

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO NA ASSINATURA DE ESTAMPAGEM DE AÇOS USADOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA¹

Thiago Sekeres²
Eduardo Nunes³
José Carlos Santos⁴
Cleber Fernandes⁵
Ronald Lesley Plaut⁶

Resumo

O processo de estampagem é influenciado por diferentes variáveis, tais como, propriedades mecânicas do material, lubrificação do *blank*, parâmetros da prensa, bem como variações nas ferramentas de conformação. Para garantir um processo estável e reproduzível, os desvios inesperados (às vezes com variações não explicáveis), devem ser compensados durante a estampagem por meio de um monitoramento contínuo. Neste trabalho, apresenta-se um sistema de monitoramento das variáveis do processo de estampagem, cujo objetivo é o de adquirir dados para criação de uma janela operacional e servir como base de alimentação de dados para uma rede neural adaptativa (RNA). O escoamento do material dentro da ferramenta de estampagem foi medido por meio de um sensor óptico desenvolvido pela empresa Di-soric. Também foi utilizado um *software* do controlador de força e da pressão do repuxo hidráulico o qual forneceu dados relevantes de uma prensa mecânica durante o processo de estampagem. Para determinar o impacto das variáveis do processo sobre a espessura do material conformado, utilizou-se uma técnica de medição da deformação real na peça. Como resultado desse monitoramento, para diferentes forças do repuxo hidráulico, a curva de afinamento e enrugamento foi obtida, assim como a determinação da melhor *curva de trabalho*. Por sua vez, a RNA possibilitou analisar a sensibilidade de cada variável monitorada no processo. As conclusões deste trabalho ilustram o efeito do monitoramento, através da utilização da janela operacional e das RNA e sua correlação com as variáveis de processo.

Palavras-chave: Janela operacional; Rede neural adaptativa; Estampagem.

INFLUENCE OF PROCESS VARIABLES IN THE STAMPING SIGNATURE OF STEEL USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract

The stamping process is influenced by several variables such as sheet mechanical properties, blank lubrication, press parameters, as well as variations in the forming tools. To ensure a stable process, unexpected deviations should be compensated during stamping through continuous monitoring. In this paper a stamping process monitoring system is presented, whose objective is to acquire data to create an operational window and to feed data to an adaptive neural network (ANN). The material flow on the stamping tool was measured by an optical sensor developed by Di-Soric. Software to monitor the binder force and its pressure during stamping process has been also used. To check thickness variations use has been made of a technique that measures the strain reached in the stamping and was correlated with process variables. As a result of monitoring the stamping process with different binder forces, curves have obtained through the analysis of the blank thinning/wrinkling, hence determining the operational window. In addition, the ANN has established the sensitivity of each monitored process variable.

Key words: Operational window; Adaptive neural networks; Stamping.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

² Engenheiro de Materiais e Metalurgia (General Motors do Brasil).

³ Mestre e Engenheiro de Materiais e Metalurgia (General Motors do Brasil).

⁴ Mestre e Engenheiro de Materiais (General Motors do Brasil).

⁵ Tecnólogo Processo de Produção Mecânica (General Motors do Brasil).

⁶ Professor Associado do Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).

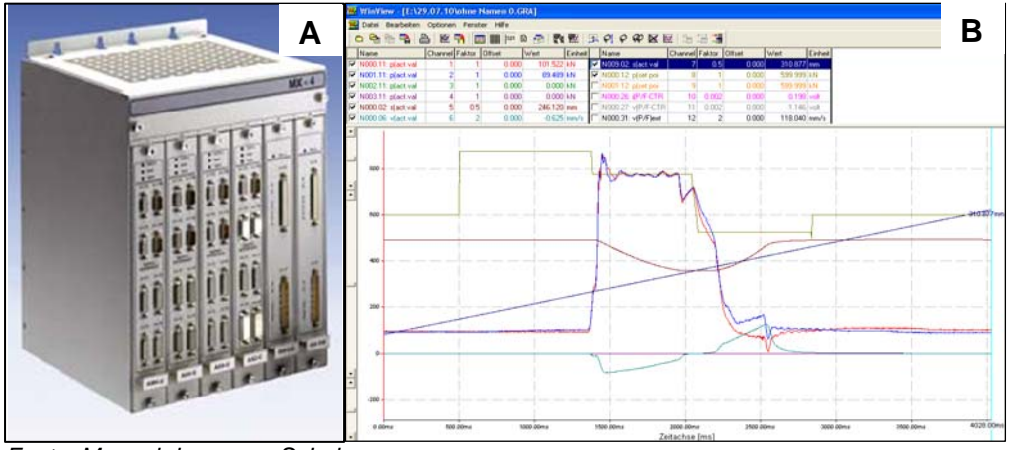
1 INTRODUÇÃO

Dentro da indústria automobilística, existe uma tendência de produzir peças estampadas com geometrias cada vez mais complexas e também a utilização de novos materiais, como aços de alta resistência e de ligas de alumínio.^(1,2) Nesta indústria é fato notório que a estampagem profunda é a técnica de conformação de maior importância. Assim, há uma necessidade contínua de melhores controles durante o processo de produção. Neste sentido, para manter e aumentar a qualidade do processo um dos aspectos fundamentais está associado à necessidade de se monitorar o deslocamento do *blank* dentro da ferramenta visando compreender a melhor condição de trabalho e, a partir destas informações, obterem-se dados que servirão como base de alimentação para uma rede neural adaptativa (RNA), objetivando criar uma *janela operacional do processo* de estampagem. Através da janela operacional é possível estabelecer as curvas limites de ruptura e de enrugamento de conformação do material e também as respectivas margens de segurança.⁽³⁻⁵⁾ Possuindo um registrador gráfico na linha de produção é possível observar se a curva de trabalho se aproximando da margem da curva de segurança quando ocorrer alguma alteração do processo e, com isto, o operador da prensa poderá estabilizar o processo alterando as forças do repuxo hidráulico da prensa,⁽⁶⁾ adicionando óleo no *blank*, colocando calço no neutralizador da ferramenta, alterando velocidade da prensa, entre outros.

Com o sistema de monitoramento das variáveis do processo de estampagem, é possível criar uma Rede Neural Artificial (RNA) (baseada na estrutura do sistema nervoso humano, o cérebro). Um dos enfoques do presente trabalho está relacionado com a aplicação das RNAs na estampagem de chapas, sendo que informações complementares encontram-se nas referências em anexo: básicas^(7,8) e em outras aplicações,⁽⁹⁻¹¹⁾ por exemplo. De maneira resumida a RNA é um programa (de Excel) de regressão múltipla não-linear, que possibilita analisar, entre outros aspectos, qual a variável que mais afeta o processo, através da análise de sensibilidade, e, com esta informação, termos uma ação mais efetiva na tomada de decisões na fase de *Try Out* da ferramenta ou durante a produção.⁽⁶⁾ Para isto é necessário fornecermos à RNA conjuntos de dados de entrada/saída. Neste aspecto os dados de saída podem ser as espessuras do material conformado, que são medidas através da deformação atingida na peça estampada.⁽¹²⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizada uma prensa mecânica Schuler de 2.000 toneladas, simples efeito com repuxo hidráulico controlado pelo equipamento MX4 da Rexroth (Figura 1a). O controlador MX4 da Rexroth, através do *software* WinView, fornece os dados de força, velocidade e deslocamento dos pinos do repuxo hidráulico, além do movimento do martelo (Figura 1b).



Fonte: Manual da prensa Schuler

Figura 1. (a) controlador de força e pressão MX4 da Rexroth; e (b) software WinView com os gráficos de força, velocidade e deslocamento dos pinos do repuxo hidráulico, além do movimento do martelo.

O monitoramento do escoamento do *blank* foi feito através de um sensor posicionado no anel da ferramenta (Figura 2). O sensor óptico utilizado foi o modelo OBS 105 da empresa Di-soric. A Figura 3 mostra a foto e as dimensões do equipamento.

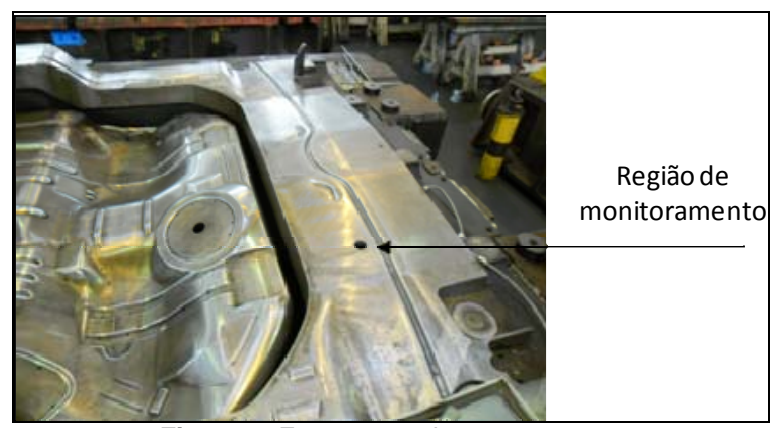
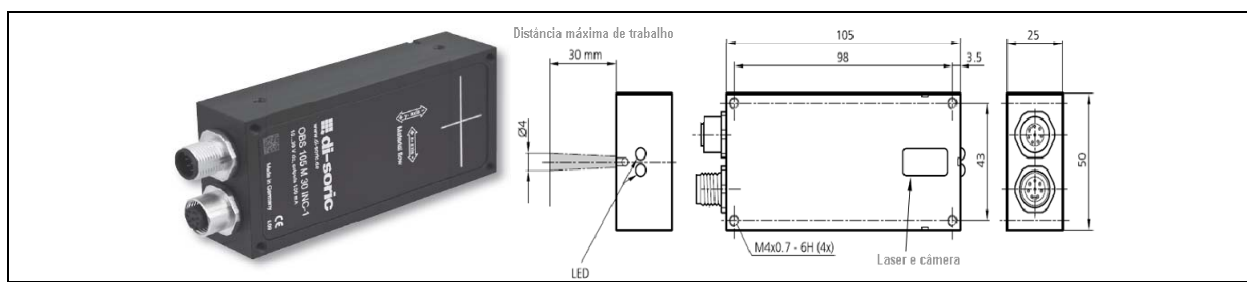


Figura 2. Ferramenta de estampagem.



Fonte: Manual do Sensor OBS 105 Di-soric.

Figura 3. Sensor OBS 105 e dimensões do sensor ABS 105.

A Figura 4 mostra como o sensor óptico foi posicionado no anel da ferramenta.



Figura 4. Sensor óptico integrado no anel da ferramenta.

O sensor de movimento mede o escoamento do material através de um furo de 23 mm. usinado no anel da ferramenta (Figura 5). O sensor óptico está fixado a uma distancia de 25 mm abaixo da superfície de leitura.



Figura 5. Furo de 23 mm no anel da ferramenta para que o laser e a câmera possam monitorar o escoamento do *blank* no momento da estampagem.

O material utilizado como *blank* foi um aço-carbono com espessura de 0,75 mm, classificado pela norma NBR 5915 como sendo de Estampagem Extra Profunda (EEP),⁽¹³⁾ revestido por zinco (apenas de um lado), produzido em linha contínua de galvanização eletrolítica. Nesta experiência foram utilizados dois materiais de lotes diferentes, porém do mesmo grau, para melhor avaliar a influência das propriedades mecânicas junto a RNA. As Tabelas 1 e 2 mostram as composições químicas dos materiais e suas respectivas propriedades mecânicas (fornecidas pelo certificado de qualidade da Usina).

Tabela 1. Composição Química

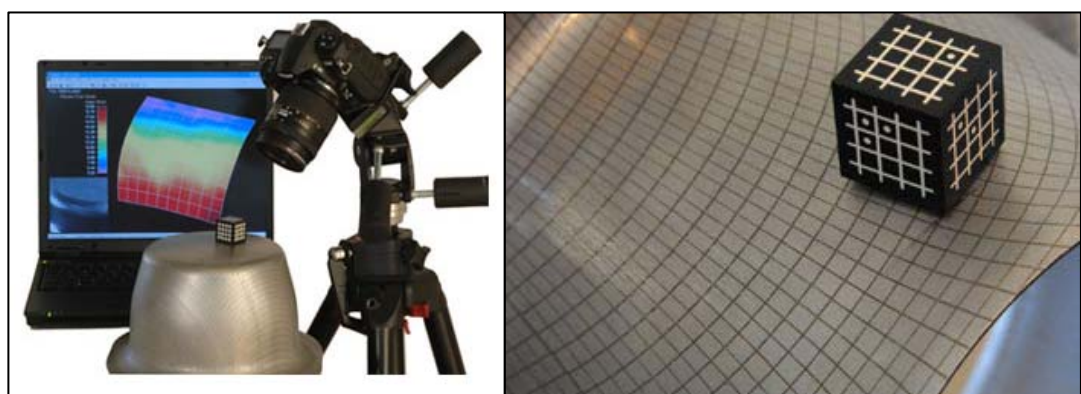
Material	C %	Mn %	P %	S %	Al %	Si %
EEP- LOTE A	0,0334	0,2100	0,011	0,0060	0,033	0,0100
EEP- LOTE B	0,0022	0,1010	0,0070	0,0060	0,033	0,0030

Fonte: Certificado de qualidade da Usina.

Tabela 2. Propriedades Mecânicas

Material	Espessura (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Anisotropia (r)
EEP- LOTE A	0,75	216	314	37	1,85
EEP- LOTE B	0,75	204	297	48	1,90

Para medir o impacto que as variáveis do processo têm sobre a espessura da peça estampada, foi utilizada a técnica para medir a deformação real no estampado. Os respectivos *blanks* foram previamente gravados com uma malha quadriculada. Após a marcação eletrolítica sobre a superfície da chapa (por uma rede de quadrados), seguiu-se o processo de estampagem. Uma máquina fotográfica dedicada (especial) foi empregada para determinar o mapa tridimensional da área e, conseqüentemente, registrar a deformação dos dois eixos do quadrado. Com o conhecimento do tamanho da grade original não deformada e os dados tridimensionais para cada quadrado deformado, a deformação superficial foi calculada pelo *software* (Figura 6). Assim obtiveram-se os valores calculados das espessuras das peças da região crítica de deformação.



Fonte: Manual do equipamento Asame.

Figura 6. Equipamentos utilizados para medição do grau de deformação da peça estampada.

Uma das propriedades mais importantes das RNA é a habilidade de aprender de seu ambiente e com isso possibilitar melhorias no processo. Neste sentido, utilizou-se o programa *NeuroSolutions para Excel*. As RNAs aprendem através de uma fase chamada de treinamento, ou seja, fornecer dados na forma de conjuntos entrada (variáveis de processo) / saída (resposta- no caso espessuras). Neste experimento os dados de entrada foram: ajuste na força do repuxo hidráulico (realizada no *display* da prensa), tempo final de estampagem do deslocamento dos pinos do repuxo hidráulico, as forças do lado esquerdo e direito do repuxo hidráulico, deslocamento final dos pinos e sua velocidade. Também foram adicionados como entradas os deslocamentos da chapa e as propriedades mecânicas do *blank*. Os dados de saída foram as espessuras da peça (Figura 7).

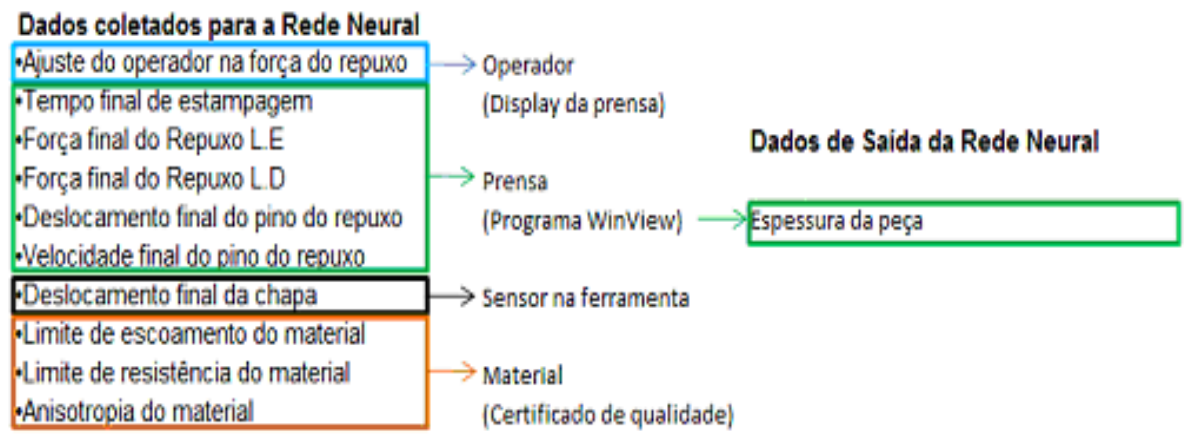


Figura 7. Esquema de coletas de dados para a RNA.

2.1 Procedimento de Ensaio

Foram estampados 100 *blanks* do aço EEP de dois lotes diferentes denominados pelas letras A e B, foram aplicadas quatro diferentes forças do repuxo hidráulico, sendo 3 *blanks* do lote A e 3 *blanks* do lote B com forças de 750 KN, 42 *blanks* do lotes A e 42 *blanks* do lote B com forças de 650 KN, 2 *blanks* do lote A e 2 *blanks* do lote B com forças de 615 KN e 3 *blanks* do lote A e 3 *blanks* do lote B com forças de 580 KN. Também foram realizadas as gravações eletrolíticas na região de maior criticidade da peça em 12 *blanks* dos 100 *blanks* proposto para o experimento, a região de criticidade no *blank* se encontra a 270 mm de distância do local que o sensor óptico foi posicionado na ferramenta. Os *blanks* com gravação eletrolítica foram estampados de acordo com a programação descrita no Quadro 1. A velocidade de trabalho do martelo da prensa foi programada para 10 golpes por minuto (sem alterações ao logo do experimento). Os *blanks* vieram com a lubrificação proveniente da Usina (apenas óleo de proteção contra corrosão). A cada estampagem foram obtidos gráficos do sensor óptico e da prensa. Estes gráficos foram salvos no formato de texto e, posteriormente, transformados em dados tipo Excel. Assim, com estes dados, foi criada a *Janela Operacional* bem como a fonte de dados de entrada para a RNA.

Quadro 1. Programação da realização das experiências

N ° Blank	Quantidades de <i>Blanks</i> com Gravação Eletrolítica	Material	Força do Repuxo Hidráulico
3	2	Lote A	750 KN
3	2	Lote B	
42	2	Lote A	650 KN
42	2	Lote B	
2	-	Lote A	615 KN
2	-	Lote B	
3	2	Lote A	580 KN
3	2	Lote B	

3 RESULTADOS

Para as diferentes forças aplicadas no repuxo hidráulico, a Figuras 8 ilustra uma janela operacional típica.

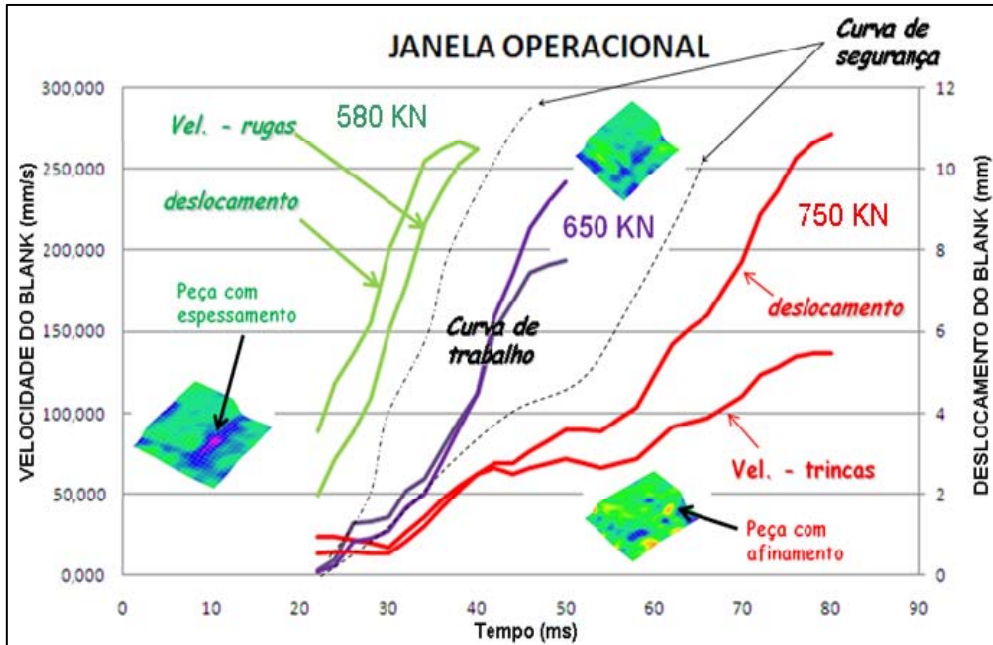


Figura 8. Janela operacional típica.

A Figura 9 ilustra a aproximação da curva de trabalho próxima das margens da curva de segurança para 615 KN de força aplicada nos pino do repuxo hidráulico.

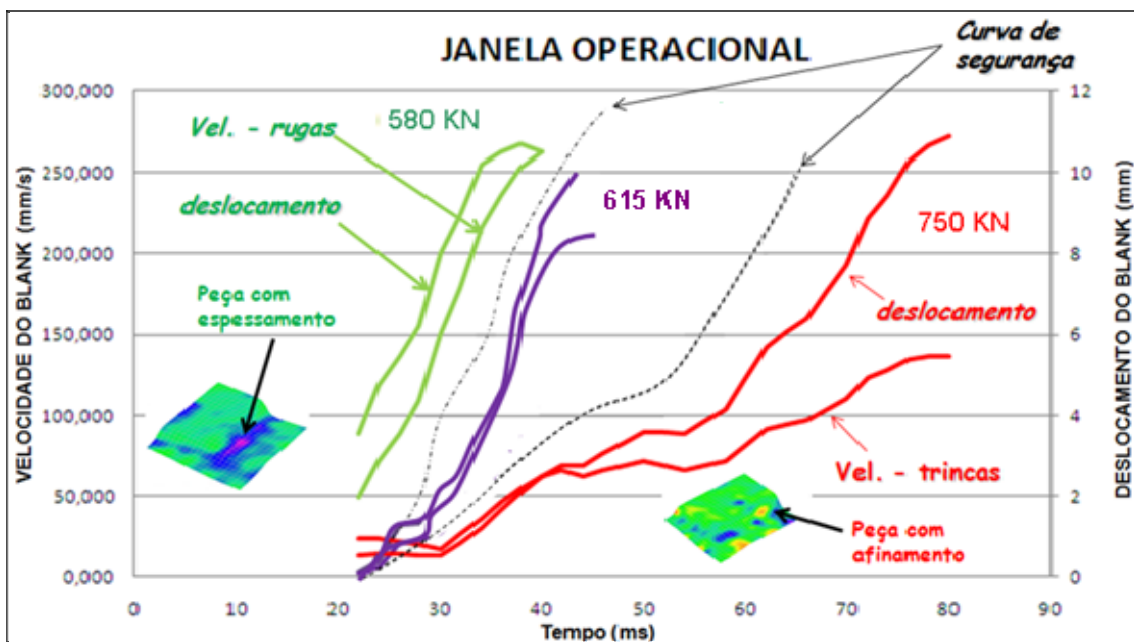


Figura 9. Janela Operacional e curva de segurança.

Nas Figuras 8 e 9 observa-se que para maiores velocidades dos *blanks* (curva verde, mais a esquerda do gráfico), as quais são obtidas com menores forças do repuxo, é possível delimitar a área do gráfico onde ocorre o enrugamento da chapa. De maneira inversa, para menores velocidades dos *blanks* (curva vermelha, mais a direita do gráfico), as quais são obtidas com maiores forças do repuxo, é possível delimitar a área do gráfico onde ocorre a fratura da chapa (trincas). A curva de segurança foi estabelecida 20% acima da curva de afinamento do deslocamento do *blank* e 20% abaixo da curva de enrugamento do deslocamento do *blank*.

Com todos os dados coletados pelo sensor da ferramenta e pelo programa da prensa, foi possível transportar as informações para o programa *NeuroSolutions para Excel* e efetuar as etapas de treinamento/validação/testes da RNA (Quadro 2). A arquitetura empregada na RNA foi do tipo 10-4-1, com retro-propagação (BP).

Quadro 2. Tabela Excel apresentando parte de um conjunto típico de dados de entrada (10) e de saída (1), comparando os resultados calculados pela RNA e os valores experimentais obtidos

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Aju	Temp	FLE	F.L.D	Desl	Vel	Lvdt	LE	LR	r	Emin	
										production	observed
650	600	747,5	762,54	66,23	49,44	16,018	204	297	1,9	0,6400008	0,64
750	596	818,19	817,44	66,02	53,06	17,642	204	297	1,9	0,6499562	0,65
650	598	716,67	724,94	66,18	51,88	16	204	297	1,9	0,6400824	0,64
750	598	804,66	815,94	66,15	50,81	17,367	216	314	1,85	0,5804949	0,58
580	596	718,93	715,92	66,19	52,81	16,832	204	297	1,9	0,6400534	0,64
650	594	770,06	776,83	65,89	54,62	16,012	204	297	1,9	0,639869	0,64
750	596	812,18	821,95	66,13	50,06	17,134	216	314	1,85	0,5999793	0,6
580	596	716,67	724,94	66,18	51,88	17,368	216	314	1,85	0,6200203	0,62
650	598	764,05	771,57	66,12	51,69	17,127	216	314	1,85	0,6490178	0,65
580	596	716,67	724,94	66,18	51,88	17,368	216	314	1,85	0,6200203	0,62
650	698	753,52	760,29	66,17	50,12	17,647	216	314	1,85	0,6504036	0,65
580	596	716,67	724,94	66,18	51,88	17,368	216	314	1,85	0,62200203	0,62

A seguir foi gerado o gráfico do Fator de Sensibilidade por variáveis do processo, como ilustra a Figura 10.

REDE NEURAL

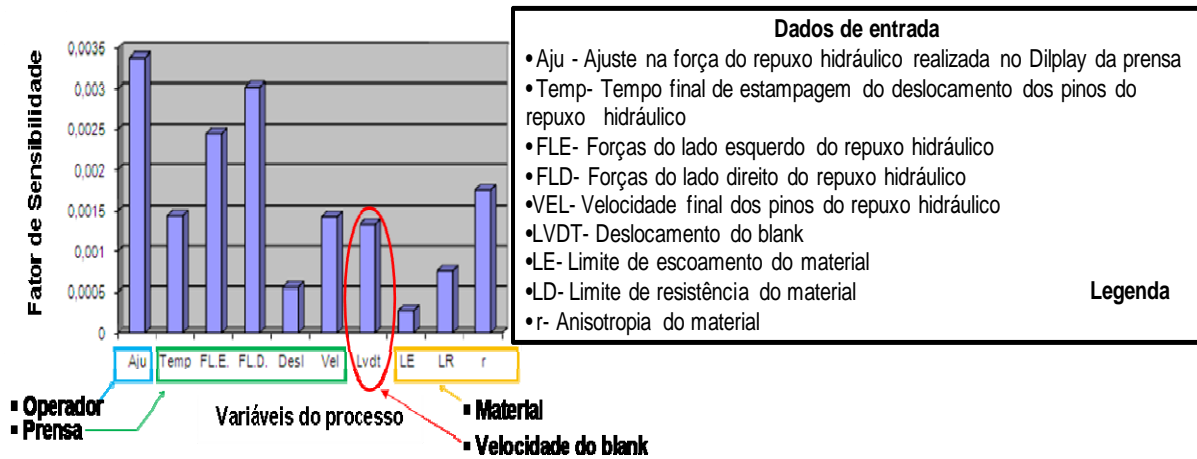


Figura 10. Gráfico do fator de sensibilidade por variáveis do processo.

Neste caso, o gráfico mostra que, das dez variáveis de entrada analisadas, o ajuste da força de repuxo tem maior impacto na sensibilidade do processo de estampagem. Esta, por sua vez, afeta a espessura do estampado. O ajuste acima mencionado poderá ser efetuado pelo operador da prensa através de registrador gráfico, etapa ainda a ser realizada.

4 DISCUSSÃO

A *Janela Operacional* (Figura 8) ilustra que a 580 KN de força no repuxo hidráulico, a peça apresentou um enrugamento (pela análise da técnica de deformação) e

visualizada na coloração roxo da região de maior criticidade da peça. A 750 KN observa-se um afinamento excessivo demonstrado pela cor amarela e vermelha na peça. Já na força de repuxo hidráulico de 650 KN obtiveram-se as melhores condições de trabalho, estabelecidas pela cor verde e azul. Também foram determinadas as margens de segurança. (por convenção 20% acima da curva de ruptura e 20% abaixo da curva de enrugamento. As cores acima mencionadas provêm do sistema de análise de deformações (do *software* Asami).

A Figura 9 mostra o resultado de 4 *blanks* estampados com força de 615 KN no repuxo hidráulico, sendo a metade do lote A e a outra do lote B, cujo resultado é um deslocamento na curva de trabalho, a qual se aproxima da margem da curva de segurança. Por esta ocasião seria possível efetuar alterações através da remoção do óleo de estampagem, alteração da velocidade da prensa ou ainda através da remoção de calços do neutralizador da ferramenta (alteração das folgas).

Para a peça estudada observou-se que o ajuste na força de repuxo hidráulico (Aju) da prensa (efetuado pelo operador) tem o maior efeito no processo. Este, por sua vez, afeta a força do repuxo hidráulico (FLE e FLD), conforme pode ser observado no gráfico da RNA da Figura 10. Entre as propriedades mecânicas do material, a que tem maior relevância no processo é a anisotropia (resistência ao afinamento da chapa - parâmetro r).

Os resultados preliminares aqui apresentados encontram-se seguidos de trabalhos em andamento relativos às interações entre os resultados experimentais que estão sendo obtidos e técnicas complementares de análise através dos métodos: dos elementos finitos, de Taguchi, das superfícies de resposta, além da caracterização/evolução da rugosidade superficial da chapa, com medições efetuadas em 3D.

5 CONCLUSÕES

- os sensores ópticos são de fácil manuseio, podendo ser colocados e retirados a cada *setup* de linha, desde que a ferramenta seja projetada para posicionar estes equipamentos;
- com a *janela operacional* tem-se um monitoramento preventivo, evitando peças defeituosas e evitando paradas não-programadas da linha de produção;
- ocorrendo alteração na velocidade do *blank* (devido a alguma variação operacional), será possível estabilizar o processo alterando as forças do repuxo hidráulico da prensa;
- as RNA podem captar/aprender a influência das variáveis do processo e assim contribuir para melhorar o desempenho da produção;
- as RNA podem indicar qual variável que tem maior influência no processo, através do fator de sensibilidade. Com esta informação tem-se uma ação mais efetiva na tomada de decisões durante o *Try Out* do ferramental, assim como durante a produção da peça estampada.

Agradecimentos

Agradecemos a linha de estamparia da General Motors do Brasil por colaborar na realização dos experimentos na escala industrial e também a empresa Choise representante da empresa Di-soric no Brasil, por fornecer o sensor óptico de movimento para os experimentos.

REFERÊNCIAS

- 1 FEKETE, J. R.; KERNOSKY, S. K.; Characterization of Press Tonnage Requirements during Stamping of Dual Phase Steel, World Congress, Detroit, Michigan, April 16-19, 2007.
- 2 LEE, T. M.; WÜNSCH, S. E.; XU, S.; Demonstration of the Preform Anneal Process to Form a One-Piece Aluminum Door Inner Panel, SAE World Congress, Detroit, Michigan, April 3-6, 2006.
- 3 BEHRENS, B. A.; YUN, J. W.; MILCH, M.; Closed-Loop-Control of the Material Flow in the Deep Drawing Process. *Advanced Materials Research*, v.6-8, (2005), pp. 321-328.
- 4 SIEGERT, K; ZIEGLER, M.; WAGNER,S.- Closed loop control of the friction force, deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, V.71, (1997), pp.126-133.
- 5 DOEGE, E.; SEIDEL, H-J; GRIESBACH, B.; YUN,J-W- Contactless on-line measurement of metal flow for closed loop control of deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology* , V. 130-131, (2002), pp.95-99.
- 6 SEKERES, T.; ERNANDES, C.; SANTOS, J. C.; NUNES, E.; PLAUT, R.L. - FEM modeling and press signature evolution of a typical car stamping, 6th Int. Conference on Phys. and Num. Sim. of Mat. Proc.- ICPNS, Guilin, China, Nov 16-19,(2010), paper F139.
- 7 HAYKIN, S.- *Redes Neurais, princípios e prática*- Bookman (2ª edição), 2001.
- 8 PRINCIPE, J.C.; EULIANO, N.R.; LEFEBVRE, W.C.- *Neural and Adaptive Systems*- J.Wiley & Sons, 2000.
- 9 CAMPANA, R. C.; VIEIRA, P.C.; PLAUT, R.L.; Applicability of Adaptive Neural Networks (ANN) in the Extrusion of Aluminum Alloys and in the Prediction of Hardness and Internal Defects, *Materials Science Forum*, V. 638 – 642, (2009), pp. 303-309.
- 10 VALLIM, P.S.; GORNI, A.A.; PLAUT,R.L.- Aplicação de rede neural para cálculo da tensão de escoamento na laminação de tiras a quente de aço C-Mn –Anais Seminário de Laminação- ABM, 2009.
- 11 MORAIS, W.A.; BORGES,H.C.;PLAUT,R.L.- Implementation and practical use of neural network models for hot rolled steel products adaptation and development in Usiminas Cubatão, Anais IFHTSE Congress- ABM, 2010.
- 12 SILVA, A. T.; Investigação sobre as vantagens de usar aços envelhecíveis em estufa (com efeito BH) em peças estruturais da carroceria do veículo, *Novos Mercados - Novas Tecnologias: Desafios da Engenharia da Mobilidade da indústria*, 14º Congresso SAE, 2005.
- 13 NBR 5915/2003 – Chapas de aço laminados a frio para estampagem, ABNT.