

Estudo experimental e simulação por elementos finitos da homogeneidade de deformação entre regiões de titânio comercialmente puro deformado por ECAP

Experimental study and finite element simulation of deformation homogeneity between regions of commercially pure titanium deformed by ECAP

Estudio experimental y simulación por elementos finitos de la homogeneidad de deformación entre regiones de titanio comercialmente puro deformado por ECAP

Recebido: 29/10/2022 | Revisado: 08/11/2022 | Aceitado: 09/11/2022 | Publicado: 16/11/2022

Vagner dos Anjos Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9162-6030>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: vagner1211costa@gmail.com

Késia Filadélfia Dionizio Silva Ramos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3514-5472>
Universidade Federal de Alagoas, Brasil
E-mail: kesia.filadelfia@gmail.com

Wilton Walter Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6667-8947>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: wiltonwalter@hotmail.com

Eduardo de Oliveira Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-629X>
Instituto Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: edu.unit@yahoo.com.br

Resumo

O ECAP é um processo de deformação plástica severa de um material, cujo objetivo é refinar o tamanho do grão na microestrutura. Os materiais processados pelo ECAP apresentam melhorias em suas propriedades mecânicas. As variáveis de processo que afetam o refinamento da microestrutura são: rota de processamento, tipos de matriz, e número de passes. Na matriz ECAP utilizada no processo de deformação, o ângulo de canal e o ângulo de curvatura determinaram a eficiência do refinamento microestrutural. Esse trabalho tem como objetivo analisar a homogeneidade de deformação por meio do processamento mecânico do Ti CP via ECAP de forma experimental e por elementos finitos, associar os modelos para comparação entre os níveis de deformações nas regiões externa e interna com corte longitudinal do corpo de prova. As amostras de Ti CP foram deformadas via ECAP em até 8 passes, utilizando a rota A, numa matriz com ângulo de intersecção entre os canais de $\Phi = 120^\circ$. Aferições de microdureza Vickers foram realizadas a cada passe para avaliar as mudanças ocasionadas para posterior associação com a simulação numérica. O material foi simulado numericamente através da interface de modelagem do Abaqus – versão 2020 com licença educacional. Os parâmetros físicos foram pré-estabelecidos por meio do registro das variáveis físicas e mecânicas no software. Os resultados foram satisfatórios ao comprovarem a associação entre os estudos experimental e de elementos finitos, indicando ainda que existe diferença entre os níveis de deformação para as regiões analisadas em ambos os modelos.

Palavras-chave: ECAP; Deformação plástica severa; Titânio; Elementos finitos; Homogeneidade.

Abstract

ECAP is a process of severe plastic deformation of a material, whose objective is to refine the grain size in the microstructure. The materials processed by ECAP show improvements in their mechanical properties. The process variables that affect the microstructure refinement are: processing route, die types, and number of passes. In the ECAP matrix used in the deformation process, the channel angle and the curvature angle determined the efficiency of the microstructural refinement. This work aims to analyze the deformation homogeneity through the mechanical processing of Ti CP via ECAP in an experimental way and by finite elements, associate the models for comparison between the levels of deformation in the external and internal regions with longitudinal section of the specimen. The Ti CP samples were deformed via ECAP in up to 8 passes, using route A, in a matrix with an intersection angle between the channels of $\Phi = 120^\circ$. Vickers microhardness measurements were performed at each pass to evaluate the changes caused for later association with the numerical simulation. The material was numerically simulated through the Abaqus modeling interface – 2020 version with educational license. The physical parameters were pre-established

by recording the physical and mechanical variables in the software. The results were satisfactory in proving the association between the experimental and finite element studies, also indicating that there is a difference between the strain levels for the regions analyzed in both models.

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

Resumen

ECAP es un proceso de deformación plástica severa de un material, cuyo objetivo es afinar el tamaño de grano en la microestructura. Los materiales procesados por ECAP presentan mejoras en sus propiedades mecánicas. Las variables de proceso que afectan el refinamiento de la microestructura son: ruta de procesamiento, tipos de dados y número de pasadas. En la matriz ECAP utilizada en el proceso de deformación, el ángulo de canal y el ángulo de curvatura determinaron la eficiencia del refinamiento microestructural. Este trabajo tiene como objetivo analizar la homogeneidad de la deformación mediante el procesamiento mecánico de Ti CP vía ECAP de manera experimental y por elementos finitos, asociar los modelos para la comparación entre los niveles de deformación en la región externa e interna con la sección longitudinal de la probeta. Las muestras de Ti CP se deformaron vía ECAP en hasta 8 pasadas, utilizando la ruta A, en una matriz con un ángulo de intersección entre los canales de $\Phi = 120^\circ$. Se realizaron mediciones de microdureza Vickers en cada pasada para evaluar los cambios ocasionados para su posterior asociación con la simulación numérica. El material fue simulado numéricamente a través de la interfaz de modelado Abaqus – versión 2020 con licencia educativa. Los parámetros físicos fueron preestablecidos mediante el registro de las variables físicas y mecánicas en el software. Los resultados fueron satisfactorios al probar la asociación entre los estudios experimentales y de elementos finitos, indicando además que existe una diferencia entre los niveles de deformación para las regiones analizadas en ambos modelos.

Palabras clave: ECAP; Severa deformación plástica; Titanio; Elementos finitos; Homogeneidad.

1. Introdução

Nos últimos anos têm sido realizadas diversas investigações para o desenvolvimento de materiais a base de titânio (Ti) para diversas aplicações. As principais aplicações destas ligas são na indústria biomédica, em ambientes extremamente corrosivos e para a produção de equipamentos industriais avançados. O titânio é amplamente aplicado na medicina, porém sua utilização não se resume apenas a este setor, ela é estendida em larga escala para diversos setores entre eles principalmente aparecem os campos aeroespaciais e marítimos, devido à sua alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão e ao calor, (Huang et al., 2022).

Muitas aplicações do titânio requerem propriedades mecânicas e microestruturais para atenderem a determinadas necessidades industriais, e uma eficiente solução para essas aplicações é a adição de elementos de liga via solução sólida. Assim como a liga Ti-6Al-4V, que foi o material a base de titânio mais utilizado como biomaterial em aplicações ortopédicas nos últimos anos, porém seus problemas de biocompatibilidade devido ao alto teor de vanádio e alumínio acabam por torná-lo menos adequada para o organismo. No entanto, uma alternativa muito promissora para melhorar as propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro sem a adição de elementos de liga é refinar sua microestrutura pelo processamento ECAP. Nesse contexto, verifica-se que a resistência mecânica e a ductilidade do titânio deformado por ECAP são comparáveis, e em alguns casos até melhores que a liga Ti-6Al-4V, (Banerjee & Williams, 2013; Roodposhti et al., 2015; Wu et al., 2017).

Técnicas capazes de melhorar as propriedades mecânicas de materiais metálicos vêm sendo bastante exploradas com o interesse de aperfeiçoar o desempenho dos materiais para diversas aplicações, por exemplo, técnicas capazes de refinar a microestrutura do material, (Segal et al., 1981; Valiev & Langdon, 2014). De acordo com estudos, o material comercialmente puro com grãos refinados apresentam características estruturais atraentes que podem melhorar significativamente seu desempenho mecânico quando comparadas às ligas de grãos grosseiros, (Sordi et al., 2012; Valiev & Langdon, 2014).

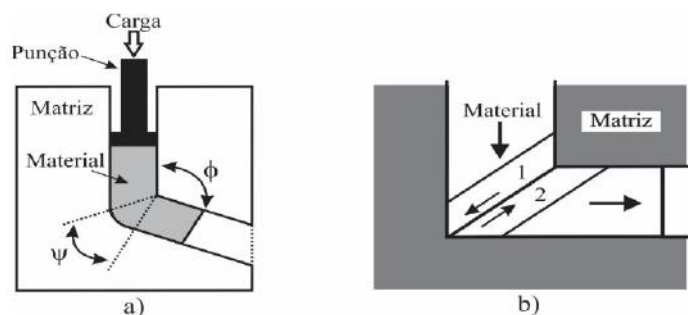
A prensagem em canais equiangulares (Equal Channel Angular Pressing ECAP) surge como alternativa para introduzir ao material uma deformação plástica severa (Severe Plastic Deformation - SPD). O processamento via ECAP promove a prensagem do material entre dois canais com seções transversais idênticas, com intersecção em um ângulo de canal (Φ) e do ângulo de curvatura (Ψ), submetendo o mesmo a cisalhamento simples, preservando a forma da seção transversa do corpo de prova, (Bernardi, 2009; Valiev & Langdon, 2014). O procedimento é considerado um dos métodos

mais simples de deformação que acontece por cisalhamento. Nessa técnica, as dimensões da amostra não são reduzidas, sendo possível a repetição do processo várias vezes para que o nível de deformação aumente e a estrutura final seja ultrafina, (Pourdavood et al., 2018; Sordi et al., 2012). Outra vantagem da técnica é que além do aumento de resistência através do refino de grão, também é possível que o material mantenha e até eleve seus níveis de ductilidade, (Bernardi, 2009; Valiev & Langdon, 2014).

O ECAP torna possível através do refinamento microestrutural o mecanismo de Hall-Petch que é a formação de elevada fração de contornos de alto ângulo produzida pela deformação plástica do processo, elevando-se os limites de escoamento e de resistência do material processado. O processo é executado em uma matriz disposta por dois canais sequenciais. O canal interno é dobrado através da intercessão do ângulo Φ ou ângulo de canal (geralmente, $60^\circ < \Phi < 135^\circ$, e frequentemente, $\Phi = 90^\circ$ ou 120°), o ângulo adicional ψ representa o arco externo de curvatura onde se cruzam os canais e interagem entre os dois planos gerando assim as tensões dos cisalhamentos característicos do processamento, (Bernardi, 2009; Valiev & Langdon, 2006).

O processamento via ECAP apresenta variáveis de processo que influenciam a capacidade de trabalho e as características microestruturais do material deformado. As variáveis de processo são: quantidade de passes, rotas de processamento, ângulos de canal (Φ) e de curvatura (Ψ) e temperatura de prensagem. Antes de serem sujeitos a deformação os componentes (canais e lingotes) devem passar por lubrificação, com o objetivo de reduzir o atrito entre as partes, o que facilita e promove maior trabalhabilidade no procedimento. Os lingotes obrigatoriamente devem obedecer a mesma geometria do canal de passagem (cilíndrico ou quadrado), para que seja possível a deformação da amostra, o lingote deve ser inserido no primeiro canal de forma que não haja diferença na geometria dos componentes, em seguida pressionado pelo punção, passando pela interseção dos planos sendo então deformado, o punção é retirado e o lingote neste momento já deformado é separado do segundo canal, o processo pode ser repetido de acordo com os modelos experimentais seguidos e obedecendo as variáveis do procedimento previamente definidas. O caminho de deformação pode ser alterado por meio da rotação do material a cada passe, ativando diferentes sistemas de escorregamento: A (não há rotação da amostra entre os passes); BA (rotação em 90° em sentidos opostos entre os passes); BC (rotação em 90° no mesmo sentido entre os passes); C (rotação de 180° entre os passes). A execução ECAP pode ser representada por meio da Figura 1, (Adedokun, 2011; Nakashima et al., 2000; Valiev et al., 2000; Valiev & Langdon, 2006).

Figura 1 - Ilustração esquemática de um processo típico de ECAP, destacando em a) o ângulo de intercessão Φ e o ângulo adicional ψ e em b) Plano de cisalhamento no processamento por ECAP.



Fonte: Valiev e Langdon (2006).

A natureza da deformação imposta é um cisalhamento simples que ocorre quando a amostra passa através da matriz no ponto onde o plano de cisalhamento é mostrado, observado na Figura 1b, o lingote é sujeito ao movimento por meio da solicitação do punção, passando por este tipo de cisalhamento na variação do volume entre os canais durante o processamento,

(Valiev & Langdon, 2006). Os modelos de tensões aplicadas ao processo são diretamente dependentes das variáveis de deformação impostas, estão relacionados com as propriedades do material processado, ao atrito gerado entre os elementos (canais e lingote), a geometria e resistência da matriz, e a forma ou geometria a qual o lingote foi moldado, (Adedokun, 2011). No ECAP é possível se trabalhar com amostras fabricadas em geometrias diversas. Os materiais podem ser processados em instalações convencionais, pois não gera a necessidade que o material se disponha em chapas finas por exemplo, possibilita também a aplicação em lingotes grandes de maneira que há potencial para produção de materiais para aplicações estruturais, (Ferrasse et al., 2004; Valiev & Langdon, 2006).

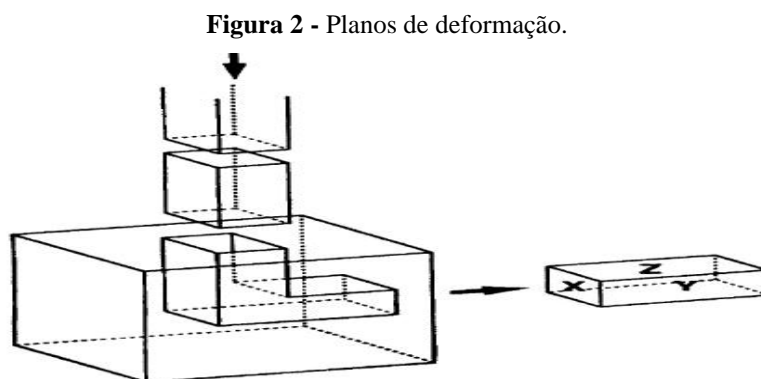
Nesse contexto, o presente estudo tem o objetivo de analisar a homogeneidade de deformação por meio do processamento mecânico do Ti CP através do método de prensagem em canais equiangulares (ECAP) de forma experimental e por elementos finitos com associação entre os modelos para comparar os níveis de deformações nas regiões externa e interna com corte longitudinal do corpo de prova, correlacionando as medidas de dureza no plano Y com as deformações impostas computacionalmente, apontando a validade e correlação entre as abordagens de estudo para assim analisar o efeito do processamento nas propriedades mecânicas do material.

A relevância do tema justifica-se, pois espera-se que esse trabalho contribua com discussões e reflexões a respeito do assunto e fortaleça o material bibliográfico do objeto de estudo, em vista que não foram identificados trabalhos que possibilitassem a análise da homogeneidade de deformação do titânio comercialmente puro por meio de comparações entre regiões através de medidas experimentais de microdureza em planos de deformação com dados obtidos por simulação computacional por elementos finitos aplicados ao ECAP no plano Y, em múltiplos passes de processamento, na rota A e utilizando corpo de prova de base quadrada.

2. Metodologia

2.1 Planos de deformação do ECAP

No processo ECAP, uma convenção foi adotada para o plano de deformação que é mostrado na Figura 2. O plano X ou plano transversal é perpendicular à direção em que o tarugo passa pelo canal, e o plano Z ou plano longitudinal está em contato com o topo e o fundo. O plano Y ou transversal fica em contato com as laterais do canal, (Valiev et al., 2006). Para o presente trabalho foram empregadas análises atreladas ao plano Y tanto no modelo experimental quanto no modelo numérico.



Fonte: Valiev e Langdon (2006).

2.2 Estudo experimental

Nesse trabalho foram deformadas e analisadas amostras de Ti CP, onde foram empregados corpos de prova na forma de blocos de lâminas empilhadas, Figura 3. O tamanho dos corpos de prova foi determinado com base nas dimensões dos canais da matriz de deformação: base quadrada de 6 x 6 mm e altura de 10 mm.

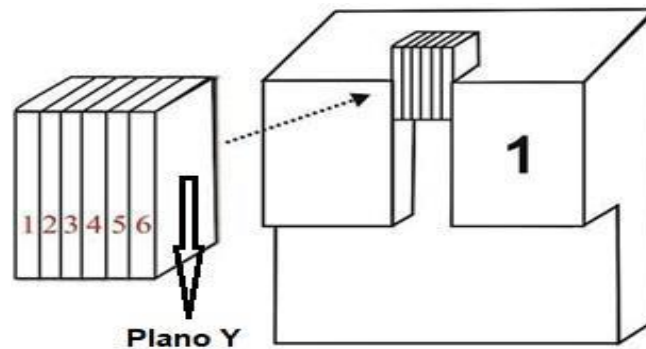
O corte do metal utilizou uma cortadora para materiais não ferrosos. Foi utilizada a rota A, onde a amostra não é girada entre os múltiplos passes. Uma matriz de deformação com base quadrada de 6 x 6 mm, ângulo de canal $\Phi = 120^\circ$, e ângulo de curvatura de $\Psi = 0^\circ$ foi usada para execução do ECAP.

Após lubrificação dos canais e tarugo o Ti comercialmente puro foi deformado experimentalmente via ECAP em temperatura ambiente de 20°C . As lâminas foram numeradas de 1 a 6, para posterior análise das lâminas de números 1 e 3, correspondentes a parte externa e interna do corpo de prova respectivamente. As amostras foram avaliadas em até oito passes. As deformações das amostras por ECAP foram realizadas.

As medidas de dureza obtidas experimentalmente com o ECAP foram analisadas verificando assim o comportamento do titânio comercialmente puro, onde em sua deformação foram empregadas amostras na forma de blocos de lâminas de titânio empilhadas no intuito de analisar o comportamento das deformações, além da superfície de contato com as paredes da matriz por meio das aferições da lâmina 1, também as das regiões de deformação por cisalhamento ou região interna do corpo de prova por meio das aferições da lâmina 3 no plano Y.

A Figura 3 mostra como foram desenvolvidos os procedimentos do estudo experimental e as condições de deformação impostas às lâminas de titânio.

Figura 3 - Condições de deformação para as amostras de Ti CP com lâminas perpendiculares à face 1.



Fonte: Elaboração própria.

2.3 Elementos finitos

As implementações e análises numéricas dos dados foram desenvolvidas em três etapas, destacadas a seguir:

Pré-processamento: descrição da entrada de dados, criação e modelagem da geometria dos sólidos envolvidos, introdução das propriedades do material do corpo de prova no estudo, montagens e posicionamento dos sólidos envolvidos, conectividade da matriz de deformação e punção como corpos rígidos e o corpo de prova como corpo deformável, os passos envolvidos associados a simulação, as interações e condições de contorno entre os elementos rígidos com o corpo de prova, as amplitudes e eixos de movimento do corpo de prova, os pontos de carregamento com aplicação de força na matriz e no punção perante o corpo de prova, configuração do modelo de malhas e refino da malha por elementos e nós.

Processamento: definição do modo de trabalho para a etapa de solução e processamento no software, otimização do problema, solução do problema via simulação numérica.

Pós processamento: resultados da simulação numérica e tratamento dos resultados para análise final.

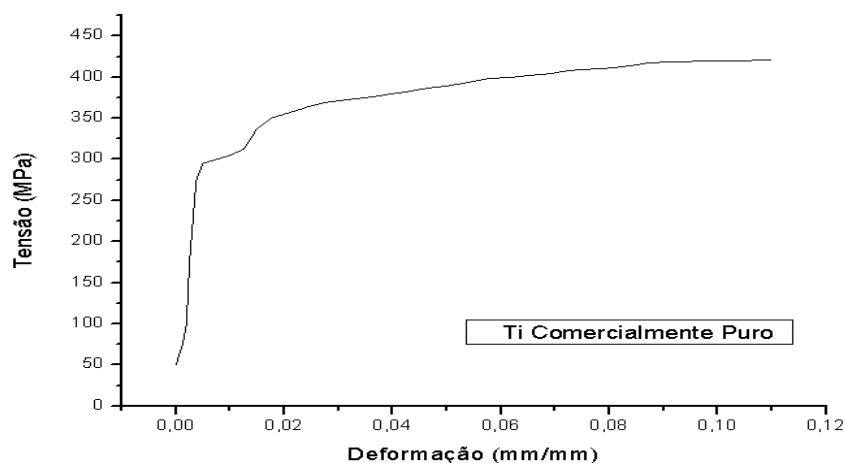
a. Pré-processamento

O software comercial Abaqus 2020 edição estudantil foi usado para simular o processamento ECAP em até oito passes de titânio no estado de pureza comercial. A peça de trabalho e a geometria utilizada foram modeladas de acordo com a

parte experimental desse trabalho. Já com o software Abaqus em execução foi dado o início da primeira etapa ou etapa de pré-processamento, para implementação dos dados, onde foi inserido o tipo de modelagem que foi desenvolvida, selecionando-se dessa forma a criação de um modelo de padrão explícito para análise, adequado ao estudo em questão, que utiliza a dinâmica explícita do estado plano de tensões dos corpos. Em seguida foram criadas as partes componentes do modelo: tarugo, matriz e punção.

O Tarugo foi modelado na forma de bloco maciço com base quadrada de 6 x 6 mm e comprimento de 10 mm, e foi processado virtualmente usando uma matriz de canal interno com as mesmas dimensões de base quadrada de 6 mm², configurado como sólido de corpo rígido, com um ângulo de canal $\Phi = 120^\circ$, e um ângulo de curvatura de $\Psi = 0^\circ$, a modelagem foi seguida com a criação do punção como elemento de geometria planar e mesma secção dimensional do tarugo de 6 mm², foi indicado como material de corpo rígido, com função de pressionar e conduzir o corpo de prova na movimentação entre os passes. O comportamento do corpo de prova é abordado como um material elástico-plástico, possibilitando-se assim a descrição da deformação de um material sob condições que promovam deformações severas, que é o caso do presente estudo. Seguiu-se a modelagem com a inserção das propriedades do material no módulo de pré-processamento do Abaqus. Foi possível determinar as condições das deformações plásticas do material por meio dos dados obtidos na curva de tensão x deformação do titânio comercialmente puro retirados do estudo de Zhang et al. (2020), como seguem na Figura 4.

Figura 4 - Tensão x Deformação do titânio comercialmente puro.



Fonte: Adaptado pelos autores do estudo de Zhang et al. (2020).

Os valores atrelados às 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.

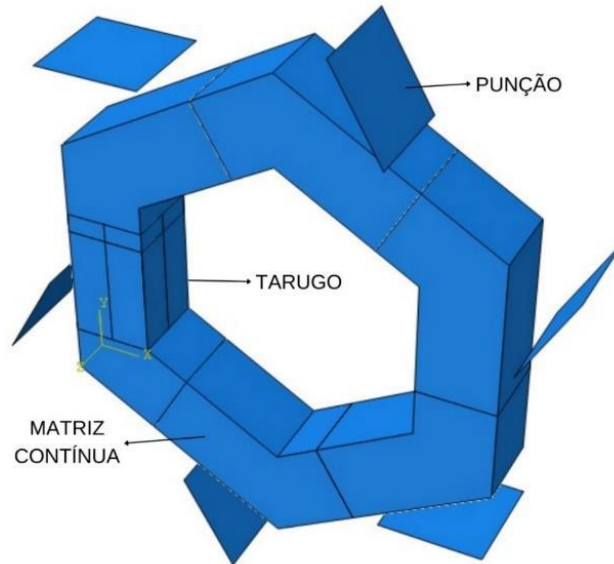
Densidade	4,39 g/cm ³
Módulo de Young	103 GPa
Coeficiente de Poisson	0,34

Fonte: Handbook (1990).

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 processamento de 20°C. Já no módulo de montagem a matriz foi multiplicada gerando-se seis matrizes que iremos chamar de matriz contínua, o punção também foi multiplicado por seis vezes,

foram realizadas as montagens dos componentes, onde a estrutura com a matriz contínua, o conjunto de punções e o tarugo formaram um hexágono geométrico tridimensional. A Figura 5 ilustra o modelo elaborado do ECAP na interface de desenvolvimento do Abaqus com o tarugo interno a matriz.

Figura 5 - Modelo desenvolvido para a simulação do ECAP.



Fonte: Elaboração própria.

No módulo de implementação seguinte foram inseridos os dois passos da simulação: passo inicial com condições e estados iniciais de equilíbrio e repouso e passo 1 com as condições de desempenho da simulação voltados a dinâmica explícita, onde todos os oito passes foram inseridos, com o tempo total de 167,85 segundos e incremento de tempo automático, avaliação em elemento por elemento para trazer mais exatidão a análise, e fator de escala de tempo para correlacionar diretamente o tempo ao espaço total percorrido pelo corpo de prova, como a simulação exigia uma quantidade de rotações e movimentos de alta complexidade foi habilitado o fator de escala de massa em 10 milhões para fornecer aos cálculos do software maior exatidão em se tratando das variáveis de movimentação do material como, centro de massa e momento de inercia relacionadas ao tarugo.

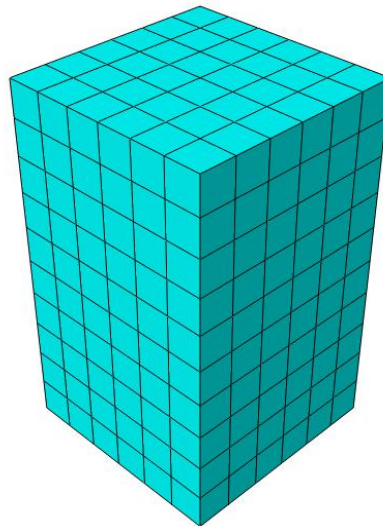
A saída solicitada como resultado no pós processamento foi a escala de deformação plástica equivalente nos pontos de integração - PEEQ. As simulações com o titânio comercialmente puro foram realizadas com uma velocidade de prensagem de 1 mm/s.

Em seguida foram implementadas as interações do modelo criado, entre os passes para todo o processamento do material, onde foram cadastradas: interações de superfície com superfície entre tarugo e a matriz contínua de deformação, interações de superfície com superfície entre tarugo e o conjunto de punções e interações de auto contato entre tarugo com o próprio tarugo essa última para caso ocorram alterações da geometria não previstas, evitando-se assim erros de leitura por parte do Abaqus. A matriz e o punção assumiram a configuração de primeira superfície de contato e o tarugo como segunda superfície de contato nas interações, todas as interações foram propagadas partindo do passo inicial cadastrado no módulo anterior. O valor do coeficiente de fricção nas interações foi determinado em 0,1 valor esse recomendado para processamentos utilizando o MoS2.

As cargas e condições de fronteira e de carga foram configuradas em seguida, onde a matriz contínua por meio de pontos referenciais foi fixada por forças de encastre ou forças de engaste no plano, sem mobilidade, ou seja, independente dos níveis de tensão impostos no processo a matriz se manteve imóvel, fixa e rígida em sua posição cadastrada no passo inicial do processo. Também com o auxílio de pontos referenciais foram cadastradas as mobilidades do conjunto de punções com amplitudes de movimento e deslocamento por meio de coordenadas propagando-se a partir do passo 1. Foram cadastradas oito amplitudes de movimento uma para cada passe executado.

Em seguida foram iniciadas as configurações de malha, o Abaqus versão estudantil habilita ao usuário a geração de até 1.000 nós, dessa forma por meio de diversas análises foi possível definir a seguinte configuração de malhas para os três elementos envolvidos, o tarugo como é o elemento foco de análise deste estudo necessitou de maior divisão, dessa forma ele foi refinado com 360 elementos para melhor mapeamento das deformações e das tensões pontuais aplicadas em cada região do tarugo com divisão correlata ao estudo experimental para comparação quando necessária, sua configuração de dinâmica atendeu a um padrão explícito linear com melhorias durante o processo, como segue a vista com detalhamento tridimensional da peça em pré-processamento com aplicação e inserção da malha ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Vista tridimensional do corpo de prova em divisão com os elementos e malhas.



Fonte: Elaboração própria.

A malha da matriz contínua foi refinada com 300 elementos e a do conjunto de punções com 54 elementos. Todos os corpos foram configurados para responderem ao comportamento em dinâmica explícita, com controle de curvatura em 0,1. Dessa forma foi dado início ao processamento do modelo de simulação por elementos finitos para o Ti CP.

b. Processamento

O processamento foi iniciado com a inicialização do módulo de trabalho, onde foi selecionado o modelo criado com as configurações na etapa de pré-processamento para execução da simulação, apontando o tipo de trabalho para avaliar os dois passos cadastrados e conseqüentemente a execução do processamento em ECAP do Ti CP virtualmente em até 8 passes. Foi selecionado a dupla precisão nos cálculos efetuados pelo Abaqus para possibilitar maior exatidão nessa etapa. Passando-se dessa forma para a etapa de aquisição dos resultados de saída conhecida como pós-processamento.

c. Pós-processamento

No módulo de visualização de dados do Abaqus foi possível analisar e retirar as saídas como resultados a serem apresentados no presente estudo, para as análises das deformações foi solicitada a saída em escala PEEQ.

Foram plotadas as imagens com a escala PEEQ do plano Y externamente referentes aos passes 1, 2, 4, 6 e 8. Também foram plotadas imagens do plano Y com a escala PEEQ internamente do tarugo referentes aos passes 1, 2, 4, 6 e 8 que foram obtidas partindo da secção do tarugo longitudinalmente em 3 mm, que foi correspondente ao estudo experimental, que analisou o corpo de prova por corte em lâminas e utilizou a lâmina 1 e a lâmina 3 em 3mm para aferir a dureza do plano Y externamente e internamente respectivamente, como mostra o detalhamento do procedimento na Figura 3.

As imagens plotadas com a escala PEEQ no plano Y externo e as imagens plotadas com a escala PEEQ do plano Y interno foram utilizadas para comparação entre a escala PEEQ com as medidas de dureza no plano Y obtidas externamente na lâmina 1 e internamente na lâmina 3 do estudo experimental para lâminas perpendiculares. Essa análise foi realizada no intuito de identificar as deformações impostas no tarugo e estudar a homogeneidade entre duas regiões do tarugo, sendo possível dessa forma associar os dois estudos e correlacionar os resultados dos mesmos.

3. Resultados e Discussão

3.1 Estudo experimental

O estudo experimental promoveu no decorrer de todos os passes analisados aferições das medidas das durezas tanto da lâmina 1 quanto da lâmina 3 ao longo do plano Y como são mostradas na Tabela 2, onde a lâmina 1, é correlata à região externa do corpo de prova e a lâmina 3 ou lâmina intermediária correspondente à região interna do corpo de prova seccionado.

Os dados da Tabela 2 mostram todos os valores das médias de dureza referentes às amostras deformadas com lâminas perpendiculares do estudo experimental. As durezas com apenas um passe apresentaram valores de 169 ± 15 HV para a região externa e 159 ± 13 HV para a região interna. Já no segundo passe, a dureza foi elevada para 173 ± 10 HV para a região externa e 168 ± 9 para região interna.

Com o aumento do número de passes os valores de dureza cresceram proporcionalmente para 183 ± 12 HV na região externa e 175 ± 10 HV para a região interna para o quarto passe. Com 6 passes os valores de dureza foram de 203 ± 10 HV para região externa e 198 ± 8 para região interna, já com 8 passes as medidas de durezas se elevaram e alcançaram os maiores valores de todo o processamento com 250 ± 6 HV na região externa e 235 ± 7 HV na região interna.

Tabela 2 - Valores de microdureza para o Ti CP após deformação por ECAP na condição de lâminas perpendiculares.

Condição Perpendicular	Região externa: lâmina 1	Região interna: lâmina 3
01 passe	169 ± 15 HV	159 ± 13 HV
02 passes	173 ± 10 HV	168 ± 9 HV
04 passes	183 ± 12 HV	175 ± 10 HV
06 passes	203 ± 10 HV	198 ± 8 HV
08 passes	250 ± 6 HV	235 ± 7 HV

Fonte: Elaboração própria.

3.2 Elementos finitos

A comparação entre a Tabela 2 que destaca as medidas de dureza experimentais com a Figura 7 que mostra os níveis de deformação impostos na região externa e interna do tarugo deformado por um passe de ECAP via simulação numérica por elementos finitos, indicam que já no primeiro passe existe boa correlação entre os resultados práticos e os simulados.

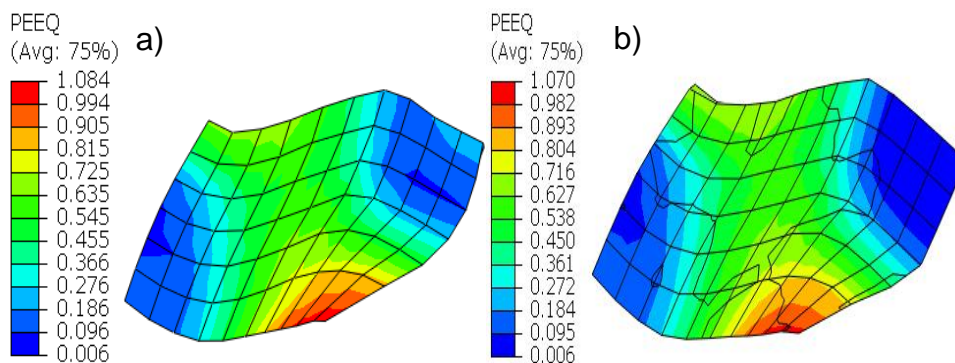
A região externa do tarugo Figura 7(a) apresenta níveis em média superiores aos indicados na região interna Figura 7(b), mostrando também que a parte direita superior da imagem do plano seccionado é sujeita aos menores níveis de deformação entre 0.006 e 0.095 e quase não apresenta modificação com relação ao seu estado inicial (sem deformação), porém é possível apontar que a região do centro do tarugo mantém boa homogeneidade, os valores apresentados na região externa são muito próximos aos apresentados na região interna com muito pouca variação dos níveis de deformação em escala com predominância em valores entre 0.455 e 0.635 indicados na parte externa e 0.450 e 0.627 indicados na parte interna na cor verde do mapa de contorno do tarugo, resultados alcançados por Awang Sh'ri et al. (2019) e Wongsan-Ngam et al.(2021) corroboraram com os do presente trabalho.

As imagens plotadas do tarugo seccionado longitudinalmente apresentam linhas que indicam a tendência de deformação por cisalhamento das malhas no interior do corpo de prova, essa tendência se seguirá nos resultados apresentados nessa seção sempre nas figuras com indicação em (b) ou plano interno seccionado.

Através das incertezas é possível perceber que no primeiro passe existiu uma grande heterogeneidade nas medidas de dureza com 15 HV na região externa e 13 HV na região interna, comprovando dessa maneira a presença de deformações com diferentes amplitudes e incrementos em escala na parte experimental, resultado esse apresentado também na simulação por meio da grande heterogeneidade no mapeamento de contorno auxiliado pelos valores em escala PEEQ, que destacam a região direita inferior do tarugo como a parte com os maiores níveis de deformação do mesmo tanto externamente quanto internamente.

A região superior esquerda logo em seguida, porém a região central é a região com os índices mais homogêneos de deformação, tanto na região externa quanto na região interna do tarugo, fato similar foi observado também nos estudos de Su et al. (2007).

Figura 7 - Corpo de prova no plano Y deformado por um passe de ECAP a) externamente e b) internamente.



Fonte: Elaboração própria.

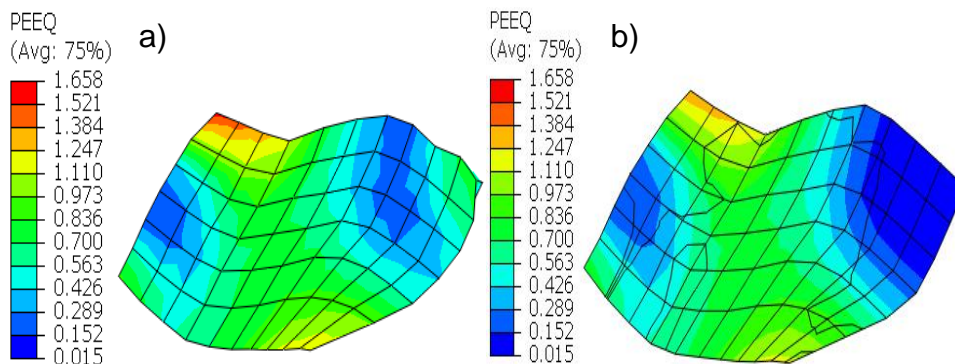
Para o segundo passe por ECAP mostrado na Figura 8 a simulação continua apresentando correlação com os dados obtidos experimentalmente, onde a região da parte superior direita do corpo de prova internamente Figura 8(b) continua a ser a parte com os mais baixos níveis de deformação até o segundo passe com valores máximos em 0.289 favorecendo bastante a diferença na média de concentração dos níveis de deformação e homogeneidade entre as regiões externa e interna do plano Y.

A análise da homogeneidade entre o plano Y externo e o plano Y interno apresenta níveis de deformação muito próximos na parte do centro do tarugo, com elevação desses níveis de deformação no progresso do processamento, e aproximação dos valores vistos em escala se comparados ao primeiro passe, apontando tanto no plano interno quanto no externo níveis de deformação entre 0.426 e 0.973, com diferença entre os valores em escala de 0.547 nessa parte, na parte superior esquerda do plano externo os níveis de deformação são ligeiramente maiores com valor máximo de 1.521 que na mesma região do tarugo seccionado internamente apresenta valor máximo de 1.384, mostrando pequena redução do valor máximo de deformação na escala PEEQ, isso se dá pela interação de contato superficial entre a amostra, o punção e a matriz com deformação severa no ângulo Φ da matriz, gerando elevada deformação superficial se propagando na região interna, porém com pequena redução no interior do tarugo pela limitação relacionada aos planos de deslizamento na microestrutura, resultados similares foram alcançados por Wongs-Ngam et al. (2012, 2021), deformando uma liga de cobre via ECAP.

As incertezas nas medidas de dureza do estudo experimental no segundo passe mostraram que existiu uma pequena aproximação dos níveis de deformação com conseqüente homogeneidade se comparadas ao primeiro passe com 10 HV na região externa e 9 HV na região interna, na simulação numérica houve a mesma tendência, onde é possível observar que os valores apontados na escala PEEQ reduziram os incrementos de distanciamento entre máximos e mínimos praticamente ficando iguais na região do centro do tarugo, As medidas de dureza também possuem relação direta com os valores médios em escala destacados nos resultados da simulação, indicando novamente a correlação entre os estudos, os trabalhos desenvolvidos por Abd El Aal, (2017, 2021) alcançaram resultados similares.

O estudo demonstra que até o segundo passe existem ótimos indícios de homogeneidade de deformação entre as partes externa e interna do plano Y, indicando também que a região da parte esquerda e da parte direita do tarugo desfavorecem bastante a análise por média associada ao estudo por gerar grande incerteza das medidas por conta do baixo potencial de deformação, indicando nessas duas partes grande heterogeneidade nos níveis de deformação em comparação ao centro do corpo de prova.

Figura 8 - Corpo de prova no plano Y deformado por dois passes de ECAP a) externamente e b) internamente.



Fonte: Elaboração própria.

O quarto passe por ECAP mostrado na Figura 9 apresenta valores acumulados e com considerável elevação dos níveis de deformação, que demonstra boa evolução do processamento com o aumento do número de passes, indicando associação direta dessa variável à elevação dos níveis de deformação, destacando continuamente a homogeneidade de deformação presente na região central do tarugo com o favorecimento da ZDP, com valores predominantes entre 0.574 e 1.133 na região externa e na região interna valores predominantes entre 0.574 e 0.854, mostrando uma pequena diferença entre os níveis de deformação presentes nas duas regiões do plano analisado. A região interna passa a apresentar pequena diferença em

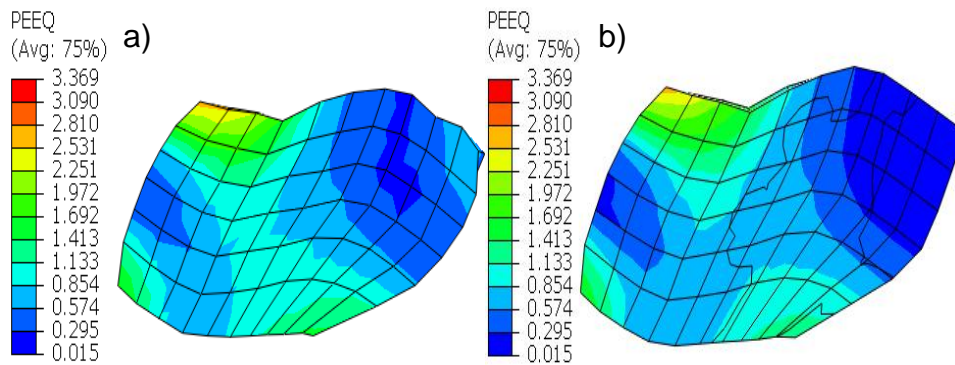
comparação a região externa, porém sem grande discrepância e com níveis de deformação muito próximos, fato também observado de forma similar por Wongs-Ngam et al. (2021) através dos resultados de seu estudo.

As partes da esquerda e a parte superior direita principalmente continuam apresentando altos níveis de heterogeneidade de deformação em comparação a parte do centro tanto na região externa quanto na região interna do tarugo, com o corpo de prova na parte superior esquerda apresentando os maiores níveis de deformação com máximo de 2.531 bem propagado no plano se mantendo nesse valor também na região interna.

A parte superior direita o corpo de prova na região interna continua apresentando níveis baixos de deformação com valores máximos em escala alcançando o valor de 0.295 com baixo incremento nos valores máximos no acúmulo de deformação em comparação ao segundo passe que apresentou valores máximos em 0.289, ou seja com incremento de apenas 0.006, dessa forma sendo identificado baixos valores no acréscimo do acúmulo de deformações desde então, se mostrando precocemente, ainda no quarto passe como uma parte muito prejudicial ao desenvolvimento do processo focado na homogeneidade de deformação, Awang Sh'ri et al. (2019) mesmo trabalhando com corpos de prova de secção circular encontraram indicativos dessa condição na distribuição das deformações em determinadas regiões do tarugo.

Os valores obtidos por meio da simulação continuaram crescendo de forma muito similar as medidas de dureza e permanecem indicando boa correlação entre os estudos de forma direta. As incertezas geradas por meio das medidas de dureza do estudo experimental no quarto passe se mantiveram constantes se comparadas ao segundo passe com 12 HV na região externa e 10 HV na região interna, na simulação numérica houve a mesma tendência, onde é possível observar que os valores apontados na escala PEEQ praticamente mantiveram os incrementos de distanciamento entre máximos e mínimos na parte do centro do tarugo principalmente, porém com valores reduzidos nas extremidades do corpo de prova, principalmente na região interna do plano seccionado na parte direita.

Figura 9 - Corpo de prova no plano Y deformado por quatro passes de ECAP a) externamente e b) internamente.



Fonte: Elaboração própria.

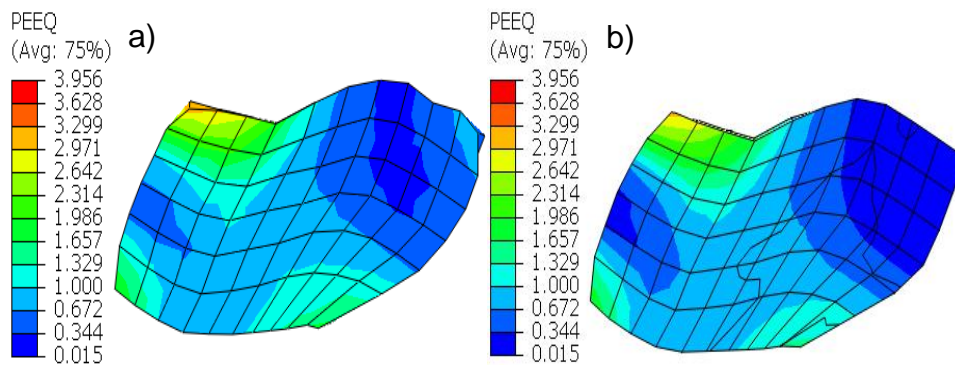
No sexto passe por ECAP mostrado através da Figura 10 já é possível identificar a presença das escalas praticamente nos mesmos limites e níveis de deformação na parte mais ao centro do tarugo, parte essa com as maiores concentrações e níveis entre 0.672 e 1.329 apresentando predominantemente duas cores no mapeamento de contorno do tarugo tanto na região externa quanto na região interna, a região interna continua apresentando os menores valores médios com relação a região externa, com a parte direita permanecendo com os menores níveis acumulados de deformação, apresentando valores máximos em 0.344, indicando incremento de deformação desde o quarto passe com elevação 0.049, com pequeno acréscimo e elevação, porém indicando baixo potencial no acúmulo de deformação. A parte esquerda do tarugo continua apresentando os maiores valores acumulados de deformação na parte superior esquerda, com bons índices de homogeneidade nas duas regiões, porém apresentando nos demais locais dessa parte heterogeneidade dos níveis de deformação por média, onde na região externa

indica valores entre 0.344 e 0.672 e na região interna com valores entre 0.015 e 0.672, indicando dessa forma a região interna com menores acúmulos nos níveis de deformação.

Houve uma pequena redução nas incertezas das medidas de dureza experimentais, apresentando 10 HV na região externa e 8 HV na região interna, na simulação numérica as escalas principalmente na parte do centro se aproximaram e passaram a apresentar valores em escala com níveis mais próximos e mais homogêneos tanto na região externa quanto na região interna, indicando que as duas regiões estão se tornando mais homogêneas com a elevação do número de passes, resultado identificado de forma similar por Zhang et al. (2016) que deformaram via ECAP uma liga de Ti-Ni e analisaram a sua homogeneidade de deformação.

Os incrementos de deformação passaram a estabilizar com relação a elevação dos níveis em escala, com a região ao centro do tarugo apresentando os melhores indícios de homogeneidade até então, as partes direita e esquerda continuaram sendo as responsáveis por manterem os níveis médios de acúmulo de deformação mais heterogêneos com a região da calda assumindo os menores valores em escala de deformação. As medidas de dureza continuam corroborando e ratificando o estudo por simulação numérica, apontando novamente bons indícios de correlação dos resultados entre a escala PEEQ e as medidas de dureza experimentais.

Figura 10 - Corpo de prova no plano Y deformado por seis passes de ECAP a) externamente e b) internamente.



Fonte: Elaboração própria.

No oitavo e último passe via ECAP mostrado através da Figura 11, a elevação dos valores nas médias das medidas de dureza experimentais destacadas na Tabela 2, (250 HV região externa e 235 HV na região interna) é justificada por conta do aumento da densidade de discordâncias e bandas de cisalhamento do material, que é característica associada ao processamento. Na simulação numérica os valores em escala também se elevaram na mesma proporção, sendo possível dessa forma associar diretamente a elevação das medidas de dureza experimental aos resultados obtidos na simulação numérica no decorrer do ECAP, alcançando o registro dos maiores níveis de deformação neste último passe, onde a comparação entre os estudos teve grande correlação, resultados similares foram alcançados nos estudos de (Alateyah et al., 2021, 2022; Wongsan-Ngam et al., 2012, 2021). A parte esquerda superior do tarugo continuou apresentando os maiores valores em escala nos níveis de deformação chegando a apontar no oitavo passe valores máximos em 3.629 demonstrando também boa homogeneidade nessa parte do corpo de prova, porém se analisada toda a extremidade esquerda é possível identificar uma pequena heterogeneidade entre as regiões externa e interna, principalmente na parte mais ao centro, onde externamente apresentou valores mínimos entre 0.417 e 0.818 externamente e 0.015 e 0.417 internamente, gerando pequena diferença entre as regiões. A parte inferior direita apresentou valores praticamente iguais em ambas as regiões (externa e interna), com níveis de deformação muito próximos ou iguais entre 0.818 e 1.621. No canto inferior esquerdo foi apontada boa homogeneidade de deformação entre as regiões, porém se nos deslocarmos mais ao centro da peça partindo dessa parte do plano a homogeneidade não é propagada gerando pequeno

nível de heterogeneidade entre as partes. O centro continua se mostrando ser a parte com o mais alto índice de homogeneidade de deformação de todo o processamento.

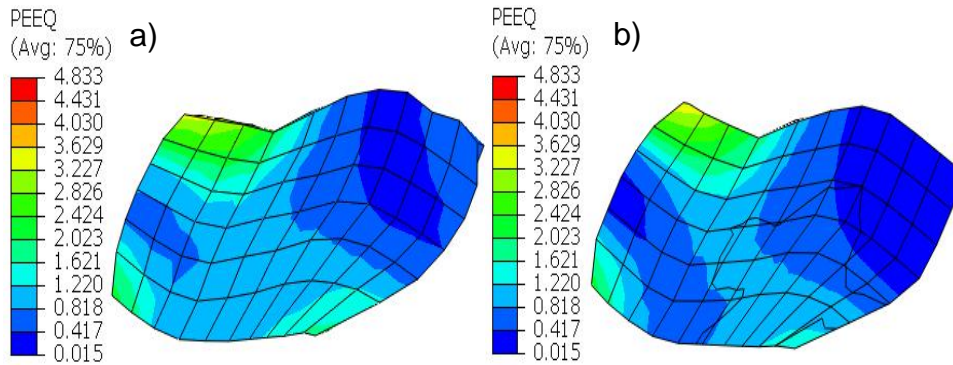
A parte que engloba o canto superior direito do tarugo foi a que apresentou em proporção os menores níveis de deformação ao final do ECAP nas duas regiões. A região interna nessa parte apresentou níveis de deformação em escala muito baixos entre 0.015 e 0.417 indicando níveis de heterogeneidade mais ao canto dessa parte no comparativo entre as regiões, muito da deformação que essa parte é sujeita no canto superior direito do tarugo na região externa no decorrer dos passes foi por conta do contato com as paredes da matriz de deformação com as arestas dos ângulos da matriz de forma direta, em vista que não existe grande propagação via cisalhamento para o interior da peça, sendo dessa forma uma parte com baixa concentração de deformação. A parte mais ao centro do tarugo continua demonstrando boa evolução e aproximação entre os níveis em escala, indicando que quanto mais central e próxima ao início da formação da zona de deformação plástica no tarugo for direcionada a análise mais características visíveis de homogeneidade serão apresentadas e identificadas entre as duas regiões (externa e interna) no decorrer de todos os passes, ficando muito bem destacada e nítida no oitavo passe, que apresenta níveis de deformação em escala predominantes nas duas regiões entre 0.818 e 1.220 com a região interna apresentando predominantemente nas partes mais afastadas do centro valores entre 0.417 e 0.818 que são também apresentados na região externa, porém com menor destaque. Esses valores em escala indicam boa homogeneidade na parte mais ao centro e boa aproximação entre os níveis em escala de deformação. Correlação essa destacada no estudo experimental por meio da aproximação das incertezas nas medidas de dureza, apresentando valores de 6 HV na região externa e 7 HV na região interna, dessa forma apontando os menores valores de discrepância entre as medidas. Demonstrando boa aproximação das aferições se analisadas as partes do plano como um todo de forma individualizada, onde a região externa apresenta níveis pouco mais homogêneos por conta da propagação dos níveis de deformação de mesma natureza em direção às arestas da amostra, já na região interna os níveis de heterogeneidade são um pouco maiores, em vista das maiores diferenças dos níveis de deformação, justificando e associando novamente os estudos.

A evolução da distorção das malhas no plano interno pode ser utilizada como fator de comparação das intensidades de deformações por cisalhamento na evolução do processamento entre os passes via ECAP, onde é possível observar que o primeiro passe gerou grande distorção das linhas se propagando em praticamente toda a zona deformada e foi ganhando estabilização a partir do sexto passe com pequena distorção sendo apresentada a partir de então, mostrando no oitavo passe reduzida tendência de distorção das malhas do plano interno localizada na região central com direção a parte inferior direita, sendo uma consequência da acomodação dos planos de deslizamento e consequente acúmulo de discordâncias no material, apresentando dessa forma uma grande estabilização dos níveis de deformação e associando a presença de forte tendência ao estado estacionário na rota de processamento associada ao processo, os resultados de Wongs-Ngam et al. (2012, 2021) indicaram tendência similar, porém para material, rota de processamento e tipo de matriz diferentes.

As partes que indicaram os maiores níveis de deformação nos passes iniciais apresentaram um processo de redução e estabilização no acúmulo de deformações à medida que o número de passes aumentou, Awang Sh'ri et al. (2019) alcançaram resultados similares que foi indício de que a microestrutura parou de se recrystalizar, destacando que as tensões dos primeiros passes fragmentaram os grãos em tamanhos muito pequenos oferecendo grande homogeneidade e já na passagem final o tamanho da microestrutura fragmentada já estava em níveis tão elevados de homogeneidade em todo o tarugo, demonstrado pela boa aproximação dos níveis de deformação indicando saturação da microestrutura. Isso foi mais um dos fatores da estabilização dos níveis de deformação e indicação de tendência ao estado estacionário de deformação a partir do sexto passe. Outro fator que indica a tendência ao estado estacionário de deformação é a presença do acúmulo de grandes níveis de deformação na região central do tarugo com valores muito próximos, demonstrados pela boa aproximação entre os limites em

escala com tendência de estabilização dos valores de deformação entre 0.417 e 1.621, mostrando apenas duas escalas de cores no mapeamento de contorno do tarugo simulado virtualmente no oitavo passe.

Figura 11 - Corpo de prova no plano Y deformado por oito passes de ECAP a) externamente e b) internamente.



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados experimentais mostraram que para o Ti CP deformado por ECAP a estrutura foi homogênea nas regiões interna e externa. Indicando que a maior homogeneidade do material foi observada nas pequenas diferenças dos valores das medidas de dureza das regiões externa e interna no plano Y que foi de aproximadamente 5%, se mantendo constante para todos os passes realizados. A simulação numérica indicou tendência similar por meio das análises dos valores em escala PEEQ e complementou o estudo prático por meio do mapeamento por partes do tarugo verificando os locais com os maiores e os menores níveis de deformação que poderiam promover redução da homogeneidade de deformação, onde as partes das extremidades direita e esquerda do corpo de prova apresentaram altos níveis de heterogeneidade de deformação sendo dessa forma prejudiciais ao desenvolvimento do ECAP e na utilização do produto final oferecido por meio do processamento, Wongs-Ngam et al. (2021) também constataram essa limitação do ECAP.

4. Considerações Finais

Por meio dos valores de dureza aferidos foi possível confirmar o efeito do número de passes na melhoria das propriedades mecânicas correlatas ao refino de grão do material. Dessa forma o aumento do número de passes mostrou que os valores de dureza apresentaram tendência de crescimento diretamente proporcional ao desenvolvimento e evolução do processamento via ECAP.

Os resultados do estudo experimental mostraram que a região externa das amostras analisadas apresentou valores mais elevados de dureza comparando-se a região interna do corpo de prova, isso foi corroborado através da simulação numérica.

Todos os passes por simulação ilustraram geometrias e formas do tarugo idênticas às obtidas experimentalmente. O estudo comparativo das deformações apresentadas no tarugo nos passes 1, 2, 4, 6 e 8 tanto internamente quanto externamente mostraram que os resultados por simulação numérica estão de acordo com os dados obtidos por meio do estudo experimental comparado e possuem correlação na evolução da dureza comparada aos níveis de deformação na escala PEEQ obtidos virtualmente.

Com a elevação do número de passes o incremento nos níveis de deformação no centro da peça passa a diminuir, isso se dá em proporção a redução da zona de deformação plástica que possui essa tendência justificada por meio do acúmulo de discordâncias e consequente limitação dos planos de deslizamento, onde os níveis em escala de deformação entre as regiões externa e interna tenderam a ficarem muito próximos à medida que se elevaram o número de passes, apresentando no último

passe níveis praticamente iguais com pequena diferença em escala, indicando grande homogeneidade entre as regiões, o estudo experimental forneceu correlação similar ao destacar a redução das incertezas das medidas de dureza.

Com o aumento do número de passes a homogeneidade de deformação foi elevada, fator comprovado por meio da aproximação entre os níveis de deformação associados a reduções das incertezas nas aferições de microdureza Vickers, sendo possível observar com maior detalhamento a partir do quarto passe.

Os resultados do presente estudo apresentaram indicações diretas que para a utilização de materiais processados via ECAP de maneira segura, com controle de qualidade e favoráveis para obtenção de um produto homogêneo em se tratando da aquisição das propriedades mecânicas de tenacidade e ductilidade associadas a resistência mecânica torna-se necessária a integração de estudos e associação de análises numéricas a estudos experimentais para que dessa forma seja possível produzir e utilizar o material processado com uma maior gama de dados e conhecimento integrado do processo e do resultado final.

Por meio dos resultados obtidos no presente estudo foi possível propor as seguintes sugestões para trabalhos futuros: Estudo numérico da homogeneidade de deformação no plano Z externo de acordo com a variação do ângulo de curvatura do Ti CP na rota A, discretizações nas medidas de dureza do tarugo no plano Y experimentalmente para comparação por região de forma pontual com os dados obtidos via simulação numérica na rota A e, deformar o Ti CP via simulação numérica em 1,2, 4, 6 e 8 passes para verificar o efeito do número dos passes nas zonas dos ângulos Φ e Ψ .

Referências

- Abd El Aal, M. I. (2017). 3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 27(6), 1338–1352. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60155-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60155-9)
- Abd El Aal, M. I. (2021). Prediction of hardness distribution during SPD process based on FEM simulations: Case study of ECAP and HPT processes. *Materials Research Express*, 8(8). Scopus. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac1ec9>
- Adedokun, S. T. (2011). A Review on Equal Channel Angular Extrusion as a Deformation and Grain Refinement Process. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, 2, 360–363.
- Alateyah, A. I., Ahmed, M. M. Z., Alawad, M. O., Elkhatny, S., Zedan, Y., Nassef, A., & El-Garaihy, W. H. (2022). Effect of ECAP die angle on the strain homogeneity, microstructural evolution, crystallographic texture and mechanical properties of pure magnesium: Numerical simulation and experimental approach. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 1491–1511. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.088>
- Alateyah, A. I., Ahmed, M. M. Z., Zedan, Y., El-Hafez, H. A., Alawad, M. O., & El-Garaihy, W. H. (2021). Experimental and numerical investigation of the ecap processed copper: Microstructural evolution, crystallographic texture and hardness homogeneity. *Metals*, 11(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/met11040607>
- 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>
- 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>
- Bernardi, H. H. (2009). *Processamento e caracterização microestrutural de nióbio deformado plasticamente por extrusão em canal angular* [Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP). Escola de Engenharia de Lorena].
- 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*. (10^o ed). Direction of the ASM International Handbook Committee.
- Huang, Z., Xiao, H., Yu, J., Zhang, H., Huang, H., Yu, K., & Zhou, R. (2022). Effects of Different Annealing Cooling Methods on the Microstructure and Properties of TA10 Titanium Alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.149>
- Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (2000). Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains. *Materials Science and Engineering: A*, 281(1), 82–87. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00744-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00744-3)
- Pourdavood, M., Sedighi, M., & Asgari, A. (2018). ECAP process capability in producing a power transmission bimetallic rod. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(8), Art. 8. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1376080>

- 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)
- Segal, V. M., Reznikov, V., & Drobyshevkiy, A. (1981). Plastic Working of Metals by Simple Shear. *Russian Metallurgy*, 1, 99–105.
- 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>
- Su, C. W., Lu, L., & Lai, M. O. (2007). 3D finite element analysis on strain uniformity during ECAP process. *Materials Science and Technology*, 23(6), 727–735. <https://doi.org/10.1179/174328407X179728>
- 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., Islamgaliev, R. K., & Alexandrov, I. V. (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 45(2), 103–189. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9)
- 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., & Langdon, T. G. (2014). Report of International NanoSPD Steering Committee and statistics on recent NanoSPD activities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 63, 12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/011002>
- Wongsa-Ngam, J., Kawasaki, M., & Langdon, T. G. (2012). The development of hardness homogeneity in a Cu–Zr alloy processed by equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 556, 526–532. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.022>
- 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), Art. 12. <https://doi.org/10.3390/met7120563>
- Zhang, D., Osman, M., li, li, Zheng, Y., & Tong, Y. (2016). Simulation and Experimental Investigation for the Homogeneity of Ti49.2Ni50.8 Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing. *Metals*, 6, 45. <https://doi.org/10.3390/met6030045>
- 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>