>	1,02 mm	
	<b>Comprimento de corte [loc]</b>	16 mm	
	<b>Avanço [f]</b>	0,254; 0,381 mm/rev	0,254; 0,381 mm/rev
	<b>Velocidade de corte [V]</b>	24,4; 48,8; 97,5; 195 m/min	24,4; 48,8; 97,5; 195 m/min
	<b>Coeficiente de atrito</b>	0,5	

Tabela 5. Valores da força tangencial, da força radial e da força axial obtidos por Li &amp; Shih [13] e obtidos por simulação numérica para a liga Ti Cp (grau 2).

<b>Avanço (mm/rev)</b>		<b>0,254</b>				<b>0,381</b>			
<b>Velocidade de corte (m/min)</b>		<b>22,4</b>	<b>48,8</b>	<b>97,5</b>	<b>195</b>	<b>22,4</b>	<b>48,8</b>	<b>97,5</b>	<b>195</b>
<b>Força tangencial (Fx)</b>	Li & Shih (2005) (N)	400	375	365	345	558	538	510	445
	Li & Shih (2005) FEM (N)	335	320	310	307	446	421	418	413
	<i>AdvantEdge</i> (N)	339	325	324	320	510	490	500	490
	desvio (%)	16,8	13,3	11,2	7,28	10,4	9,8	1,9	10,1
<b>Força radial (Fy)</b>	Li & Shih (2005) (N)	55	63	70	55	112	98	80	68
	Li & Shih (2005) FEM (N)	71	67	73	66	80	79	73	61
	<i>AdvantEdge</i> (N)	70	70	70	70	100	88	81	77
	desvio (%)	27,3	11,1	0	27,3	10,7	14,3	1,3	14,7
<b>Força axial (Fz)</b>	Li & Shih (2005) (N)	45	47	50	36	88	72	60	55
	Li & Shih (2005) FEM (N)	29	27	40	27	59	54	45	43
	<i>AdvantEdge</i> (N)	50	48	44	43	75	64	60	50
	desvio (%)	11,1	2,1	12	19,4	14,8	11,1	0	9,1

### 3.2. Corte tridimensional-3D

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos por simulação numérica do corte tridimensional do titânio e suas ligas. Para a validação experimental do modelo de elementos finitos, são apresentados os dados publicados na literatura, obtidos por meio experimental do torneamento de titânio comercialmente puro (grau 2) e da liga Ti6Al6V2Sn.

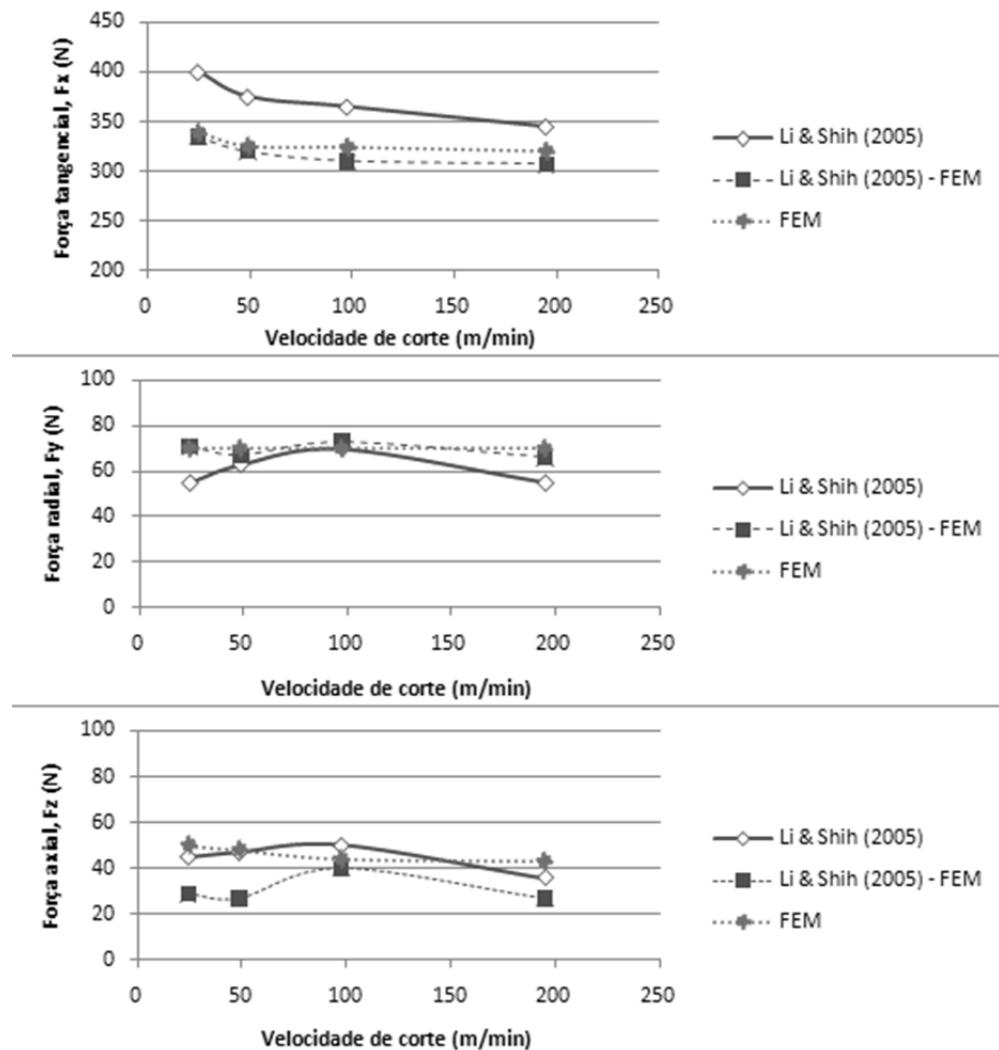


Fig. 8. Valores das forças tangenciais, radiais e axiais para o torneamento tridimensional com avanço de 0,254mm/rev.

Li & Shih [13] conduziram testes de torneamento para o titânio comercialmente puro (grau 2), para velocidades de corte de 24,4 a 195 m/min, avanços de 0,254 e 0,381 mm/rev e largura de corte de 1,02 mm. Nesses testes, foram medidas as três componentes de força envolvidas na maquinagem, sendo elas a força tangencial ( $F_x$ ), a força radial ( $F_y$ ) e a força axial ( $F_z$ ). Na Tabela 4 estão explicitados os parâmetros de corte usados pelos autores assim como os dados de entrada, definidos na simulação numérica FEM.

Para além dos testes experimentais, os autores executaram um conjunto de simulações numéricas FEM com o *AdvantEdge4.5®* de forma a validar as previsões obtidas pelo software. No presente trabalho, executaram-se simulações numéricas com a versão do software, *AdvantEdge5.5®*.

Na Tabela 5 mostram-se os valores das forças obtidas experimentalmente e numericamente por Li & Shih [13], assim como, os obtidos por simulação numérica neste trabalho.

Os valores obtidos nas simulações numéricas levadas a cabo neste trabalho apresentam, em geral, uma maior aproximação dos valores experimentais do que os previstos pelos autores com a anterior versão do *AdvantEdge®*.

Através das simulações numéricas executadas neste trabalho, foram previstos valores de forças tangenciais inferiores aos experimentais, obtendo-se um desvio inferior a 16,8%, com média de 12% para avanços de 0,254 mm/rev, e média de 8% para avanços de 0,381 mm/rev.

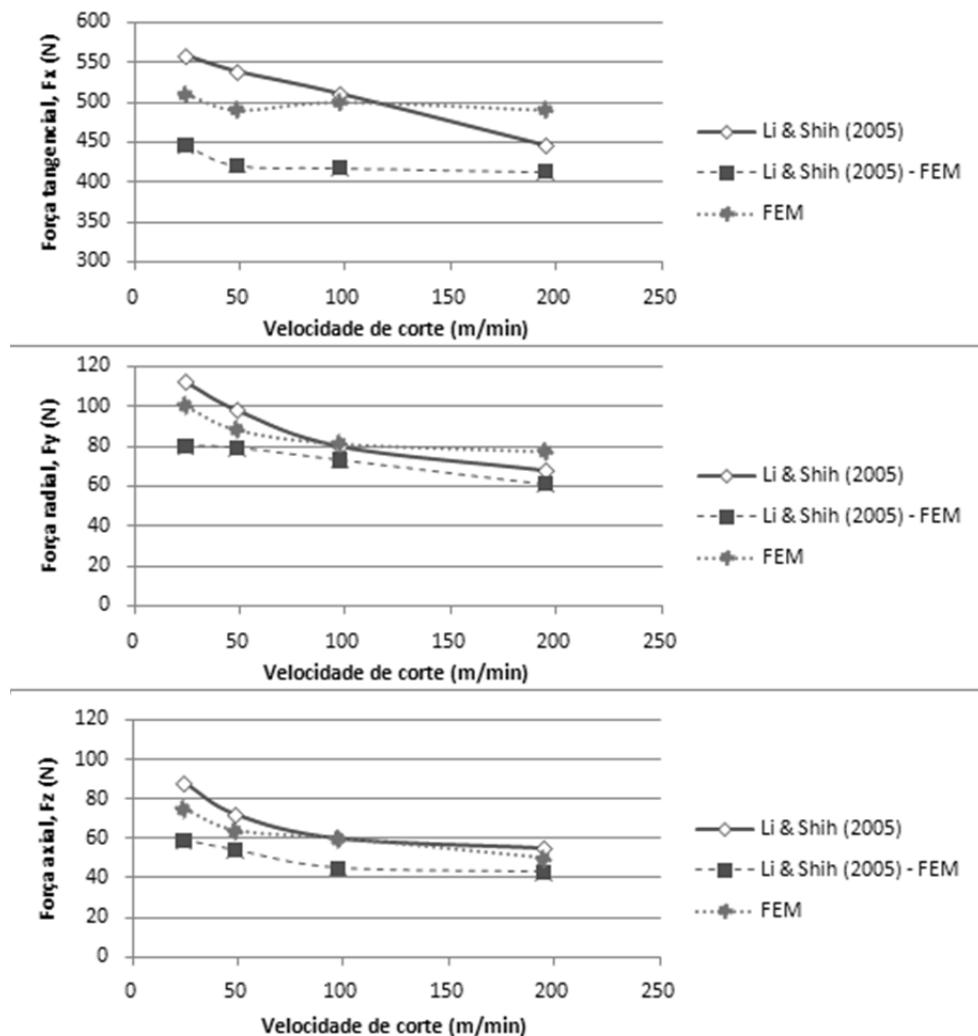


Fig. 9. Valores das forças tangenciais, radiais e axiais para o torneamento tridimensional com avanço de 0,381mm/rev.

As previsões para as forças radiais, revelaram um desvio com um valor máximo de 27,3%, com uma média de 16,4% para avanços de 0,254 mm/rev, e uma média de 10,2% para avanços de 0,381 mm/rev. Para as forças axiais, verifica-se um desvio inferior a 19,4%, com média de 11,2% para avanços de 0,254 mm/rev, e média de 8,7% para avanços de 0,381 mm/rev.

De seguida são apresentados os gráficos dos valores das forças envolvidas no torneamento 3D em função da velocidade de corte, para avanços de 0,254 mm/rev, Fig. 8, e para avanços de 0,381 mm/rev, Fig. 9. Os dados presentes nos gráficos são obtidos por simulação numérica realizada neste trabalho, por simulações numéricas e trabalho experimental realizado por Li & Shih [13].

Para avanços de 0,254 mm/rev verificou-se que as forças tangenciais registadas experimentalmente diminuem com o aumento da velocidade de corte. Os valores previstos nas simulações numéricas executadas revelam uma ligeira tendência de diminuição com o aumento da velocidade de corte, apresentando um desvio inferior dos valores experimentais em relação aos resultados obtidos por simulação numérica feitas por Li & Shih [13].

No que respeita às forças radiais e axiais, os registos experimentais mostram em geral um aumento da sua magnitude com o aumento da velocidade de corte, atingindo um valor máximo aos 97,5 m/min e diminuindo o seu valor posteriormente. As simulações numéricas realizadas neste trabalho mostram um

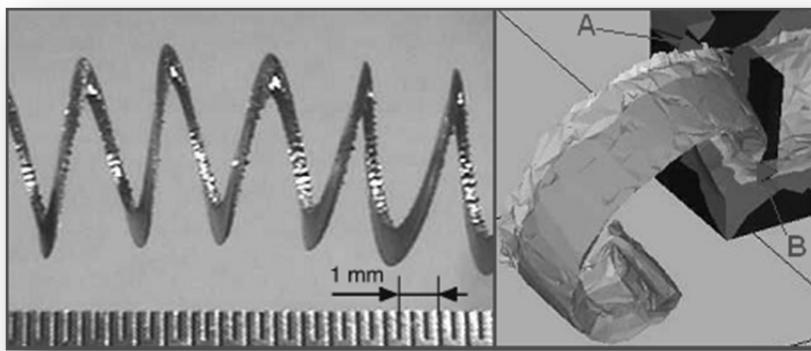


Fig. 10. Aparo obtida no torneamento tridimensional com avanço de 0,254 mm/rev, velocidade de corte de 48,8 m/min e largura de corte de 1,02 mm, por Li & Shih [13].

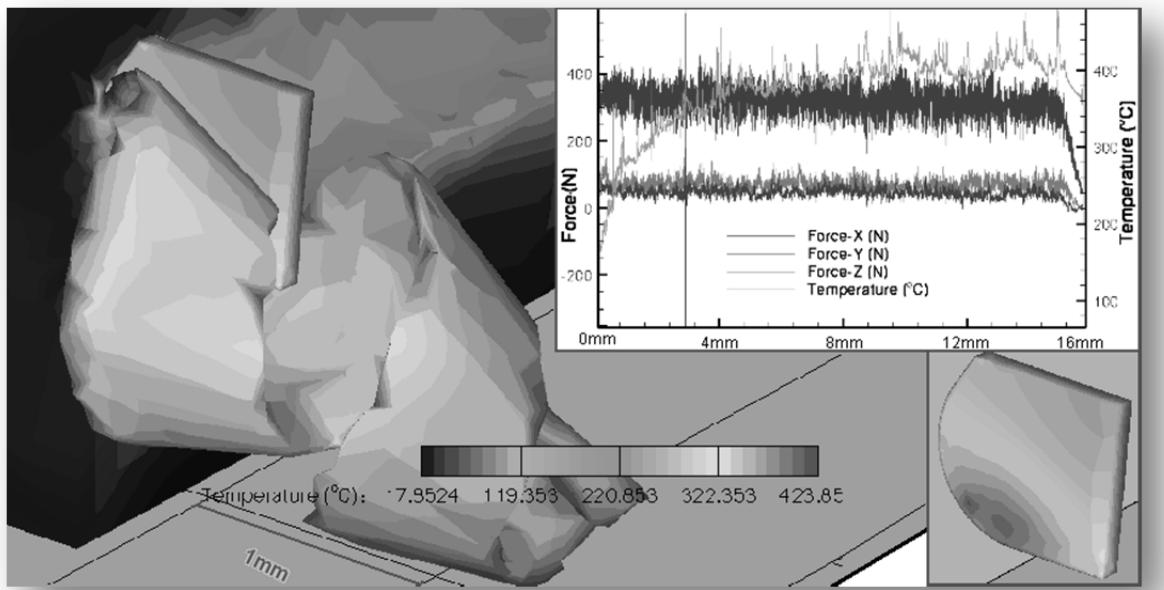


Fig. 11. Previsão da formação da aparo, da distribuição da temperatura e forças envolvidas no corte, obtidas por simulação numérica com o *AdvantEdge*<sup>®</sup>.

comportamento menos dependente com a velocidade de corte, contudo os valores registados apresentam baixos desvios com os dados experimentais.

Para avanços de 0,381 mm/rev, as forças tangenciais registadas experimentalmente diminuem com o aumento da velocidade de corte. Os valores previstos neste trabalho revelam uma maior proximidade dos valores experimentais, relativamente aos previstos numericamente pelos autores, contudo mostram pouca dependência com o aumento das velocidades de corte.

No que respeita às forças radiais e axiais, os valores obtidos por simulação numérica apresentam um comportamento de maior semelhança com os dados experimentais. As previsões obtidas neste trabalho apresentam em geral uma maior proximidade com os valores experimentais.

Nos testes experimentais, Li & Shih [13] observaram a formação de aparo helicoidal em gume, como mostrada na Fig. 10, contudo, as simulações por eles executadas apresentaram uma aparo em espiral. Os

Tabela 6: Valores máximos de temperatura na ferramenta de corte obtidos nas simulações numéricas executadas por Li & Shih [13] e os obtidos neste trabalho.

Avanço (mm/rev)	0,254				0,381			
Velocidade de corte (m/min)	22,4	48,8	97,5	195	22,4	48,8	97,5	195
Li & Shih (2005) - FEM (°C)	265	349	385	484	262	313	385	459
AdvantEdge® - FEM (°C)	330	390	490	530	370	430	520	540

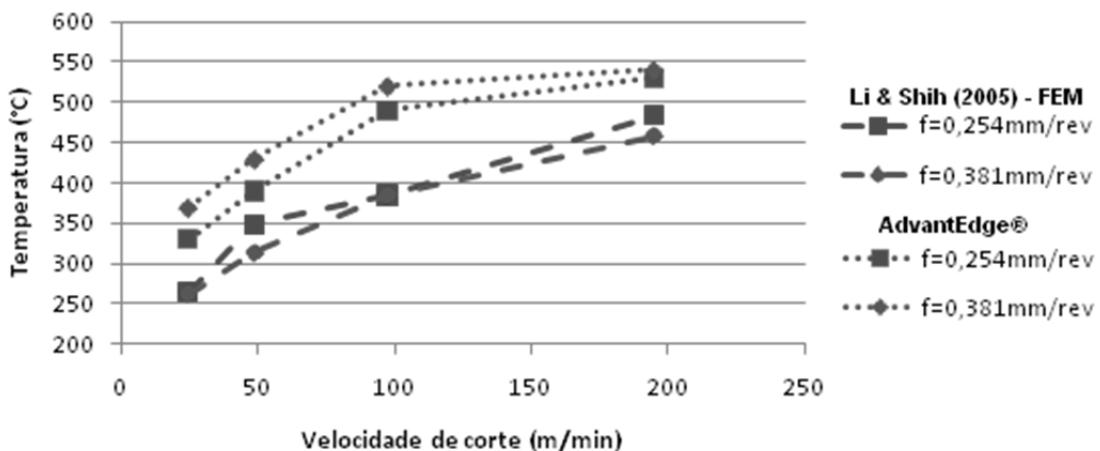


Fig. 12: Valores máximos de temperatura na ferramenta de corte obtidos nas simulações numéricas executadas por Li & Shih, [13] e os obtidos neste trabalho.

autores justificaram que a principal razão para tal discrepância é o facto de o corte ser modelado numa peça rectilínea, onde os valores de velocidade de corte nos pontos A e B (Fig. 10) são semelhantes, ignorando assim o efeito de curvatura.

Para todas as simulações numéricas executadas, verificou-se a formação de uma apara tubular mais próxima da forma da apara obtida experimentalmente.

Na Fig. 11 é apresentada a previsão obtida na simulação numérica da formação da apara no torneamento tridimensional com avanço de 0,254 mm/rev, velocidade de corte de 48,8 m/min e largura de corte de 1,02 mm. Também se inclui o gráfico das forças envolvidas no corte assim como a temperatura máxima na ferramenta de corte.

Adicionalmente foi feita a comparação entre as previsões do valor máximo da temperatura de corte na ferramenta obtidas neste trabalho e por Li & Shih, [13] Tabela 6. Na Fig. 12 é mostrado o gráfico desses valores em função da velocidade de corte.

Pelas simulações levadas a cabo neste trabalho, regista-se uma tendência crescente da temperatura com o aumento da velocidade de corte. Verifica-se uma diminuição do crescimento da temperatura para valores de velocidade de corte superiores a 97,5 m/min. O aumento do avanço de 0,254 para 0,381 mm/rev, não afecta o comportamento dos valores de temperatura com o aumento da velocidade de corte, aumentando apenas a sua magnitude.

As simulações numéricas executadas por Li & Shih [13] apresentam temperaturas inferiores às previstas neste trabalho, aumentando com o aumento da velocidade de corte.

#### 4. CONCLUSÕES

Tendo em consideração o trabalho de simulação numérica e de validação desenvolvido, pode concluir-se o seguinte:

##### Corte ortogonal

- Os resultados da simulação numérica revelaram valores de força de corte em geral inferiores aos valores experimentais recolhidos por Barry *et al.* [7], apresentando um desvio abaixo dos 22,7%.
- As simulações numéricas executadas com avanços de 0,1 mm/rev, mostram comportamentos semelhantes das forças de corte com os valores recolhidos experimentalmente. Para avanços inferiores, o comportamento das forças de corte previstas pelas simulações numéricas divergem dos experimentais apresentando uma diminuição mais acentuada dos seus valores com o aumento da velocidade de corte.
- Através das simulações numéricas foi possível visualizar e prever a formação de apara serrilhada periódica e aperiódica para os diferentes avanços e velocidades de corte testados. Tal como em Barry *et al.* [7], verificou-se uma nítida dependência da periodicidade do serrilhado da apara com o aumento tanto da velocidade de corte como do avanço.
- Verificou-se nas simulações numéricas, para baixos valores de velocidade de corte assim como baixos valores de avanço, a formação de aparas serrilhadas aperiódicas. Com o aumento de ambos os parâmetros de corte, verifica-se a formação de apara serrilhada periódica. Verificou-se, ainda, para os dados recolhidos na simulação numérica, uma antecipação do fenómeno de mudança de periodicidade, relativamente aos experimentais.
- Os valores para o grau de recalque obtidos nas simulações numéricas são bastante próximos dos experimentais obtidos por Barry *et al.* [7]. Tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte, e não apresentam dependência significativa com o aumento do avanço.

##### Corte Tridimensional

- Tal como as previsões registadas por Li & Shih [13], os valores de força no corte tridimensional obtidos por simulação numérica neste trabalho, apresentam em geral uma dependência pouco acentuada com a variação da velocidade de corte, contrastando com os valores experimentais.
- Das simulações numéricas levadas a cabo neste trabalho, por regra geral, são registadas forças com valores mais próximos aos obtidos experimentalmente, do que os previstos pelos autores, tendo uma magnitude inferior. Verificam-se desvios máximos de 16,8% para as forças tangenciais, 27,3% para as forças radiais e 19,4% para as forças axiais.
- Nos testes experimentais, Li & Shih [13] observaram a formação de apara helicoidal, contudo nas simulações numéricas os autores previram a formação de uma apara em espiral. Nas simulações numéricas levadas a cabo neste trabalho previu-se a formação de uma apara mais próxima da obtida experimentalmente.

Finalmente, refere-se que a utilização de software FEM para modelar e simular a maquinagem deve ser cuidadosa recorrendo sempre que possível ao máximo de dados experimentais para validação. Neste tipo de análise onde existe uma alta concentração de tensões junto ao bico da ferramenta a utilização de malhas muito densas permite minimizar erros numéricos que podem afectar os resultados obtidos. O critério para a separação da apara da peça é também um problema complicado neste tipo de análise. A obtenção de resultados fiáveis e de qualidade é uma tarefa que merece toda a atenção e conhecimentos de elementos finitos e de tecnologia de maquinagem.

## REFERÊNCIAS

- [1] Boyer, R.R., "An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry", *Materials Science & Engineering, A213(1-2)*, 103-114 (1996)
- [2] Collings, E.W., *The Physical Metallurgy of Titanium Alloys*, Ohio: Metal Park 44073: American Society for Metals (1983)
- [3] Eylon, D., Newman, J.K., *Titanium and Titanium Alloys Castings*, Materials Park: ASM International, ed. 10 (1990)
- [4] Armendia, M., Garay, A., Iriarte, L.M., Arrazola P.J., "Comparation of the Machinabilities of Ti6Al4V and Ti54M Using Uncoated WC-co tools", *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 197-203 (2010)
- [5] Ezugwu, E.O., "Key Improvements in the Machining of Difícult-to-Cut Aerospace Superalloy", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45**(12-13), 1353-1367 (2005)
- [6] Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., "Titanium Alloys and Their Machinability - A Review", *Journal of Materials Processing Technology*, **68**, 262-274 (1997)
- [7] Barry, J., Byrne, G., Lennon, D., "Observations on Chip Formation and Acoustic Emission in Machining Ti-6Al-4V Alloy", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **41**, 1055-1070 (2001)
- [8] Venugopal, K.A., Paul, S., Chattopadhyay, A.B., "Growth of tool wear in turning of Ti-6AL-4V alloy under cryogenic cooling", *Wear*, **262**(9-10), 1071-1078 (2007)
- [9] Che-Haron, C.H., "Tool Life and Surface Integrity in Turning Titanium Alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, **118**, 231-237 (2001)
- [10] Colafemina, J.P., Jasinevicius, R.G., Duduch, J.G., "Surface Integrity of Ultra-Precision Diamond Turned Ti Cp and Ti6Al4V", *Proceedings of Institutions of Mechanical Engineers, Jounal of Engineering and Manufacture - part B*, 999-1006 (2007)
- [11] Hughes, J.I., Sharman, A.R., Ridgway, K., "The Effect of Cutting Tool Material and Edge Geometry on Tool Life and Workpiece Surface Integrity", *Journal of Engineering Manufacture, part B*, **220**, 93-107 (2005)
- [12] Liu, C.-H., Finite Element Simulation of Chip Formation for Orthogonal Turning of Ti-6Al-4V. Hartford, Connecticut (internal report) (2006)
- [13] Li, R., Shih, A.J., "Finite Element Modeling of 3D Turning of Titanium", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **29**, 253-261 (2005).

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF MACHINING OF TITANIUM AND ITS ALLOYS – ORTHOGONAL CUTTING (2D) AND THREE-DIMENSIONAL CUTTING (3D)

**Abstract** – Currently, titanium and its alloys are used in advanced industries, such as aeronautics, automotive and biomedical. In this paper, we present a finite element analysis of machining of titanium and its alloys (orthogonal cutting-2D and tridimensional cutting-3D). The numerical simulations were performed using the software AdvantEdge®. Was performed validation of numerical simulations based on results available in the literature.

**Keywords** – Finite Element Method; numerical simulation; machining, orthogonal cutting-2D, three-dimensional cutting-3D, titanium and its alloys.