



# OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA MAQUINAGEM SUSTENTÁVEL DA LIGA TI6AL4V

## Authors:

Sílvia Carvalho ([sdrc@ua.pt](mailto:sdrc@ua.pt))

Ana Horovistiz ([Horovistiz@ua.pt](mailto:Horovistiz@ua.pt))

João Paulo Davim ([pdavim@ua.pt](mailto:pdavim@ua.pt))



Universidade Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Centro tecnologia Mecânica e Automação (TEMA)  
Enquadrado no projeto “FAMASI - Sustainable and intelligent manufacturing by machining”



# Introdução

## 1. Motivação & Enquadramento

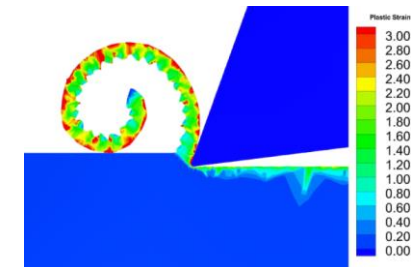
### I. Relevância da liga Ti6Al4V na indústria

- É usada em componentes de alto valor acrescentado.
- A definição de condições de maquinagem adequadas é desafiante.



### II. Em que aspeto é que a simulação por MEF pode ser útil?

- No desenvolvimento de modelos que prevejam a resposta na maquinagem.
- Na redução do número de ensaios experimentais.
- O número simulações de maquinagem sob condições de lubrificação e refrigeração é limitado.





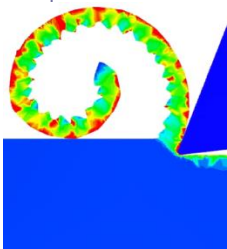
## Introdução

### 2. Questão e Metodologia de Investigação



#### Questões de Investigação

Como maquinar a liga Ti6Al4V através de metodologias sustentáveis de lubrificação e refrigeração? Que parâmetros de corte devem ser seleccionados? Quais as variáveis de resposta que devem ser analisadas? Que combinação de condições deve ser testada experimentalmente?



#### Metodologia de aquisição de dados numéricos

- Simulações em corte ortogonal no AdvantEdge.
- Definição das variáveis referentes à aplicação de fluidos de corte no AdvantEdge.
- Análise da resposta obtida em função das condições de corte.
- Criação da base de dados.



#### Otimização do processo de maquinagem

- Análise relacional de Grey (ARG) para otimização multiobjectivo.
- Testes em corte ortogonal com medições de forças de maquinagem.
- Validação dos modelos.



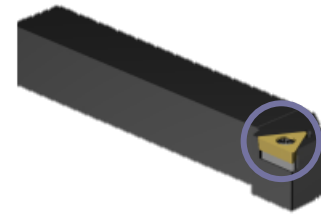
# Parametrização das simulações

## 1. Ferramenta de corte

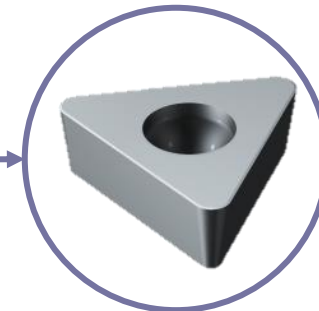
- Material: Carboneto tungsténio
- Não revestida (H13A)
- Ângulo de saída ( $\gamma$ ):  $0^\circ$
- Ângulo de folga:  $7^\circ$
- Raio da aresta de corte:  $30\ \mu\text{m}$  [1]

↓  
Obtido através da reconstrução 3D de imagens obtidas por microscopia ótica

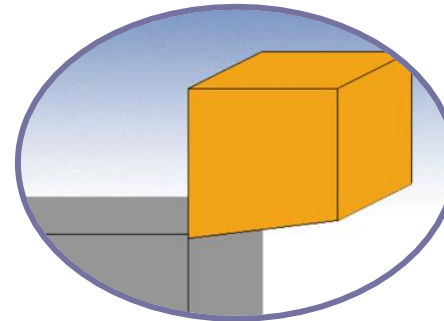
(1) STGCL 2020K 16



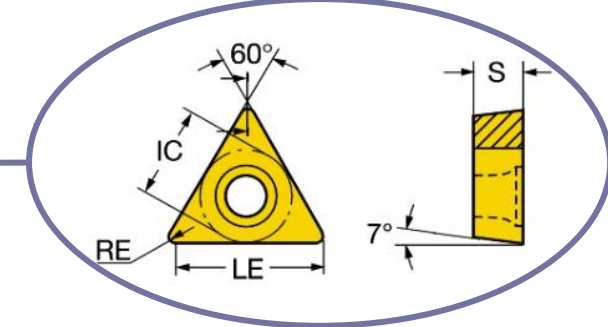
(2) TCMW 16 T3 04 H13A



(4) Ferramenta no AdvantEdge



(3)

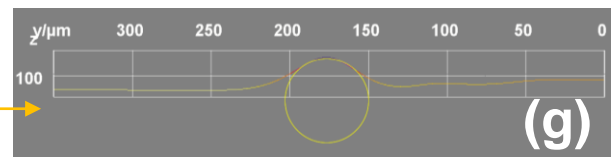
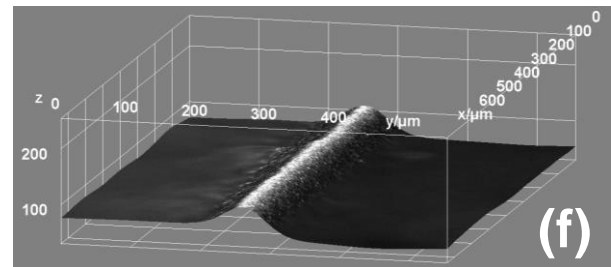
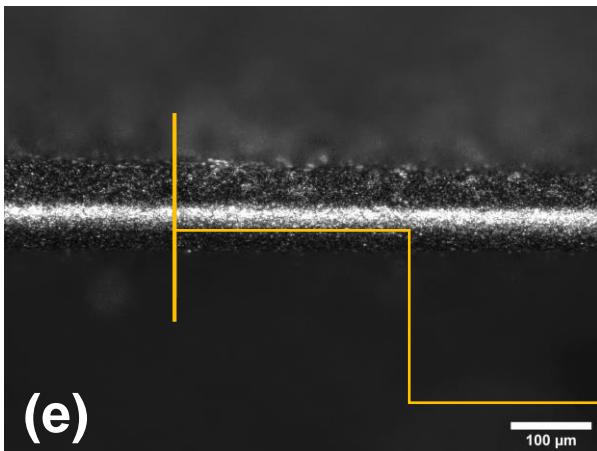
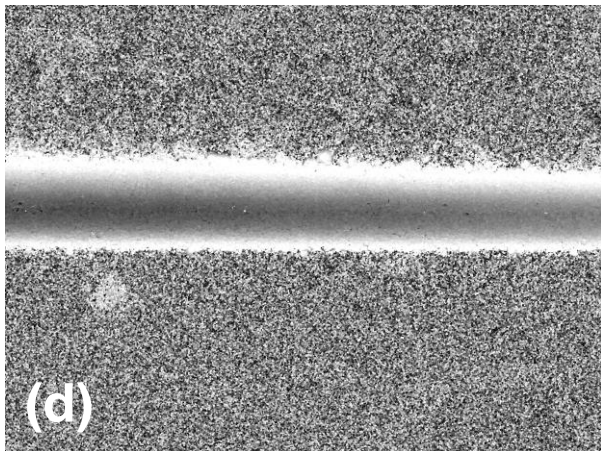
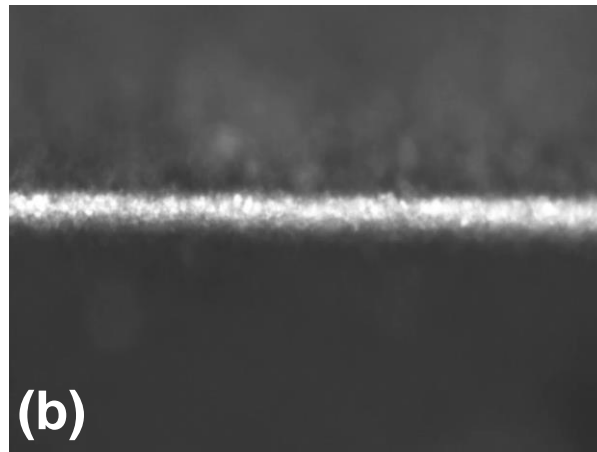
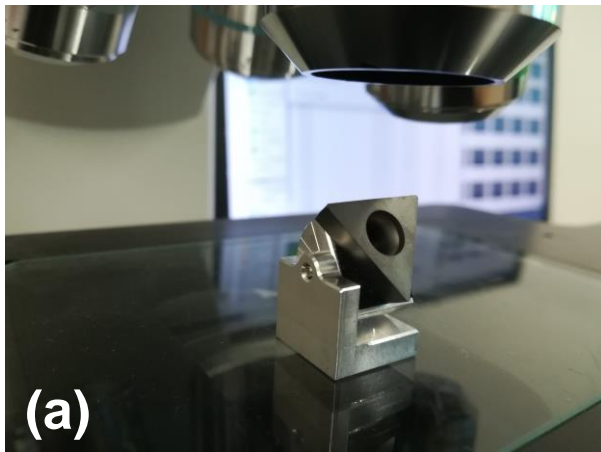


[1] Cedergren S, Frangoudis C, Archenti A, et al. Influence of work material microstructure on vibrations when machining cast Ti-6Al-4V. *Int J Adv Manuf Technol* 2016; 84: 2277–2291.

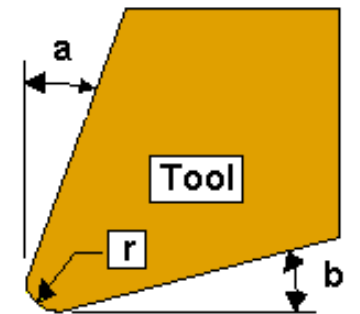


# Parametrização das simulações

## 2. Raio da aresta de corte



Parâmetros geométricos da ferramenta no AdvantEdge



Cutting Edge Radius	[r] {mm}	0.03
Rake angle	[a] {deg}	0
Relief angle	[b] {deg}	7



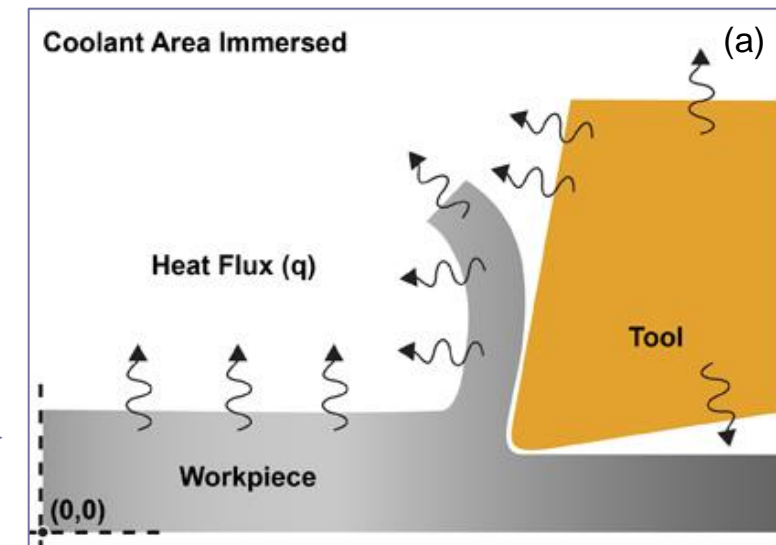
## Parametrização das simulações

### 3. Parâmetros de lubrificação e refrigeração

#### I. Maquinagem a seco

#### II. Lubrificação abundante

- Emulsão base mineral
- Densidade:  $990 \text{ Kg/m}^3$
- $h$ :  $87\,500 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  [2]
- Estratégia de modelação : Região submersa em fluido



[2] S. Y. Hong and Y. Ding, "Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, no. 10, pp. 1417–1437, 2001, doi: 10.1016/S0890-6955(01)00026-8.



## Parametrização das simulações

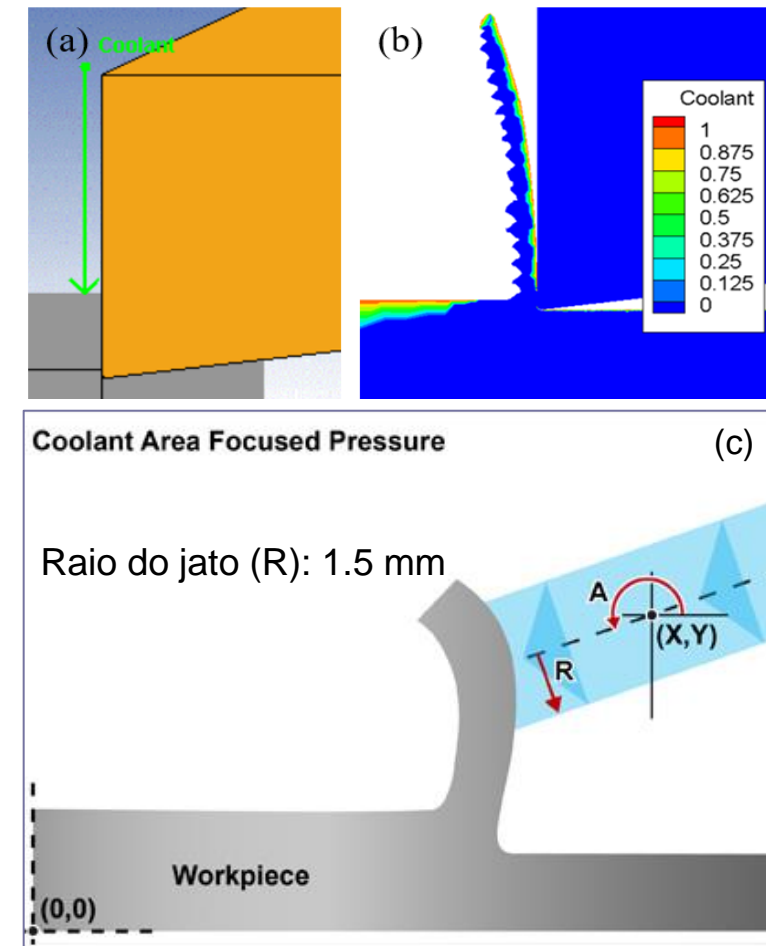
### 4. Parâmetros de lubrificação e refrigeração

#### III. Mínima Quantidade Lubrificação (MQL)

- Óleo biodegradável Coolube™ 2210
- Pressão do ar comprimido: 6 bar
- Densidade [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]: 890 (óleo); 1.2 (ar); 1,23 (98% ar, 2% óleo)
- Caudal [ $\text{mL}/\text{min}$ ]: 156 (óleo); 95E3 (ar)
- $h$ :  $486,5 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  [3]
- Velocidade fluido = 223 m/s [4]
- Estratégia de modelação: Fluido sob pressão

[3] Jamil M, Khan AM, Gupta MK, et al. Influence of CO<sub>2</sub>-snow and subzero MQL on thermal aspects in the machining of Ti-6Al-4V. Appl Therm Eng 2020; 177: 115480.

[4] Hadad M, Sadeghi B. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. Int J Mach Tools Manuf 2012; 63: 1–15.





# Parametrização das simulações

## 5. Planeamento das simulações

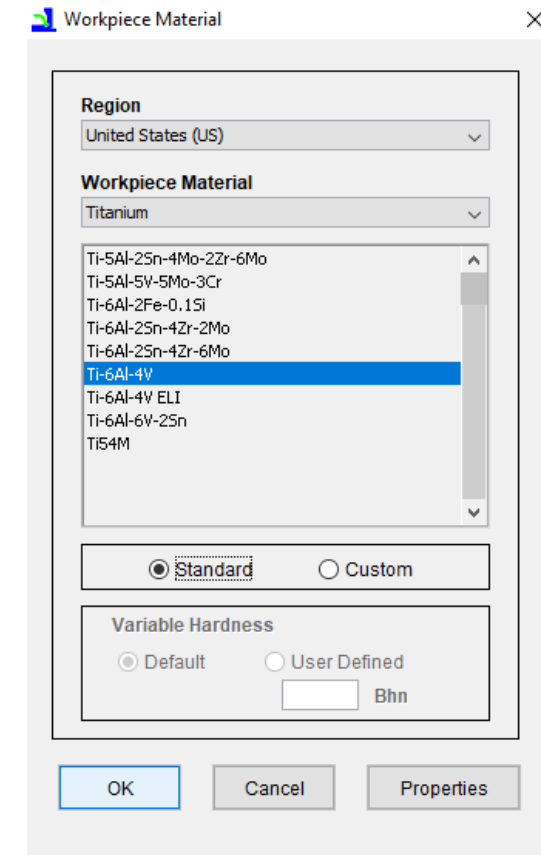
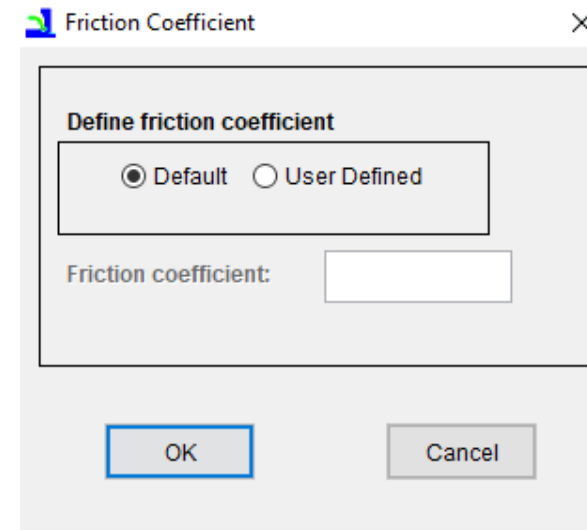
3	x	3	x	3
Condições da envolvente		Avanço [mm/rev]		Velocidade de corte [m/min]
Seco		0.05		30
Inundação		0.10		60
MQL		0.15		90

Profundidade de corte: 1 mm

= **27 simulações**

### Outras informações relevantes

- **Modelo escoamento da liga**  
Ti6Al4V da biblioteca do AE
- **Coefficiente de atrito** definido pelo AE

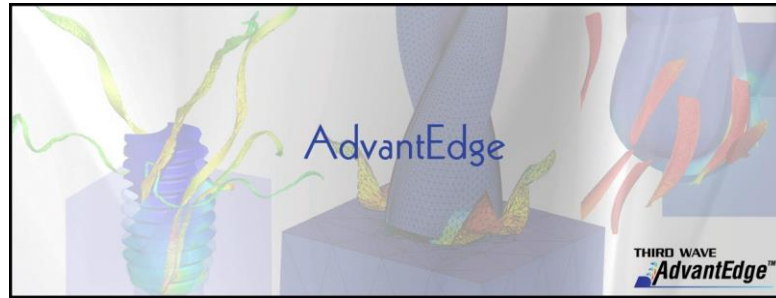






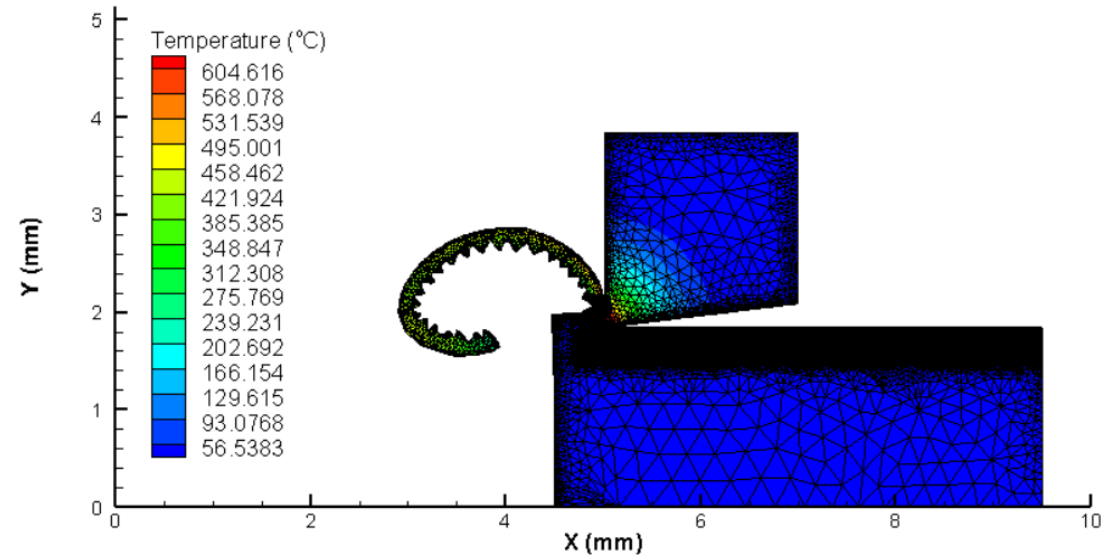
# Aquisição dos dados numéricos

## 1. Parâmetros de resposta avaliados

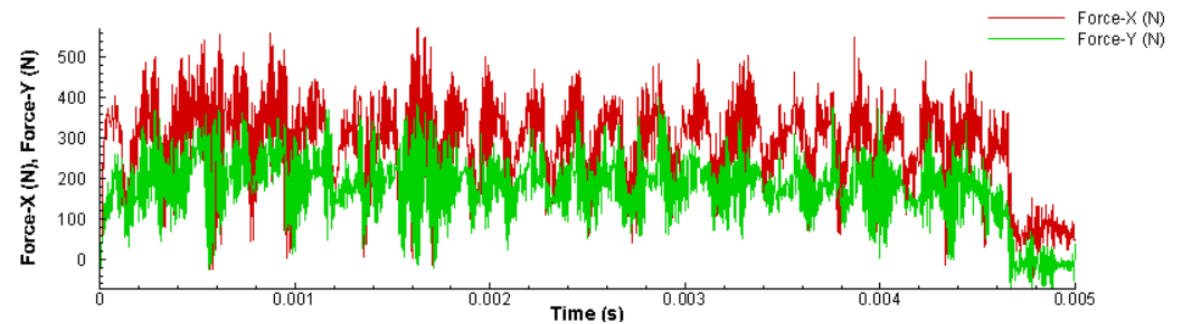


*Third Wave AdvantEdge*

Teste nº 18: MQL, 60 m/min, 0.15 mm/rev



(a)

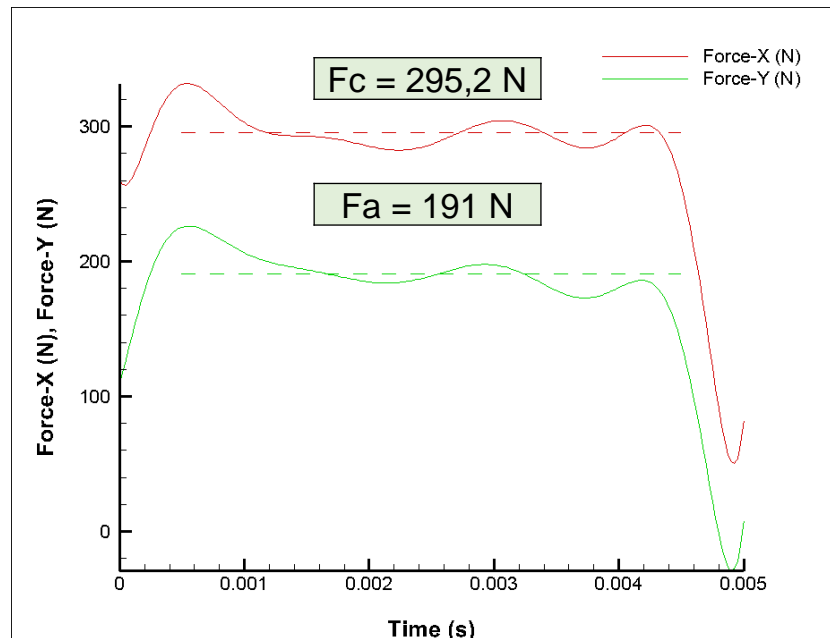




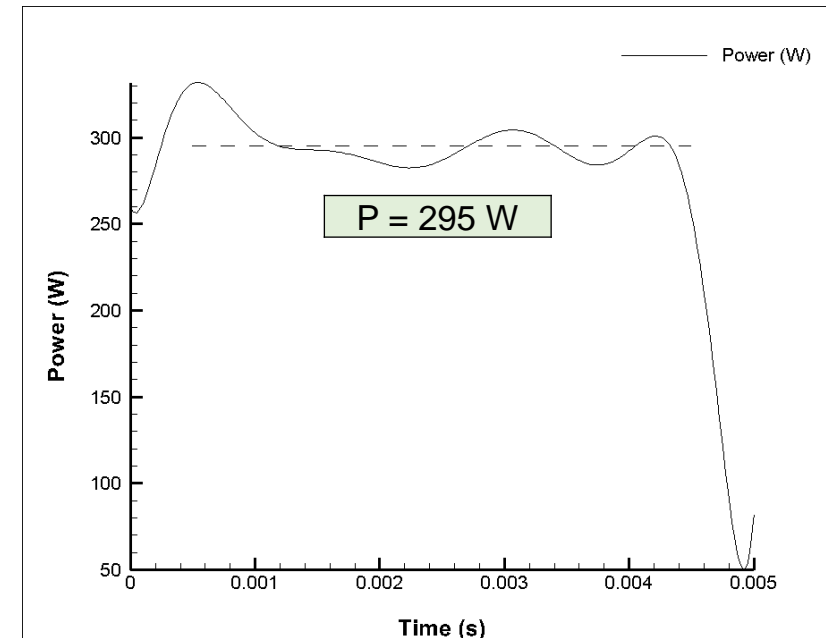
## Aquisição dos dados numéricos

### 2. Parâmetros de resposta avaliados

↘ Força de corte (FC) [N]



↘ Potência de corte (P) [W]



↘ Força Especifica de corte (Ks) [MPa]

$$K_s = \frac{\text{Força de corte}}{\text{Avanço} \times \text{Profundidade de corte}}$$

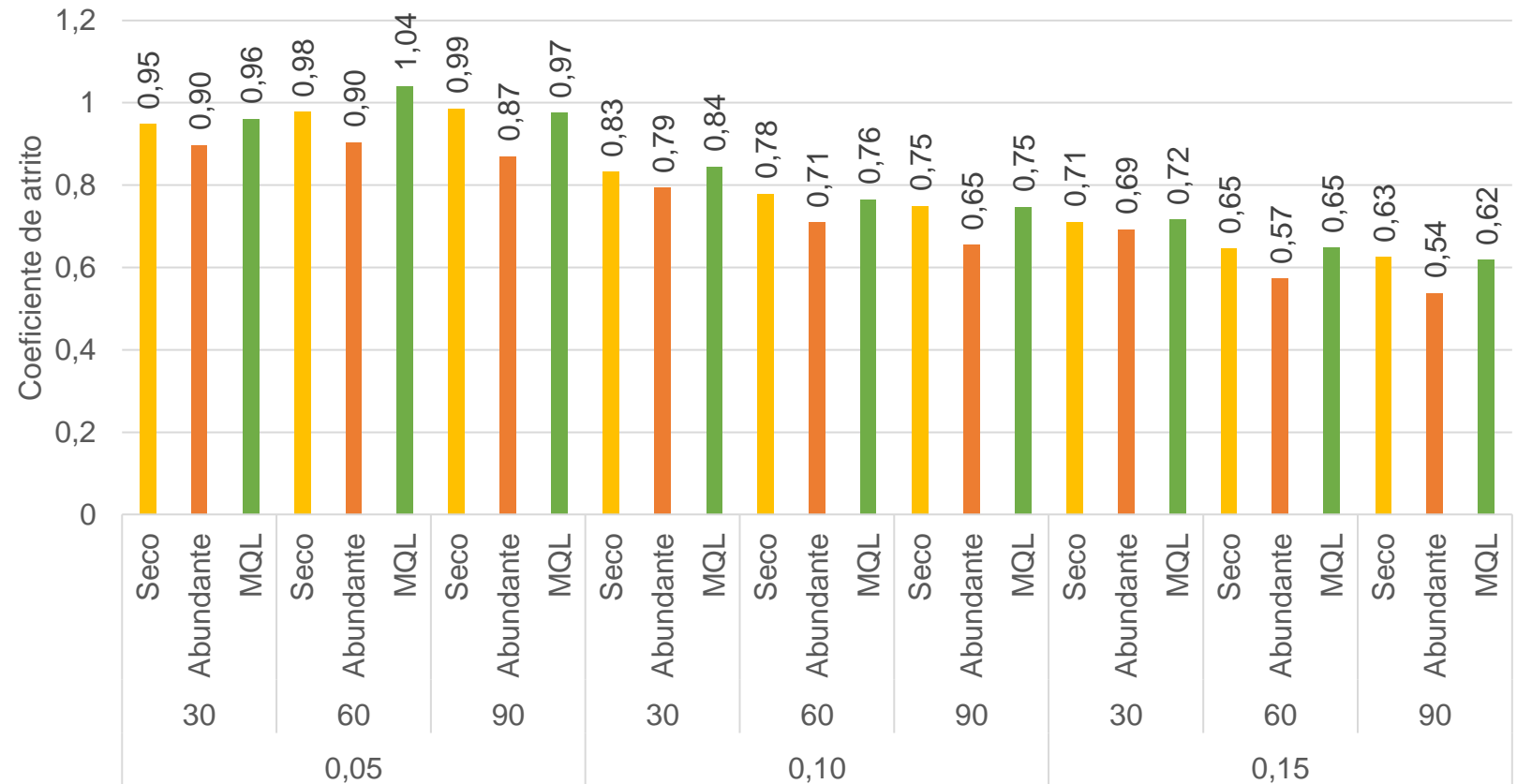


# Aquisição dos dados numéricos

## 3. Parâmetros de resposta avaliados

↘ Coeficiente de atrito ( $\mu$ )

$$\mu = \frac{F_c \times \sin \gamma + F_a \times \cos \gamma}{F_c \times \cos \gamma - F_a \times \sin \gamma}$$

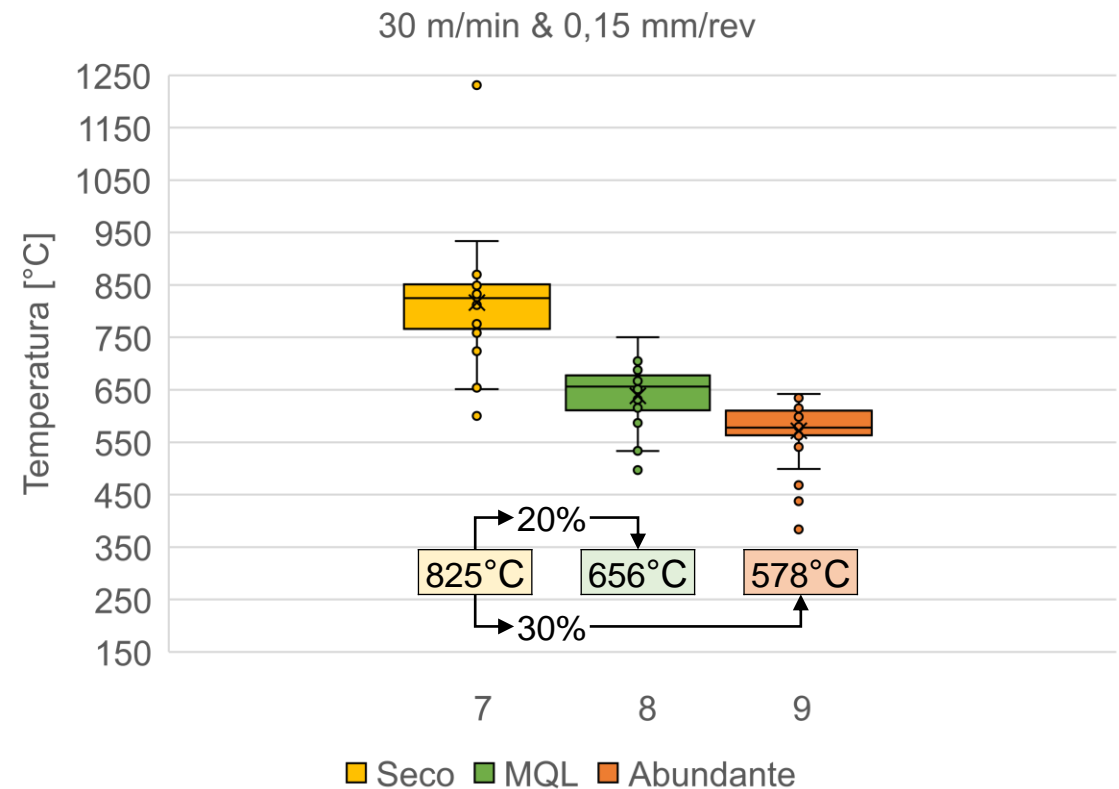
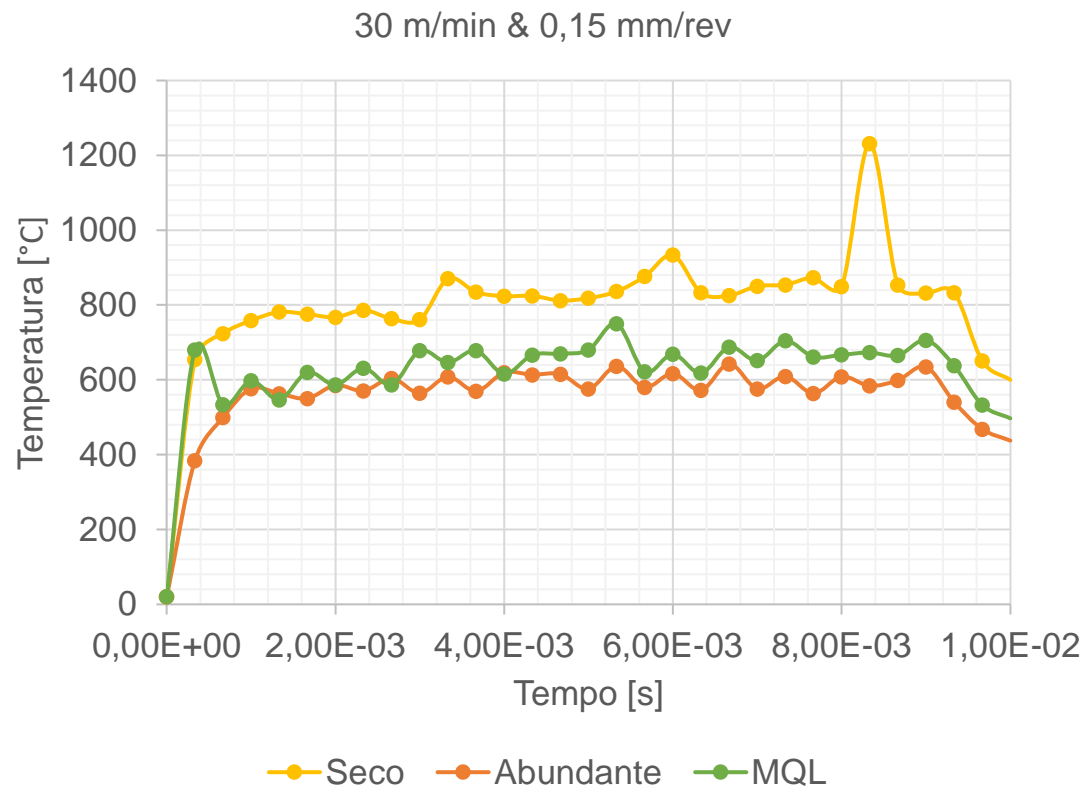




# Aquisição dos dados numéricos

## 4. Parâmetros de resposta avaliados

↘ Temperatura máxima (TM) [°C]

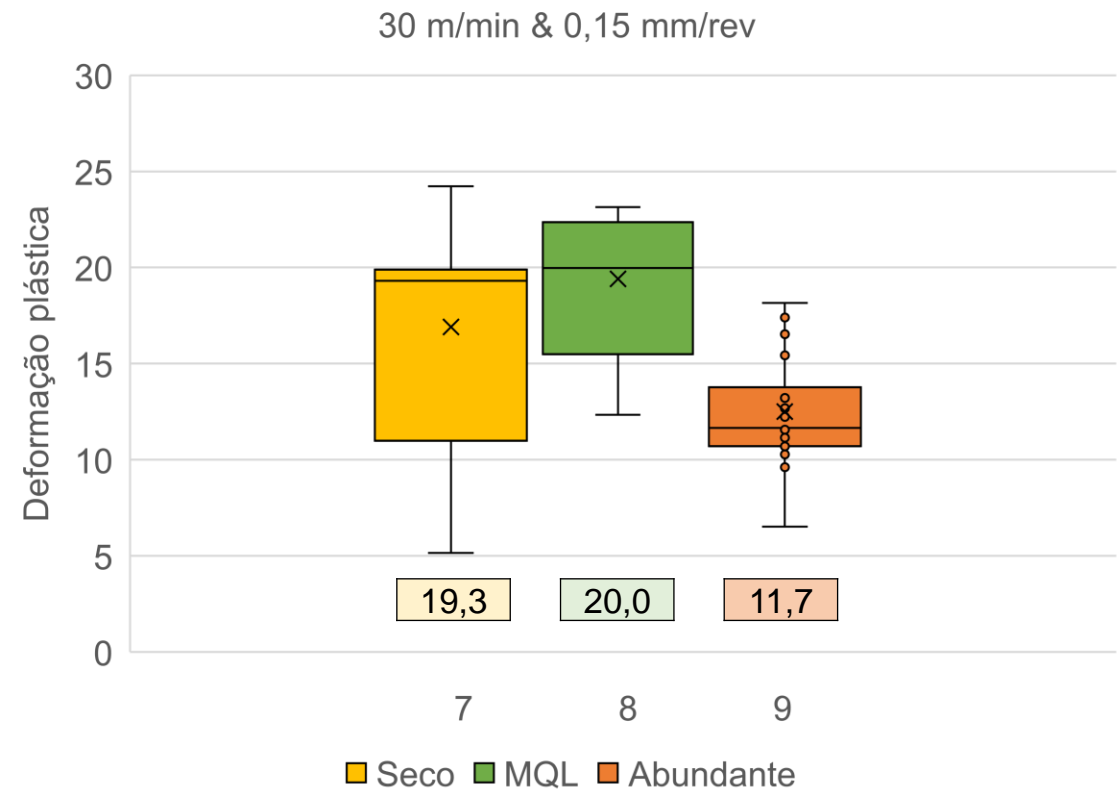
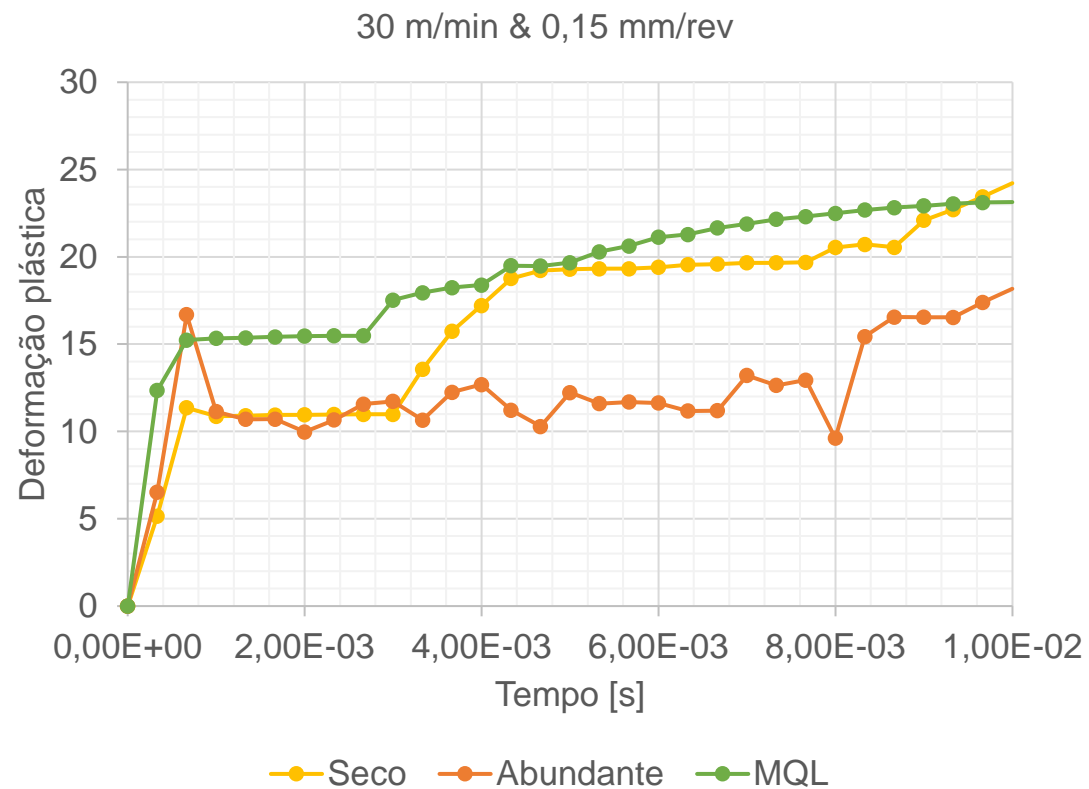




# Aquisição dos dados numéricos

## 5. Parâmetros de resposta avaliados

↘ Máxima deformação plástica (MDP)

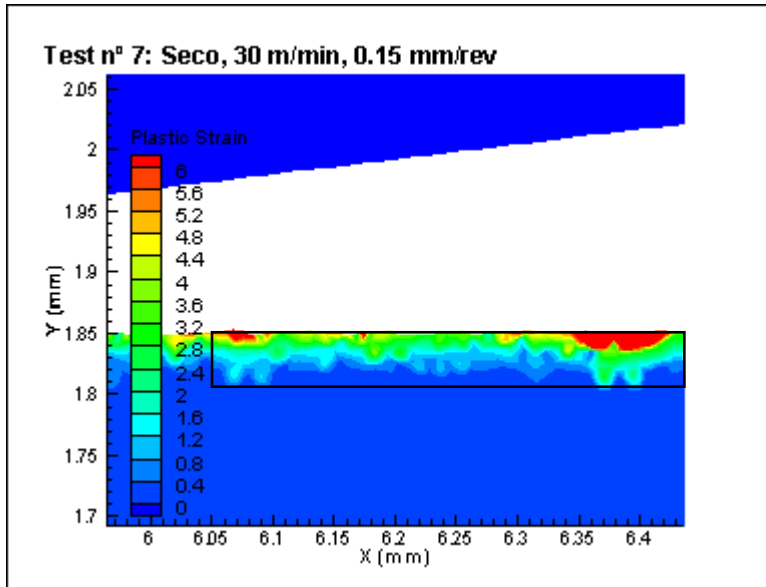




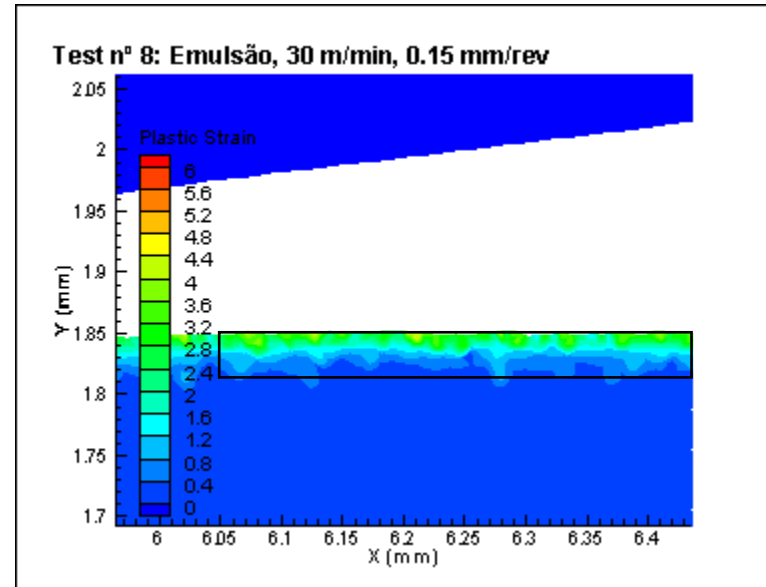
## Aquisição dos dados numéricos

### 6. Parâmetros de resposta avaliados

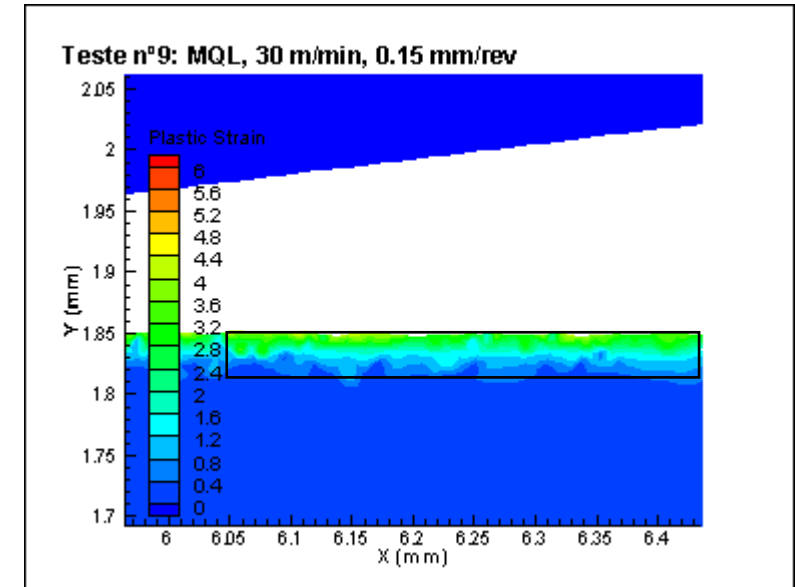
↘ Camada afetada pela deformação plástica (CA) [mm]



CA = 36,1  $\mu\text{m}$



CA = 34,6  $\mu\text{m}$



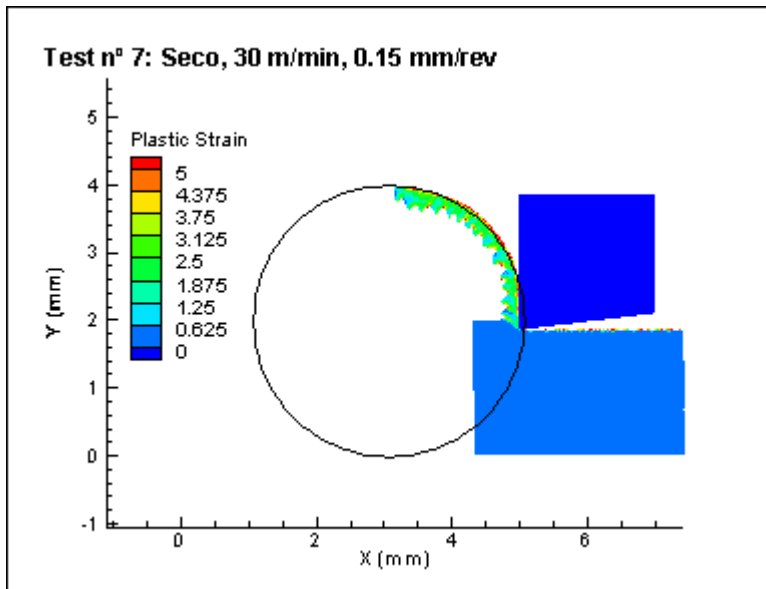
CA = 34,2 mm



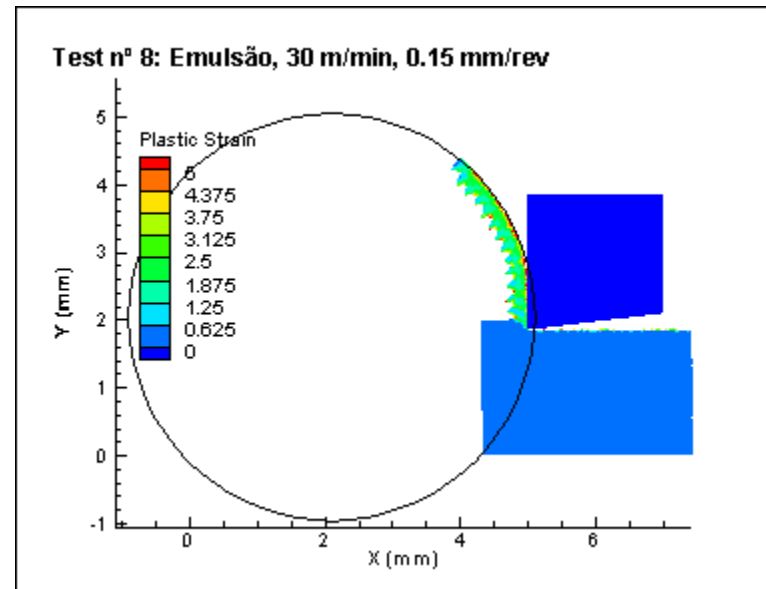
# Aquisição dos dados numéricos

## 7. Parâmetros de resposta avaliados

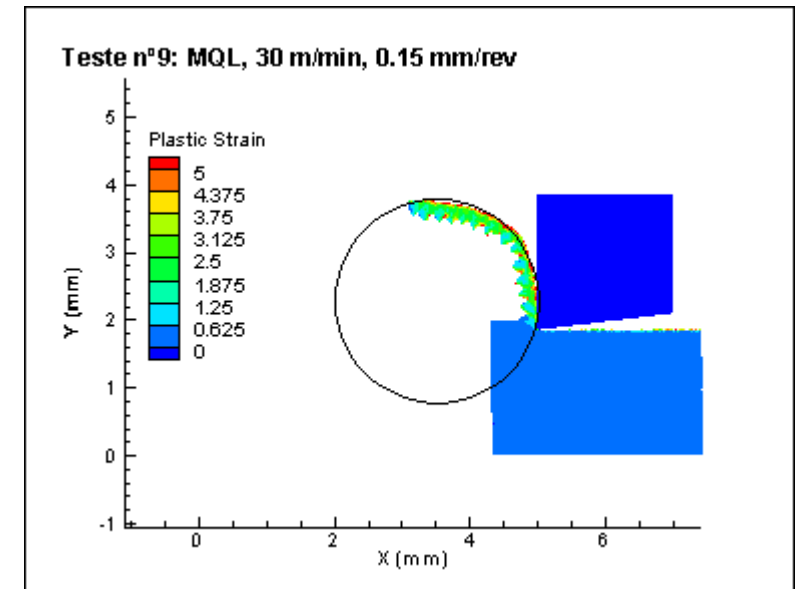
↘ Raio de curvatura da apara (RCA)



RCA = 2 mm



RCA = 3 mm



RCA = 1,5 mm



[m/min]	[mm/rev]			$\mu$	Fc [N]	P [W]	TM [°C]	PEC [MPa]	CA [ $\mu$ m]	MDP	RCA [mm]
30	0,05	1	Seco	0,95	147	73	484	2932	28,89	47,81	6,0
		2	Abundante	0,90	145	72	459	2898	25,12	39,84	3,5
		3	MQL	0,96	149	75	492	2978	31,25	8,06	4,0
	0,10	4	Seco	0,83	250	125	565	2499	29,28	12,58	2,8
		5	Abundante	0,79	265	132	547	2648	23,18	11,09	5,0
		6	MQL	0,84	255	127	570	2549	25,19	45,69	4,0
	0,15	7	Seco	0,71	335	167	825	2231	36,12	19,30	1,2
		8	Abundante	0,69	355	177	578	2364	34,57	11,66	2,0
		9	MQL	0,72	337	169	656	2249	34,20	19,98	1,4
60	0,05	10	Seco	0,98	144	144	623	2882	28,49	23,81	2,5
		11	Abundante	0,90	142	142	599	2830	25,16	12,99	5,0
		12	MQL	1,04	143	143	643	2866	25,10	8,51	2,0
	0,10	13	Seco	0,78	224	224	725	2238	28,10	10,30	0,5
		14	Abundante	0,71	231	231	696	2308	20,46	17,87	0,9
		15	MQL	0,76	222	222	734	2221	26,81	13,98	0,8
	0,15	16	Seco	0,65	301	301	818	2003	34,65	27,88	0,6
		17	Abundante	0,57	306	306	774	2041	36,92	16,32	0,5
		18	MQL	0,65	295	295	864	1968	38,53	16,85	0,5
90	0,05	19	Seco	0,99	137	205	738	2736	30,37	9,14	1,8
		20	Abundante	0,87	134	200	679	2672	22,52	18,35	2,5
		21	MQL	0,97	135	203	734	2700	28,04	13,46	0,8
	0,10	22	Seco	0,75	209	314	825	2093	24,49	19,30	0,3
		23	Abundante	0,65	213	320	807	2130	26,65	33,20	0,4
		24	MQL	0,75	210	315	823	2099	24,53	12,80	0,3
	0,15	25	Seco	0,63	278	417	948	1855	35,36	27,27	0,4
		26	Abundante	0,54	279	418	881	1859	32,06	23,88	0,5
		27	MQL	0,62	295	428	933	1967	42,27	15,36	0,4





# Otimização Multiobjectivo

## 1. Resposta Relacional de Grey

### Etapas de implementação

1ª. Normalização: Criação de uma escala única de acordo com o atributo (pode ser quanto maior melhor ou quanto menor melhor).

2ª. Cálculo do coeficiente GR: Que estabelece a relação entre a resposta ideal e a verdadeira.

3ª. GRG ( $\xi$ ): É calculada através do coeficiente GR e do peso de cada atributo.

4ª. Ranking: Ranking, a posição 1 indica as condições ótimas.

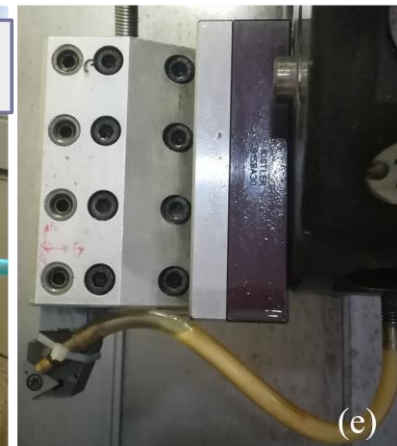
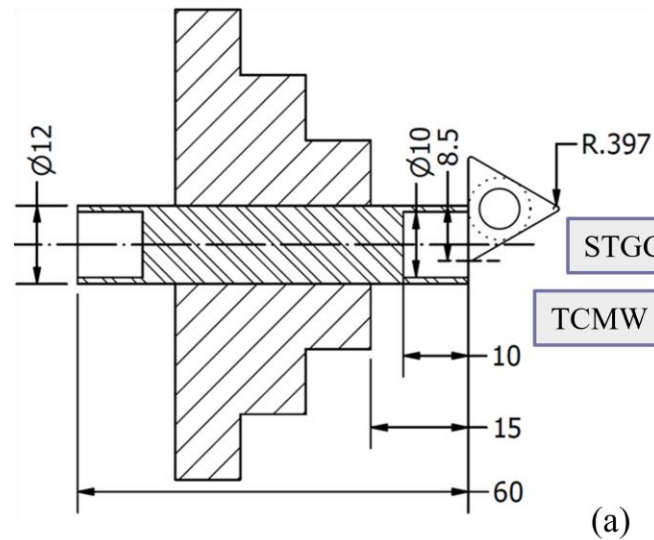
	Ensaio nº	GRG( $\xi$ )	Ranking		[m/min]	[mm/rev]
Coeficiente GR dos 9 atributos	1	0,594	19º	Seco	30	0,05
	2	0,653	2º	<b>Abundante</b>	<b>30</b>	<b>0,05</b>
	3	0,674	1º	<b>MQL</b>	<b>30</b>	<b>0,05</b>
	4	0,598	17º	Seco	30	0,10
	5	0,612	14º	Abundante	30	0,10
	6	0,538	26º	MQL	30	0,10
	7	0,534	27º	Seco	30	0,15
	8	0,572	23º	Abundante	30	0,15
	9	0,562	25º	MQL	30	0,15
	10	0,580	22º	Seco	60	0,05
	11	0,617	12º	Abundante	60	0,05
	12	0,650	4º	<b>MQL</b>	<b>60</b>	<b>0,05</b>
	13	0,637	7º	<b>Seco</b>	<b>60</b>	<b>0,10</b>
	14	0,651	3º	<b>Abundante</b>	<b>60</b>	<b>0,10</b>
	15	0,619	11º	MQL	60	0,10
	16	0,571	24º	Seco	60	0,15
	17	0,616	13º	Abundante	60	0,15
	18	0,595	18º	MQL	60	0,15
	19	0,611	15º	Seco	90	0,05
	20	0,626	10º	Abundante	90	0,05
	21	0,628	9º	MQL	90	0,05
	22	0,629	8º	Seco	90	0,10
	23	0,601	16º	Abundante	90	0,10
	24	0,649	5º	<b>MQL</b>	<b>90</b>	<b>0,10</b>
	25	0,593	20º	Seco	90	0,15
	26	0,638	6º	<b>Abundante</b>	<b>90</b>	<b>0,15</b>
	27	0,588	21º	MQL	90	0,15



# Testes em corte ortogonal

1.

Seco, Abundante, MQL - 30 m/min, 0,05 mm/rev

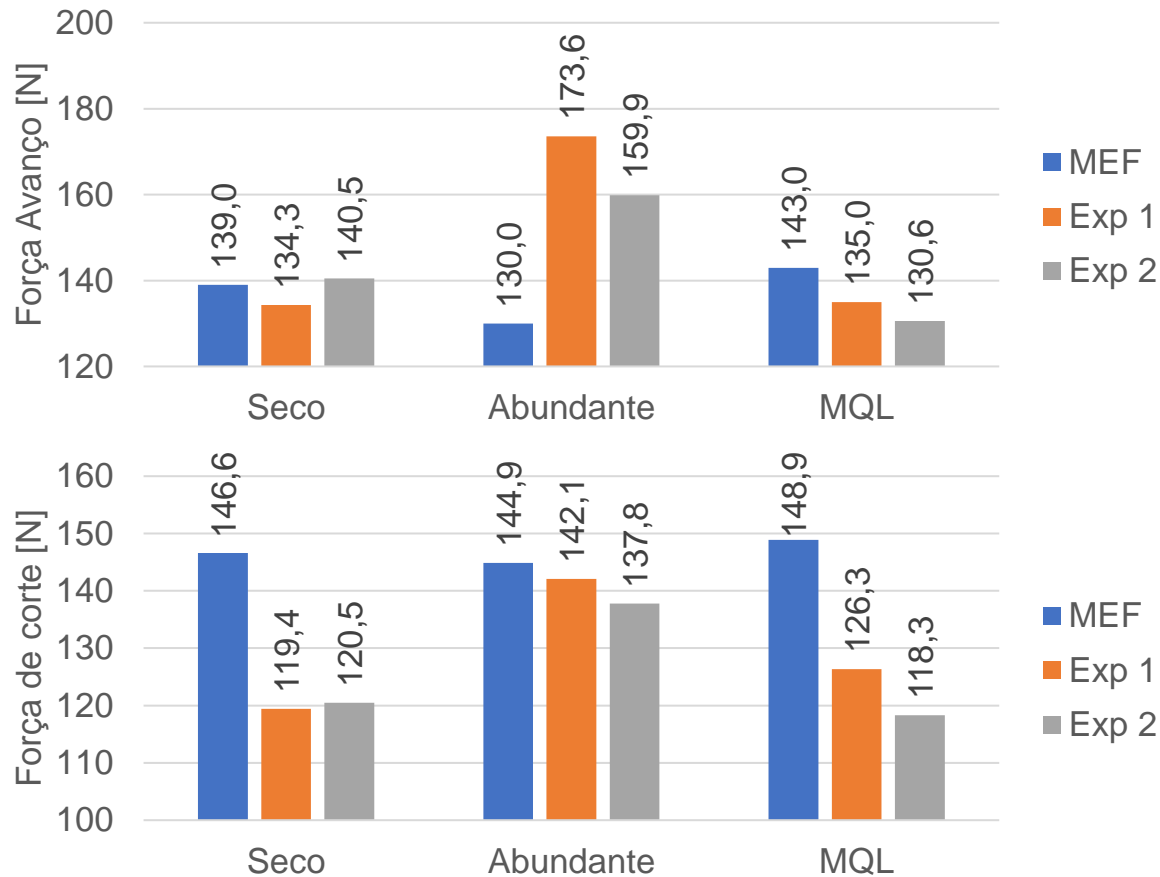




# Validação modelos numéricos através das forças de corte

1.

Seco, Abundante, MQL - 30 m/min, 0,05 mm/rev



Erro relativo percentual [%]			
	Exp	Força Avanço	Força de corte
Seco	1	3,5	22,8
	2	1,1	21,7
Abundante	1	25,1	2,0
	2	18,7	5,2
MQL	1	5,9	17,9
	2	9,5	25,9



## Notas finais

- Criou-se uma **base de dados** para perceber como é que as condições de corte afetaram a resposta de maquinagem.
- A estratégia de **otimização** indica que a **maquinabilidade** da liga Ti6Al4V pode ser melhorada com a utilização de **sistemas de lubrificação e arrefecimento**.
- Através das forças de maquinagem foi possível **validar os modelos numéricos desenvolvidos**, mas também garantir que as variáveis relacionadas com a aplicação de fluidos de corte foram capazes de reproduzir as condições experimentais.
- Nas próximas etapas deste trabalho serão executados mais testes de validação, com **novas configurações do sistema de MQL**, nomeadamente o aumento do caudal de fluido.



## Agradecimentos

- Os autores agradecem ao projeto “031556-FCT/02/SAICT/2017, FAMASI - Sustainable and intelligent manufacturing by machining” financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). POCI. Portugal. in the scope of TEMA - Centre for Mechanical Technology and Automation - UID/EMS/00481/2013.
- Os autores agradecem à Tifast (Itália) pelo fornecimento da liga de titânio utilizada nos ensaios.



# OTIMIZAÇÃO MULTIOBJECTIVO USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA MAQUINAGEM SUSTENTÁVEL DA LIGA TI6AL4V

## Authors:

Sílvia Carvalho ([sdrc@ua.pt](mailto:sdrc@ua.pt))

Ana Horovistiz ([Horovistiz@ua.pt](mailto:Horovistiz@ua.pt))

João Paulo Davim ([pdavim@ua.pt](mailto:pdavim@ua.pt))



Universidade Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Centro tecnologia Mecânica e Automação (TEMA)  
Enquadrado no projeto “FAMASI - Sustainable and intelligent manufacturing by machining”