

Finite element simulation of ECAP strain of commercially pure titanium

Simulação por elementos finitos da deformação por ECAP de titânio comercialmente puro

Article Info:

Article history: Received 2022-09-20 / Accepted 2022-10-03 / Available online 2022-10-05

doi: 10.18540/jcecv18iss6pp14740-01i

Vagner dos Anjos Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9162-6030>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: vagner1211costa@gmail.com

Wilton Walter Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6667-8947>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: wiltonwalter@hotmail.com

Resumo

O ECAP é um processo de deformação plástica severa de materiais, onde se busca produzir o refino da granulometria na microestrutura. Materiais processados por ECAP apresentam melhorias em suas propriedades mecânicas, como a associação entre a elevação da resistência mecânica junto ao aumento da ductilidade. As variáveis de processo que interferem no refino microestrutural são: tipos de matriz, rota de processamento e número de passes de deformação. Na matriz ECAP empregada no processo de deformação, os ângulos de canal e curvatura determinam a eficiência do refino microestrutural, que pode possibilitar aplicações tecnológicas diversas para os materiais processados. O presente trabalho tem o objetivo de avaliar virtualmente os níveis de deformação por oito passes via ECAP do titânio em estado comercialmente puro, em matriz com ângulo de canal de 120°. O corpo de prova e a matriz foram modelados e simulados numericamente por elementos finitos por meio da interface de modelagem e do ambiente de simulação no Abaqus – versão 2020 com licença estudantil. A matriz ECAP foi cadastrada empregando-se parâmetros de um material de corpo rígido, ou seja, não sofreu deformação durante todo o processo, haja vista que o interesse foi o de analisar as deformações do material estudado. Os parâmetros físicos foram estabelecidos previamente por meio do cadastro das variáveis físicas e mecânicas no software. O material foi submetido a oito passes de deformação na matriz ECAP, em uma rota de processamento A, e os resultados foram analisados para verificar as deformações totais que o material foi submetido. Foi possível dessa forma analisar previamente sua aplicação física posterior com maior confiabilidade, maior conhecimento do material a ser trabalhado nos corpos de prova, maior economia com a antecipação de problemas que antecedem a prática experimental real, evitando-se assim erros e obtendo-se maior exatidão no tratamento do mesmo.

Palavras-chave: ECAP. Deformação plástica severa. Titânio. Elementos Finitos.

Abstract

ECAP is a process of severe plastic deformation of materials, which seeks to refine the granulometry in the microstructure. Materials processed by ECAP show improvements in their mechanical properties, such as the association between the increase in mechanical strength and the increase in ductility. The process variables that interfere in the microstructural refinement are: matrix types, processing route and number of deformations passes. In the ECAP matrix used in the deformation process, the channel and curvature angles determine the efficiency of the microstructural refining, which can enable different technological applications for the processed materials. The present work

has the objective of virtually evaluating the strain levels by eight passes via ECAP of titanium in a commercially pure state, in a matrix with a channel angle of 120° . The specimen and matrix were numerically modeled and simulated by finite elements through the modeling interface and simulation environment in Abaqus – 2020 version with student license. The ECAP matrix was registered using parameters of a rigid body material, that is, it did not undergo deformation during the entire process, given that the interest was to analyze the deformations of the material studied. The physical parameters were previously established by registering the physical and mechanical variables in the software. The material was subjected to eight deformation passes in the ECAP matrix, in a processing route A, and the results were analyzed to verify the total deformations that the material was subjected to. It was thus possible to previously analyze its later physical application with greater reliability, greater knowledge of the material to be worked on the specimens, greater savings with the anticipation of problems that precede the actual experimental practice, thus avoiding errors and obtaining greater accuracy in its treatment.

Keywords: ECAP. Severe plastic deformation. Titanium. Finite elements.

1. Introdução

Estudos em torno de melhorias nas propriedades mecânicas de materiais que são aplicados na indústria e na engenharia por meio de modificações da microestrutura tornam-se essenciais por ampliarem as avaliações e melhorarem o desempenho mecânico do material. Os materiais metálicos são constantemente avaliados para verificar possíveis melhorias em sua microestrutura que ampliem os campos de aplicações ofertando maior segurança e melhor desempenho mecânico, os processos de deformação plástica severa aparecem como alternativas de melhoria potencial desses materiais, (Handbook, 1990; Valiev & Langdon, 2006).

Deformação plástica severa (SPD) é um processo de conformação que impõe grandes deformações no material sem provocar mudanças dimensionais da peça trabalhada, permitindo a obtenção de materiais de alta resistência mecânica. Os primeiros relatos descritos da aplicação do processamento de SPD para obter uma microestrutura de granulometria ultrafina (UFG) e propriedades excepcionais de materiais apareceram na literatura russa em 1988, (Valiev & Langdon, 2006).

As principais técnicas de deformação plástica severa são: laminação acumulativa (Accumulative Roll-Bonding - ARB), torção sob elevada pressão (High Pressure Torsion - HPT) e prensagem em canais equiangulares (Equal Channel Angular Pressing – ECAP). O ECAP destaca-se por proporcionar grandes deformações na peça trabalhada sem modificação de sua geometria inicial, com alto potencial de refino de grão e melhoria das propriedades mecânicas por meio da associação entre a ductilidade e resistência mecânica do material (Azushima et al., 2008; Sabirov et al., 2013).

O ECAP é um processo de deformação plástica por extrusão, onde grandes deformações por cisalhamento são impostas ao material por meio de compressão ao longo dos canais de uma matriz, sem que ocorram mudanças significativas nas suas dimensões. A matriz é dividida em dois canais que se interceptam formando o ângulo de canal Φ , o qual representa a quantidade de deformação imposta por passe de extrusão (Valiev & Langdon, 2006). No ECAP é possível se trabalhar com amostras fabricadas em geometrias diversas, o que diferencia este processo dos demais métodos em SPD. Os materiais podem ser processados de forma mais simplificada comparando aos demais procedimentos de SPD, pois não gera a necessidade de que o material se disponha em chapas finas por exemplo, possibilitando também a aplicação em lingotes grandes de maneira que há potencial para produção de materiais via ECAP para aplicações estruturais (Ferrasse et al., 2004; Valiev & Langdon, 2006).

No processo ECAP o material recebe a carga de compressão do punção e escoamento no interior dos canais da matriz. Os canais da matriz se interceptam com ângulo de canal Φ e ângulo de curvatura ψ , que são variáveis importantes de processo. A natureza da deformação imposta é de

cisalhamento simples que ocorre quando a amostra passa através da curvatura da matriz, (Valiev & Langdon, 2006).

O ângulo de canal Φ é a variável de processo mais significativa, determinando a deformação total aplicada em cada passe. Quanto menor for o valor do ângulo Φ maior será a deformação (Valiev et al., 2012; Valiev & Langdon, 2006).

O ângulo de curvatura Ψ está ligado as tensões de cisalhamento impostas ao tarugo e apresenta pouca influência nos níveis de deformação da amostra, porém estudos afirmam que o ângulo Ψ possui efeito direto na homogeneidade de deformação da amostra, ou seja, quanto mais elevado for o valor do ângulo Ψ , maior a homogeneidade do material deformado (Mathaudhu et al., 2005; Santos, 2018; Valiev & Langdon, 2006).

O titânio e suas ligas são amplamente utilizados no campo médico em aplicações ortopédicas assumindo papel crucial neste setor como um dos principais biomateriais do mercado e seu emprego é amplamente difundido. Diversas investigações tem sido desenvolvidas nas últimas décadas buscando melhorias na fabricação de produtos à base de titânio (Ti) com inúmeras aplicações, tais como, em ambientes de alta corrosão, no setor aeroespacial, na produção de equipamentos industriais e no campo médico como já foi citado. Para essa última aplicação mencionada aparecem as ligas do tipo β e β -metaestável, que no campo biomédico são promissoras por conta das propriedades que envolvem boa biocompatibilidade, alta resistência mecânica e baixo módulo de elasticidade sendo o titânio comercialmente puro - Ti CP um dos biomateriais com o módulo de elasticidade mais próximos ao osso humano, (SILVA, 2017; SORDI et al., 2012; CHEN; THOUAS, 2015; ZHOU; NIINOMI, 2009; HUANG et al., 2022).

A liga de Ti-6Al-4V é o derivado de titânio que foi mais utilizado como biomaterial nos últimos anos em soluções ortopédicas, porém problemas relacionados a sua biocompatibilidade devido aos altos teores de vanádio e alumínio acabam as tornando tóxicas ao corpo. A não utilização do titânio comercialmente puro em ligas ortopédicas se resume a necessidade da melhoria de suas propriedades mecânicas, necessitando dessa forma da adição de elementos de liga pra a melhoria dessas propriedades, porém uma alternativa muito promissora para melhorar as características desse material em seu estado puro é o refino de sua microestrutura por meio do processamento via ECAP. Nesse contexto é comprovado que a resistência mecânica e a ductilidade do titânio comercialmente puro deformado por ECAP é igual, e até em alguns casos superior a liga Ti-6Al-4V, (Banerjee & Williams, 2013; Roodposhti et al., 2015; Silva, 2017; Wu et al., 2017; Zhao et al., 2008).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica, que utiliza conceitos de aproximação na análise empregando o sistema de equações na condição do equilíbrio Lagrangiano, que supõe que a malha de elementos finitos está fixa ao material estudado, acompanhando assim sua deformação total, onde cada ponto material torna-se função das coordenadas dimensionais e do tempo. As análises utilizadas neste método podem se apresentar de forma bidimensional ou tridimensional. A forma tridimensional é a mais utilizada devido a integração de toda a geometria para a análise, ao avanço no desenvolvimento de softwares específicos para simulações e criação de modelos virtuais. O MEF possibilita que cada ponto material se torne função das coordenadas dimensionais, largamente utilizado para obtenção de solução de problemas mecânicos, idealizados a partir de pontos virtuais (nós), e da conectividade de regiões discretas (elementos) que representam o domínio do problema. Esse conjunto gerado de nós e elementos, chamado de malha de elementos finitos representa numericamente o modelo físico real (Pinho, 2013; Xavier, 2011).

O objetivo central do MEF é a determinação dos estados de tensão e de deformação de um sólido com geometria arbitrária sujeito a ações externas. Trabalhos utilizando o MEF possuem o objetivo de alcançar uma solução satisfatória, mesclando termos econômicos aos pré-requisitos funcionais e normativos voltados ao estudo em questão (Azevedo, 2003).

O MEF é bastante utilizado como método de resolução de problemas em engenharia que envolvem o emprego de grandes deformações, pois apresenta como base os princípios variacionais de forma sólida, essa abordagem numérica atualmente é a que apresenta os resultados de maior confiança. Utilizando essa metodologia é possível reduzir e fragmentar problemas de geometrias complexas delimitando-os em espaços geométricos definidos e atribuindo equações conhecidas,

tornando assim factível o desenvolvimento de uma solução dentro de um número finito de pontos subdivididos em regiões parciais que podem ser chamadas de malhas (Vieira & Coelho, 2020).

Wongsa-Ngam et Al. (2021) desenvolveram um dos poucos estudos da literatura que envolvem a simulação numérica do ECAP em múltiplos passes de deformação em uma liga Cu-Zr com matriz de secção circular, ângulo de canal $\Phi=110^\circ$ e ângulo de curvatura $\Psi=20^\circ$, onde obtiveram sucesso ao mapear a homogeneidade de deformação em até oito passes pelos canais.

Estudos que envolvem a análise das deformações impostas pelo ECAP por meio da modelagem por elementos finitos são escassos, o objetivo desse trabalho é sanar esse déficit e promover uma análise objetiva em torno do processo de deformação total do corpo de prova e as tensões aplicadas pontualmente por toda a peça de trabalho para que dessa forma seja possível conhecer melhor o processamento ECAP e otimizar o processo de maneira virtual, possibilitando assim a prevenção de erros e obtenção de resultados mais amplos no estudo real.

2. Metodologia

O software comercial Abaqus 2020 edição estudantil foi usado para simular o processamento ECAP em oito passes de Titânio no estado de pureza comercial. A peça de trabalho e a geometria utilizada foram modeladas de acordo com descrições em experimentos anteriores realizados na Universidade Federal de Sergipe (UFS), (Santos, 2018; Silva, 2017). Onde a peça de trabalho foi modelada na forma de blocos maciços com base quadrada de 6 x 6 mm e um comprimento de 10 mm, e foi processado usando um sólido de canal interno com as mesmas dimensões de base quadrada de 6 mm² configurado como corpo rígido com um ângulo de canal $\Phi=120^\circ$ e um ângulo de curvatura de $\Psi=0^\circ$ a rota de processamento escolhida foi a rota A, onde não há rotação do corpo de prova entre os passes e foi considerada e configurada a temperatura ambiente para o processamento de 20°C. Essa modelagem foi seguida e utilizada na simulação. O comportamento do corpo de prova é abordado como um material elástico-plástico, possibilitando assim a descrição da deformação de um material sob condições que promovam deformações severas, que é o caso do presente estudo. A “Figura 1” mostra o modelo elaborado do ECAP na interface de desenvolvimento do Abaqus com o corpo de prova interno a matriz.

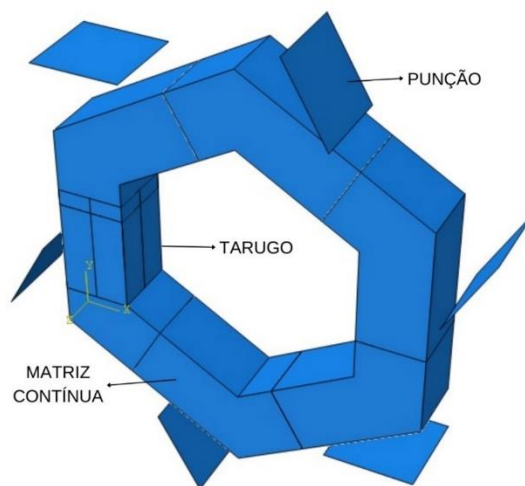


Figura 1 – Modelo desenvolvido para a simulação do ECAP.

Para determinar as condições plásticas por meio da curva de tensão x deformação do titânio foram seguidos os dados do estudo de Zhang et al. (2020), como seguem na “Figura 2”.

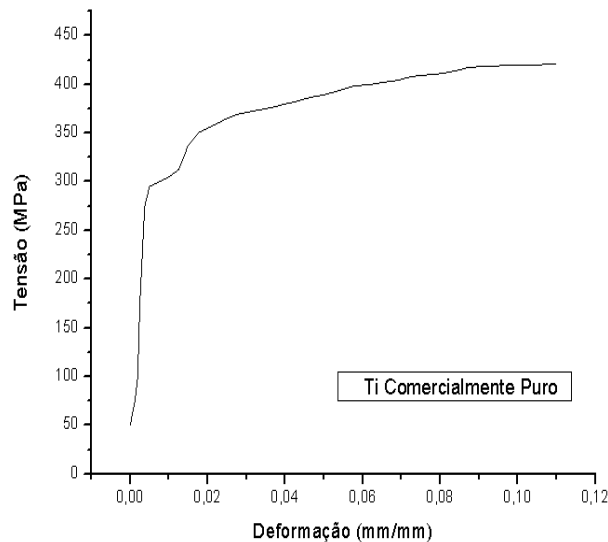


Figura 2 – Gráfico de Tensão x Deformação do titânio comercialmente puro, Adaptado pelos autores do estudo de Zhang et al. (2020).

Os valores relacionados as propriedades físicas e elásticas do titânio: densidade, módulo de Young e coeficiente de Poisson, foram retirados de Handbook (1990) como seguem na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas e elásticas do titânio, (Handbook, 1990).

Densidade	4,39 g/cm ³
Módulo de Young	103 GPa
Coeficiente de Poisson	0,34

As simulações com o titânio comercialmente puro foram realizadas com uma velocidade de prensagem de 1 mm/s. O valor do coeficiente de fricção entre o corpo de prova e a matriz foi determinado em 0,1 valor esse recomendado para processamentos utilizando o MoS₂. O corpo de prova foi modelado e sua malha foi refinada com 360 elementos para melhor mapeamento das deformações e das tensões pontuais aplicadas em cada região do objeto de estudo, como segue a vista com detalhamento tridimensional da peça em pré-processamento com aplicação e inserção da malha mostrado na “Figura 3”.

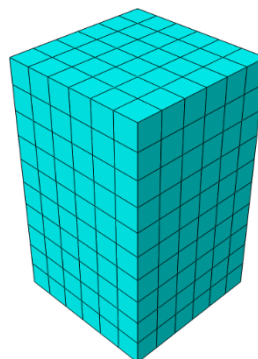


Figura 3 – Vista tridimensional do corpo de prova em divisão com os elementos e malhas.

No processo ECAP foi adotada uma convenção para os planos de deformação observados na “Figura 4”. O plano X ou transversal é perpendicular à direção de passagem do tarugo através dos canais, o plano Z ou longitudinal fica em contato com as faces superior e inferior dos canais da matriz e o plano Y ou lateral é paralelo e está em contato com as faces laterais dos canais da matriz

(Valiev et al., 2006). Para esse estudo será empregado o plano Y na análise da modelagem numérica e no mapeamento das deformações.

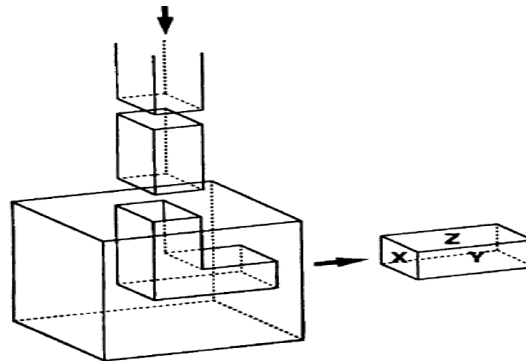


Figura 4 – Planos de deformação (Valiev & Langdon, 2006).

A situação do material simulado em forma de tarugo a cada passe foi plotada no plano Y para a análise do mapeamento atrelado aos níveis de deformação do primeiro ao oitavo passe por meio da escala de deformação plástica equivalente nos Pontos de integração-PEEQ.

3. Resultados e Discussões

Abaixo pode ser destacado através da “Figura 5” o tarugo na horizontal no plano Y externamente, dividido teoricamente em três partes para facilitar a discussão, essas regiões foram analisadas e discutidas sendo chamadas de regiões da cabeça, centro e calda do tarugo. As malhas foram inseridas no ambiente do software Abaqus previamente aos passes, a esquerda é possível observar a escala PEEQ, escala essa responsável pelo mapeamento e verificação das deformações e dos níveis de deformações que o tarugo sofreu durante o processamento.

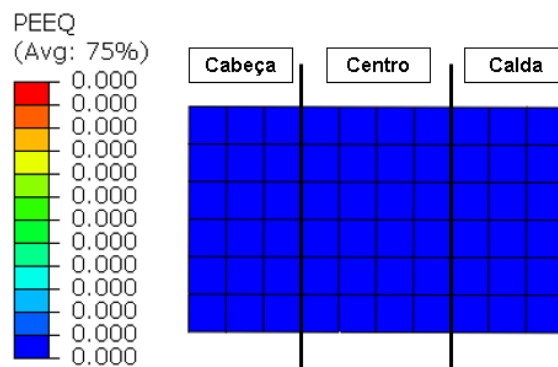


Figura 5 – Corpo de prova no plano Y externamente sem deformação por passes de ECAP com divisão teórica em três partes: cabeça, centro e calda.

Na “Figura 6” é possível observar o tarugo no plano Y externo após o primeiro passe de deformação por ECAP simulado por meio do software Abaqus, apenas com o primeiro passe com o auxílio da escala PEEQ já é possível identificar o alto potencial de deformação aplicado, principalmente na região central do corpo de prova que engloba a zona de deformação plástica, em vista que no processamento via ECAP o tarugo experimenta intensa plasticidade ao ser pressionado através da região de interseção entre o canal, onde isso pode ser denotado como zona de deformação plástica-ZDP, (Wongsa-Ngam et al., 2021). Região essa que sofre grande deformação por cisalhamento, ou seja, o tarugo é deformado por meio da ativação dos planos de deslizamento que

são correlacionados a movimentação das discordâncias, já apresentando predominância de níveis de deformação em escala entre 0.276 e 0.635.

O canto da parte inferior direita do tarugo de forma pontual sofre a maior incidência de deformações, essa região é a região de contato com o ângulo de canto da matriz na parte interna de intersecção entre os canais, o ângulo de curvatura baixo assume a maior responsabilidade por essa grande deformação pontual, em vista que o tarugo em mobilidade de rotação não consegue efetuar o giro de forma suave necessitando da geração de grande atrito com a matriz naquela região para conseguir completar a totalidade de sua rotação entre os canais da matriz.

É possível apontar por meio da “Figura 6” que as regiões chamadas de cabeça do tarugo e calda do tarugo, onde podem ser observadas na parte esquerda e na parte direita da imagem respectivamente são as regiões que passam pelos menores níveis de deformações sofridas por meio de um passe de ECAP.

A deformação por um passe de ECAP não oferece homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise do plano Y se analisado o tarugo de forma global.

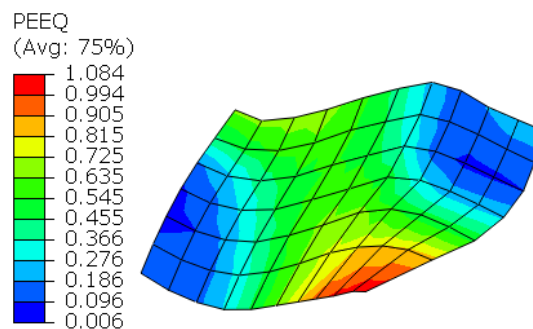


Figura 6 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por um passe de ECAP.

No passe por ECAP de número dois mostrado por meio da “Figura 7” já é perceptível uma pequena elevação da homogeneidade de deformação, onde todo o plano do corpo de prova analisado já sofreu parcialmente algum nível de deformação, destacando o nível em escala entre 0.152 e 0.289 como os menores índices perceptíveis de deformação, porém percebe-se que esses níveis de deformação são distintos, gerando dessa forma uma grande heterogeneidade dos valores, onde é possível visualizar que na parte central da peça que engloba a região deformada que pertence à ZDP gerada por meio da ativação dos planos de deslizamento das discordâncias. Sendo a região mais destacada por possuir características apresentáveis de igualdade ou similaridade dos níveis de deformação, predominantemente homogênea e com valores em escala entre 0.426 e 0.973 com elevação média dos níveis de deformação entre 0.15 e 0.338 em comparação ao primeiro passe.

A cabeça e a calda do tarugo ainda possuem os menores níveis de deformação, a cabeça na parte superior esquerda concentra pontualmente o maior nível de deformação sofrida, justificado pelo atrito entre punção, tarugo e a matriz na região do canto externo entre na intersecção dos canais, a parte da calda na parte inferior direita diferentemente do primeiro passe passou a apresentar índices menores de deformação, muito por conta do mecanismo de encruamento sujeito ainda no primeiro passe que modificou substancialmente a estrutura gerando no segundo passe menor atrito entre a peça e a matriz na região correlata ao ângulo do canto interno ao canal, porém percebe-se que a região possui níveis pontuais elevados de deformação gerada por atrito se comparada as demais partes de deformadas.

A deformação por dois passes de ECAP ainda não oferece homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise do plano Y externamente se analisado o tarugo de forma global.

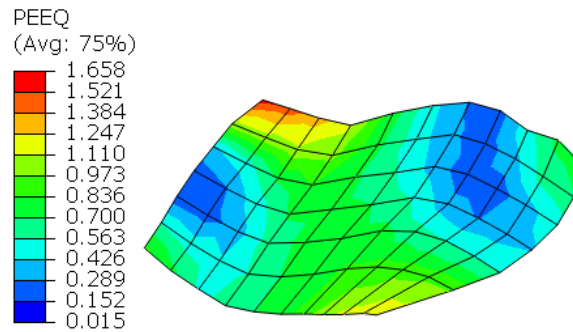


Figura 7 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por dois passes de ECAP.

A “Figura 8” mostra os níveis de deformação apresentados pelo Tarugo deformado via ECAP em três passes, onde é observada a elevação dos níveis de deformação que o tarugo sofreu e já é perceptível que a região mais ao centro do corpo de prova é a parte com os níveis de deformação em escala mais homogêneos com predominância em escala entre 0.496 e 0.978 com elevação da deformação em comparação ao segundo passe entre 0.07 e 0.005.

As regiões de canto do espécime que entram em contato com as arestas formadas pelos ângulos de intersecção nos canais da matriz ainda possuem pontualmente níveis muito elevados de deformação.

No caso da cabeça do tarugo a deformação pontual ainda é maior tanto pela interação de atrito entre o punção e o corpo de prova quanto e principalmente pelo contato de atrito com o ângulo externo do canal da matriz, onde a deformação foi maior devido a maior interação por contato via atrito gerada pela cinética de deformação no giro do tarugo submetido ao ECAP no momento de intersecção entre os canais, no caso do canto inferior direito do tarugo (região da calda) a deformação sofrida gerou uma movimentação abrupta muito elevada dos planos de deslizamento gerando uma concentração de tensões, com encruamento pontual e em consequência a geração de deformações muito elevadas ainda no primeiro passe mudando a forma rapidamente do corpo de prova. O valor desse nível de deformação vem se mantendo constante e tendendo a se igualar as deformações sofridas na região central.

A deformação por três passes de ECAP ainda não oferece homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise do plano Y externamente se analisado o tarugo de forma global.

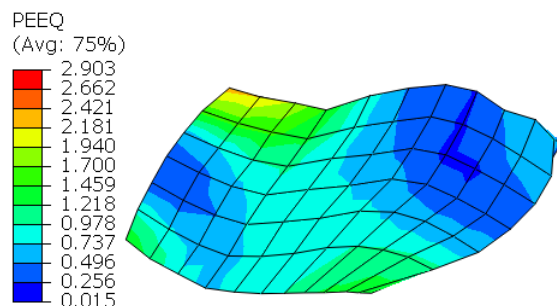


Figura 8 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por três passes de ECAP.

No quarto passe de ECAP mostrado na “Figura 9” os níveis de deformação impostos no tarugo seguem em tendência de elevação e obedecendo o que já vem sendo discutido nos passes anteriores, onde a região do centro é a região com maior homogeneidade com predominância em escala entre 0.574 e 1.133 e elevação entre 0.078 e 0.155 dos níveis em escala de deformação comparados ao terceiro passe, as regiões da cabeça e da calda do corpo de prova seguem sendo as regiões com maior heterogeneidade com a cabeça apresentando o maior nível em escala de deformação na parte superior esquerda.

Também é possível observar que existe uma tendência nos níveis de deformação médios da calda na parte superior direita serem menores que as demais regiões, já os níveis de deformação da cabeça assumem a maior heterogeneidade até o quarto passe. As deformações associadas ao centro da peça demonstram ser a região com maior homogeneidade dos níveis de deformação, em vista que no decorrer dos passes passa a tender a concentrar ainda mais essa característica.

A deformação por quatro passes de ECAP já ilustra uma tendência de homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise do plano Y externamente na região mais ao centro do corpo de prova muito por conta da ZDP, porém de forma global ainda existe uma grande heterogeneidade nas demais regiões do plano analisado.

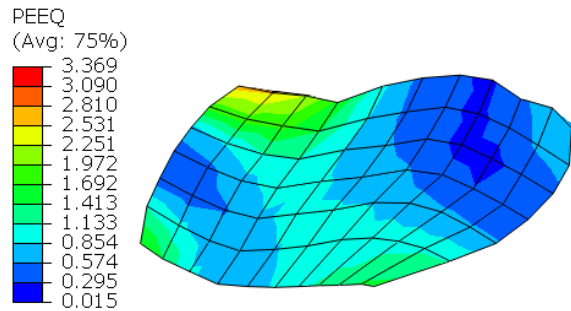


Figura 9 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por quatro passes de ECAP.

O quinto passe de ECAP que a “Figura 10” continua destacando o grande acúmulo de deformações na parte central do tarugo tornando cada vez mais homogênea essa região de acordo com o aumento do número de passes, com níveis predominantes em escala entre 0.625 e 1.234 e diferença no incremento do acúmulo de deformação em escala para o quarto passe entre 0.051 e 0.101. É possível notar que na região da cabeça mais central e na região da calda da parte superior direita do corpo de prova existem duas fendas de baixo nível de deformação que vem evoluindo desde o primeiro passe “Figura 6” isso se deve por essa região não ser atingida pela ZDP durante o processo de forma incisiva.

A deformação por cinco passes de ECAP continua demonstrando uma tendência de homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise do plano Y externamente na região mais ao centro do corpo de prova, mas de forma global existe uma grande heterogeneidade nas demais regiões do plano analisado, porém essa heterogeneidade está tendendo a diminuir a medida que se eleva o número de passes, ficando característica apenas em extremidades próximas aos cantos das regiões da cabeça e da calda do tarugo.

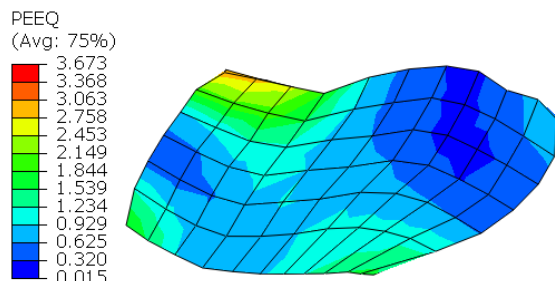


Figura 10 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por cinco passes de ECAP.

No sexto passe por ECAP mostrado na “Figura 11” o tarugo continua apresentando ao centro da peça concentrações ainda maiores nos níveis de deformação com tendência de aproximação entre os valores, característica essa que ilustra a tendência a homogeneidade com a aproximação das escalas comprovando dessa forma ser a região mais homogênea do plano analisado. Região essa que passa a apresentar redução na variação do incremento nos valores dos níveis de deformação

entre máximos e mínimos de acordo com a elevação dos passes, a região do centro no sexto passe apresentou valor predominante entre 0.672 e 1.329 com incremento no acúmulo de deformações entre 0.047 e 0.095.

A deformação por seis passes de ECAP continua demonstrando uma tendência de homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise do plano Y externamente na região mais ao centro do corpo de prova, na calda do corpo de prova parte inferior direita já é possível perceber uma estabilização e tendência a igualar os níveis de deformação do centro do tarugo, a calda na parte superior direita ainda tende a apresentar os menores níveis de deformação sendo a região com menor média de deformação, apresentando ainda uma fenda de baixa deformação se caracterizando e aumentando a cada passe de deformação próxima ao limite da região central do corpo de prova.

A região da cabeça parte superior esquerda continua sendo a região com os maiores níveis pontuais de deformação em escala apresentando também uma fenda na parte intermediária próxima a região do centro do tarugo, se caracterizando e aumentando a cada passe de deformação a exemplo da região da calda citada anteriormente, porém de menor proporção e maior nível de deformação em escala. Porém as regiões encruadas ainda no primeiro passe da cabeça do corpo de prova parte superior esquerda e a região da calda parte inferior direita continuam apresentando os maiores níveis de deformação, no entanto com a elevação dos passes estão passando a apresentar níveis de deformação mais próximos aos níveis do centro da peça, essa tendência foi notada nos estudos de Awang Sh'ri et al. (2019) e Wongs-Ngam et al., (2021) de forma similar.

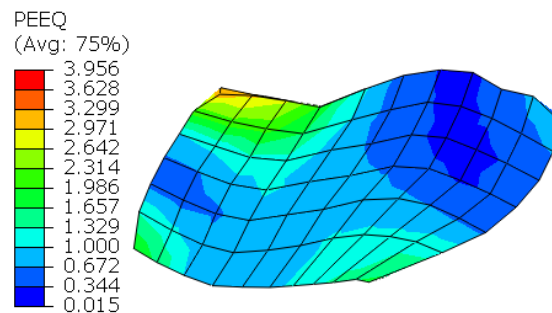


Figura 11 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por seis passes de ECAP.

O sétimo passe de processamento por ECAP mostrado na “Figura 12” destaca o crescimento do estado homogêneo nos níveis de deformações presentes na região do centro do tarugo, a homogeneidade na região fica muito aparente, os níveis em escala de deformação apresentam valores máximos nas regiões mais próximas as partes de contato como os ângulos de intersecção, com valores predominantes entre 0.745 e 1.474 com incremento dos níveis de deformação entre 0.073 e 0.145 em comparação ao sexto passe.

A cabeça do tarugo continua apresentando grande heterogeneidade com máximos na parte superior esquerda, permanecendo com os maiores valores concentrados em escala, porém continua mostrando tendência de estabilização já vista e discutida no passe anterior. A calda do corpo de prova ainda apresenta os menores níveis de deformação na parte superior direita, porém a parte inferior direita apresenta boa estabilização e tende a se igualar aos níveis homogêneos da parte central do tarugo como já observado anteriormente.

As duas fendas de menores níveis de deformação tanto na cabeça com níveis máximos em escala de 0.745, quanto na calda com níveis máximos em escala de 0.380 ainda permanecem em destaque, a calda parte superior direita se destaca como a parte que sofreu os menores níveis de deformação no plano Y até o sétimo passe.

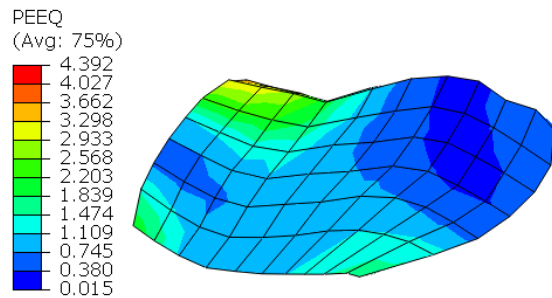


Figura 12 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por sete passes de ECAP.

No oitavo e último passe por ECAP mostrado na “Figura 13” a região do centro do tarugo se consolida como a região mais homogênea de todo o processo, apresentando níveis de deformação com as menores variações e valor predominante em escala entre 0.818 e 1.621, com incremento de acúmulo dos níveis de deformação em escala entre 0.073 e 0.147 se comparado ao sétimo passe.

Os níveis de deformação em escala com máximos e mínimos passam a se aproximar bastante no oitavo passe na região central do tarugo com predominância bem destacada na escala entre 0.818 e 1.220 indicando dessa forma a tendência ao estado estacionário nessa região variando muito pouco os limites em escala.

A cabeça do tarugo conclui o processamento como a região que apresentou maior heterogeneidade nos níveis de deformação impostos, onde a parte superior esquerda foi a região com os maiores níveis de deformação em escala com valores entre 1.621 e 3.692, no decorrer dos passes, essa região mostrou tendência a estabilização se aproximando dos níveis da região central do tarugo, fato explicado pela acomodação dos planos de cisalhamento ocasionado pelo encruamento da região ainda no primeiro passe. O canto da parte inferior esquerda da cabeça continua apresentando constância nos níveis acumulados de deformação e pode-se considerar que os níveis estão bem próximos ou iguais aos apresentados na região central do tarugo. A fenda da região da cabeça destacada nos passes anteriores apresentou os mais baixos níveis de deformação dessa região entre 0.417 e 0.815.

A calda do tarugo ao fim do processo apresentou os menores níveis de deformação em escala em sua parte superior direita, com os menores níveis destacados e concentrados no processamento por ECAP, com níveis muito baixos de deformação que ficaram entre 0.015 e 0.818, porém a parte inferior direita dessa região apresenta boa estabilização e pode-se considerar que os níveis estão bem próximos ou iguais aos apresentados na região central do tarugo. A fenda da região da calda destacada nos passes anteriores apresentou os mais baixos níveis de deformação de todo o mapeamento no plano do tarugo ao fim do mapeamento entre 0.015 e 0.417.

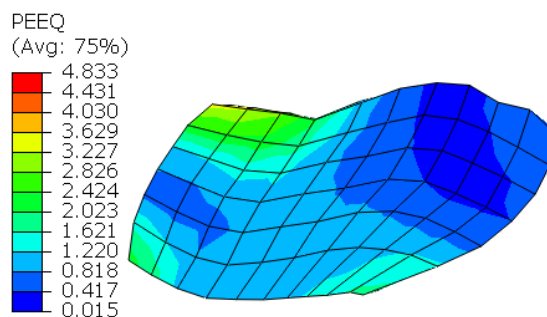


Figura 13 – Corpo de prova no plano Y externamente com deformação por oito passes de ECAP.

A “Figura 14” mostra o gráfico com a evolução no acúmulo dos níveis de deformação na região do centro do corpo de prova no decorrer dos passes realizados via ECAP, apresentando a evolução e o crescimento dos valores, com o segundo passe na linha de máximos apresentando a

maior angulação em relação ao passe anterior na distribuição dos pontos indicando ser o passe que mobilizou o maior volume de deslizamento dos planos de cisalhamento com consequente movimentação das discordâncias no material simulado.

A evolução dos pontos no decorrer do ECAP mostra ainda que com a elevação do número de passes o material tende a acumular maiores níveis de deformação e em consequência refinar a sua microestrutura, gerando ganho e melhorias de suas propriedades mecânicas, tais como, a resistência mecânica e a ductilidade, esses resultados também foram obtidos por (Silva, 2017) ao deformar Ti CP por ECAP, porém de forma experimental.

A partir do terceiro passe fica clara a estabilização nos incrementos do acúmulo nos níveis de deformação, ficando a escala de mínimos bem destacada com tendência a redução da angulação a partir do sexto passe demonstrando bons indicativos para constância dos valores de incremento já a escala de máximos demonstra tendencia crescente indicando potencial de elevação, estudos mais detalhados com a elevação do números de passes se torna necessário para ampliação da análise dos estados de estabilização e saturação com promoção do estado estacionário.

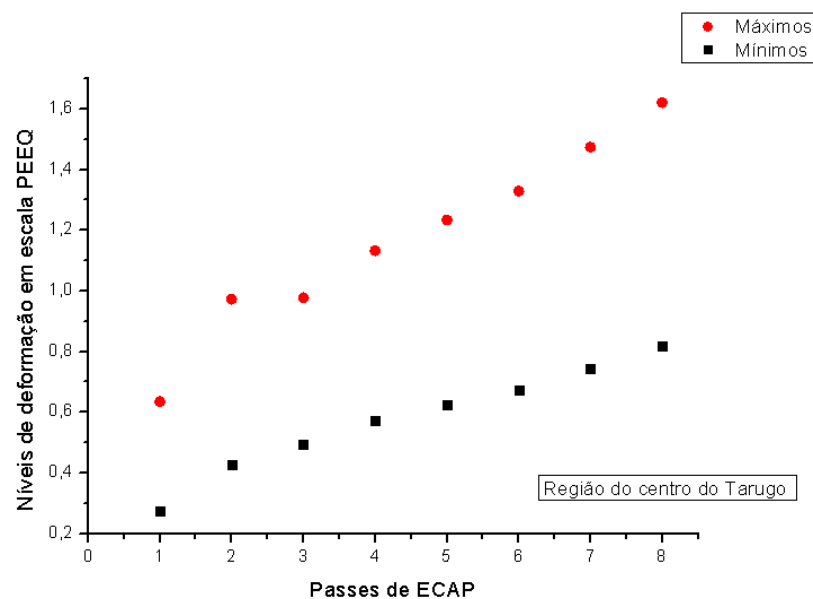


Figura 14 – Gráfico com a evolução no acúmulo dos níveis de deformação na região do centro do tarugo no decorrer do processo ECAP.

4. Conclusão

A simulação numérica em 3D foi usada com sucesso para investigar o comportamento da deformação de uma peça de corte transversal quadrada de titânio comercialmente puro, durante o processamento ECAP, com ângulos de matriz de $\Phi = 120^\circ$ e $\Psi = 0^\circ$, até um total de oito passes usando o modelo de processamento na rota A.

Os resultados da análise do plano Y conseguiram mostrar que há uma tendência de saturação de deformação percebida com a elevação do número de passes isso se dá por conta da aproximação nos níveis de deformação notados principalmente pelos resultados obtidos entre o sexto e o oitavo passe, o que produz uma considerável homogeneidade principalmente na região central do corpo de prova. Os valores mínimos apresentaram boa estabilização dos incrementos e tendência a constância da deformação, corroborando com a presença de estado estacionário, porém os valores de máximos indicaram que ainda se torna necessária uma análise mais detalhada com a elevação do número de passes para essa rota, pois indica bons indícios de elevação dos níveis de deformação.

O mapeamento do processo ECAP no plano Y via simulação numérica por elementos finitos foi bem sucedido, durante o processo foi possível observar os diferentes pontos de concentração das tensões e em consequência da distribuição das deformações acumuladas no decorrer dos passes,

com destaque para a região central do tarugo que apresentou os maiores índices de homogeneidade na distribuição dos níveis em escala de deformação.

A região da cabeça do tarugo na parte superior esquerda apresentou os maiores níveis de concentração no acúmulo de deformação, porém com altos índices de heterogeneidade de deformação. Já a região da calda do tarugo na parte superior direita apresentou a menor concentração no acúmulo de deformação no decorrer do processo. A parte inferior esquerda na região da cabeça do tarugo e a parte inferior direita na região da calda do tarugo apresentaram boa estabilização nos níveis em escala de deformação no decorrer dos passes tendendo a ficarem muito próximos ou até a se igualarem aos níveis de deformação apresentados na região do centro do tarugo, isso gera a interpretação em que se pode inferir que a microestrutura parou de se recrystalizar nessas regiões, resultados similares foram obtidos por meio dos estudos de Awang Sh'ri et al., (2019) e Wongsa-Ngam et al., (2021) que identificaram que regiões que sofreram severas deformações apresentando altos níveis em escala nos primeiros passes tenderam a se manterem constantes no decorrer do processamento indicando boa estabilização nos últimos passes.

References

- Awang Sh'ri, D. N., Abu Hassan, M. A. H., Zahari, Z. S., & Wan Harun, W. S. (2019). Finite element simulation of equal channel angular pressing: Effect of die angle and number of passes. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 16(1), 6402–6414. Scopus. <https://doi.org/10.15282/ijame.16.1.2019.22.0484>
- Azevedo, Á. F. M. (2003). *Método dos Elementos Finitos (1º)*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., & Yanagida, A. (2008). Severe plastic deformation (SPD) process for metals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 716–735. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>
- Banerjee, D., & Williams, J. C. (2013). Perspectives on Titanium Science and Technology. *Acta Materialia*, 61(3), 844–879. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.043>
- Chen, Q., & Thouas, G. A. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 87, 1–57. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001>
- Ferrasse, S., Segal, V. M., & Alford, F. (2004). Texture evolution during equal channel angular extrusion (ECAE): Part II. An effect of post-deformation annealing. *Materials Science and Engineering: A*, 372(1), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.043>
- Handbook, A. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials: Vol. 2. (10º ed)*. Direction of the ASM International Handbook Committee.
- Mathaudhu, S., Blum, S., Barber, R., & Hartwig, K. (2005). Severe plastic deformation of bulk Nb for Nb₃Sn superconductors. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 15, 3438–3441. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.849044>
- Pinho, A. G. de. (2013). *Modelação e otimização de ferramentas de conformação plástica de chapa*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Roodposhti, P. S., Farahbakhsh, N., Sarkar, A., & Murty, K. L. (2015). Microstructural approach to equal channel angular processing of commercially pure titanium—A review. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(5), 1353–1366. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63734-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63734-7)
- Sabirov, I., Murashkin, M., & Valiev, R. (2013). Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development. *Materials Science and Engineering A*, 560, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.020>
- Santos, R. T. F. dos. (2018). *Estudo da deformação de nióbio empregando a técnica de prensagem em canais equiangulares (ECAP)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil.

- Silva, K. F. D. (2017). Efeito do processo ECAP sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga Ti-35Nb-0,15Si e do Ti CP. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil.
- Sordi, V. L., Ferrante, M., Kawasaki, M., & Langdon, T. G. (2012). Microstructure and tensile strength of grade 2 titanium processed by equal-channel angular pressing and by rolling. *Journal of Materials Science*, 47(22), 7870–7876. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6593-x>
- Valiev, R. Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T. G., Zechetbauer, M. J., & Zhu, Y. T. (2006). Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *JOM*, 58(4), 33–39. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0213-7>
- Valiev, R. Z., & Langdon, T. G. (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 51(7), 881–981. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
- Valiev, R. Z., Murashkin, M. Yu., Ganeev, A. V., & Enikeev, N. A. (2012). Superstrength of nanostructured metals and alloys produced by severe plastic deformation. *The Physics of Metals and Metallography*, 113(13), 1193–1201. <https://doi.org/10.1134/S0031918X12130042>
- Vieira, D. da S., & Coelho, N. de A. (2020). Utilização do Método dos Elementos Finitos no Estudo Térmico de Elementos Simples de Concreto. *RCT - Revista de Ciência e Tecnologia*, 6, 16.
- Wongsa-Ngam, J., Noraphaiphaksa, N., Kanchanomai, C., & Langdon, T. (2021). Numerical Investigation of Plastic Strain Homogeneity During Equal-Channel Angular Pressing of a Cu-Zr Alloy. *Crystals*, 11, 1505. <https://doi.org/10.3390/cryst11121505>
- Wu, H., Jiang, J., Liu, H., Sun, J., Gu, Y., Tang, R., Zhao, X., & Ma, A. (2017). Fabrication of an Ultra-Fine Grained Pure Titanium with High Strength and Good Ductility via ECAP plus Cold Rolling. *Metals*, 7(12), 563. <https://doi.org/10.3390/met7120563>
- Xavier, D. G. (2011). Análise de Tensões e Deformações Mecânicas em Conexões Protéticas de Implantes Straumann pelo Método de Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Zhang, Y., Sun, D., Cheng, J., Tsoi, J. K. H., & Chen, J. (2020). Mechanical and biological properties of Ti-(0–25 wt%)Nb alloys for biomedical implants application. *Regenerative Biomaterials*, 7(1), 119–127. <https://doi.org/10.1093/rb/rbz042>
- Zhao, X., Fu, W., Yang, X., & Langdon, T. G. (2008). Microstructure and properties of pure titanium processed by equal-channel angular pressing at room temperature. *Scripta Materialia*, 59(5), 542–545. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.05.001>
- Zhou, Y.-L., & Niinomi, M. (2009). Ti–25Ta alloy with the best mechanical compatibility in Ti–Ta alloys for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 29(3), 1061–1065. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.09.012>