

ANÁLISE DO PROCESSO DE DOBRAMENTO DE MOLAS DE INCONEL 718 DO BOCAL SUPERIOR DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL NUCLEAR 16NGF

A.R. Passos¹, R.O. Santos^{1,2}, L.B. da Silveira¹, L.P. Moreira¹

Av. dos Trabalhadores, 420, Volta Redonda, RJ – Brasil, anderson@inb.gov.br

¹Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Volta Redonda, RJ, Brasil, ² Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Angra dos Reis, RJ, Brasil.

RESUMO

O bocal superior do elemento combustível nuclear 16NGF de Angra I é montado com três molas de Inconel 718 cuja função é dar sustentação estrutural ao bocal. As molas são manufaturadas por processos de corte e operações de dobramento, os quais podem produzir efeitos de retorno elástico. Este trabalho analisou o dobramento em V de chapas de Inconel 718 por meio de ensaios mecânicos e simulações numéricas. Para avaliar parâmetros do ferramental, um modelo de elementos finitos foi proposto assumindo-se um estado plano de deformação. Foram analisados modelos compostos por combinações entre os valores do raio da matriz (R_m) e ângulo do punção (A_p). A partir das previsões numéricas, os parâmetros que forneceram as menores variações de retorno elástico ficaram definidos por: (1) primeiro dobramento mola 1 (100% R_m e 96% A_p) e (2) segundo dobramento mola 1 (96% R_m e 100% A_p), mola 2 (100% R_m e 96% A_p) e mola 3 (98% R_m e 96% A_p).

Palavras-chave: Dobramento, Inconel 718, Retorno elástico, Molas, Bocal superior, Elemento combustível.

INTRODUÇÃO

É conhecido como conjunto de molas do bocal superior, Fig. 1(a) do elemento combustível nuclear (ECN) o dispositivo composto por três molas distintas, Fig. 1(b), as quais atuam para dar fixação do ECN junto ao núcleo do reator nuclear. O ECN é posicionado entre a placa superior e inferior do reator apenas por apoios de compressão. Dessa forma, o conjunto de molas permite a expansão do ECN no ambiente interno do reator sem a danificação do mesmo. Além disso, esse tipo de fixação impossibilita a interferência entre ECN adjacentes uma vez que cada elemento combustível é montado exclusivamente às placas de suporte do núcleo (Perrota, 1999).

As três molas que, por sua vez, compõem um conjunto montado na Fig. 1(b), são fabricadas a partir de chapas de Inconel 718, as quais passam pelo processo de dobramento antes de receberem o acabamento final.



Figura 1- Bocal superior do ECN: (a) conjuntos das molas de sustentação e (b) detalhe de montagem das molas.

A operação de dobramento destas molas é realizada por meio um ferramental composto por um punção, que se desloca verticalmente contra a chapa, e uma matriz que confere a forma desejada as molas, conforme o esquema mostrado na Fig. 2(a). Nessa operação, a força necessária ao punção apresenta cinco estágios distintos, esquematizados graficamente na Fig. 2(b) em função do deslocamento do punção. No primeiro estágio, o aumento da força do punção corresponde a deformação elástica da chapa ao passo que no segundo estágio a força permanece constante graças aos efeitos de dobramento da chapa no regime elasto-plástico, os quais promovem a conformação da chapa na cavidade da matriz. No terceiro estágio, a força do punção decresce em razão do deslizamento da chapa em direção ao fundo da matriz. A força do punção aumenta novamente no quarto estágio devido ao contato com o fundo da matriz. A partir deste penúltimo estágio, caso seja imposto um deslocamento adicional ao punção, observa-se um rápido aumento da força do punção (Boljanovic, 2004).

Os efeitos de retorno elástico, que podem provocar mudanças indesejáveis de forma após as operações de dobramento de chapas, podem ser minimizados ou até mesmo compensados por meio do projeto do ferramental (Tekaslan et al. 2006). Por outro lado, as avaliações experimentais dos efeitos de retorno elástico em chapas metálicas, que visam a determinação dos parâmetros geométricos do ferramental e a previsão da geometria final da peça segundo tolerâncias aceitáveis,

são usualmente realizadas por meio de várias etapas de tentativas e erros, as quais, por sua vez, aumentam os tempos de entrega assim como os custos de produção (Panthi et al., 2007). Portanto, no sentido de otimizar as etapas de tentativas e erros e minimizar custos de fabricação do ferramental de dobramento de molas do ECN, este trabalho tem por objetivos a caracterização experimental do comportamento plástico de chapas de Inconel 718 e a análise por elementos finitos da operação de dobramento para fins de previsão de parâmetros geométricos do ferramental que minimizem os efeitos de retorno elástico.

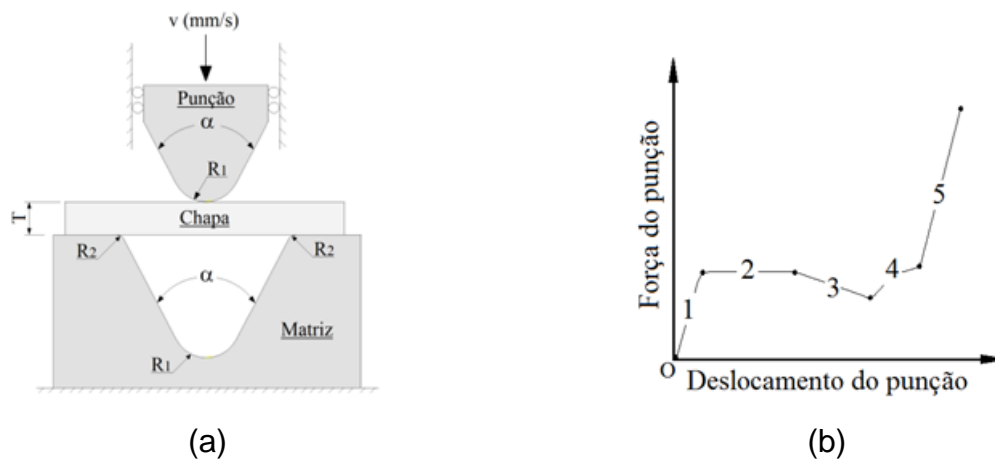


Figura 2- Dobramento de em V de chapas: (a) parâmetros geométricos do ferramental e (b) estágios da força do punção em função do deslocamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material adotado na caracterização experimental e análise por elementos finitos proposta neste trabalho foi à superliga a base de Níquel, Inconel 718, fornecido pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB), na forma chapa laminada a quente, com espessura nominal de 4,80 mm.

Ensaio de tração uniaxial

As propriedades mecânicas da chapa de Inconel 718 foram avaliadas por meio de ensaios de tração uniaxial. Os corpos de prova foram usinados por fresamento conforme geometria e dimensões indicadas na Fig. 3. Foram amostrados corpos de prova nas orientações 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação. Para cada orientação angular, foram ensaiados três corpos de prova e as propriedades foram definidas a partir dos valores médios correspondentes.

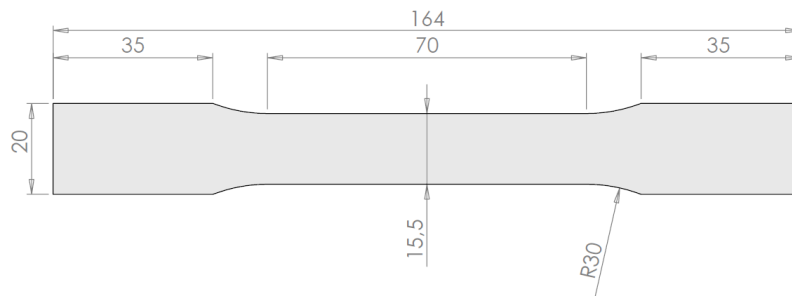


Figura 3- Geometria do corpo de prova de tração uniaxial (Dimensões em mm).

Os ensaios de tração uniaxial para fins de avaliação das propriedades mecânicas do Inconel 718 foram realizados a temperatura ambiente utilizando-se uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL 60000 equipada com célula de carga de 600 kN e extensômetro longitudinal com base de medidas igual a 50 mm. Para descrever o comportamento plástico da chapa de Inconel 718 foi adotada a equação de encruamento de Ludwik definida por:

$$\sigma = A + B (\varepsilon^P)^n \quad (A)$$

na qual as constantes A, B e n foram determinadas por meio de ajustes realizados a partir dos valores de tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira calculados para os ensaios de tração uniaxial realizados nas orientações paralela (0°) e transversal (90°) a direção de laminação.

Para avaliação do coeficiente de anisotropia plástica da chapa de Inconel 718, foram realizados ensaios de tração uniaxial em uma máquina universal Instron modelo 5960 com célula de carga de 100 kN equipada com um sistema de vídeo extensometria. Os valores do coeficiente de anisotropia plástica foram definidos para um nível de 18% de deformação.

Análise do retorno elástico

Um modelo teórico de avaliação do retorno elástico em operações de dobramento de chapas possibilita quantificar o fator de retorno elástico com bases em parâmetros geométricos (Boljanovic, 2004). Assumindo-se um descarregamento puramente elástico e desprezando-se o achatamento na região de dobra da chapa, tem-se segundo a teoria de flexão pura que a linha neutra da chapa permanece constante antes e depois da operação de dobramento. A Fig. 4 esquematiza dois

elementos de chapa que se encontram nos estados sob condições de carregamento, ou seja, devido a conformação por dobramento elasto-plástico (estado inicial) e após o descarregamento elástico em razão da remoção das ferramentas (estado final). Tal fator de retorno elástico pode ser definido pela Eq. (B) (Boljanovic, 2004):

$$K_S = \frac{R_i + \frac{t}{2}}{R_f + \frac{t}{2}} = \frac{\varphi_f}{\varphi_i} = \frac{180^\circ - \alpha_f}{180^\circ - \alpha_i} \quad (B)$$

na qual os índices “i” e “f” indicam os estado inicial (sob condições de carregamento) e final (após o descarregamento), respectivamente, para os valores dos raios e ângulos de dobramento. No presente trabalho, este fator de retorno elástico será adotado nas análises numéricas da influência dos parâmetros geométricos do ferramental de conformação de molas do bocal superior do ECN.

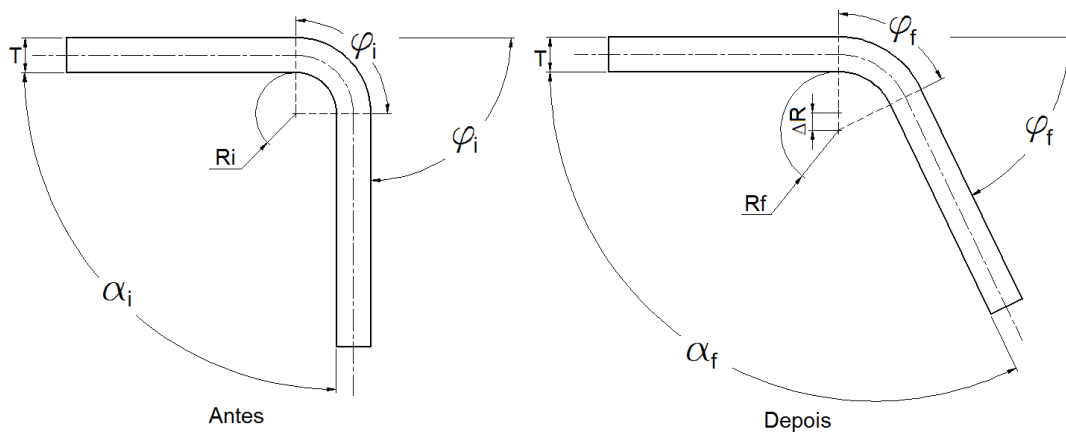


Figura 4- Parâmetros geométricos da operação de dobramento de uma chapa.

Simulação por elementos finitos

Foram propostos modelos numéricos compostos por combinações entre os valores do raio da matriz e ângulo do punção definidos em valores percentuais das especificações de projeto mecânico das molas, a saber, 96%, 98% e 100%, perfazendo um total de 36 simulações definidas na Tab. 1. Para a identificação dos casos simulados, foi adotado um código de referência no qual 96, 98 e 100 representam os valores percentuais das dimensões dos raios e ângulos em relação à geometria requerida pelo projeto.

Tabela 1 - Parâmetros geométricos das molas do bocal superior do ECN.

Ref.	Mola 1				Mola 2		Mola 3	
	Dobra 1		Dobra 2		Dobra 1		Dobra 1	
	R _i (mm)	α _i (graus)	R _i (mm)	α _i (graus)	R _i (mm)	α _i (graus)	R _i (mm)	α _i (graus)
96-96	12,672	141,744	4,876	55,344	16,704	146,064	20,736	145,856
96-98	12,672	144,697	4,876	56,497	16,704	149,107	20,736	148,894
96-100	12,672	147,650	4,876	57,650	16,704	152,150	20,736	151,933
98-96	12,936	141,744	4,978	55,344	17,052	146,064	21,168	145,856
98-98	12,936	144,697	4,978	56,497	17,052	149,107	21,168	148,894
98-100	12,936	147,650	4,978	57,650	17,052	152,150	21,168	151,933
100-96	13,200	141,744	5,080	55,344	17,400	146,064	21,600	145,856
100-98	13,200	144,697	5,080	56,497	17,400	149,107	21,600	148,894
100-100	13,200	147,650	5,080	57,650	17,400	152,150	21,600	151,933

A cinemática da simulação numérica das operações de dobramento das molas foi dividida em três etapas para a mola 1 e duas etapas para as molas 2 e 3. Na primeira e segunda etapas (somente para a mola 1), o punção se desloca verticalmente contra a chapa até que a mesma seja conformada ao fundo da matriz. Na última etapa, o descarregamento é simulado por meio da remoção do punção e das superfícies de contato entre o ferramental e a chapa. Um modelo bidimensional (2D) foi construído no programa de elementos finitos ABAQUS/Standard assumindo-se um estado plano de deformação em conjunto com a hipótese de encruamento isotrópico não-linear, descrito pela Eq. (A). O comportamento elástico da chapa é definido pela lei generalizada de Hooke com o módulo de elasticidade, E , e coeficiente de Poisson, ν . O ferramental de dobramento, composto por um punção e uma matriz, foi assumido como rígido e descrito por meio de superfícies analíticas rígidas. O contato entre as ferramentas e a chapa foi definido pela lei de Coulomb com um coeficiente de atrito igual a 0,15 em todas as superfícies de contato. A chapa foi discretizada por elementos sólidos quadriláteros lineares com regra de integração reduzida, estado plano de deformação do tipo CPE4R, de acordo com a terminologia do programa de elementos finitos ABAQUS/Standard. Com o objetivo de refinar a malha de elementos finitos da chapa nas regiões de dobramento, indicadas na mostrada na Fig. 5, foi adotada uma técnica de refinamento de malha (Anjos e Moreira, 2014).



Figura 5 – Detalhes do refinamento de malha adotado nos modelos de elementos finitos para análise do dobramento das molas 1, 2 e 3 do bocal superior do ECN.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades mecânicas

A Tab. 2 lista os valores médios e desvios padrão das propriedades mecânicas determinados a partir dos ensaios de tração uniaxial de chapas de Inconel 718, a saber, o módulo de elasticidade (E), limite de escoamento definido a 0,2% de deformação plástica (σ_e), deformação máxima uniforme (ϵ_u), limite de resistência (σ_r), deformação total (ϵ_t) e o coeficiente de anisotropia plástica (R) a 18%, em função da orientação angular da chapa em relação à direção de laminação. Esta liga apresenta uma boa ductilidade e elevado limite de resistência a tração, com valores similares aos resultados experimentais de chapas de Inconel 718 com espessura de 1,6 mm ensaiados em tração uniaxial por Alexopoulos et al. (2014). Ademais, as chapas de Inconel 718 apresentam coeficiente de anisotropia normal $R = (R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4 = 0,765 < 1,0$, o que é um indicativo de baixa conformabilidade no modo de deformação por estampagem e, um coeficiente de anisotropia planar, $\Delta R = (R_0 - 2R_{45} + R_{90})/2 = 0,106$, o qual indica a formação de orelhas na estampagem profunda nas orientações paralela a transversal ao sentido de laminação da chapa.

Tabela 2- Propriedades mecânicas de chapa de Inconel 718.

Orientação	E (GPa)	σ_c (MPa)	ϵ_u (%)	σ_r (MPa)	ϵ_t (%)	R
0°	187,33	516,00	31,03	1.265,00	35,62	0,807
	27,42	5,30	0,23	4,36	0,334	0,037
45°	184,33	430,33	34,60	1.209,33	38,46	0,659
	26,49	0,57	0,556	13,613	0,528	0,029
90°	207,20	503,33	31,93	1.258,33	37,04	0,935
	35,16	5,77	0,152	14,573	0,436	0,087

Os parâmetros da equação de Ludwik, Eq. (A) adotada para descrever o encruamento isotrópico no modelo de elementos finitos do dobramento de chapas, foram ajustados a partir dos resultados experimentais dos ensaios de tração realizados nas orientações 0° e 90. Os valores médios obtidos para estes parâmetros, e correspondentes desvios padrão, estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da equação de encruamento de Ludwik.

Orientação	A (MPa)	B (MPa)	n
0°	442,94	1.913,35	0,704
	7,18	42,81	0,004
90°	454,07	1.844,75	0,713
	7,63	31,93	0,008

Forças do punção

A força necessária para que o punção deforme o material é um importante parâmetro no projeto do ferramental de conformação. A partir do valor máximo da força aplicada ao punção é possível dimensionar a prensa necessária ao processo. Neste trabalho a força máxima aplicada ao punção foi de aproximadamente 3 kN.

Ângulo e fator de retorno elástico

As previsões numéricas determinadas para o ângulo de dobramento e o fator do retorno elástico após análise das simulações por elementos finitos estão resumidas na Tabela 4. Os resultados em função dos parâmetros geométricos do ferramental de dobramento, a saber, raio da matriz (R_m) e ângulo do punção (A_p), que forneceram as menores variações de retorno elástico ficaram definidos por: (1)

primeiro dobramento da mola 1 (100% R_m e 96% A_p) e (2) segundo dobramento mola 1 (96% R_m e 100% A_p), mola 2 (100% R_m e 96% A_p) e mola 3 (98% R_m e 96% A_p).

Tabela 4 – Previsões numéricas do ângulo e fator de retorno elástico determinadas a partir das simulações por elementos finitos do processo de dobramento de molas de Inconel 718.

Ref.	Mola 1				Mola 2		Mola 3	
	Dobra 1		Dobra 2		Dobra 1		Dobra 1	
	α_f	K_s	R_i (mm)	K_s	R_i (mm)	K_s	R_i (mm)	K_s
96-96	142,367	0,984	57,898	0,980	147,387	0,961	146,842	0,973
96-98	145,243	0,987	61,786	0,957	150,323	0,961	149,735	0,975
96-100	148,875	0,990	63,58	0,952	153,265	0,960	152,649	0,977
98-96	142,398	0,984	55,903	0,996	147,402	0,961	147,077	0,966
98-98	145,250	0,986	61,204	0,962	150,341	0,960	149,790	0,973
98-100	148,102	0,989	59,854	0,982	153,292	0,959	152,830	0,970
100-96	142,426	0,982	59,475	0,967	147,458	0,959	146,923	0,971
100-98	145,260	0,985	57,091	0,995	148,118	0,989	149,828	0,972
100-100	148,090	0,987	59,235	0,987	153,243	0,960	152,720	0,974

A Fig. 5 apresenta a região deformada do segundo dobramento da mola 1, simulação referência 96-100 (96% R_m e 100% A_p), com a distribuição dos valores da maior componente normal de tensão. Esta simulação corresponde ao menor valor do fator de retorno elástico determinado para o segundo dobramento da mola 1, conforme Tab. 4. Como esperado, as tensões normais são trativas e compressivas nas superfícies inferior e superior, respectivamente. Passa a ser interessante, explorar as distribuições destas tensões normais determinadas após as etapas de conformação e descarregamento elástico, ou seja, após a remoção da ação do ferramental.

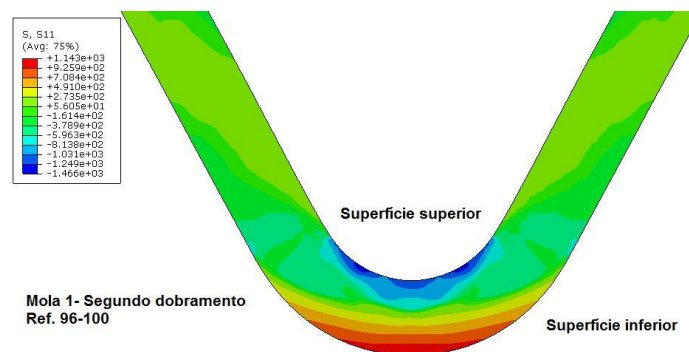


Figura: 5 – Distribuição da maior componente de tensão obtida no segundo dobramento da mola 1 a partir da simulação numérica definida pelos parâmetros geométricos do ferramental iguais a 96% R_m e 100% A_p . Valores de tensão em MPa.

As distribuições da maior componente de tensão normal referentes ao caso de referência 96-100 obtidas após as operações do primeiro e segundo dobramento da mola 1 são apresentadas na Fig. 6 para os estados sob carregamento plástico (conformação por dobramento) e após o descarregamento elástico (retorno elástico). É possível observar que ao término do curso do punção a superfície inferior encontra-se tracionada, Figs. 6(B) e 6(D) e enquanto que a superfície superior encontra-se sob compressão, Figs. 6(A) e 6(C). Após a retirada da ação do punção, pode se observar a presença de tensões residuais decorrentes do retorno elástico, com valores trativos na superfície superior da dobra. Dentre os casos analisados, observou-se que o segundo dobramento da mola 1 apresenta os maiores valores de tensões de tração e compressão bem como de tensões residuais do retorno elástico. Portanto, esses resultados indicam que esta geometria, requerida por projeto, apresenta a maior quantidade de retorno elástico.

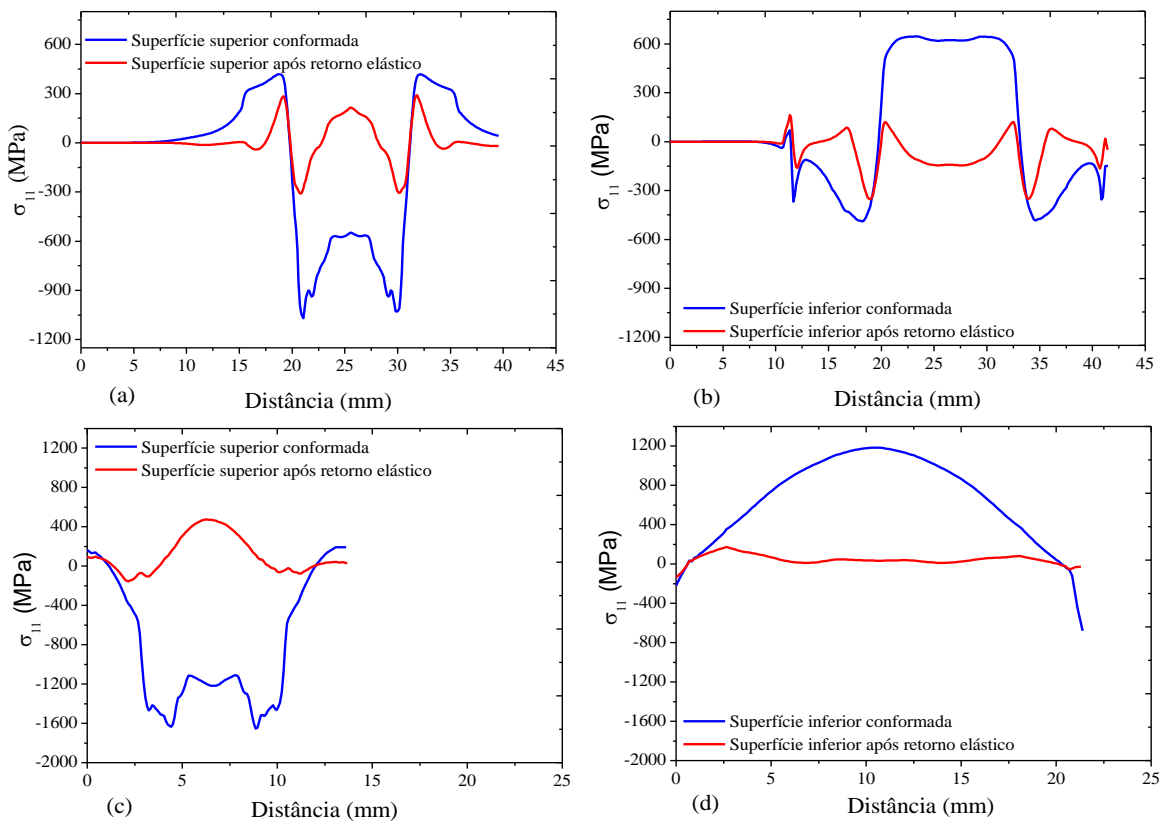


Figura: 6 – Distribuição da maior componente de tensão obtida no segundo dobramento da mola 1 a partir da simulação numérica definida pelos parâmetros geométricos do ferramental iguais a 96%R_m e 100%A_p. Valores de tensão em MPa.

CONCLUSÕES

O retorno elástico é um fator relevante no processo de dobramento em V, pois tem influência direta nas tolerâncias dimensionais e geometria final do produto. A metodologia proposta neste trabalho possibilitou a previsão numérica do retorno elástico de chapas de Inconel 718 empregadas no processo de dobramento para fabricação das molas do bocal superior do elemento combustível nuclear 16NGF de Angra I. A partir das simulações numéricas foi possível estabelecer a configuração geométrica do ferramental que fornece a menor variação geométrica das molas decorrente dos efeitos de retorno elástico. Estes parâmetros ficaram definidos em função de valores percentuais das dimensões de projeto para o raio da matriz (R_m) e o ângulo do punção (A_p), por: (1) primeira operação de dobramento da mola 1 (100% R_m e 96% A_p) e para (2) segunda operação de dobramento das mola 1 (96% R_m e 100% A_p), 2 (100% R_m e 96% A_p) e 3 (98% R_m e 96% A_p). Nesse sentido, é possível concluir que a simulações por elementos finitos pode auxiliar o projeto do ferramental e até mesmo prever condições para compensar os efeitos indesejáveis de retorno elástico. Contudo, torna-se imprescindível realizar a validação do modelo proposto por meio de ensaios experimentais de dobramento em V assim como verificar a validade da hipótese de estado plano de deformação empregando-se um modelo de elementos finitos em três dimensões. Estes trabalhos estão em andamento e serão apresentados em outra ocasião.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos às Indústrias Nucleares do Brasil (INB) por fornecer as amostras de Inconel 718, a CAPES pela concessão de Bolsa de Mestrado (LBS) e a FAPERJ e ao CNPq (LPM) pelo apoio financeiro por meio de projetos de pesquisas.

REFERÊNCIAS

- 1- Alexopoulos, N. D., Argyriou, N., Stergiou, V., Kourkoulis, S. K., (2014). "Fatigue behavior of Inconel 718 TIG welds", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol.23, 2973-2983.

- 2- Anjos, B. B., Moreira, L. P., (2014). "Experimental and numerical analysis of the lateral cutting of hot rolled strips steel". *VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Uberlândia, Brasil.
- 3- Antonelli, L., Salvini, P., Vivio, F., Vullo, V. (2007), "Identification of elasto-plastic characteristics by means of air-bending test", *Journal of materials Progressing Technology*, vol. 183, 127-139.
- 4- Boljanovic, V. (2004), "Sheet metal forming processes and die design", Industrial Press, New York.
- 5- Dan, W. J., Zhang, W. G., Li, S. H., Lin, Z. Q. (2007), "An experimental investigation of large-strain tensile behavior of a metal sheet", *Materials and Design*, vol.28, 2190-2196.
- 6-Panthi, S. K., Ramakrishnan, N., Pathak, K. K., Chouhan, J. S., (2007), "An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM)", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.186, 120-124.
- 7-Perrota, J. A. (1999), "Curso de introdução à engenharia de núcleo de reatores", *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, São Paulo.
- 8-Tekaslan, O., Seker, U., Özdemir, A. (2006), "Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies", *Materials and Design*, vol.27, 251-258.

ANALYSIS OF BENDING PROCESS OF INCONEL 718 SPRINGS OF THE NOZZLE TOP NUCLEAR FUEL ELEMENT 16NGF

ABSTRACT.

The top nozzle of the nuclear fuel element 16NGF Angra I is assembled with three springs of Inconel 718, which function is to provide structural stiffness to the nozzle. These springs are manufactured by cutting and forming processes that can produce undesirable springback effects. The present study analyzed the V bending process of Inconel 718 strips by means of mechanical testing and numerical simulations. In order to assess the geometrical tooling parameters, a finite element model is proposed by assuming a plane-strain state. Numerical models were proposed based upon combinations of design values of the die radius (Rd) and punch angle (Pa). From the proposed numerical predictions, the geometrical parameters that provide smaller elastic springback variations are defined as the first bending of spring 1 (100%Rd e 96%Pa) and for the second bending of spring 1 (96%Rd e 100%Pa), spring 2 (100%Rd e 96%Pa) and spring 3 (98%Rd e 96%Pa)

Keywords: Bending, Inconel 718, Springback, Top Nozzle Spring, Nuclear Fuel Element.