



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

PROJETO CONCEITUAL DO FERRAMENTAL DE CONFORMAÇÃO DAS TALAS DE UMA DAS GRADES ESPAÇADORAS DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL DE UM REATOR NUCLEAR

Rodolfo da Silva Oliveira¹, rodolfo_silva@id.uff.br
Felipe Louzada bVial¹, adauto@metal.eeimvr.uff.br
antonio Jose Oliveira Cabral¹, ajoc@metal.eeimvr.uff.br
Adaauto Martins de Assis¹, adauto@metal.eeimvr.uff.br

¹ Universidade Federal Fluminense,
Avenida dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, Brasil

Resumo: A geração de energia elétrica na usina nuclear é realizada a partir do calor gerado na fissão atômica no interior do reator. O núcleo do reator, onde se processa a reação, é formado por elementos combustíveis que tem como um de seus principais componentes as grades espaçadoras, que são fabricadas em Inconel (liga de Níquel) ou Zircaloy (liga de zircônio) e tem como principais funções ancorar as varetas combustíveis e os tubos guias além de dar rigidez ao elemento combustível. Devido a importância das grades espaçadoras, o trabalho atual consiste na aplicação dos conceitos de projeto mecânico no processo de estampagem das talas que dão origem às grades de um reator nuclear, no intuito de nacionalizar esta tecnologia que hoje é totalmente importada. Na realização dos estudos, caracterizou-se o comportamento mecânico da liga de Inconel e utilizou-se o modelo constitutivo de Johnson-Cook com suas constantes obtidas por ensaios de tração realizados no material da grade. Realizou-se uma simulação numérica com um corpo de prova de geometria idêntica ao corpo de prova de tração para validação do modelo. Obtiveram-se as geometrias das ferramentas de estampagem de forma a minimizar o efeito do retorno elástico da chapa. A partir das forças desenvolvidas durante o processo simulado de fabricação das talas da grade espaçadora desenvolveu-se o projeto conceitual das ferramentas de estampagem, bem como, do estampo necessário para realização do processo. Realizou-se novas simulações para validar as respectivas geometrias.

Palavras-chave: Projeto Mecânico, Simulação de Conformação, Modelagem no Abaqus, Tecnologia Nuclear

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia de geração de energia elétrica a partir da fissão nuclear no Brasil, teve início na década de 70 com o projeto da usina nuclear de Angra I, projetada pela Westinghouse, a usina conta com um reator do tipo PWR (Reator a água pressurizada) com capacidade de 121 elementos combustível e potência disponível de 640 MWh. Posteriormente teve sua continuidade com a usina de Angra II, projetada pela Siemens.

O principal componente do reator é o elemento combustível onde se processa toda a reação de fissão nuclear e a liberação do calor por ela gerado. Entre os componentes do elemento combustível, que são importados de países como Alemanha, Estados Unidos e França, estão as talas das grades espaçadoras.

A nacionalização destas tecnologias tem importante papel não só na redução de custos do processo, mas também no domínio pleno do processo de produção de energia a partir da fissão nuclear. Então, este trabalho visa estudar a dinâmica dos processos de conformação das talas das grades espaçadoras de um reator nuclear com o intuito de nacionalizar estes processos. Para isto, destacam-se o estudo das propriedades mecânicas, elásticas e plásticas, da liga de níquel na qual a grade é construída; Obtenção dos parâmetros dos modelos linear elástico e plástico; Obtenção dos modelos computacionais da geometria das ferramentas para a conformação; simulação por elementos finitos destes processos e Projeto conceitual de um estampo para realizar os processos de estampagem.

A Figura 1 mostra que em um elemento combustível existem diversos tipos de grades espaçadoras, que são construídas de Inconel-718 ou liga de Zircônio. Araújo (2009)

Uma grade de Inconel-718 é composta por várias talas de chapas laminadas (cerca de 0,35 mm de espessura), estampadas, cortadas, soldadas e encaixadas formando um arranjo quadrado de células com configuração específica. A figura (2) mostra em (a) a grade espaçadora e, em (b) um desenho ampliado de apenas uma célula e em (c) a tala.

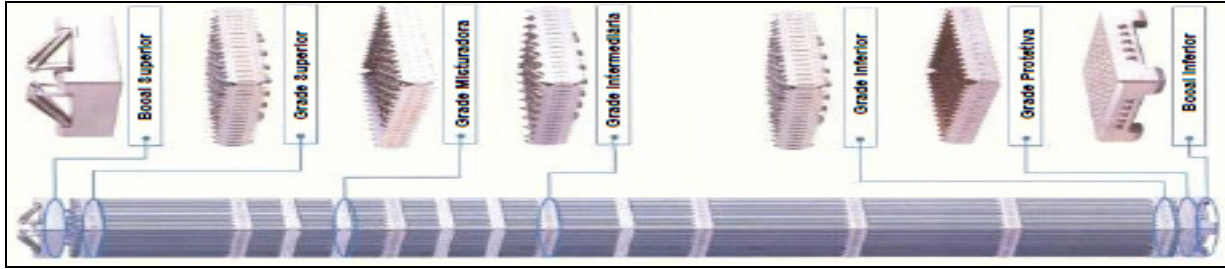


Figura 1. Elemento Combustível montado. Araújo (2009).

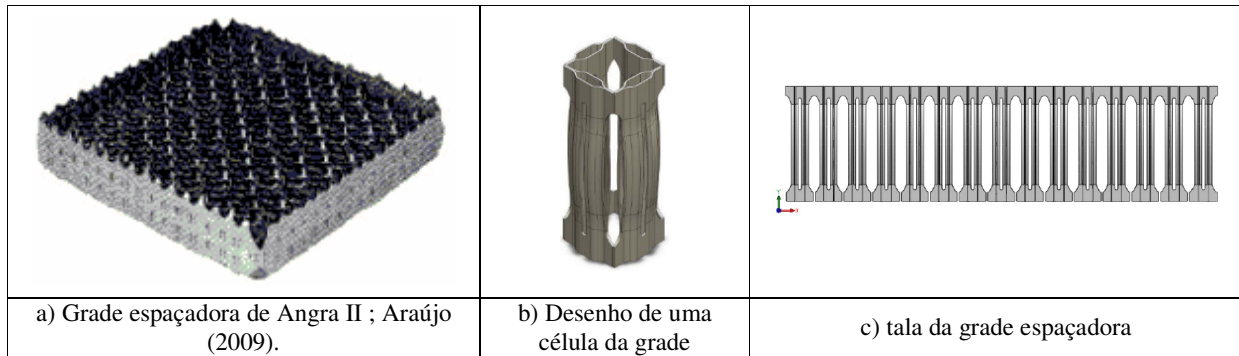


Figura 2. Grade Espaçadora de Inconel-718 de angra II. Araújo (2009).

1.1 Tecnologia da estampagem

A estampagem rasa ou profunda é um processo de conformação mecânica, realizado a frio, onde uma chapa plana adquire uma nova forma geométrica. As operações de estampagem ocorrem em máquinas chamadas estampo com acionamento mecânico ou hidráulico dotadas ou não de sistemas de alimentação automático. Para evitar problemas de desgaste do ferramental e facilitar o fluxo do material no interior da matriz e evitar deformações exageradas em regiões específicas, utiliza-se o emprego de lubrificantes. Guidi (2009).

Segundo Pião (2010) os principais defeitos que surgem nas peças estampadas têm origem em defeitos pré-existent na chapa, em falhas no projeto e construção das ferramentas e na manutenção das mesmas. Sendo os problemas mais frequentes: retorno elástico; rugas; “orelhas”; redução excessiva de espessura; trincas ou rupturas.

Devido ao retorno elástico, deve-se prever que após a retirada do punção o material irá liberar a deformação elástica e com isso sua geometria será alterada. Porém, devido à restrições geométricas após a retirada do carregamento a chapa é impedida de liberar toda a deformação elástica gerando regiões com tensões residuais. Amaral (2013).

Segundo Pião (2010) a formação de rugas surge pela deficiente acomodação das tensões tangenciais, que algumas zonas da peça são sujeitas, tais como, onde não exista contato com as ferramentas ou em zonas onde a chapa se encontra comprimida com baixas pressões entre a matriz e o prende chapa. O aumento da pressão no prende chapa elimina este defeito, mas causa o esmagamento na zona do raio de concordância do punção e a redução da espessura e posterior ruptura da chapa.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho visa à modelagem e simulação numérica do processo de conformação das talas da grade espaçadoras do reator nuclear. As grades são fabricadas a partir de chapas laminadas de Inconel-718. O Inconel-718 é uma liga de Níquel-Cromo com a composição química mostrada na tabela (1), segundo Santos *et al* (2013)

Tabela 1: Composição química (%) do Inconel-718. Santos *et al* (2013).

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Fe	Cu
54,07	18,34	4,91	2,98	0,98	0,55	18,05	0,02
Si	Mn	C	Co	Ta	S	B	P
0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	0,005	0,003	0,006

Para caracterização do comportamento mecânico da liga realizaram-se ensaios de tração uniaxial em corpos de prova confeccionados a partir da chapa do material da grade. Os ensaios foram realizados segundo a norma DIN EN10002 Parte 1. Os corpos de prova apresentavam as dimensões compatíveis com a norma de (12,5x50mm) para a área útil e com espessura de (0,35mm). Os ensaios foram realizados na máquina de tração com capacidade de carga de 100kN. Para aquisição das deformações foi utilizado um extensômetro que foi empregado nos primeiros 2% de deformação para calibrar a máquina. Ainda, os ensaios foram realizados a uma velocidade de 1mm/min.

2.1. Modelagem do material

Os materiais metálicos podem ser modelados como elásticos, plásticos, isotrópicos, ou anisotrópicos. As chapas a ser estampadas são fabricadas por processos de laminação e apresentam comportamento anisotrópico.

Segundo (Pião 2010) os critérios de plasticidade podem ser interpretados como sendo modelos definidos por uma superfície contínua, correspondente a todos os estados de tensão para os quais ocorre o início da deformação plástica. Esses critérios devem ser independentes da pressão hidrostática. Entre os diversos critérios de plasticidade os mais aplicados são: critérios: de Tresca e o de Von Mises.

Soares (2009) relata que, a teoria da energia de distorção máxima correlaciona-se melhor com os dados experimentais. Ainda, que o escoamento num corpo sob carregamento multiaxial pode ser avaliado com ensaio de tração uniaxial. Para este ensaio tem-se a Eq.(1) pelo postulado de Von Mises

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_y^2 \quad (2.1)$$

Até atingir o limite de escoamento, o material é modelado elástico linear, quando a tensão equivalente, dada pelo critério de Von Mises, atinge a tensão limite de escoamento o comportamento do material passa a um comportamento não linear devido ao encruamento do mesmo. Este comportamento pode ser modelado pelo modelo de Hollomon (1944), dado pela Eq. (2), onde k e n são constantes do material.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2)$$

A plasticidade também pode ser modelado pelo modelo de Johnson-Cook (1985), dado pela Eq.(3). Onde A é o limite de escoamento do material, B é uma constante ligada a plasticidade, η é o coeficiente ligado ao encruamento do material, C representa a sensibilidade da taxa de deformação, $\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}^{pl}}$ é a taxa de deformação adimensional, m considera o efeito de amolecimento térmico, $\bar{\varepsilon}^{pl}$ representa a deformação plástica e $\bar{\theta}$ é a temperatura

$$\sigma_{eq} = [A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^\eta] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}^{pl}} \right) \right] (1 - \bar{\theta}^m) \quad (3)$$

2.1.1. Determinação das Constantes do Modelo Constitutivo de Johnson-Cook

Na determinação das constantes do modelo, segundo (Brozostek 2010), é necessário considerar a influência da temperatura, da taxa de deformação sobre a curva tensão vs deformação, bem como, a influência cruzada dessas duas variáveis. No entanto, é difícil realizar medidas corretas para cada efeito.

O parâmetro A, da Eq.(3), corresponde à tensão de escoamento da curva tensão vs deformação quase-estático. Para obter os parâmetros B e n é necessário aplicar o logaritmo nos dados de tensão deformação no regime plástico, a fim de linearizar a curva. O coeficiente linear da reta gerada corresponde ao B e o angular ao n.

O parâmetro de taxa de deformação, C, é determinado a partir de três pontos da tensão de escoamento, na base logarítmica, sob diferentes taxas de deformação em temperatura ambiente. Estes pontos representam a tensão de escoamento em diferentes taxas de deformação na mesma deformação plástica, o parâmetro C é a inclinação da regressão linear que interpola os pontos obtidos no gráfico. O parâmetro térmico m é deduzido por um simples cálculo por explicitação na Eq.(3).

Para a obtenção das constantes do modelo de Jonson-Cook é necessário de correlacionar ensaios experimentais e simulações numéricas. As constantes do modelo foram obtidas para este trabalho onde foram desconsiderados os termos referentes à taxa de deformação e temperatura. Estas variáveis necessitam de muitos ensaios e devido ao caráter estratégico do material, mas fogem ao escopo deste trabalho.

2.1.1.1. Constante de Triaxialidade

Obteve-se os dados de tensão e deformação em um ensaio de tração uniaxial quase estático realizado no material da grade. A figura 3 mostra o gráfico tensão vs deformação obtido através do ensaio de tração uniaxial.

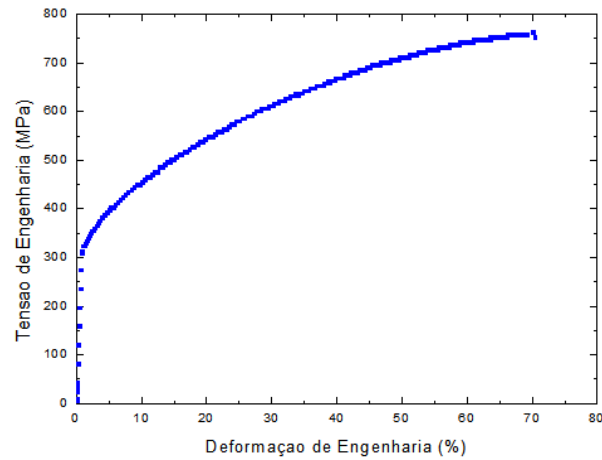


Figura 3. Tensão de Engenharia vs Deformação de Engenharia.

O gráfico da figura (3) está plotado a partir das tensões e deformações de engenharia. Portanto, para a obtenção das constantes de Johnson-Cook faz-se necessário calcular a tensão verdadeira que leva em consideração esta redução de área, atualizando-a no cálculo das tensões ao longo do ensaio. .

O modelo de Johnson-Cook com apenas a parcela de triaxialidade de tensão é representado pela equação (2.4),

$$\sigma = A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \quad (2.4)$$

Onde a Constante A é o valor do limite de escoamento do material em MPa. As constantes B e n foram obtidas a partir da linearização da equação (2.5), subtraindo do valor da tensão plástica o limite de escoamento, a equação (2.4) mostra esta linearização.

$$\log(\sigma - A) = \log(B) + n \cdot \log(\bar{\epsilon}^{pl}) \quad (2.5)$$

A equação (3.4) mostra que ao linearizar a curva tensão vs deformação, aplicando-se o logaritmo nos dados experimentais, pode-se determinar os valores das constantes B e n através dos coeficientes linear e angular da reta com coeficiente de correlação igual a 0,999.

A Figura 4 mostra, os valores das constantes constitutivas dos modelos: de Johnson-Cook e de Hollomon para o Inconel-718 obtidas através dos dados experimentais.

Da Figura 4 observa-se que após 54,7% de deformação total a tensão verdadeira começou a baixar de valor e o processo de estricção teve início passando de um estado de tensão uniaxial a um estado de tensão triaxial mais complexo. O modelo de Johnson-Cook tem uma boa previsão do comportamento do material mesmo depois de iniciada a estricção. A figura (4) mostra as curvas tensão vs deformação para os casos: modelado a partir da equação de Hollomon (azul), equação de Johnson-Cook (verde) e Experimental (vermelho).

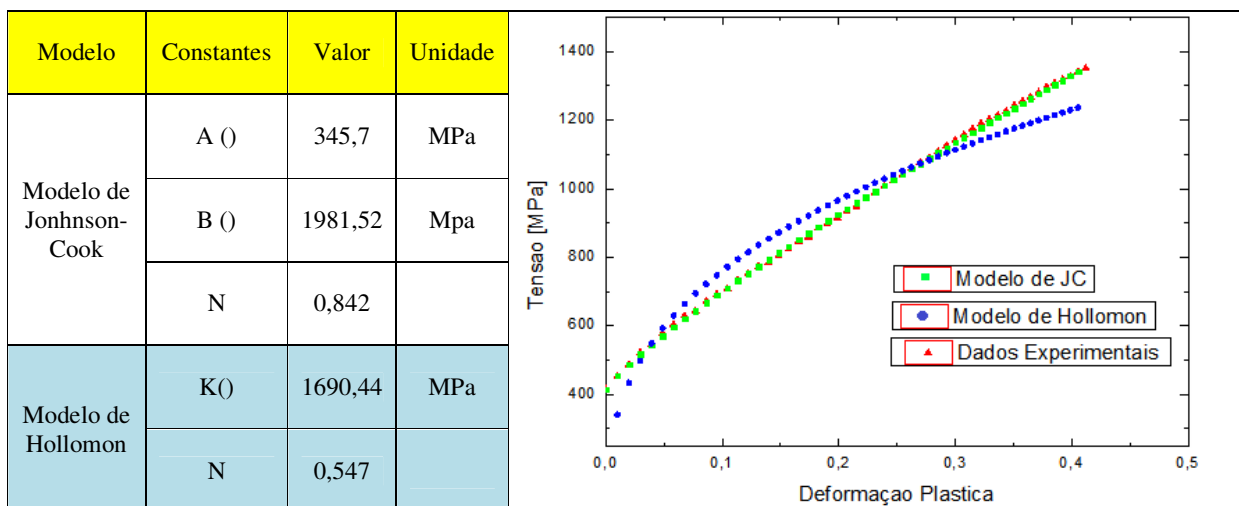


Figura 4. Tensão verdadeira vs Deformação verdadeira

2.2. Método dos Elementos Finitos

Para lidar com as não-linearidades envolvidas neste processo de estampagem, oriundas da complexidade geométrica, do contato entre a chapa e a ferramenta, da plasticidade, etc. Recorreu-se ao uso de métodos numéricos para se chegar a uma solução que, embora não seja exata, possua uma precisão aceitável. Há equações que definem a resposta de cada elemento para um dado problema e a resposta aproximada do sistema original é obtida quando se conecta todos os elementos.

Em geral, os problemas modelados e simulados no Abaqus envolvem encontrar uma solução para variações de força, deslocamentos, temperaturas, tensões e deformações sobre um corpo. (Abaqus 2009)

A obtenção da solução requer que as equações de equilíbrio de momento e força sejam sempre respeitadas sobre o volume de um elemento qualquer do corpo em análise. As equações de equilíbrio podem ser estáticas e dinâmicas.

2.3. Estampagem da Grade Espaçadora

A grade espaçadora será produzida a partir de um processo de estampagem e uma etapa de corte posterior. A dinâmica do processo será da seguinte forma: será empregado o processo de estampagem com a prensa na posição fechada, com a chapa aprisionada entre o punção e a matriz e processada a estampagem. o processo de corte, não estudado neste trabalho, finaliza as etapas de confecção de forma ao produto. A Fig.2(b) mostra uma tala da grade espaçadora com os respectivos cortes e a Fig. 5 em (a) mostra apenas uma célula da grade na forma de chapa e, em (b), tem-se a chapa após sofrer o processo de estampagem em (c) a forma final da célula com os respectivos cortes.

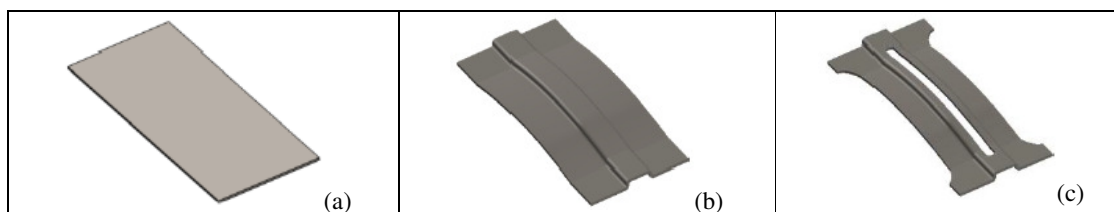


Figura 5. Esquema de fabricação de uma célula da tala. (a) Chapa cortada pela tesoura. (b) Chapa conformada. (c) Chapa cortada por punção.

Da Figura 6 observa-se que, de acordo com a dinâmica do processo, conforme foi exposto, a matriz e o punção de estampagem devem contemplar as regiões com os rasgos necessários ao punção de corte para que este possa processá-lo com a chapa ainda presa nas ferramentas de estampagem. A Fig.7 mostra o modelo geométrico computacional utilizado nas simulações.

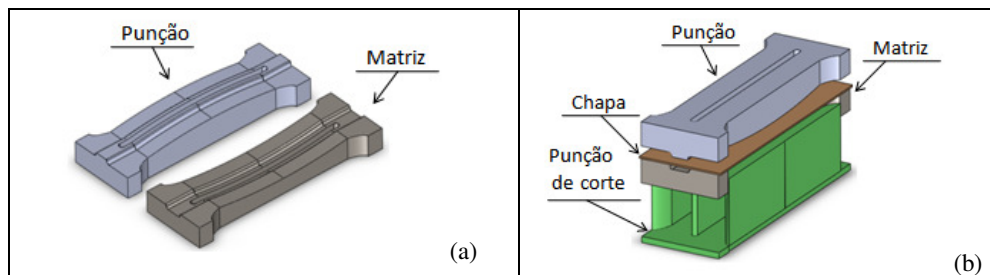


Figura 6: Em (a) Punção (azul) e matriz (cinza) de estampagem. Em (b) Conjunto montado: punção de estampagem (azul), punção de corte (verde), matriz de estampagem (cinza) e chapa (marrom)

Na Figura 6 (b) tem-se o conjunto montado, em azul, tem-se o punção de estampagem contemplando os cortes, tanto lateral quanto central e, em cinza, tem-se a matriz de conformação contemplando os mesmos cortes, em verde tem-se o punção de corte e em marrom a chapa.

Além das tensões geradas no processo de estampagem, outra variável de grande interesse é a folga entre as ferramentas de conformação.

Após a obtenção das constantes do modelo constitutivo do material passou-se para a etapa de ajuste das ferramentas de estampagem com o auxílio de simulação do processo através do software Abaqus-CAE. As simulações da estampagem foram realizadas no ambiente dinâmico explícito do Abaqus. Depois, o modelo foi exportado para o ambiente implícito ainda no Abaqus para se obter o retorno elástico sofrido pela peça após a estampagem.

Para a simulação do retorno elástico, inicialmente, foi exportado o modelo geométrico das ferramentas bem como da chapa do ambiente de CAD do SolidWorks para o ambiente de montagem do abaqus através da associação de interface SolidWorks/Abaqus onde estas ferramentas foram alteradas de geometria sólida para casca no intuito de aliviar o custo computacional. Após a exportação das peças passou-se para a caracterização do material no Abaqus. O modelo constitutivo do material empregado foi o modelo de Johnson-Cook que já se encontra implementados na interface do Abaqus.

Tendo feito a implementação do material, passou-se para a escolha do tipo de análise. Inicialmente trabalhou-se com a análise dinâmica explícita para a simulação da estampagem. A malha de elementos finitos utilizada na ferramenta foi constituída por elementos rígidos, portanto, o modelo não contempla variações na geometria do ferramental ao longo do processo devido às deformações. Já a malha utilizada na chapa foi constituída de elementos 3D.

Ao término de cada simulação do retorno elástico realizou-se a atualização manual da geometria das ferramentas de estampagem no SolidWorks e, novamente, exportação das geometrias para o ambiente de montagem do abaqus através da associação de interfaces. Com essa metodologia chegou-se às geometrias finais das ferramentas de estampagem. Com essa geometria final, simulou-se os processos de estampagem, sem fazer o retorno elástico da chapa no intuito de obter as forças gerados nos respectivos processos.

A partir dos dados de força, completou-se os dados informacionais necessários ao projeto conceitual e, em seguida, passou para a etapa de concepção das possíveis soluções aos requisitos de projeto levantados. Por fim, chegou-se à geometria das ferramentas de estampagem que atenderam aos requisitos levantados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi realizada a simulação da chapa da grade espaçadora completa. Devido às suas dimensões e à complexidade geométrica, houve a necessidade de refinar consideravelmente a malha de elementos finitos em cada região de “ombro” da matriz o que ocasionou um custo computacional extremamente elevado, tornando esta abordagem inviável. Para solucionar tal problema, utilizou-se o artifício de simular apenas uma única “célula” da grade reduzindo-se, com isso, as dimensões do modelo e o número de elementos da malha.

O primeiro objetivo da simulação foi obter a geometria das ferramentas de estampagem e, para tanto, realizou-se um estudo a respeito da geometria do punção e da matriz para chegar a um valor que contemple as variações geométricas devido ao retorno elástico sofrido pelo material após o alívio dos esforços ao se retirar as ferramentas de estampagem. A Figura 5 (b) mostra uma célula da grade após o processamento da estampagem, observa-se que a peça apresenta simetria ao longo dos eixos transversal e longitudinal que passam pelo seu centro. Portanto, para simular o retorno elástico da chapa utilizou-se $\frac{1}{4}$ da geometria do punção e da matriz para se ter um resultado com menor tempo de simulação e, com isso, poder realizar um numero elevado de simulações para tentar chegar à geometria que otimize o retorno elástico. A Figura 7 mostra o desenho de quarto das ferramentas de estampagem. em (a) tem-se o punção e em (b) a matriz de estampagem.

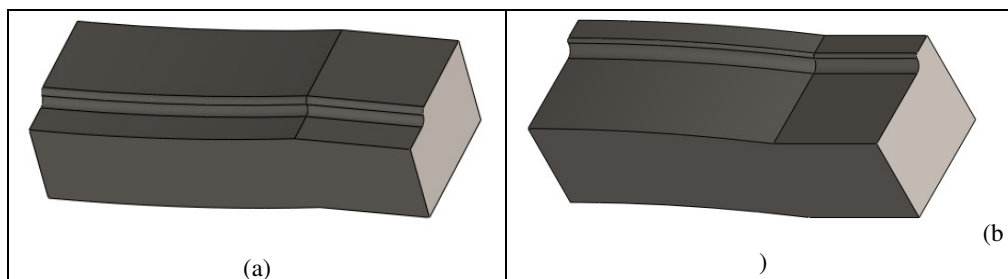


Figura 7. Um quarto das Ferramentas: Em (a) geometria do punção e em (b) geometria da matriz.

A Figura 8 mostra o resultado do retorno elástico da linha longitudinal da chapa obtido na simulação da estampagem utilizando-se diversas geometrias de punção e matriz.

O gráfico da Fig. 8 foi obtido a partir da medição da posição dos nós dos elementos ao longo de um caminho, nesse caso a linha longitudinal da superfície da chapa. Para uma melhor visualização, o referido gráfico foi ampliado. A curva G7 em azul escuro apresenta a situação ideal, ou seja, as dimensões da grade conforme projetada. Observa-se que a curva que mais se aproxima do caso ideal foi a curva G1, em preto, onde neste caso teve-se um desvio de aproximadamente 5% da geometria esperada na região extrema á direita no gráfico. Devido a este desvio observou-se que houve uma variação na planicidade do trecho reto da grade, contudo, esta pequena variação pode ser aceitável pois recai na tolerância de planicidade da peça.

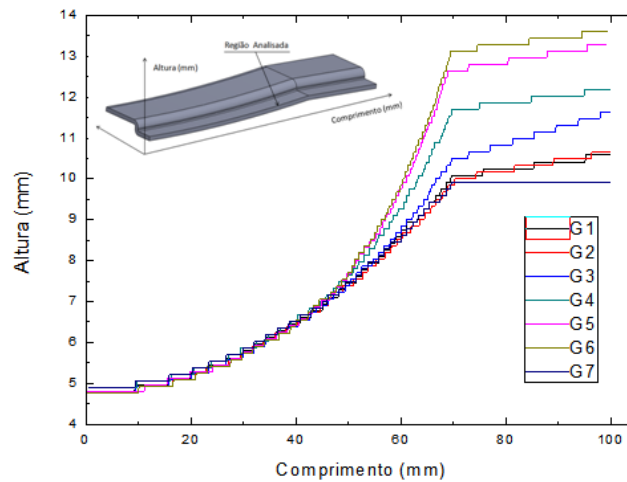


Figura 8. Simulação do retorno elástico para ajustar a geometria ideal do punção e matriz.

3.1. Projeto Conceitual de um Estampo

Com base na avaliação das variáveis de projeto levantadas trabalhou-se em um projeto conceitual de um possível estampo de conformação para a fabricação das talas das grades espaçadoras.

A grade espaçadora apresenta uma repetição de 16 vezes cada célula que foi modelada neste trabalho, portanto, a matriz e os punções de estampagem devem contemplar estas 16 células. A força máxima desenvolvida no processo de conformação para uma célula ficou próximo de 16000 N o que nos sugere que a força desenvolvida para as 16 células fique em torno de 256000 N que é equivalente a 25,6 toneladas. Portanto, o estampo deve possuir um arranjo geométrico tal que otimize sua rigidez para que o mesmo não sofra deformações excessivas ocasionando em desvios geométricos no produto final conformado. A figura 9 em (a) mostra o desenho do estampo que atende aos requisitos de projeto levantados. A Figura 9 em (b) mostra, de forma gráfica, a cinemática de acionamento do estampo. Em vermelho (tracejado) tem-se a cinemática do movimento do punção de conformação.

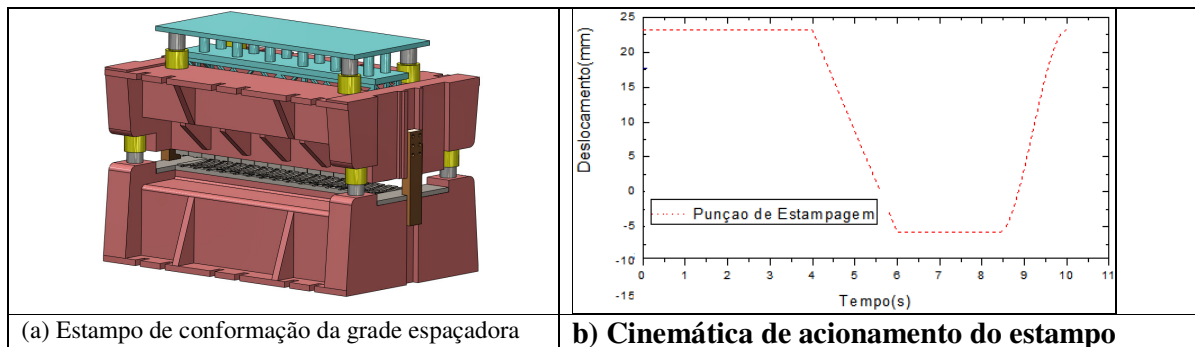


Figura 9. Estampo de conformação.

Na figura 10 observa-se que será necessário um acionamento para realizar o processo de estampagem. Nesta mesma figura de (a) a (d) indicam como é a dinâmica do processo de fabricação da grade.

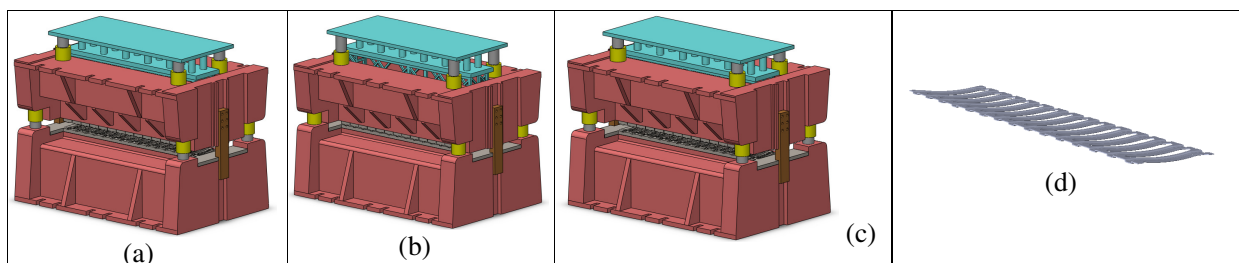


Figura 10. Dinâmica do processo de fabricação da grade espaçadora.

Inicialmente, Fig.10 (a), o estampo encontra-se na posição aberto e a chapa então será posicionada no interior do mesmo. Para facilitar o posicionamento da chapa o estampo possui em seu interior um canal guia para que não haja perda de tempo desnecessária com o posicionamento. Tendo posicionado a chapa, passa-se para o processo de estampagem, Fig. 10 (b), onde aciona-se o punção de estampagem que dará a forma à chapa. Com as operações mencionadas fecha-se o ciclo de acionamento (fechamento) do estampo e passa-se ao ciclo de desacionamento (abertura) do mesmo. Portanto, na Fig. 10 (c) observa-se o recuo do punção de conformação fechando-se o ciclo. A Figura 10 (d) mostra a tala da grade depois de fabricada nos processos anteriormente citados.

3.1.1. Análise da Rigidez do Estampo

Um problema que pode surgir no processo de conformação é a deformação excessiva das ferramentas ao longo do processo e, para evitar tal problema o estampo foi concebido com um conjunto de enrijecedores que têm como principal função a diminuição da deformação do mesmo evitando, com isso, que hajam variações dimensionais na chapa conformada bem como engripamento das ferramenta durante cada operação. O material utilizado nas ferramentas foi o aço AISI 1045 por apresentar boas propriedades mecânicas para a aplicação em questão.

Inicialmente, foram analisadas as deformações no punção de estampagem. Para tal análise utilizou-se o modelo geométrico computacional obtido no projeto conceitual do estampo. A Figura 11 mostra o resultado da análise em elementos finitos da deformação do punção de estampagem durante a aplicação da carga máxima no processo de fabricação da grade. Para tal análise aplicou-se a carga de 256000 N na região superior do estampo e engastou-se a região inferior do mesmo.

Observa-se na Fig.11 em (a) que o estampo apresenta uma deformação equivalente máxima de aproximadamente $5,05\text{e-}4$ na região de furo para passagem do punção de corte. No entanto, analisando-se os deslocamentos gerados pela aplicação da força, observa-se que a direção crítica é a direção x. A Figura 11 (b) mostra a análise do deslocamento na direção x do estampo. A escala da deformação foi aumentada em 500 vezes para que possa ser perceptível a olho nu.

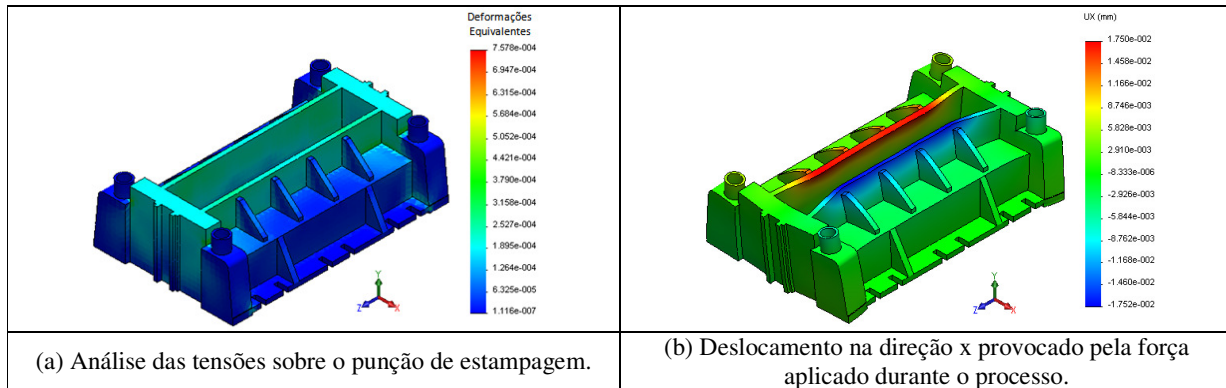


Figura 11: Punção de estampagem.

Observa-se, na Fig.12 (a), que os deslocamentos são mais acentuados na borda do furo e que nesta região seu valor máximo fica em torno de $1,75\text{e-}2\text{mm}$. Este valor pode facilmente ser compensado pela folga de ajuste necessária ao deslocamento do punção de corte no interior do referido furo.

Analisando-se, da mesma forma, a deformação gerada na matriz de conformação observa-se um comportamento similar ao encontrado no punção.

A Figura 12 (b) mostra a distribuição das deformações equivalentes que surgiram na matriz devido a aplicação do esforço requerido durante o processo de conformação. A forma de aplicação das condições de contorno foi a mesma utilizada para o punção. Observa-se, da mesma figura, que as deformações da matriz foram mais acentuadas na região do furo necessário para a passagem dos refugos do processo. Nesta região o valor máximo da deformação equivalente ficou em torno de $2,32\text{e-}4$, ou seja, 46% menor que a encontrada no punção.

De forma análoga ao que foi feito para o punção, analisou-se as deformações na direção x para a matriz. A figura (65) mostra o resultado de tal análise. Observa-se da figura que existe uma tendência, devido à deformação, de fechar o furo central existente na peça.

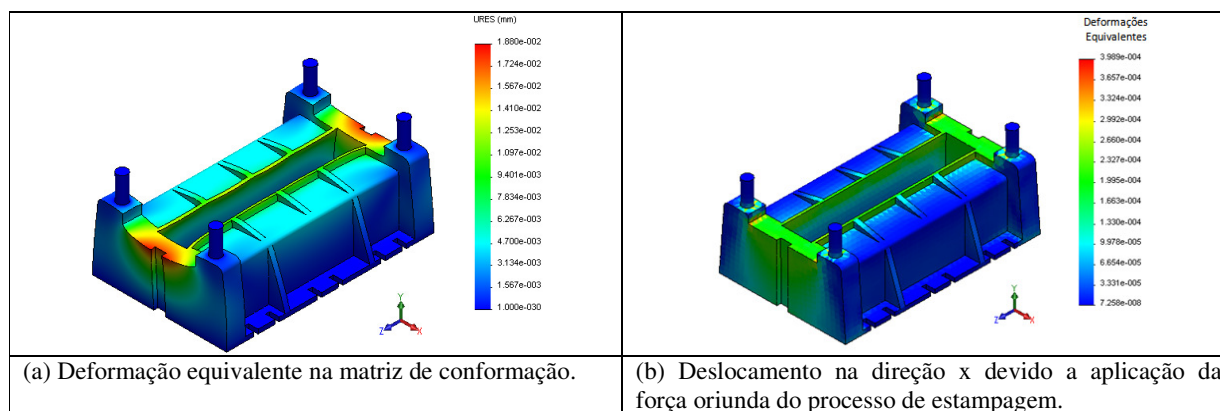


Figura 12. Matriz de Estampagem.

4. CONCLUSÃO

Foram obtidas aqui informações significativas no que diz respeito à caracterização do comportamento mecânico da liga de Inconel-718, visto que este é um material de aplicação nuclear e que é de difícil acesso no âmbito acadêmico.

A modelagem tradicional com a curva tensão vs deformação nas regiões elástica e plástica que vai até o alongamento uniforme, antes da estricção, que modelou bem o comportamento do material durante a estampagem.

Para a simulação do processo de estampagem das talas da grade espaçadora foi de fundamental importância a obtenção da geometria das referidas talas e como não houve a possibilidade de efetuar medições diretamente na peça física foi necessário fazer uma modelagem geométrica embasada em medições indiretas através de imagens publicadas em trabalhos bibliográficos. Durante a modelagem geométrica houve dificuldades no levantamento bibliográficos devido à confidencialidade de assuntos nucleares no Brasil.

Através de um processo de engenharia reversa usando a geometria da tala desenvolvida chegou-se à geometria do ferramental e esta foi calibrada através de simulações para que a mesma contemplasse as variações geométricas geradas nos processos de conformação mecânica devido ao retorno elástico do material.

As ferramentas de estampagem desenvolvidas foram também validadas através de simulações de carregamentos com as forças desenvolvidas ao longo do processo de fabricação das grades espaçadoras e, portanto, o próximo passo no desenvolvimento das mesmas será detalhar, ou seja, confeccionar desenhos de fabricação do referido estampo.

Neste trabalho, durante as simulações dos processos de estampagem foram considerados material fictício, ou seja, rígidos e indeformáveis nas ferramentas e, por isso, o modelo numérico não contemplou as deformações sofridas nas mesmas devido aos carregamentos durante estes processos. Portanto, fica como recomendação para trabalhos futuros a utilização de uma malha deformável para que se possa chegar às geometrias para o ferramental que contemple estas deformações. Além disto, recomenda-se o estudo do desgaste das ferramentas ao longo dos processos de fabricação das grades espaçadoras para que se possa estimar a vida em serviço de tais ferramentas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ELETRONUCLEAR pelo incentivo a pesquisa através da parceria que gerou o edital de pesquisas do faz parte o presente trabalho, e também pelas bolsas de mestrado e doutorado..

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaqus.CAE, 2009, "User's Manual", Version6.5. Abaqus In. Providence USA.
- Amaral, R.R.L, 2013, "Modelação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Chapas: Caraterização Mecânica e Previsão de Retorno Elástico ", Dissertação de mestrado, engenharia mecânica, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto Portugal.
- Araújo, V. H. L., 2009, " Efeito da soldagem por feixe de elétrons e tratamento térmico pós-soldagem em características mecânicas e microestruturais de tiras de Inconel 718 aplicados em componentes nucleares". Dissertação Mestrado em Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, Lorena-SP.
- Brzostek, R. C., 2012, "Desenvolvimento e estudo do modelo numérico de fratura de Johnson-Cook para FSpW",Dissertação de mestrado, Ciências dos materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS
- Guidi, E. S., 2009, "Desenvolvimento de um Programa Paramétrico para Simulação do Processo de Estampagem Utilizando Elementos Finitos". Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. SP.

- Moraes, E. D., 2013, "Análise de Critérios de Falha em Materiais Dúcteis: Um Estudo Numérico e Experimental". Dissertação de mestrado, Escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP.
- Ozel, T., Lianos, I., Soriano, J. P., Arrazola, J. 2011, 3D Finite Element Modelling of Chip Formation Process For Machining Inconel 718: Comparison of FE Software Predictions. An International Journal, Vol 15, 121-46.
- Piã, P. S. P., 2010, "Modelação e Simulação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Metais". Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Santos, R. O., Moreira, L. P., Cardoso, M. C., 2015, "Finite Element Analysis of the Blanking and Stamping Processes of Nuclear Fuel Spacer Grids" International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol:9, No:9.
- Soares, J. A., 2009, "Modelamento da Operação de Puncionamento Utilizando o Critério da Falha Dúctil". Dissertação de Mestrado, Engenharia mecânica, Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR.

1. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os único(s) responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CONCEPTUAL DESIGN OF FORMING TOOLS OF A SPLINT OF SPACER GRIDS OF A NUCLEAR REACTOR FUEL ELEMENT

Rodolfo da Silva Oliveira¹, rodolfo_silva@id.uff.br
Felipe Louzada bVial¹, adauto@metal.eeimvr.uff.br
antonio Jose Oliveira Cabral¹, ajoc@metal.eeimvr.uff.br
Adauto Martins de Assis¹, adauto@metal.eeimvr.uff.br

**1 Universidade Federal Luminense,
Avenida dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, Brasil**

Abstract. The electricity generation in nuclear power plant is carried out from the heat generated in nuclear fission inside the reactor. The core of the reactor, where the reaction takes place, it contains the fuel elements whose main components: the upper nozzles, lower nozzles, fuel pipe guide, fuel pipe and Spacer Grids. The Spacer Grids are made of Inconel (nickel alloy) or zircaloy (zirconium alloy) and its main functions to support the fuel pipe guide and the fuel pipe as well to provide stiffness to the fuel element. Due to the Spacer Grids relevance, this paper studied the applying mechanical design concepts in the stamping process which generate Spacer Grids of a nuclear reactor, in order to nationalize this technology that nowadays is fully imported. Initially, carrying out were made tests for characterize of the mechanical behavior Inconel alloy, where they used as constitutive model of Johnson-Cook and their constant were obtained from the tensile tests performed on grid material. The model constant of the mechanical behavior models were obtained and fitting then a numerical test on a specimen with geometry identical to the tensile test piece to validate the model. At first it obtained the geometries of stamping tools to minimize the effect of the strip springback. It is starting with developed loads during the forming process of the strip it was developed conceptual design of forming die, as well as the full tools need to perform the process. And simulations with generated loads on all process were carried out to validate their purposes..

Keywords: Mechanical Design, Forming Simulation, Abaqus model, Nuclear Technology