



**CONCURSO DE PROVAS E TÍTULOS DO MAGISTÉRIO SUPERIOR**  
**EDITAL N° 377 DE 25/05/2022, PUBLICADO NO DOU N° 102 DE 31/05/2022**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SETOR DE FABRICAÇÃO – VAGA**  
**MC-025**

**QUESTÕES PROVA ESCRITA**

Conforme o Inciso III do Artigo 35 da Resolução n° 15/2020 do CONSUNI, seguem as questões da Prova Escrita:

1. Explique a razão pela qual o ensaio de tração uniaxial de uma barra cilíndrica de aço apresenta instabilidade plástica.
2. Considere o processo de forjamento a frio de uma barra de aço de seção transversal retangular entre ferramentas rígidas sob condições de deformação plana com efeitos de atrito. Em seguida, estabeleça um método de cálculo para previsões da pressão de contato e esforço.
3. Quais são os fenômenos físico-químicos que causam o desgaste de uma ferramenta de usinagem? Em que níveis de velocidade de corte cada um deles acontece? Por quê? Relacione os tipos (formas) de desgaste da ferramenta de usinagem com os fenômenos causadores de desgaste.
4. O que é vida de uma ferramenta de usinagem? Quais são as formas que podem ser utilizadas para se detectar o fim da vida de uma ferramenta, direta e indiretamente, em um processo produtivo?

PROVA ESCRITA  
28/11/2022

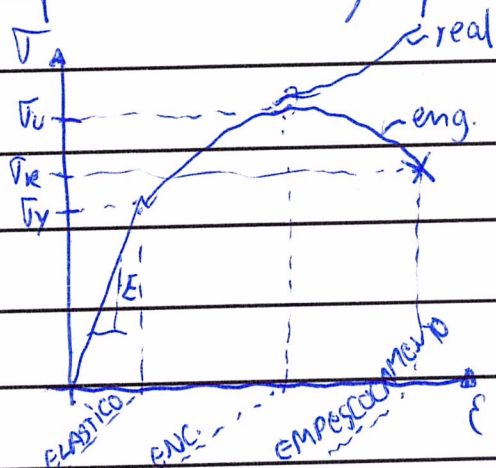
CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

LAUGP9

RESPOSTA QUESTÃO 1

①

No ensaio de tração, um corpo de prova é tracionado inicialmente na direção longitudinal até sua fratura. Durante o ensaio, a carga e o <sup>alongamento da</sup> comprimento são adquiridos e o gráfico tensão x deformação é gerado.



$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\epsilon = \ln \frac{l_f}{l_0}$$

A curva tensão x deformação de engenharia é traçada considerando a área inicial  $A_0$  do corpo de prova e a curva real a área instantânea. Após atingir o valor de  $\sigma_u$ , a resistência a tração, inicia-se o empescoamento da amostra caracterizado pela rápida diminuição de área. A curva de engenharia decai pois com a rápida diminuição de área, o carregamento fixo pela máquina, que é de acordo com a deformação, cai.

PROVA ESCRITA  
28/11/2022

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

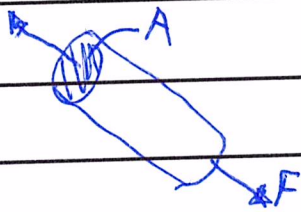
CAUSPQ

RESPOSTA QUESTÃO 1

A partir da curva, é possível calcular propriedades como tensão de escoamento, módulo de elasticidade, Tenacidade, resiliência, estricção etc.

Para o ensaio de tração uniaxial:  $\sigma_1 = F/A$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ .

A deformação  $\epsilon_1$  é dada, na região elástica, pela Lei de Hooke:  $\sigma_1 = E\epsilon_1$ .



$\epsilon_3 = \epsilon_2 = -\frac{\epsilon_1}{\nu}$ , onde  $\nu$  é o coef. de Poisson.

Assim:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\epsilon_1}{\nu} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\epsilon_1}{\nu} \end{bmatrix}$$

Aplicando os critérios de plasticidade, de Tresca e Mises, para o ensaio de tração, tem-se que:

Tresca:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y \Rightarrow \sigma_1 = \sigma_y$

PROVA ESCRITA  
28/11/2022

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

CAUSPQ

RESPOSTA QUESTÃO 1

3)

$$\text{Mises: } \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} = \sigma_y \Rightarrow \sigma_1 = \sigma_y$$

Enquanto a Lei de Hooke rege o comportamento elástico, a região plástica pode ser modelada pela Equação de Hollomon  $\bar{\sigma} = k \bar{\epsilon}^n$ , onde  $k$  é o coeficiente de resistência e  $n$  é o coeficiente de encruamento. Esse é um dos modelos que tentam prever o comportamento do material no encruamento.

Na região plástica:

$$d\epsilon_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \cdot \left( \sigma_1 + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{2} \right), \text{ onde } d\bar{\epsilon} \text{ e } \bar{\sigma} \text{ são, respectivamente a deformação efetiva e a tensão efetiva.}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2}$$

$$d\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} [(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2 + (d\epsilon_1 - d\epsilon_3)^2]^{1/2}$$

**PROVA ESCRITA**  
**28/11/2022**

**CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO**

LAUGP9

**RESPOSTA QUESTÃO 2**

①

O processo de forjamento é caracterizado pela compressão de um material entre as superfícies de uma ferramenta, sendo no forjamento livre utilizadas ferramentas alternas como placas planas, similar a um ensaio de compressão.

O método de cálculo de esforços mais simples utilizado para prever as pressões e esforços nos processos de conformação é o Método da Deformação Homogênea. Este método considera um processo ideal, onde toda energia (Trabalho) feito pela ferramenta sobre a peça foi utilizada para alteração geométrica ou deformação; não havendo perdas por atrito ou deformações redundantes. Para se considerar perdas no processo deve-se considerar uma eficiência e perdas percentuais no balanço das energias.

Para o caso de forjamento com atrito, pode ser usa

PROVA ESCRITA  
28/11/2022

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

LAUGP9

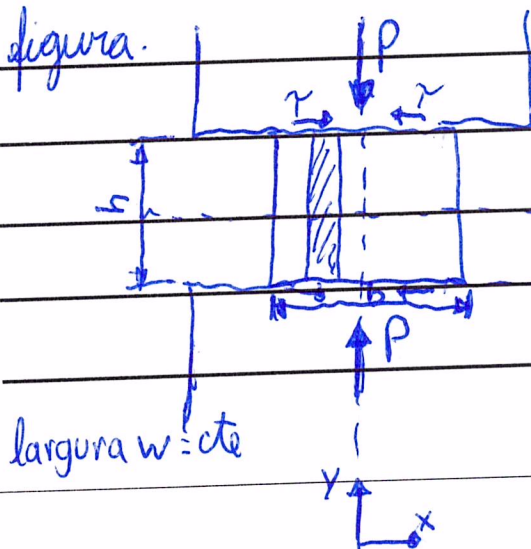
RESPOSTA QUESTÃO 2

2

do o Método dos Blocos. Ele é calculado através do equilíbrio de forças aplicadas a um infinitesimal localizado na região de deformação. O Método dos Blocos faz uso das seguintes considerações:

- \* as direções de aplicação de força no processo são consideradas como as direções principais;
- \* as forças variam predominantemente em uma direção;
- \* material isotrópico e deformação uniforme.

Assim, considera-se o processo de forjamento frio da figura.



Sabe-se que a pressão  $P$  aplicada à superfície da peça gera uma distribuição <sup>de carregamento</sup> onde o mínimo encontra-se nas fronteiras em  $x = \pm \frac{b}{2}$ . Este fato é com

PROVA ESCRITA  
28/11/2022

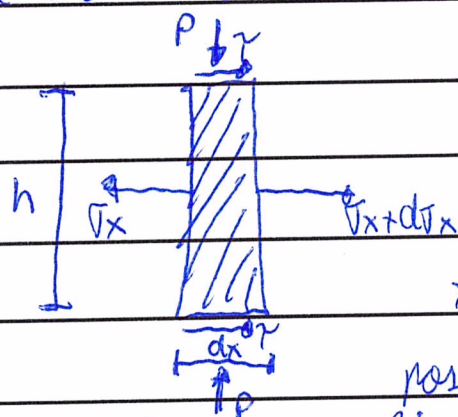
CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

LAUGPQ

RESPOSTA QUESTÃO 2

3

provada experimentalmente. Para esta análise, considera-se que o material não sofre deformação na sua largura ( $w = \text{cte}$ ), ou seja, trata-se de um estado plano de deformação. Isolando a região destacada na deformação e montando seu DCL:



Quando a peça é comprimida, o material tende a escaar para os lados, sendo que a porção em  $x$  positivo se movimenta no sentido positivo e a negativo no sentido negativo do eixo  $x$ . Isso gera uma força de atrito, contrária à movimentação, que muda de sentido, dependendo de onde se faz a análise. Levando à simetria do processo, basta fazê-la em um dos lados. O DCL foi feito em na região negativa de  $x$ .

PROVA ESCRITA  
28/11/2022

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

LAUGP9

RESPOSTA QUESTÃO 2

Fazendo o somatório das forças em  $x$  para a equi-  
libria, tem-se que:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (\bar{\sigma}_x + d\bar{\sigma}_x) \cdot hw + 2\tau dx w - \bar{\sigma}_x hw = 0$$

$$\bar{\sigma}_x hw + d\bar{\sigma}_x hw + 2\tau dx w - \bar{\sigma}_x hw = 0$$

Considerando o atrito Coulombiano:  $\tau = \mu p$

$$d\bar{\sigma}_x h + 2\mu p dx = 0 \quad (1)$$

Utilizando critério de plasticidade de Mises para  
o estado plano de deformação,  $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_y = S$ , sendo  
 $\bar{\sigma}_y$  a tensão de escoamento, tem-se que para o caso em  
questão  $\bar{\sigma}_1 = -p$  e  $\bar{\sigma}_2 = -\bar{\sigma}_x$ . Assim:

$$\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2 = S \Rightarrow$$

$$-p + \bar{\sigma}_x = S \Rightarrow p = \bar{\sigma}_x S \Rightarrow dp = d\bar{\sigma}_x \text{ já que } S \text{ é constante} \quad (2)$$



<b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b>	<b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b>
	LAUGPQ

**RESPOSTA QUESTÃO 2**

⑤

Fazendo (2) em (1):

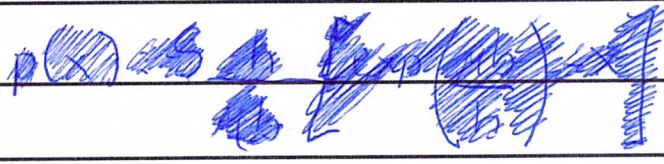
$$dp/h + 2\mu p dx = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dp}{p} = -\frac{2\mu}{h} dx$$

$$\text{Integrando: } \ln p = -\frac{2\mu}{h} x + C \quad (3)$$

Utilizando como condição de contorno a periferia da peça:  $x = \frac{b}{2}$ , onde  $\sigma_2 = 0$  e Mises leva a  $p = S$

$$\text{Resolvendo para } p \text{ encontra-se: } C = \ln S + \frac{\mu b}{h} \quad (4)$$

~~~~, onde:  $h$  é a altura da peça  
 $\mu$  é o coef. de atrito

De (4) em (3):

$b$  é o comprimento

$$S = 2/\sqrt{3} \sigma_y$$

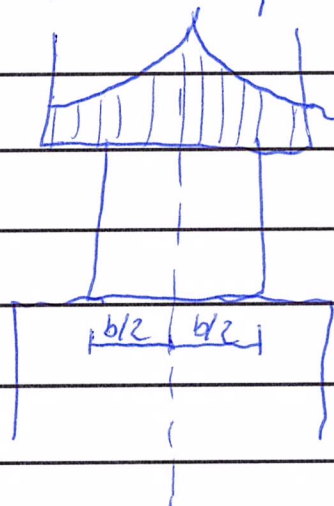
$$p(x) = S \cdot \exp\left[\frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x\right)\right] \quad (5) \quad x \text{ é a coord em } x$$

<b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b>	<b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b>
	LAU8P9

**RESPOSTA QUESTÃO 2**

(6)

Percebe-se que a pressão possui um valor mínimo em  $x = \pm \frac{b}{2}$  e máxima quando  $x = 0$ , levando a um gráfico de pressão do tipo



Pode-se calcular a pressão total tal integrando a Eq. 5 de  $-b/2$  a  $b/2$ :

$$P_T = \int_{-b/2}^{b/2} p(x) dx = 2 \cdot \int_0^{b/2} p(x) dx$$

A pressão média é dada pela pressão total dividida pela área  $bw$ .

<b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b>	<b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b>
	LAU8P9

**RESPOSTA QUESTÃO 3**

①

Os desgastes em ferramentas de corte podem ser classificados de duas formas. Uma considerando a região da ferramenta em que ele ocorre e seu formato (cratera, flama, entalhe, ponta) e outra considerando os fenômenos físico-químicos que os ocasionam. Os três principais fenômenos são descritos abaixo:

- desgaste por abrasão - o desgaste por abrasão envolve o atrito gerado pelo contato com movimentos relativos das superfícies da ferramenta com partículas envolvidas na operação de usinagem. Essas partículas podem ter a origem diversas: do <sup>material</sup> cavaco, dos materiais da ferramenta ou da peça, impurezas no fluido de corte, entre outros.

Uma forma de cálculo desse tipo de desgaste é dada por:

$$v = K_w \cdot N \cdot L_s$$

onde  $v$  é o volume de desgaste;  $N$  é a carga normal à sup. de deslizamento;  $L_s$  é o comprimento de deslizamento e  $K_w$  a dureza do material da ferramenta.

<b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b>	<b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b>
	LAUGP9

**RESPOSTA QUESTÃO 3**

②

Outra forma para prevenir esse tipo de desgaste pode-se usar um material mais duro para a ferramenta. O aumento da velocidade de corte leva a um aumento no desgaste pois o comprimento do deslocamento da cavaca aumenta e a dureza diminui porque a temperatura aumenta.

O desgaste por abrasão é mais comum nos desgastes de cratera e flanco.

Desgaste por adesão - o desgaste por adesão envolve o agarramento da cavaca nas superfícies da ferramenta que, quando se desloca, acaba levando pequenas partes de material da ferramenta. Este tipo de desgaste também costuma ser modelado por uma equação do tipo apresentada para o desgaste de por abrasão.

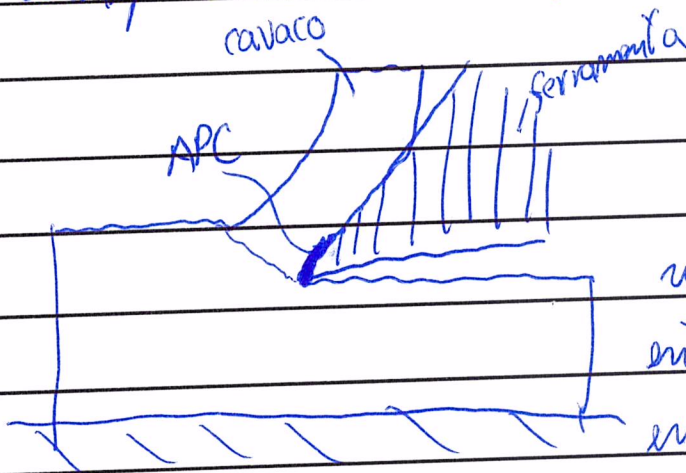
O desgaste por adesão ocorre, principalmente, em materiais mais dúcteis, havendo, inclusive, a possibilidade de ocorrência da aresta positiva de corte (APC). A APC ocorre quando há

<p><b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b></p>	<p><b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b></p>
	<p>LAUGP9</p>

**RESPOSTA QUESTÃO 3**

agarramento de material do cavaco na ponta da ferramenta por solda e suficiente para alterar a geometria da aresta mudando a mecânica do corte. Este tipo de desgaste ocorre especialmente em velocidades muito baixas, mas pode acontecer também com velocidades muito altas que podem aumentar a ductilidade do material da peça devido ao aumento de temperatura.

O desgaste por adesão gera principalmente o desgaste de cratera, pois é na superfície de saída que ocorre o deslizamento do cavaco.



Desgaste por difusão - este tipo de desgaste envolve a transferência de átomos entre cavaco e ferramenta ou entre a peça e a ferramenta.

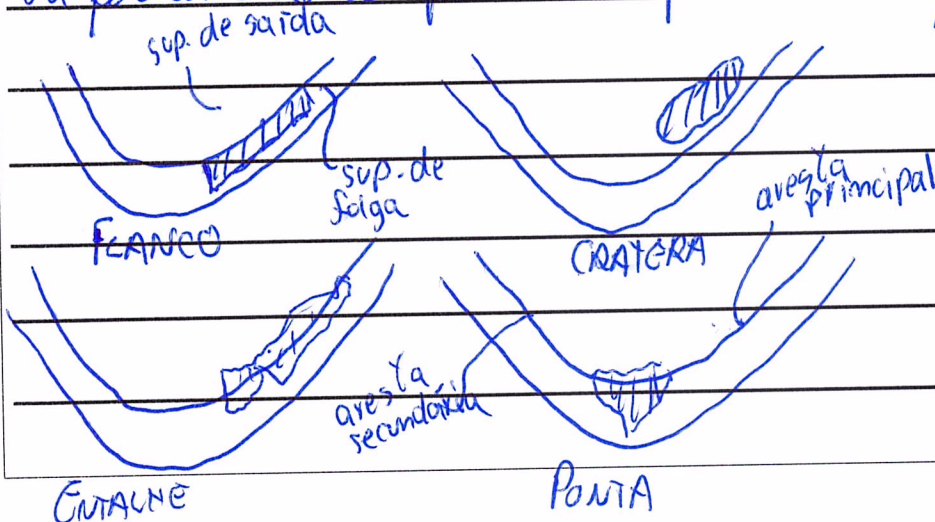
<b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b>	<b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b>
	LAUGPA

**RESPOSTA QUESTÃO 3**

4

O desgaste por difusão vai depender da solubilidade entre os materiais da ferramenta e da peça. Por exemplo, na usinagem do aço AISI 316 <sup>com metal duro</sup> pode ocorrer o transporte de átomos de W para a peça. O aumento de velocidade costuma aumentar o desgaste por difusão já que este é iniciado, principalmente, devido à altas temperaturas e pressão que fazem o gatilho para a difusão substitucional ou intersticial. As Leis de Fick regem o fenômeno de difusão.

Os desgastes são classificados de acordo com a região da ferramenta conforme o esquema a seguir.



**PROVA ESCRITA**  
**28/11/2022**

**CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO**

LAUGPA

**RESPOSTA QUESTÃO 4**



As ferramentas de corte são utilizadas nos processos de usinagem para dar as dimensões, acabamentos e tolerâncias demandadas por projeto à peça que está sendo fabricada. Porém, mesmo utilizando parâmetros de corte adequados, assim que o processo de corte se inicia, a ferramenta começa a sofrer desgaste devido ao contato com movimento relativo entre as superfícies e arestas da ferramenta com o cavaco sendo deformado e retirado e com a superfície usinada. Esse desgaste é, ainda, acelerado devido às condições em que esse contato ocorre: altas temperaturas e pressões.

Nessa forma, chega um momento durante o corte em que a ferramenta não atinge mais as especificações de projeto e precisa ser trocada por uma nova ou afiada, quando possível. Assim, a vida útil de uma ferramenta de corte representa o tempo que ela lavora, em corte, pa

**PROVA ESCRITA**  
**28/11/2022**

**CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO**

LAUGPA

**RESPOSTA QUESTÃO 4**

②

ra necessitar de troca. O fim da vida de uma ferramenta pode acontecer devido ao desgaste progressivo até atingir um limite, ~~mas também pode ocorrer a falha que se pode ser definido previamente, mas também podem ser utilizadas outras variáveis para defini-la.~~ Por exemplo, em um processo produtivo, torna-se inviável que se pause as operações para analisar o desgaste da ferramenta, sendo necessário o uso de outras formas de estimar o tempo de uso das ferramentas já que também não é possível guardar que as peças começam a ser fabricadas fora de padrões para que a troca ocorra.

É usual a realização de ensaios experimentais de fim de vida para definir, sob condições específicas (parâmetros de corte, material usinado, processo utilizado etc.) que a vida de uma ferramenta. Nesses ensaios, uma amostra é usinada e de tempos em tempos (por exemplo, de 60s a 60s)



<b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b>	<b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b>
	LAUGP9

**RESPOSTA QUESTÃO 4**

3

O corte é pausado e o desgaste medido. Isso é feito até que o desgaste atinja o critério de fim de vida especificado para o ensaio. Esse tipo de ensaio é conhecido por ensaios curtos enquanto os longos são feitos com o fim de vida sendo a falha da ferramenta, porém estes são de morador e curtos. A norma ABNT 3685 estabelece alguns critérios de vida relacionados, principalmente, aos desgastes de flanco e cratera. A Figura 4.1a e Figura 4.1b apresentam dimensões de medição para o desgaste de cratera e de flanco, respectivamente.

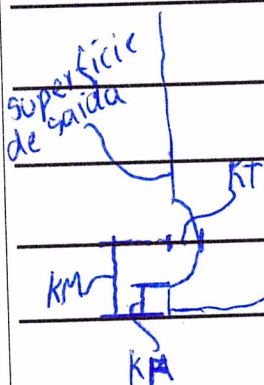


Figura 4.1a

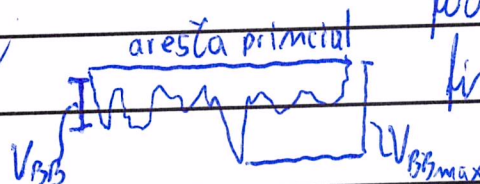


Figura 4.1b

A norma diz que a ferramenta chegou ao fim de vida quando uma das condições abaixo ~~são~~ é a atingida:

**PROVA ESCRITA**  
**28/11/2022**

**CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO**

LAU8P9

**RESPOSTA QUESTÃO 4**

④

1-  $V_{AB}$  médio = 0,3  $\Rightarrow$  desgaste de flanco regular

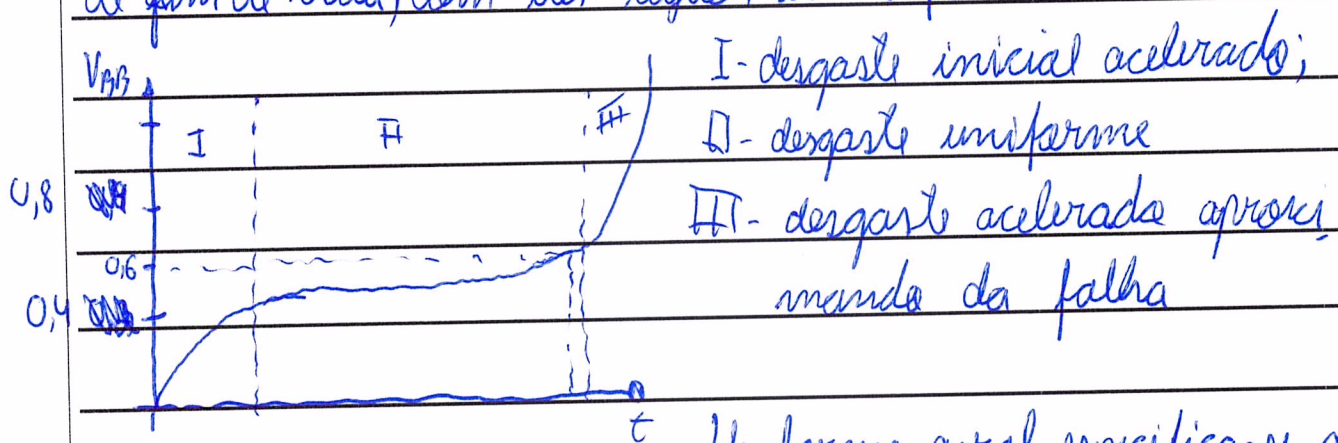
2-  $V_{ABmax}$  = 0,6  $\Rightarrow$  desgaste de flanco não regular

3-  $K_T = 0,06 \times 0,3f$ , onde  $f$  é o avanço da ferramenta

4-  $K_F = 0,2$

5-  $K_F/K_M = 0,1$

A Figura 4.2 apresenta um gráfico típico de um ensaio de vida, considerando o desgaste de flanco como critério de fim de vida, com três regiões bem definidas:



De forma geral, especifica-se a vida da ferramenta pela  $V_c$  (velocidade de corte) usada no ensaio:

$V_c = 30 \text{ m/min} \Rightarrow T_{30}$ . Usualmente, tem-se que a vida diminui

PROVA ESCRITA  
28/11/2022

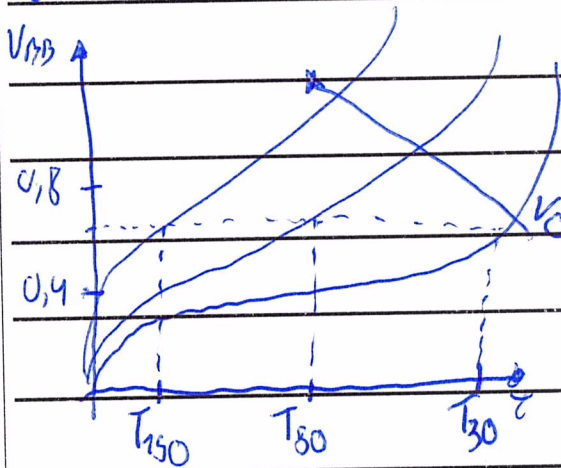
CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO

LAU8P9

RESPOSTA QUESTÃO 4

5

com o aumento da velocidade, como na Figura 4.3.



$$T_{150} < T_{80} < T_{30}$$

Além do desgaste da ferramenta, a norma 3685 fala sobre utilizar a rugosidade da superfície usinada e as forças envolvidas no processo.

Sobre as forças de usinagem, o Critério de Schlesinger diz que o fim de vida é atingido caso a força passe de 10% dos seus valores iniciais. Como é sabido, de forma geral, o aumento no desgaste leva a um aumento nas forças, em especial a de flanco. A rugosidade também pode ser usada definindo-se um certo valor crítico.

Outras formas de analisar o fim de vida envolvem, ainda, a temperatura durante o corte e a calorificação da cavaca. Há também modelos que relacionam a emissão acústica produzida durante o corte para prever o desgaste, como can

<b>PROVA ESCRITA</b> <b>28/11/2022</b>	<b>CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO</b>
	LAU8P9

**RESPOSTA QUESTÃO 4**

6

sequências, e fim da vida útil.

Entretanto, como comentado, durante o processo produtivo, no chão de fábrica, é comum a definição do fim de vida da ferramenta usando tabelas ou indicações do fabricante ou, ainda, realizar ensaios como os mencionados para definir uma vida de ferramentas que não gere refugos, mas também não haja trocas desnecessárias.

Um modelo bastante usado para a vida da ferramenta é a Equação de Taylor, que varia com a velocidade de corte e possui constantes de acordo com as condições envolvidas da peça e ferramenta.

$$V_c \cdot T^x = C$$

, onde  $x$  e  $C$  são constantes

$V_c$  é a velocidade de corte

$T$  é a vida da ferramenta