

Um estudo do problema de micro-extrusão de materiais bifásicos a partir da sua microestrutura utilizando OOF2 e ABAQUS

D. S. Montero, diegoscmo@outlook.com¹

M. Vaz Jr., miguel.vaz@udesc.br¹

¹Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, SC, Brasil

Resumo: Neste trabalho é realizado um estudo preliminar de um processo de micro-extrusão no qual o material é composto por duas fases microscópicas diferentes. A estratégia compreende a geração da malha da pré-forma a partir da micrografia do material contendo duas fases. O software OOF2 é empregado para a criação da malha de elementos finitos da microestrutura bifásica de um aço eutetóide, enquanto o ABAQUS[®] é utilizado para simular a micro-extrusão desse material. Simulações são realizadas com o material original e com o material dividido nas fases da microestrutura e os resultados são comparados. Devido à diferença nas propriedades das fases é possível observar a deformação predominante na fase com tensão de escoamento menor, todavia o comportamento do material como um todo é bastante similar na simulação com e sem microestrutura.

Palavras-chave: micro-extrusão, plasticidade, microestrutura, ABAQUS, OOF2.

1. INTRODUÇÃO

Pouco se estuda na literatura sobre micro-extrusão direta, em detrimento de operações tais como o ECAP (*Equal Channel Angular Pressing*). O ECAP constitui um tópico similar na área de plasticidade e consiste em extrudar um perfil por um canal angular para que ele seja deformado, porém sem redução da seção transversal. Prangnell *et al.* (1997) foi o primeiro a aplicar a técnica de elementos finitos ao problema de ECAP dado o alto interesse científico em materiais com grãos ultra-finos, devido as suas propriedades mecânicas não usuais. A partir da técnica do ECAP é possível obter os grãos refinados sem alterar a forma do material, para que este possa ser utilizado em outro processo. Posteriormente, surgiu o ECMAP (*Equal-Channel Multi-Angle Pressing*), com a extrusão em múltiplos ângulos. Kim (2002), por exemplo, realizou estudos quanto ao melhor modo de realizar a extrusão com múltiplos ângulos. Forças, ângulos e atrito do ECAP também foram estudados por Li *et al.* (2004) com interesse de verificar a influência no estado de saída da peça deformada. Chan *et al.* (2011), ao estudar o processo de micro-formagem, afirma que a previsão do comportamento de deformação é difícil já que o modelo constitutivo do material clássico já não seria mais válido quando a geometria aproxima para a escala microscópica. Este efeito é conhecido como *size-effect* (efeito do tamanho). Em sua pesquisa, Chan *et al.* (2011) estabelece um modelo constitutivo com base em testes de compressão e o estuda juntamente com análises de elementos finitos correspondentes, determinando curvas de deformação e carga para calibrar o seu modelo e validá-lo.

De maneira similar ao que é proposto neste trabalho, Puff and Barbieri (2017) realiza uma análise de elementos finitos em mesoescala de um ferro fundido cinzento, estudando o efeito das veias de grafita na matriz de perlita. A interface entre os materiais é modelada tanto com adesão perfeita quanto com atrito de Coulomb visando observar o comportamento de tensão-deformação e concentrações de tensão para comparar com a literatura.

2. O PROBLEMA DE MICRO-EXTRUSÃO

O processo de extrusão consiste em forçar a passagem de um material através de uma matriz reduzindo a sua área original e, assim, lhe dando um novo formato, conforme ilustrado na Figura 1. Na indústria em geral, a extrusão de um material é usada para dar forma a um componente e lhe conferir determinadas características. No caso da micro-extrusão, este processo é feito em uma escala geométrica muito menor, geralmente com dimensões abaixo de 6 milímetros.

Parâmetros como o material, velocidade e geometria da matriz sempre precisam ser levados em consideração. Para estudos mais avançados podem ser consideradas também as influências de atrito e temperatura. Entretanto, como o objetivo deste estudo é uma análise introdutória do comportamento de um material bifásico, no presente caso não será considerada a geração de calor por dissipação mecânica no processo.

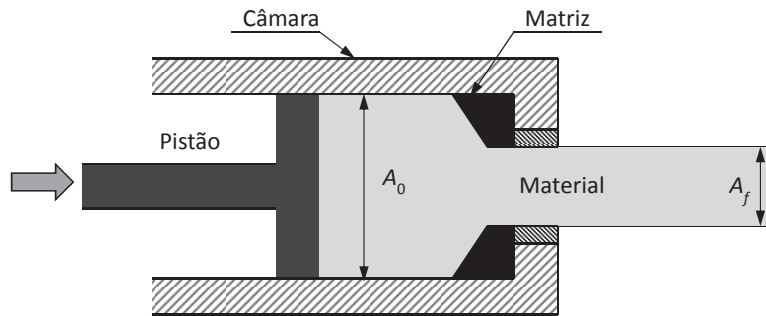


Figura 1: Diagrama simplificado de um processo de extrusão.

3. DISCRETIZAÇÃO A PARTIR DA MICROESTRUTURA

Para este estudo, é proposta a simulação de um material que possa ser representado pelas fases constituintes da sua microestrutura. Uma imagem microscópica real é discretizada por uma malha de elementos finitos, de modo que um mesmo elemento não contemple mais de uma fase do material. Assim, cada elemento da malha considera as propriedades mecânicas correspondentes a uma única fase do material.

3.1 Seleção do Material

A literatura é escassa e divergente quando se refere em quantificar individualmente as propriedades mecânicas de fases constituintes de materiais, como por exemplo as fases do aço: austenita, ferrita, perlita e cementita. Com o objetivo de realizar um estudo introdutório, os critérios de escolha do material de análise foram os seguintes: que o material pudesse ser representado por apenas duas fases constituintes e que seja de uso abundante na indústria. Cumprindo estes critérios, um aço eutetóide composto por ferrita e perlita foi selecionado.

O aço eutetóide é um aço composto por apenas duas fases: ferrita e perlita. A ferrita é formada por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa. A ferrita é o constituinte com menor resistência mecânica dos aços, sendo, porém, o mais tenaz e maleável. A ferrita também apresenta-se nos aços como constituinte e misturada com a cementita para formar parte da perlita. Se o aço é muito pobre em carbono, sua estrutura é formada quase que totalmente por grãos de ferrita. Os grãos axiais da ferrita podem ser revelados facilmente através de microscopia depois de um ataque com ácido nítrico diluído.

A perlita, formada por uma mistura eutetóide de duas fases, ferrita e cementita, é produzida durante o resfriamento da austenita. Quando a composição do aço é de 0,77%, toda a cementita é misturada à ferrita para formar perlita, chamado de ponto eutetóide. A estrutura neste ponto está constituída por lâminas alternadas de ferrita e cementita, sendo a espessura das lâminas de ferrita superior à da cementita. A perlita apresenta uma resistência mecânica maior do que a ferrita, porém mais branda e maleável que a cementita. A perlita apresenta-se em forma laminar, reticular e globular. A Figura 2(a) mostra a microestrutura do aço eutetóide que será utilizada neste trabalho. A ferrita é a fase clara e a cementita é a fase escura, sendo possível observar a interação entre a cementita e a ferrita, formando a perlita, assim como as camadas que compõem a perlita em uma vista mais ampliada na Figura 2(b).

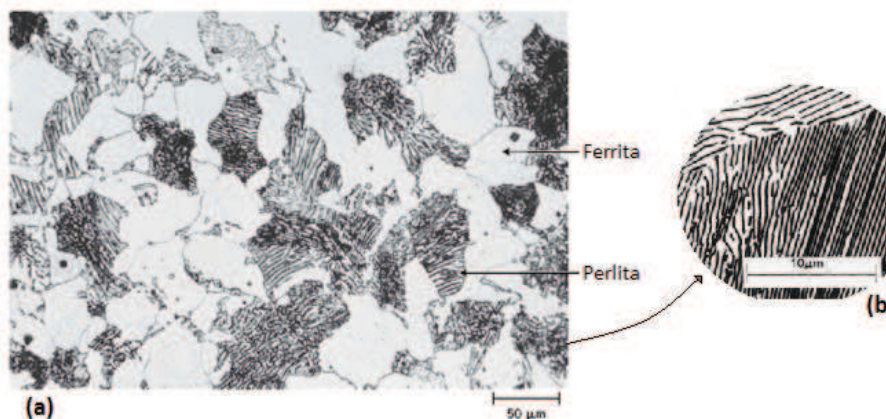


Figura 2: Microestrutura do aço eutetóide (a), e perlita ampliada (b). Fonte: Callister (2000).

Para solucionar o problema elasto-plástico, é necessária a curva de tensão vs. deformação de cada uma das fases constituintes e também do material como um todo. Collini (2004) modela o comportamento mecânico da ferrita e da perlita como um material elasto-plástico com curva de encruamento do tipo Ramberg-Osgood,

$$E\varepsilon = \sigma + \alpha\sigma \left(\frac{|\sigma|}{\sigma_0} \right)^{n-1}, \quad (1)$$

onde σ e ε são as tensões e deformações uniaxiais de cada fase constituinte, E é o módulo de elasticidade, σ_0 é a tensão de escoamento e α o offset do escoamento (quando $\sigma = \sigma_0$, $\varepsilon = (1 + \alpha)\sigma_0/E$) e n é o expoente de encruamento para o termo plástico não-linear (se $n = 1$ não há encruamento no material). Collini (2004) ajusta dados da literatura para obter os parâmetros da Eq. (1) para as fases constituintes, obtendo os valores exibidos na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades das fases. Fonte: Collini (2004).

Material	E [GPa]	ν	σ_0 [MPa]	n	α
ferrita	209	0.3	427	20.2	0.978923
perlita	209	0.3	552	5.4	0.757246

Em uma rápida análise crítica dos dados, o valor encontrado por Collini (2004) para a tensão de escoamento da ferrita difere do valor de $\sigma_0 = 280$ MPa de Callister (2000). Além disso, o módulo de elasticidade das duas fases são iguais, e isso dificilmente representa a realidade. Apesar desta aparente divergência, o modelo de Ramberg-Osgood e os valores da Tabela 1 serão utilizados neste estudo comparativo.

Neste estudo, os resultados da análise de micro-extrusão utilizando a microestrutura são comparados com os resultados de uma análise com um material homogeneizado. Para que esta análise seja válida, as propriedades das fases constituintes precisam representar um material homogêneo. Como o modelo de elementos finitos possui simetria de revolução (modelo plano), uma homogeneização simples é proposta baseada na combinação linear das áreas ocupadas por cada componente, de modo que

$$p_H = \frac{1}{A_H} \sum_{k=1}^{n_f} p_k A_k, \quad (2)$$

onde p é uma propriedade mecânica do material, $A_H = \sum_{k=1}^{n_f} A_k$ é a área total, A_k é a área da fase constituinte, n_f é o número de fases e os índices H e k representam o material homogeneizado e uma respectiva fase. No presente caso são definidas apenas duas fases. Com base nas propriedades do aço eutetóide e utilizando as referências de uma das fases, a propriedade da segunda fase pode ser determinada pela fração da área ocupada por esta.

Para a homogeneização, o cálculo das áreas é executado com auxílio do programa gerador de malha descrito na seção 3.2. É importante ressaltar que o modelo axissimétrico ignora os efeitos tridimensionais da microestrutura, mascarando o real volume de cada uma das fases. Uma abordagem tridimensional irá requerer a determinação do volume real de cada uma das fases, elevando o grau de complexidade do mapeamento e geração de malha.

As frações de áreas de 50.6 % e 49.4 % foram obtidas da microestrutura para a ferrita e perlita, respectivamente. O comportamento das curvas de deformação de Ramberg-Osgood para as duas fases constituintes e do material homogeneizado é mostrado conforme a Eq. (1). As propriedades do material homogeneizado obtidas através da Eq. (2) são: $\sigma_0 = 448.75$ MPa, $n = 12.889$ e $\alpha = 0.86945$. As curvas podem ser observadas na Figura 3, a partir da qual percebe-se que a ferrita possui um comportamento plástico quase perfeito, ou seja, a tensão de escoamento aumenta pouco com a deformação, enquanto a perlita apresenta encruamento substancialmente maior.

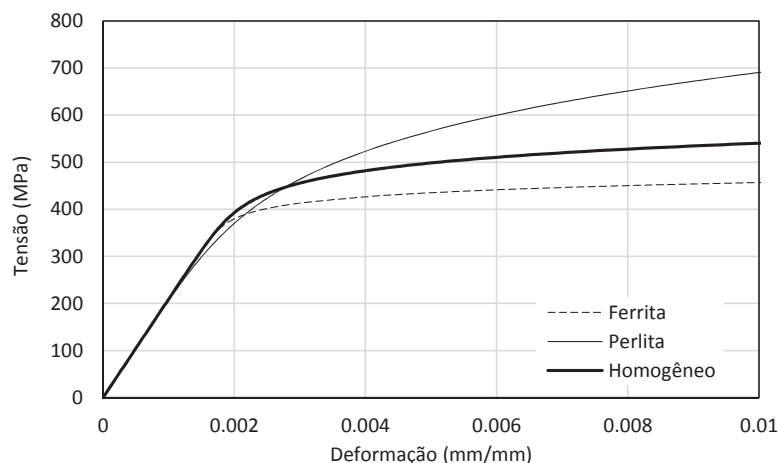


Figura 3: Curvas de tensão-deformação. Fonte: Autor.

3.2 Malha de elementos finitos

A malha foi gerada com auxílio do programa OOF2 para análise de elementos finitos de microestruturas conforme descrito em Reid *et al.* (2009). De maneira simplificada, o programa utiliza uma imagem como entrada, permitindo a seleção dos pixels referentes a cada fase do material para a seleção e geração a malha. O procedimento considera o controle do tamanho dos elementos, de modo que um mesmo elemento não contenha duas fases. O programa também

pode realizar análises de elementos finitos e possui diversas outras funções, entretanto, neste trabalho utilizou-se apenas a função de criação da malha da microestrutura.

Após seleção das fases, classificação dos pixels em dois grupos e atribuição dos materiais, a geração da malha é realizada com os parâmetros padrão do programa, juntamente aos parâmetros de tamanho de elemento. Um parâmetro de tamanho máximo é utilizado para criar uma primeira malha estruturada, e, a partir desta malha, os elementos são alterados até um tamanho mínimo visando separar os dois tipos de materiais. Os passos podem ser observados no exemplo da Figura 4, onde, a partir de uma malha inicial, 4(a), ocorrem refinamentos subsequentes, 4(b) e 4(c), sendo o segundo refino o mais importante, onde novos nós são criados nos pontos de transição dos materiais. A racionalização, 4(d), corrige a forma de alguns elementos, como triângulos finos e retângulos longos e, finalmente, a malha é suavizada e está pronta para análise, Figura 4(e).

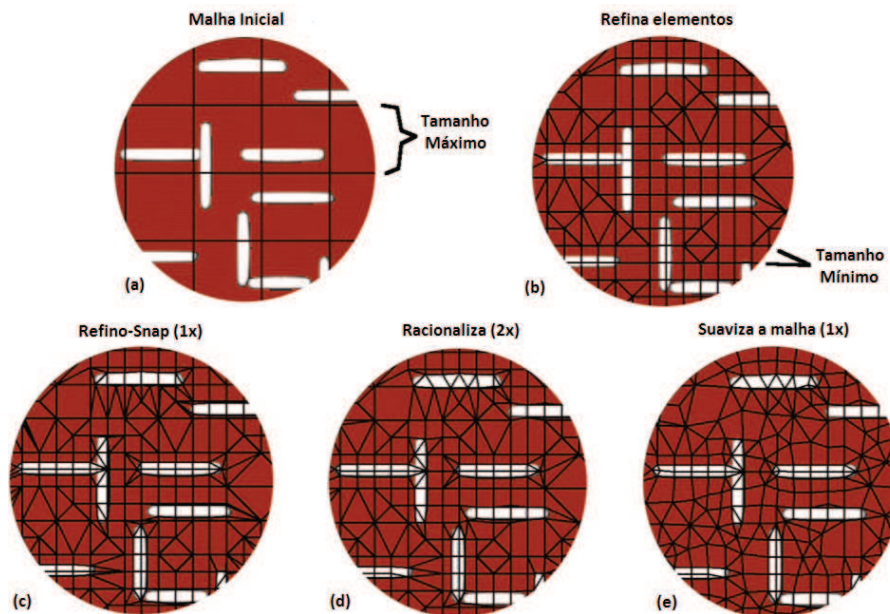


Figura 4: Funcionamento do OOF2. Fonte: Reid *et al.* (2009).

Para facilitar a identificação das fases no programa OOF2, a micrografia é previamente tratada para que a ferrita seja completamente branca e a perlita possua tons de cinza. A seleção dos pixels da perlita pode ser observada na Figura 5(b), assim como duas tentativas de refino de malha mostradas nas Figuras 5(c) e 5(d).

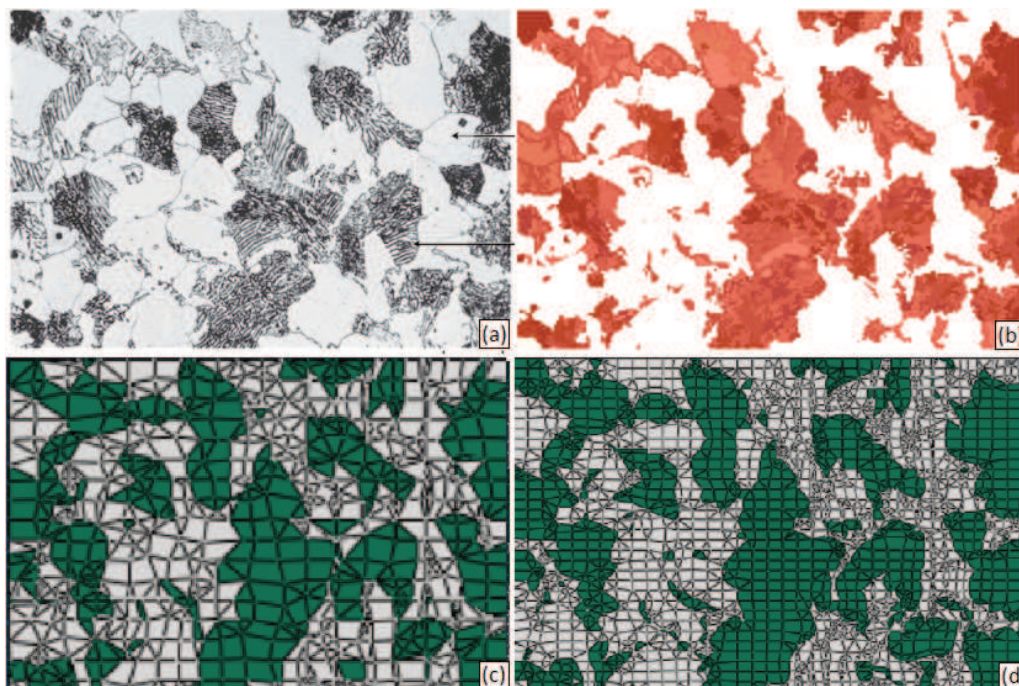


Figura 5: Etapas na obtenção da malha: (a) Microestrutura original, (b) seleção dos pixels, (c) malha mais grosseira e (d) malha mais refinada.

Como a imagem metalográfica real possui $300\ \mu\text{m}$ de altura por $400\ \mu\text{m}$ de largura, neste trabalho a imagem é repetida

algumas vezes para gerar a seção axissimétrica da peça. Para que não houvesse descontinuidades na malha, a imagem foi replicada e espelhada três vezes em cada direção para ser posteriormente processada no OOF2. Esta estratégia permitiu que fosse utilizado um tamanho da pré-forma de 0.825 mm de comprimento por 1.225 mm de largura. Devido à simetria de rotação, a largura representa o diâmetro da pré-forma, de modo que o material a ser extrudado apresenta um diâmetro de 2.45 mm . A malha final utilizada pode ser observada na Figura 6 e possui 8926 elementos. A malha mais refinada mostrada na Figura 5(d), com 27906 elementos, não foi utilizada visando diminuir o tempo computacional.

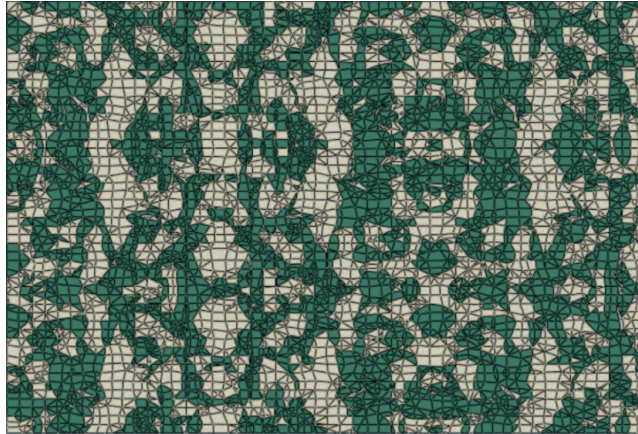


Figura 6: Malha utilizada nas simulações (8926 elementos).

4. MODELO NUMÉRICO

Com os materiais e a malha já definidos, é necessário considerar alguns parâmetros para a geometria da micro-extrusão. Kathirgamanathan (2006) estudou um problema de micro-extrusão de tamanho regular através do programa ABAQUS®. Uma geometria da matriz similar é aplicada neste trabalho. Ângulos de matriz maiores levam a uma área de interface de fricção maior entre a peça e a matriz, entretanto, quando o ângulo é pequeno, a superfície é pequena, porém mais "turbulência" ocorre. Segundo o autor, existe um ângulo ótimo, mas este depende do material, temperatura e regime de fricção. Neste trabalho é utilizado um ângulo de 45° , sendo adicionados pequenos raios nas interfaces retas para suavizar a matriz. A redução de diâmetro de 65% do trabalho original é mantida neste estudo.

O comprimento do canal de saída também possui dependência com material, temperatura e atrito. Entretanto é utilizado um valor arbitrário de duas vezes o diâmetro de saída. Kathirgamanathan (2006) aplica um valor de $V_0 = 5\text{ m/s}$ para a velocidade de entrada, este valor é ajustado neste estudo para diminuir o tempo de simulação. Quanto ao coeficiente de atrito matriz-material, Kathirgamanathan (2006) estudou valores de 0.05 até 0.25 e concluiu que a variação do raio da peça já extrudada aumenta conforme é incrementado o atrito, assim como também existem aumentos na velocidade e nas tensões. Neste trabalho é utilizado um contato sem atrito, já que não há interesse na geração térmica do processo.

No modelo, a seção axissimétrica do material inicia sem deformações e com uma velocidade inicial $V_0 = 20\text{ mm/s}$. A matriz é criada com uma geometria do tipo linha, indeformável e com engaste como condição de contorno. O modelo esquemático com as dimensões para simulação pode ser observado na Figura 7.

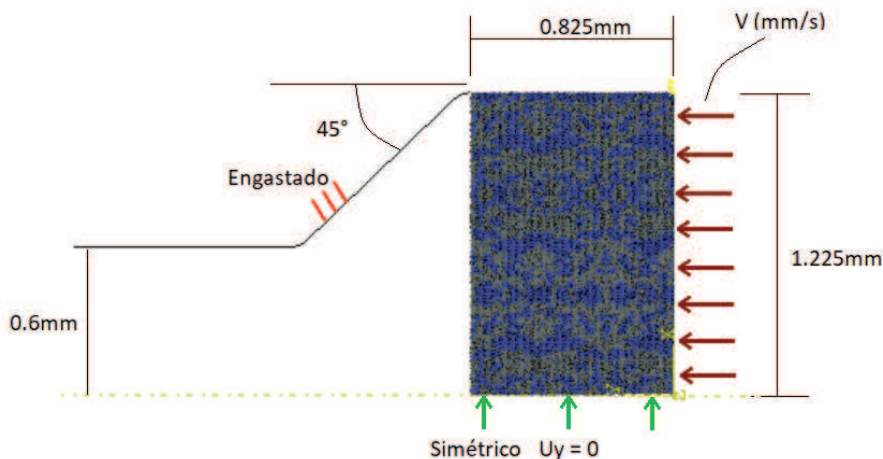


Figura 7: Modelo da simulação do problema de micro-extrusão.

A malha do material a ser extrudado é composta por elementos quadriláteros (4 nós, bilinear, integração reduzida, axissimétrico com controle de modo espúrio) e também de elementos triangulares (3 nós, linear e axissimétrico). A relação entre as diferentes fases do material não considera contato ou atrito, ou seja, os nós são compartilhados com propriedades

específicas para cada elemento. As simulações foram realizadas por um tempo inferior a 0.1 s, tempo suficiente para a pré-forma atravessar a região em ângulo da matriz, pois o passo de integração necessário para estabilidade durante as iterações foi de 1.0×10^{-8} .

5. RESULTADOS

Duas simulações diferentes foram executadas com o intuito de comparar o padrão de deformação: a primeira utilizando as propriedades do material homogeneizado e a segunda utilizando as propriedades das fases nos seus respectivos elementos. As duas simulações utilizaram a mesma malha de elementos finitos para que não houvesse influência da mesma nos resultados.

A Figura 8 mostra o resultado das simulações para a tensão equivalente de *von Mises*. A malha foi suprimida para facilitar a visualização. Nas Figuras 8(a) e 8(b) observa-se a tensão equivalente de *von Mises* para os passos intermediários da análise com o material homogeneizado, enquanto que as Figuras 8(c) e 8(d) mostram o material bifásico. Nota-se claramente que o padrão de deformação no material clássico é uniforme, assim como a distribuição de tensões é suave durante todo o processo. Já no caso do material bifásico, é possível verificar que há uma grande diferença entre a tensão de cada uma das fases.

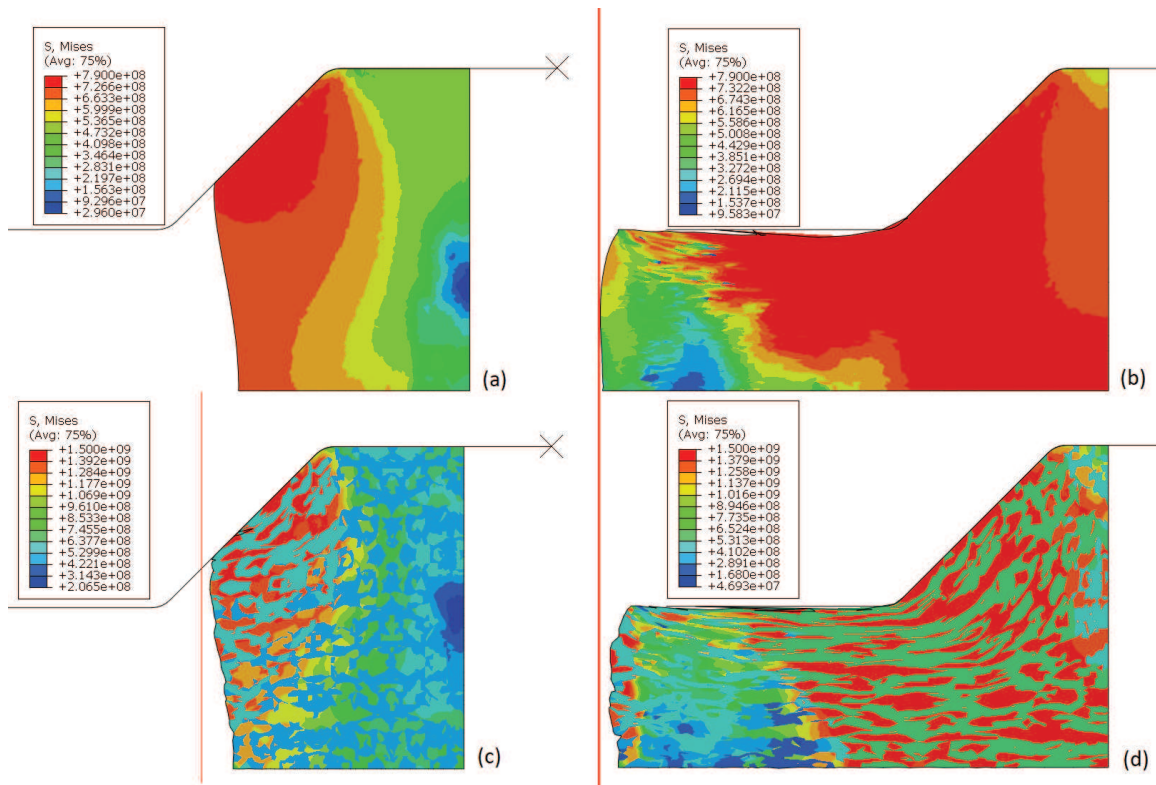


Figura 8: Tensão equivalente de von Mises [Pa]: (a) e (b): Material homogeneizado, (c) e (d): Material bifásico.

A tensão máxima no material homogeneizado é 790 MPa, sendo que as tensões máximas na ferrita e na perlita são aproximadamente 580 MPa e 1500 MPa, respectivamente. Ressalta-se que, a partir de um valor de deformação $\varepsilon_p \geq 1 \text{ mm/mm}$, o ABAQUS® considera plasticidade perfeita, limitando, neste caso, a um valor de tensão máxima da perlita igual a 1500 MPa. Analisando a resposta do modelo bifásico, percebe-se que após chegar em seu ponto de escoamento, a ferrita segue absorvendo quase toda a deformação da peça. A deformação total no material bifásico é ligeiramente menor (linha vertical vermelha, Figura 8) devido à consideração da plasticidade perfeita mencionada anteriormente. A deformação neste material aparenta acomodar-se melhor à matriz, isto pode ser tanto devido a interação entre as fases quanto à alta distorção dos elementos na fronteira material-matriz. Em um ensaio real, espera-se que a ferrita encruze para que haja um gradiente de tensão uniforme, a constatação desta diferença indica um possível erro nas propriedades dos materiais. É possível ver que a ferrita, apesar de ter uma tensão baixa, ainda consegue transmitir tensão para partes subseqüentes da perlita. Existem veios de ferrita na direção da extrusão, formando regiões que se deformam demasiadamente, levando a uma grande distorção dos elementos. Isto cria um plano por onde a perlita menos deformada “flui”, conforme pode ser visto na Figura 8(d). Isto não ocorre no material homogêneo.

A Figura 9 mostra a magnitude das forças necessárias para manter a velocidade de extrusão imposta. De imediato, nota-se que o material bifásico precisa de uma força maior de extrusão, justamente devido ao maior endurecimento da perlita. As duas curvas mostram uma diminuição após um deslocamento do pistão de 0.6 mm (estágio ilustrado nas Figuras 8(b) e 8(d)), devido a um alívio das tensões na parte central da material extrudado.

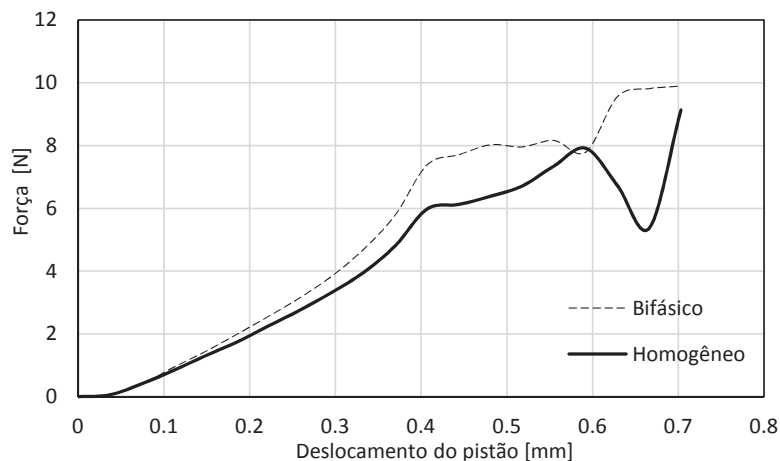


Figura 9: Forças durante a simulação.

6. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Para melhorar a qualidade da análise, a malha de elementos finitos original necessita de um refino maior com vistas a melhor representar as diferenças dos contornos de grão. O próximo passo deste trabalho é a utilização de uma malha adaptativa para evitar uma grande distorção dos elementos. No ponto de vista da composição de fases do material, neste trabalho a perlita foi considerada como apenas uma fase. Entretanto, a perlita é composta por ferrita e cementita, e em uma análise mais refinada, esta composição deverá ser considerada. As propriedades das fases constituintes dos materiais são de difícil obtenção, este trabalho pode ser estendido com uma parte experimental relacionando a dureza de cada uma das fases do material com as respectivas propriedades.

7. REFERÊNCIAS

- Callister, W.D., 2000. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma introdução*. Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil. 589 p.
- Chan, W.L., Fu, M.W. and Lu, J., 2011. "Experimental and simulation study of deformation behavior in micro-compound extrusion process". *Materials and Design*, Vol. 32, p. 525–534.
- Collini, L., 2004. *Micromechanical Modeling of the Elasto-Plastic Behavior of Heterogeneous Nodular Cast Iron*. Doctorate thesis, Università Degli Studi di Parma.
- Kathirgamanathan, P., 2006. "Modeling of metal extrusion using abaqus". *The Proceedings of 3rd New Zealand Metals Industry*.
- Kim, H.S., 2002. "Finite element analysis of deformation behaviour of metals during equal channel multi-angular pressing". *Materials Science and Engineering*, Vol. 328, pp. 983–989.
- Li, S., Bourke, M.A.M., Beyerlin, I.J., Alexander, D.J. and Clausen, B., 2004. "Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion". *Materials Science and Engineering*, Vol. 382, p. 217–236.
- Prangnell, P.B., Harris, C. and Roberts, S.M., 1997. "Finite element modelling of equal channel angular extrusion". *Scripta Materialia*, Vol. 37, p. 317–323.
- Puff, R. and Barbieri, R., 2017. "Gray cast iron matrix simulation in mesoscale". *VI International Symposium on Solid Mechanics - MecSol*.
- Reid, A.C.E., Lua, R.C., Garcia, R.E., Coffman, V.R. and Langer, S.A., 2009. "Modelling microstructures with oof2". *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol. 35, p. 361–373.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A study of the micro-extrusion problem considering the microstructure of biphasic materials using OOF2 and ABAQUS

D. S. Montero, diegoscmo@outlook.com¹

M. Vaz Jr., miguel.vaz@udesc.br¹

¹Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, SC, Brazil

Abstract: *This work presents a preliminary study of a micro-extrusion process for a material composed of two different microscopic phases. The first step comprises generating the mesh for the preform from the micrograph of a two-phase material. In a second stage, the OOF2 software is used to generate the finite element mesh of the biphasic microstructure of a eutectoid steel. The commercial software ABAQUS[®] is used to simulate the micro-extrusion of this material. Simulations are performed for biphasic material and a corresponding homogenised material. Due to differences in the properties of the phases, it is possible to observe the predominant deformation in the phase with lower yield stress; however the behaviour of the material as a whole is similar in the simulation in both cases.*

Keywords: *micro-extrusion, plasticity, microstructure, ABAQUS, OOF2*