

ESTUDO DO PROCESSO DE QUINAGEM PARA APLICAÇÃO PRÁTICA EM PROGRAMAÇÃO CNC DE QUINADORAS

STUDY OF PRESS BENDING PROCESS WITH APPLICATION ON CNC PROGRAMING

Rui Amaral¹, Abel D. Santos^{1,2}, J. Bessa Pacheco², Sara Miranda²

¹ INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto

² FEUP - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto



RESUMO

A quinagem é um processo de conformação plástica de chapas metálicas cuja interpretação geométrica é das mais simples, mas em que o controlo da geometria final pode ser complexo em virtude da interação de diferentes variáveis, quer do processo, quer da geometria das ferramentas utilizadas. O processo de quinagem consiste na dobragem de uma chapa metálica por meio de um punção, que força a chapa contra uma matriz com uma secção em V, sendo o resultado desta dobragem uma peça com um ângulo formado pelas abas, denominado ângulo de quinagem. A operação para obter o ângulo requerido efetuado por um deslocamento do punção é designada por quinagem ao ar. No entanto, a quantidade de penetração para alcançar o ângulo pretendido depende do raio natural de quinagem e da quantidade de recuperação elástica que ocorre depois de retirar as ferramentas. Neste artigo, os resultados apresentados descrevem o uso da análise por elementos finitos como uma ferramenta na previsão do ângulo natural de quinagem, assim como no retorno elástico respetivo, ambos influenciados pela penetração do punção necessário para se obter o ângulo final de quinagem. São ainda considerados resultados experimentais para validação e avaliação da metodologia usada.

ABSTRACT

Press Brake bending is a sheet metal plastic deformation process in which the geometric interpretation is simple, but the control of final geometry can be complex due to the interaction of different variables, either from the process or from the geometry. This procedure consists in bending the sheet metal to obtain a V-shape. The result of this bending is a part with an angle formed by the flanges, called bending angle. However, the amount of penetration to achieve the desired angle depends on the sheet natural bending radius and the amount of elastic recovery that occurs after removing the tool. In this article, the results presented describe the use of finite element analysis as a tool to predict the natural bending angle, as well as the respective springback. For validation and evaluation of the methodology, experimental results are considered.

1. INTRODUÇÃO

A dobragem linear é uma das operações industriais mais comuns. Esta pode ser encontrada em vários utensílios do quotidiano, como aparelhos elétricos,

máquinas de lavar, frigoríficos e fornos, caixas de computador, em geradores eólicos, torres de iluminação, etc. A principal vantagem ao utilizar dobragens em componentes é a rigidez adicional que lhes é conferida.

Para conformar este tipo de componentes é necessário uma máquina designada de quinadora. Hoje em dia a maioria dessas máquinas são equipadas com controlo CNC. Este controlo serve para programar a execução das peças mais variadas sem a troca frequente das ferramentas, pois o conceito de quinagem no ar permite flexibilidade.

Como consequência, é primordial o conhecimento mais completo e o entendimento sobre este processo de dobragem, para que a realização do componente seja possível preferencialmente numa única tentativa.

1.1. Processo de quinagem no ar

A quinagem no ar é o processo de dobragem mais usual e consiste em fazer uma dobra linear, geralmente longa quando comparada com a espessura, partindo de uma chapa plana forçando-a com um punção contra uma matriz aberta, que a segura, como representado na Fig. 1. Nesta figura, é possível observar que a dobragem linear tem a forma em V de ângulo variável α .

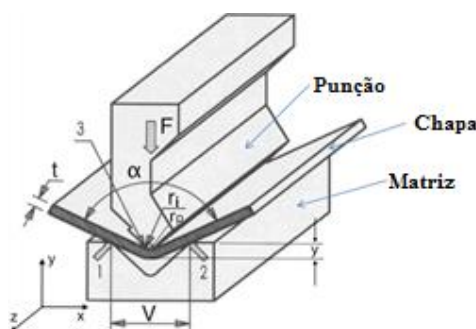


Fig. 1 - Variáveis principais do processo de quinagem.

Ao assumir este modelo 2D mostrado na Fig. 2, é possível, através de uma triangulação geométrica, definir a penetração necessária do punção, y , para obter o ângulo, α , desejado.

A Eq. (1) mostra uma relação habitual entre as variáveis e parâmetros da quinagem (Pacheco e Santos 2011; Pacheco e Santos 2013; Rodrigues *et al* 2005):

$$y = \frac{V}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_i + t) \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (1)$$

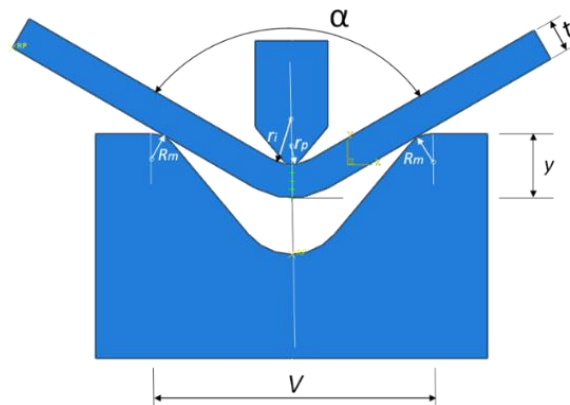


Fig. 2 - Representação 2D do processo de quinagem.

No entanto, alguns autores, como De Vin (De Vin e Streppel 1994; De Vin e Streppel 1996; De Vin 1994; De Vin 2000) usando o seu modelo rígido plástico, consideram que o raio do punção (r_p) impõe o raio interno de dobragem (r_i) na área central da chapa, designando este modelo por *wrap-around*, sendo a penetração do punção (y) em função do ângulo de dobragem (α), definida como:

$$y = \frac{V}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_p + t) \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

Outra abordagem é proposta por J. Bessa Pacheco (Pacheco *et al* 2013), cujo raio da matriz (r_m) é tido em consideração:

$$y = \frac{V}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_i + t + r_m) \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (3)$$

Adicionalmente, são consideradas algumas regras práticas pelos fabricantes de quinadoras (Pacheco *et al* 2011), sem liberdade de escolha de qualquer abertura da matriz. Esta regra relaciona a abertura da matriz, V , e a espessura da chapa, t , sendo expressa por:

$$V = k_{vt} \cdot t \quad (4)$$

em que k_{vt} varia entre 6 a 10 conforme o fabricante. Por outro lado, sugere-se que o raio interno (r_i) esteja relacionado com a abertura de V , através de:

$$r_i = \frac{V}{6.4} \quad (5)$$

2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA, PROCESSO E MATERIAIS

2.1. Análise pelo Método dos Elementos Finitos

A Fig. 3 ilustra o modelo de elementos finitos usado para as diferentes combinações estudadas.

Na Tabela 1 são apresentadas as combinações, bem como as dimensões da chapa e os parâmetros da geometria das ferramentas, punção e matriz. Devido à simetria, somente metade do modelo real é considerado.

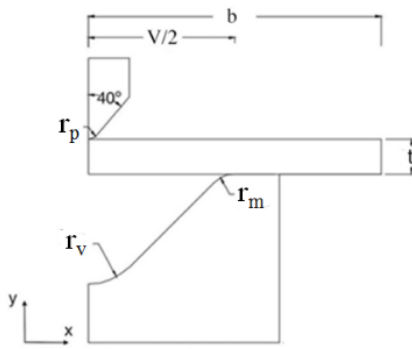


Fig. 3 - Modelo numérico usado na análise de elementos finitos.

Tabela 1 - Combinações e dimensões das ferramentas e chapa usadas.

V [mm]	b [mm]	r _m [mm]	Espessura t [mm]					
			1	2	3	4	5	6
11.5	15	1	X	X	X			
18.3	25	1.5	X	X	X	X		
23.0	35	2	X	X	X	X	X	X
34.2	50	3	X	X	X	X	X	X
43.7	50	4	X	X	X	X	X	X
53.7	50	4	X	X	X	X	X	X

É usado um modelo 2D de elementos finitos, onde a chapa metálica tem uma discretização usando elementos sólidos deformáveis de 4 nós (CPE4R da biblioteca do ABAQUS®). A chapa metálica para as diferentes espessuras tem uma discretização de 9 camadas ao longo desta, perfazendo um total de 450 elementos sólidos. O punção e a matriz são modelados como superfícies analíticas rígidas. O processo de quinagem faz uso de uma análise dinâmica (ABAQUS/Explicit).

2.2. Diagrama Vt

Ao realizar operações de quinagem existem algumas relações entre as variáveis expressas, por exemplo através da Eq. (4) e (5), que devem ser utilizadas ou de outra forma a dobragem não será a ideal. Para ilustrar e interpretar os resultados quando se têm diferentes relações, é útil um diagrama que relaciona a abertura de matriz (V) e a espessura (t) da chapa, denominado aqui por diagrama Vt. A Fig. 4 representa assim as combinações das ferramentas e chapas usadas na Tabela 1 onde cada ponto corresponde a uma quinagem para um dado V e t .

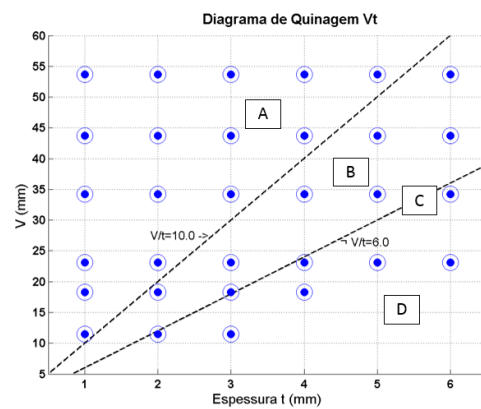


Fig. 4 - Diagrama Vt definindo diferentes relações entre V e t .

2.3. Materiais

Nos estudos aqui apresentados são usados dois materiais, que correspondem a diferentes classes de tensão de rotura, como referido na norma DIN6935. Os aços são caracterizados de acordo com a Lei de Swift e os parâmetros correspondentes, tais como as propriedades mecânicas, são apresentadas na Tabela 2.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS E ANALÍTICOS

3.1. Comparação das diferentes abordagens analíticas

Nesta secção, as diferentes equações analíticas expressas pela Eq. (1), (2) e (3) são usadas para reproduzir a evolução do ângulo de quinagem com o deslocamento do punção, sendo comparadas com os resultados obtidos por simulação numérica.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais estudados.

	Aço MS	Aço DP590
Módulo de elasticidade E [GPa]	210	210
Coefficiente de Poisson ν	0.3	0.3
Tensão de cedência Rp02 [MPa]	157	393
Tensão de rotura Rm [MPa]	294	641
Extensão após rotura A [%]	48	24
Lei constitutiva σ [MPa]	Swift $\sigma=k(\epsilon_0+\epsilon)^n$	
	k= 610	k= 1000
	$\epsilon_0=0,0013$	$\epsilon_0=0,0024$
	n= 0,3056	n= 0,155

A comparação é feita utilizando os materiais apresentados na Tabela 2, para diferentes espessuras de chapa utilizando a mesma abertura V ($V = 23,1$ mm).

Como se pode observar na Fig. 5 e Fig. 6, a equação analítica proposta por J. Bessa Pacheco, Eq. (3), representa melhor a evolução

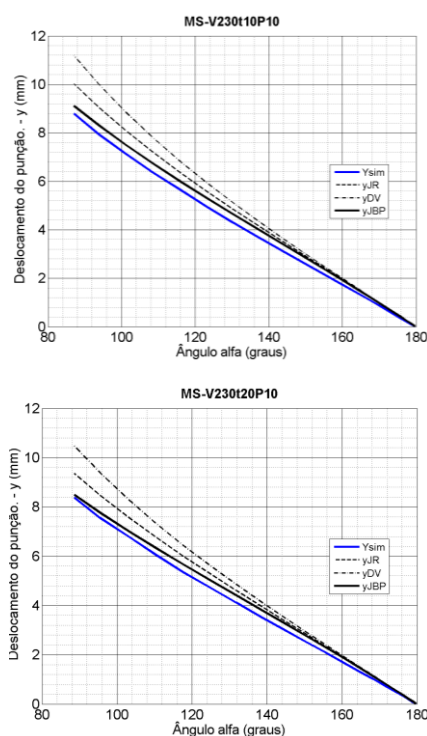


Fig. 5 - Comparação entre as diferentes equações analíticas para o aço MS.

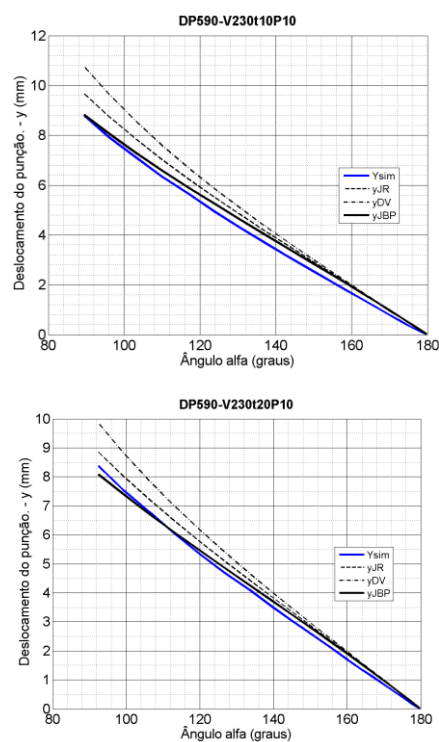


Fig. 6 - Comparação entre as diferentes equações analíticas para o aço DP590.

evolução obtida a partir do modelo de elementos finitos, para as diferentes combinações estudadas do diagrama de Vt .

Esta equação inclui o raio da matriz (r_m), sendo uma variável importante para uma melhor precisão na previsão de $y=f(\alpha)$. Por esta razão, a Eq. (3) ($yJBP$) será utilizada para a análise analítica nos próximos resultados apresentados.

3.2. Limites de Quinabilidade

A Fig. 4 contém relações práticas, entre a abertura da matriz e a espessura da chapa a quinar, diferenciando quatro zonas de trabalho, mas que nem todas elas devem ser utilizadas para o processo de quinagem.

A zona recomendada de trabalho situa-se para uma relação V/t entre 6 e 12 (zonas B e C). Os componentes produzidos na zona A, para $V/t > 10$, tem como características áreas de curvatura maiores, cujo retorno elástico é superior. Por outro lado devem ser evitadas relações V/t inferiores a 6 (zona D), pois são propícias ao aparecimento de deformações localizadas nas zonas de contacto quer da chapa com a matriz, quer da chapa com o punção, como se representa na Fig. 7, havendo ainda a possibilidade de danos por fratura.

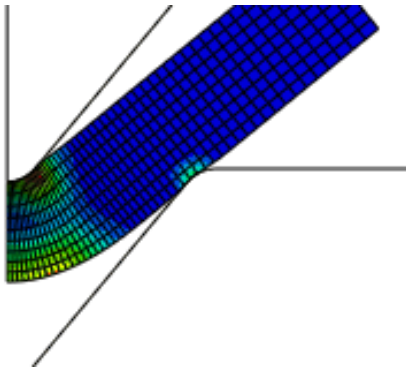


Fig. 7 – Deformação localizada causada pelo “esmagamento” do punção na chapa metálica.

Para verificação destas relações práticas, são escolhidos dois pontos do diagrama, um que se situa na zona A e outro na zona D, para cada material, cujos resultados de quinagem estão apresentados na Fig. 8 e Fig. 9.

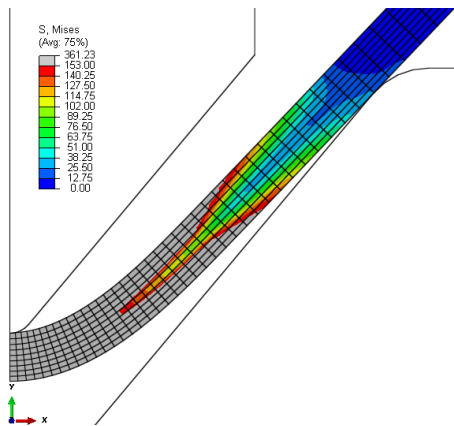


Fig. 8 – Contorno de tensões do aço MS, para $V=34.2$ mm e $t=2$ mm (zona A).

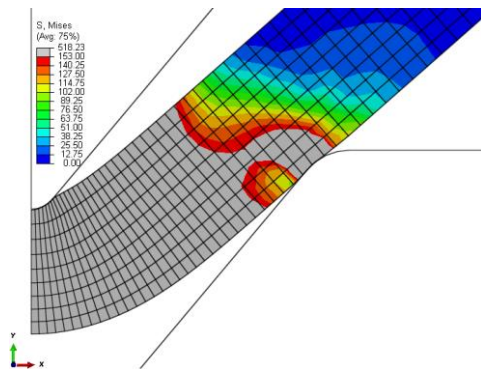


Fig. 9 – Contorno de tensões do aço MS, para $V=23.1$ mm e $t=5$ mm (zona D).

Como se pode observar, um $V/t > 12$ (Fig. 8) causa maiores zonas de dobragem enquanto um $V/t < 6$ pode causar esmagamento ou deformação localizada junto do

punção ou matriz, Fig. 9. O mesmo se pode concluir com a análise da Fig. 10 e Fig. 11 para o aço DP590, cuja mesma deformação localizada está presente.

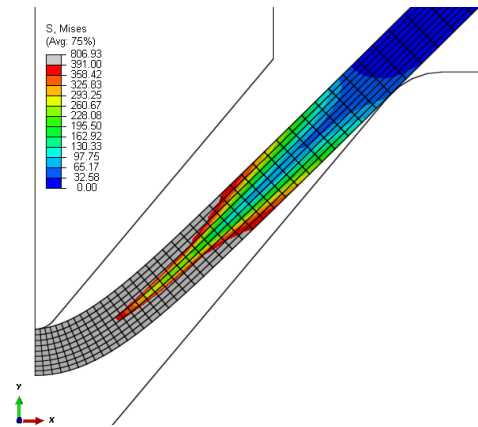


Fig. 10 – Contorno de tensões do aço DP590, para $V=34.2$ mm e $t=2$ mm (zona A).

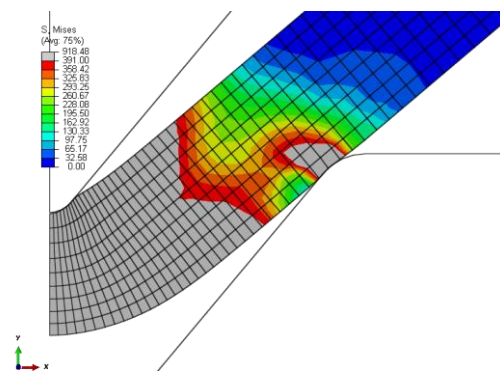


Fig. 11 – Contorno de tensões do aço DP590, para $V=23.1$ mm e $t=5$ mm (zona D).

3.3. Análise da força do punção

Para a análise de força do punção, é feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos e as seguintes expressões provenientes da SSAB (SSAB 2006) e da norma DIN 6935 (Deutsche Normen 1975; Rodrigues *et al* 2005), respetivamente:

$$F_{SS} = 1.6 \cdot b \cdot t^2 \cdot \frac{R_m}{V} \quad (6)$$

$$F_{DIN} = \left(1 + 4 \cdot \frac{t}{V}\right) \cdot R_m \cdot \frac{b \cdot t^2}{V} \quad (7)$$

Uma primeira abordagem para esta comparação é feita usando como material de estudo o aço MS.

A análise dos resultados da Fig. 12 e Fig. 13, mostra que as curvas obtidas pelas expressões analíticas são muito próximas, sendo a Eq. (7), proposta pela norma DIN 6935, a que mais se aproxima dos resultados numéricos. A fim de verificar a anterior conclusão, o mesmo tipo de análise é feita para o aço DP590.

Com a análise da Fig. 14 e Fig. 15, verifica-se que a Eq. (7) está mais ajustada para as zonas limite de quinabilidade.

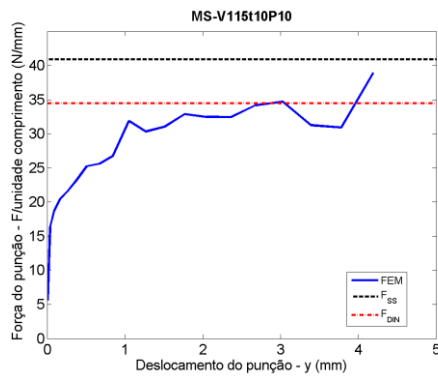


Fig. 12 - Comparação da força do punção para o aço MS (V=11.5 mm e t=1 mm)

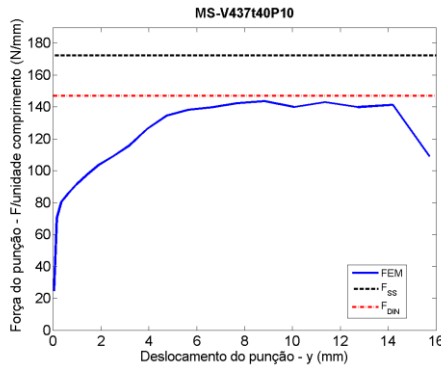


Fig. 13 - Comparação da força do punção para o aço MS (V=43.7 mm e t=4 mm)

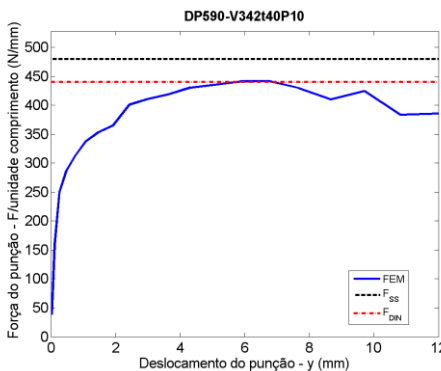


Fig. 14 - Comparação da força do punção para o aço DP590 (V=34.2 mm e t=4 mm)

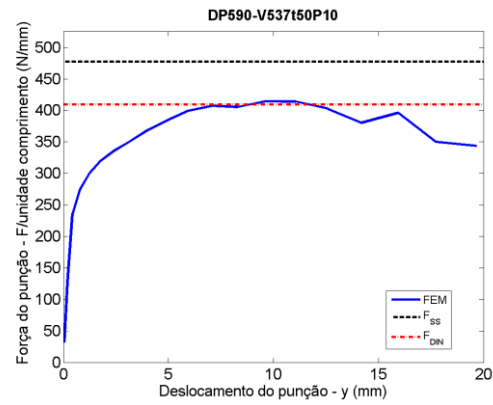


Fig. 15 - Comparação da força do punção para o aço DP590 (V=53.7 mm e t=5 mm)

Se for considerada uma área de contacto de referência entre o punção e a chapa, é possível obter a pressão do punção, traduzida por:

$$P_{punção} = \frac{F_{punção}}{A_{ref}} \quad (8)$$

A evolução da pressão do punção para diferentes relações entre V/t^2 , para o aço MS está presente na Fig. 16.

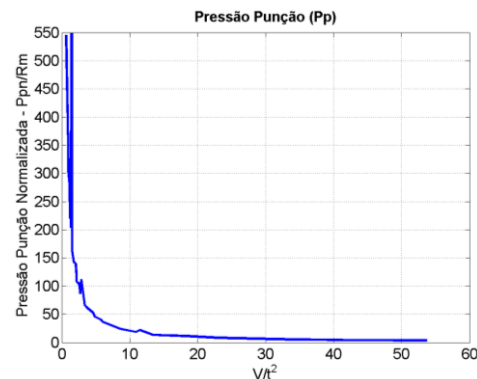


Fig. 16 - Pressão do punção para diferentes V/t^2 para o aço MS.

Adicionalmente, se forem tidas em consideração a tensão de rotura R_m do material, é possível obter um valor de pressão do punção normalizada, através de:

$$P_{punção_{norm}} = \frac{P_{punção}}{R_m} \quad (9)$$

A Fig. 17 representa a evolução da força do punção normalizada para diferentes relações V/t^2 e para os dois materiais aqui estudados.

A pressão normalizada para o aço MS e para o aço DP590 é de 0.42 (Fig. 17).

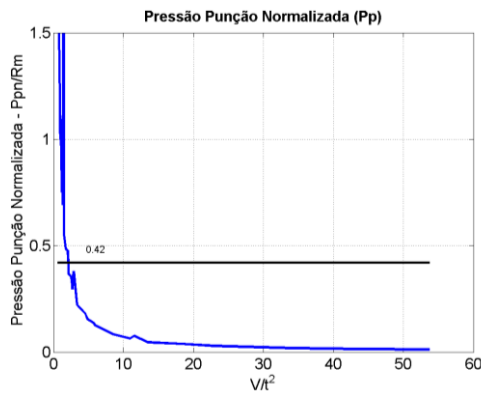


Fig. 17 - Pressão do punção normalizada para diferentes V/t^2 , para o aço MS.

Após a análise dos vários resultados obtidos para cada ponto do diagrama Vt (Fig. 4), verifica-se que a relação entre a abertura da matriz e a espessura da chapa é dada por:

$$V = k \cdot t^2 \quad (10)$$

em que k é a constante que define o limite de quinagem sem esmagamento, sendo o seu valor de 2.8.

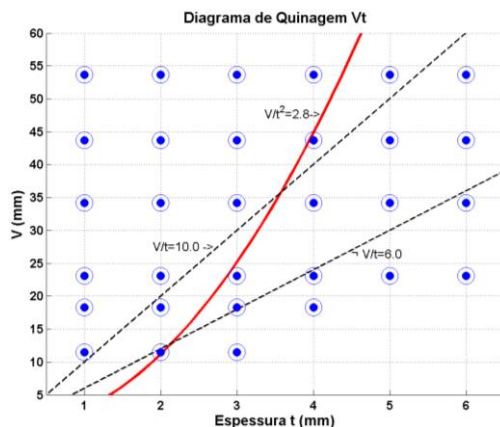


Fig. 18 - Relações V/t^2 para o aço MS e o aço DP590.

3.4. Retorno elástico

O retorno elástico consiste na modificação da geometria da dobragem após a remoção das ferramentas. Isto ocorre porque a chapa, depois de ser quinada para um determinado ângulo, vai alterar a sua curvatura e ângulo de quinagem, após a libertação dos momentos instalados, como mostra a Fig. 19.

O retorno elástico é dado pela diferença entre ângulo após recuperação elástica (peça retirada da ferramenta) e o ângulo de

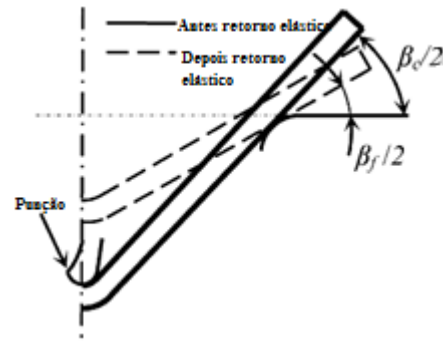


Fig. 19 - Retorno elástico no processo de quinagem ao ar.

quinagem (peça em contacto com as ferramentas). Esta diferença é dependente do material (características mecânicas e espessura), da geometria da ferramenta e do próprio ângulo de quinagem.

Os resultados de retorno elástico para o aço MS, apresentados na Fig. 20 e Fig. 21, e para o aço DP590, apresentados na Fig. 22 e Fig. 23 mostram, que a variação de retorno elástico é semelhante, quando a relação V/t é constante.

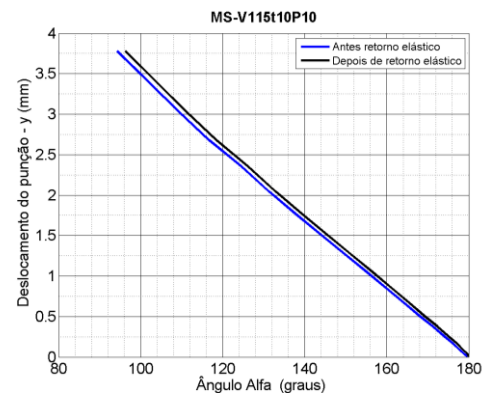


Fig. 20 – Evolução do ângulo de quinagem, antes e depois de retorno elástico, para o aço MS ($V=11.5$ mm e $t=1$ mm)

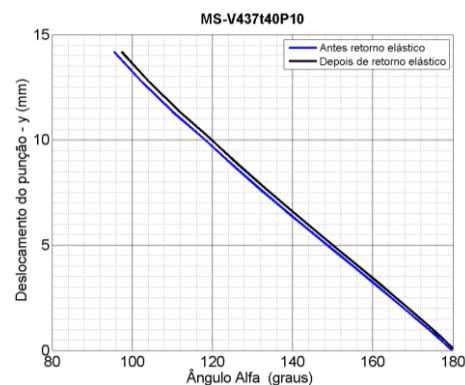


Fig. 21 - Evolução do ângulo de quinagem, antes e depois de retorno elástico, para o aço MS ($V=43.7$ mm e $t=4$ mm)

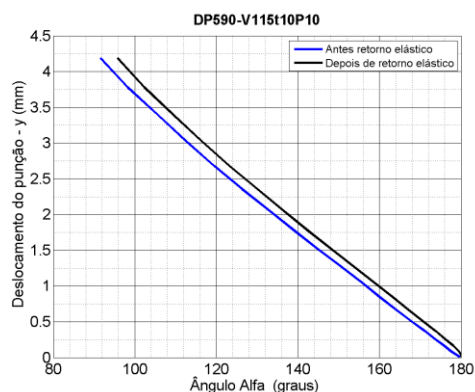


Fig. 22 - Evolução do ângulo de quinagem, antes e depois de retorno elástico, para o aço DP590 ($V=11.5$ mm e $t=1$ mm)

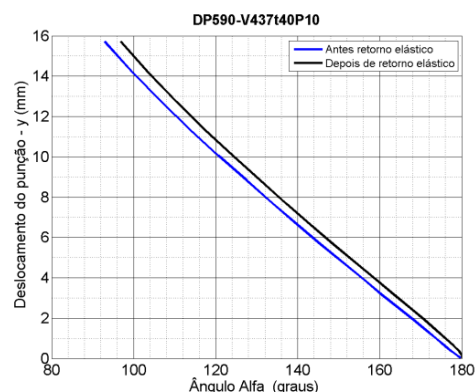


Fig. 23 - Evolução do ângulo de quinagem, antes e depois de retorno elástico, para o aço DP590 ($V=43.7$ mm e $t=4$ mm)

A alteração da relação V/t conduz a resultados de retorno elástico diferentes. Assim na Fig. 24 para as três relações de V/t apresentadas: $V/t=14.5$ (V437t30P10), $V/t=10.9$ (V437t40P10) e $V/t=8.7$ (V437t50P10), podemos verificar que o retorno elástico vai diminuindo à medida que a relação V/t também diminui. Esta observação está de acordo com a análise anteriormente realizada sobre as zonas do diagrama Vt , em que maiores V/t dão origem a maiores zonas de dobragem (maior retorno elástico) e menores V/t conduzem a menores zonas de dobragem (menor retorno elástico), podendo-se obter eventualmente zona de esmagamento do punção.

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A realização de ensaios experimentais do processo de quinagem, incidiu na verificação do ângulo de quinagem obtido pelas abas para

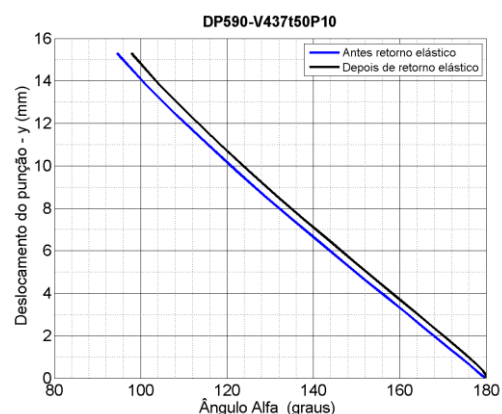
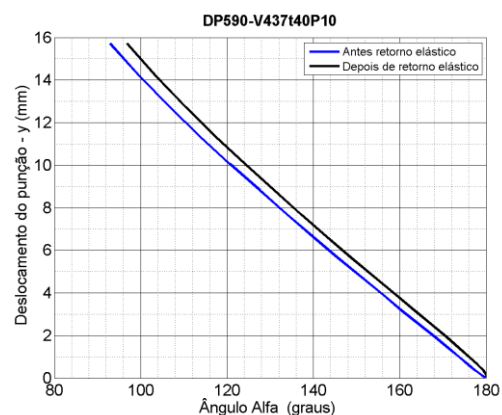
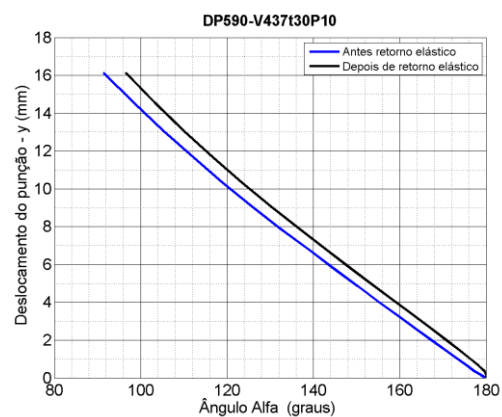


Fig. 24 - Evolução do ângulo de quinagem, antes e depois de retorno elástico, para o aço DP590 com abertura de matriz constante ($V=43.7$ mm e $t=3, 4$ e 5 mm)

um determinado deslocamento do punção e o respetivo retorno elástico, e ainda sobre a evolução da força do punção durante a quinagem. O material usado foi o aço DP590 cuja caracterização já foi definida na Tabela 2.

Os ensaios foram realizados com uma abertura de matriz de 11.5 mm e raio de matriz de 1 mm, para um punção com raio de 1 mm. A largura dos provetes é de 50 mm, sendo a sua espessura de 0.6 mm. Os valores obtidos da força do punção com o seu deslocamento mostram-se na Fig. 25.

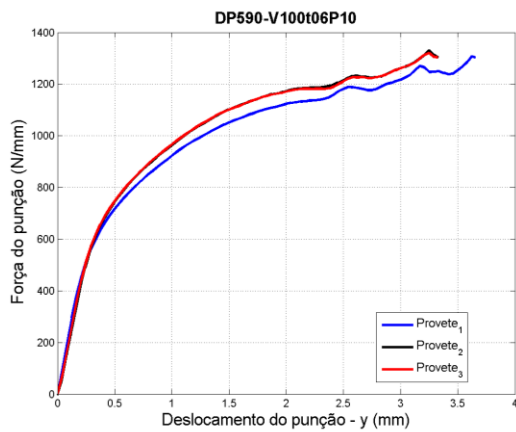


Fig. 25 - Evolução da força do punção com o seu deslocamento.

Na Fig. 26 compara-se a curva de evolução experimental da força do punção, com a força do punção obtida, quer analiticamente, quer numericamente.

Os resultados obtidos são bastante próximos, dando indicação que o modelo numérico representa o ensaio experimental. A Eq. (7) adequa-se novamente para a obtenção da força máxima do punção.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente para o ângulo de quinagem (antes e depois de retorno elástico), para um determinado deslocamento do punção.

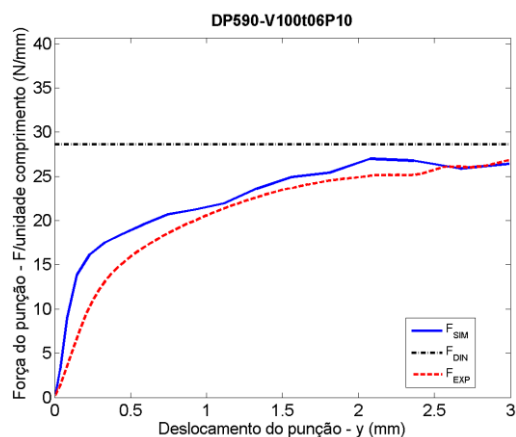


Fig. 26 - Comparação da curva da força do punção numérica e analítica com a obtida experimentalmente.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo está apresentada uma proposta de análise dos processos de quinagem com o uso de um diagrama V_t .

Tabela 3 - Resultados dos ensaios experimentais para o aço DP590.

Proвете	Deslocamento do punção y - [mm]	Ângulo antes retorno elástico [°]	Ângulo depois retorno elástico [°]
1	3.65	100	107
2	3.32	107	114
3	3.32	107	114

A Fig. 27 representa a comparação dos resultados $y=f(\alpha)$ obtidos numericamente, com os resultados obtidos experimentalmente (Tabela 3).

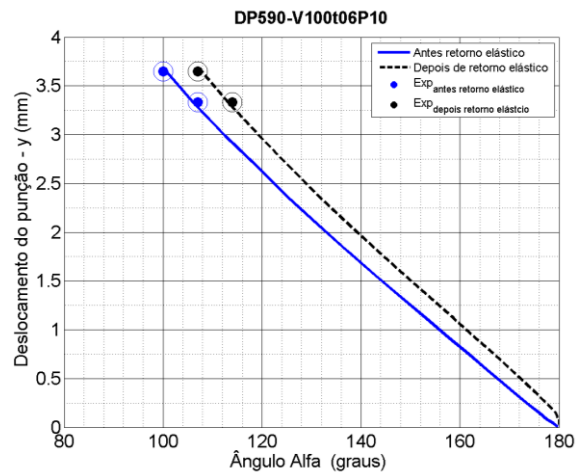


Fig. 27 - Comparação da curva de evolução do ângulo com o deslocamento do punção numérica e experimental, antes e depois de retorno elástico.

Com base neste diagrama é possível considerar as zonas ótimas de quinagem e definir as zonas com dobragem excessiva ou quinagem com problemas de esmagamento pelo punção.

Adicionalmente considera-se uma análise de forças de quinagem e pressões do punção, que permitem definir limites de *quinabilidade* no uso de determinados punções. Os limites correspondentes estão relacionados com uma relação V/t^2 que também podem ser incorporados no diagrama V_t proposto.

Foram ainda realizadas análises de retorno elástico e trabalho experimental cujos resultados permitem validar os modelos numéricos considerados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através dos projetos PTDC/EME-TME/113410/2009 e PTDC/EMS-TEC/2404/2012.

7. REFERÊNCIAS

- Deutsche Normen, October 1975. Cold Bending of Flat Steel Product DIN 6935.
- L.J. De Vin, A.H. Streppel, U.P. Singh, H.J.J. Kals, 1994. A process model for air bending in CAPP applications, Second International Conference on Sheet Metal, SheMet'94.
- L.J. De Vin, A.H. Streppel, U.P. Singh, H.J.J. Kals, 1996. A process model for air bending, Journal of Materials Processing Technology 57 pp. 48-54.
- Leo J. De Vin, 1994. Computer Aided process Planning for the Bending of Sheet Metal Components, PhD Thesis, University of Twente (NL), ISBN 90-9007217-9.
- Leo J. De Vin, 2000. Curvature prediction in air bending of metal sheet, Journal of Materials Processing Technology 100 pp. 257-261.
- Pacheco J.A.B., Santos A.D., 2011. Numerical Simulation on the validation of a press brake design criteria to minimize angle deviations, CMNE 2011 - Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia.
- Pacheco J.A.B., Santos A.D., 2013. A study on the Nose Radius influence in Press Brake Bending Operations by Finite Element Analysis, 16th annual ESAFORM, Conference on Material Forming.
- Pacheco J.A.B., Santos A.D., 2013. Developments on press brake bending process and limits on analytical expressions based on Numerical Simulation, SEMNI, 2013 - Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Rodrigues J. M. C. e Martins P. A. F., 2005. Tecnologia Mecânica, Vol. I e Vol.II, Escolar Editora.
- SSAB, February 2006. Hardox Weldox bending/shearing Publication.