



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS (*P²CEM*)

P²CEM

VAGNER DOS ANJOS COSTA

*SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA PRENSAGEM EM CANAIS
EQUIANGULARES (ECAP) NA HOMOGENEIDADE DE
DEFORMAÇÃO DE TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO*

SÃO CRISTÓVÃO - SE
2023

VAGNER DOS ANJOS COSTA

***SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA PRENSAGEM EM CANAIS
EQUIANGULARES (ECAP) NA HOMOGENEIDADE DE
DEFORMAÇÃO DE TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO***

Dissertação apresentada à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wilton Walter Batista

**SÃO CRISTÓVÃO - SE
2023**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Costa, Vagner dos Anjos
C837s Simulação numérica do efeito da prensagem em canais equiangulares (ECAP) na homogeneidade de deformação de titânio comercialmente puro / Vagner dos Anjos Costa ; orientador Wilton Walter Batista. - São Cristóvão, 2022.
90 f. : il.

Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Método dos elementos finitos. 2. Titânio. 3. Prensas mecânicas. I. Batista, Wilton Walter Orient. II. Título.

CDU 66.017

“SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA PRENSAGEM EM
CANAIS EQUIANGULARES (ECAP) NA HOMOGENEIDADE DE
DEFORMAÇÃO DE TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO”

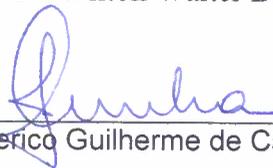
Vagner dos Anjos Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

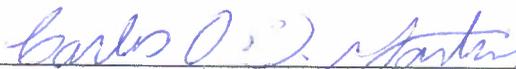
Aprovada por:



Prof. Dr. Wilton Walter Batista



Prof. Dr. Frederico Guilherme de Carvalho Cunha



Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

Janeiro/2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, dotado de tudo aquilo que não está disposto em nossos domínios mentais, senhor de todas as graças e responsável por nossa singela e humilde existência.

À minha amada esposa Valeska Matos, que apesar das dificuldades, sempre me estimulou e nunca mencionou que eu não conseguiria, que é uma mulher batalhadora e de coração enorme a quem admiro e dedico todo o meu amor.

Agradeço à minha querida Mãe, Maria de Lourdes por tudo que fez por mim na medida do possível e de suas possibilidades para que eu me tornasse um homem formado capaz de lutar por todos os meus objetivos.

Agradeço imensamente ao professor Wilton a quem tenho muito respeito e admiração, que se mostrou tão disposto a me orientar e contribuir a concluir minha formação o que me permitiu visualizar rumos acadêmicos e de pesquisas pelos quais nunca havia antes imaginado.

A UFS, A coordenação do P²CEM e a todo corpo docente do P²CEM que mesmo em um período tão difícil de pandemia se mantiveram a frente dos ensinamentos para organizar e colaborar em minha formação, meu muito obrigado sem tamanho.

Aos colegas que viraram bons amigos Eduardo, Reinan, Bruno e Fábio pela contribuição e ajuda mútua para que houvessem progressos em nossas pesquisas.

Meu muito obrigado a todos que de forma direta ou indireta deslocaram esforços para me ajudar a concluir o meu objetivo, fiquem com Deus.

Resumo da Dissertação apresentada ao P²CEM/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais (M. Sc.).

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA PRENSAGEM EM CANAIS
EQUIANGULARES (ECAP) NA HOMOGENEIDADE DE DEFORMAÇÃO DE
TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO

Vagner dos Anjos Costa
Janeiro/2023

Orientador: Wilton Walter Batista

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

A prensagem em canais equiangulares (ECAP) é um processo de deformação plástica severa de materiais, onde se busca produzir o refino da granulometria na microestrutura. Materiais submetidos ao processamento 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. 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° e confrontar a um estudo experimental com o intuito de comparar os níveis de deformação entre regiões do corpo de prova. 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 do Abaqus – edição estudantil 2020. Na simulação da deformação, a matriz ECAP foi cadastrada empregando-se parâmetros de um material de corpo rígido, ou seja, não foi sujeita a deformação durante todo o processo, haja vista que o interesse foi o de analisar as deformações no material estudado. O material deformado virtualmente foi o titânio comercialmente puro, os parâmetros físicos foram estabelecidos previamente por meio do cadastro das variáveis físicas e mecânicas no ambiente do Abaqus. 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. Empregando-se o software de simulação computacional foram determinados os comportamentos do material em função das variáveis envolvidas no processo com comparação experimental posterior. Sendo possível dessa forma analisar previamente sua aplicação física subsequente 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: Elementos finitos, titânio, deformação plástica severa, ECAP.

Abstract of Thesis presented to P²CEM/UFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Materials Science and Engineering (M. Sc.).

NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF PRESSING IN EQUIANGULAR CHANNELS (ECAP) ON THE HOMOGENEITY OF DEFORMATION OF COMMERCIALY PURE TITANIUM

Vagner dos Anjos Costa
January/2023

Advisors: Wilton Walter Batista

Department: Materials Science and Engineering

Pressing in equiangular channels (ECAP) is a process of severe plastic deformation of materials, which seeks to produce the refinement of granulometry in the microstructure. Materials subjected to ECAP processing show improvements in their mechanical properties, such as the association between increased mechanical strength and increased ductility. The process variables that interfere in the microstructural refining are: matrix types, processing route and number of deformation passes. The present work has the objective of virtually evaluating the levels of deformation by eight passes via ECAP of titanium in a commercially pure state, in a matrix with a channel angle of 120° and confronting an experimental study with the intention of comparing the levels of deformation between regions of the test body. The specimen and the matrix were numerically modeled and simulated by finite elements using the modeling interface and the Abaqus simulation environment – student edition 2020. In the deformation simulation, the ECAP matrix was registered using parameters of a rigid body material, that is, it was not subject to deformation throughout the process, given that the interest was to analyze the deformations in the studied material. The virtually deformed material was commercially pure titanium, the physical parameters were previously established through the registration of physical and mechanical variables in the Abaqus environment. The material was submitted 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 submitted. Using computer simulation software, the behavior of the material was determined as a function of the variables involved in the process, with subsequent experimental comparison. In this way, it is possible to previously analyze its subsequent physical application with greater reliability, greater knowledge of the material to be worked on the test specimens, greater economy with the anticipation of problems that precede the real experimental practice, thus avoiding errors and obtaining greater accuracy in its treatment.

Keywords: Finite elements, titanium, severe plastic deformation, ECAP.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
2.1	OBJETIVO GERAL	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1	TITÂNIO	5
3.2	DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SEVERA.....	7
3.3	PRINCIPAIS MÉTODOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SEVERA	8
3.3.1	Laminação acumulativa (Accumulative Roll-Bonding - ARB).....	9
3.3.2	Torção sob elevada pressão (High Pressure Torsion - HPT)	9
3.3.3	Processo de prensagem em canais equiangulares (Equal Channel Angular Pressing - ECAP)	10
3.4	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	16
3.4.1	Critério das tensões de von Mises.....	17
3.5	SOFTWARES DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	18
3.5.1	Softwares que trabalham com o método de elementos finitos.....	18
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
4.1	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ECAP	22
5	METODOLOGIA	37
5.1	ESTUDO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA COMPARAÇÃO COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	37
5.2	PROCEDIMENTOS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO ECAP38	
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
6.1	MAPEAMENTO DAS DEFORMAÇÕES DO TI CP A CADA PASSE DE ECAP NO PLANO Y	46
6.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS EXPERIMENTAIS E OS DA SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS	60
7	CONCLUSÕES.....	72
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Células unitárias e os planos de deslizamento das fases α e β do titânio. Fonte: BANERJEE; WILLIAMS, 2013.	6
Figura 2. Esquema do processo de deformação por laminação acumulativa (ARB). Fonte: AZUSHIMA et al., 2008.	9
Figura 3. Esquema do processo de deformação por torção em alta pressão (HPT). Fonte: AZUSHIMA et al., 2008.	10
Figura 4. Processo de deformação por ECAP. Fonte: VALIEV; LANGDON, 2006. ..	12
Figura 5. Planos de deformação. Fonte: VALIEV; LANGDON, 2006.	13
Figura 6. Rotas de processamento: Rota A, Rota B _A , Rota B _C e Rota C. Fonte: VALIEV; LANGDON, 2006.	14
Figura 7. Processo de deformação por ECAP. (a) Ângulo de canal Φ e ângulo de curvatura ψ . (b) Plano de cisalhamento no processamento por ECAP. Fonte: VALIEV; LANGDON, 2006.	15
Figura 9: Distribuição média das deformações em três planos da liga Ti-50,8%Ni processada via ECAP em múltiplos passes: (a) 1 passe, (b) 3 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Zhang et al., 2016.	26
Figura 10: Corte em vista da matriz ECAP com ângulo de canal de $\Phi = 120^\circ$ e a divisão em malha. Fonte: AWANG SH'RI et al., 2019.	27
Figura 11: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano Y com $\varphi = 120^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: AWANG SH'RI et al., 2019.	28
Figura 12: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano Y com $\varphi = 126^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: AWANG SH'RI et al., 2019.	29
Figura 13: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano X com $\varphi = 120^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: AWANG SH'RI et al., 2019.	30
Figura 14: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano X com $\varphi = 126^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: AWANG SH'RI et al., 2019.	31
Figura 15: Esquema da modelagem via simulação numérica para o ECAP em matriz contínua para deformação. Fonte: WONGSA-NGAM et al., 2021.	32

Figura 16: Contornos de distribuição de deformação plástica equivalentes do tarugo durante o processamento via ECAP: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: WONGSA-NGAM et al., 2021.....	33
Figura 17: Distribuição dos níveis de deformação plástica equivalentes ao longo do comprimento do tarugo processado via ECAP: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: WONGSA-NGAM et al., 2021.....	34
Figura 18: Ilustração esquemática mostrando as regiões da análise. Fonte: WONGSA-NGAM et al., 2021.....	35
Figura 19. a) Corpo de prova composto por lâminas de Ti CP, sentido da deformação na matriz ECAP e plano de análise b) Desenho esquemático da matriz utilizada para a formação do canal de $\Phi=120^\circ$. Fonte: (SILVA 2017).....	38
Figura 20. Curva tensão x deformação do titânio comercialmente puro. Adaptado de Zhang et al. (2020).....	40
Figura 21. Modelo desenvolvido para a simulação do ECAP.....	41
Figura 22. Vista tridimensional do corpo de prova em divisão com os elementos e malhas.....	43
Figura 23. (a) Corpo de prova na posição horizontal com divisão em três regiões: cabeça, centro e Cauda. Visão do plano Y na condição sem deformação ECAP. (b) Corpo de prova na posição vertical na matriz ECAP com o punção. (c) Corpo de prova posição horizontal após a deformação.....	47
Figura 24. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 1 passe de deformação ECAP.....	48
Figura 25. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 2 passes deformação ECAP.....	50
Figura 26. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 3 passes deformação ECAP.....	51
Figura 27. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 4 passes de deformação ECAP.....	52
Figura 28. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 5 passes de deformação ECAP.....	53
Figura 29. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 6 passes de deformação ECAP.....	55

Figura 30. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 7 passes de deformação ECAP.....	56
Figura 31. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 8 passes de deformação ECAP.....	57
Figura 32: Evolução no acúmulo dos níveis de deformação na região do centro do corpo de prova durante o processo ECAP.	59
Figura 33. Corpo de prova com 1 passe de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.....	62
Figura 34. Corpo de prova com 2 passes deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.....	64
Figura 35. Corpo de prova com 4 passes de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.....	66
Figura 36. Corpo de prova com 6 passes de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.....	67
Figura 37. Corpo de prova com 8 passes de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas e elásticas do titânio.....	41
Tabela 2. Valores de microdureza para o Ti CP não deformado e deformado via ECAP na condição de lâminas perpendiculares.	61

1 INTRODUÇÃO

Os materiais metálicos policristalinos são largamente utilizados em diversos setores da indústria, muito se dá por conta das amplas características que favorecem e justificam essas aplicações, essas características estão associadas à disposição final da microestrutura de cada material e a organização final dos grãos que fornece ao sólido diferentes propriedades físicas e químicas. Por isso estudos em torno de melhorias nas propriedades mecânicas de materiais metálicos policristalinos que são empregados amplamente na indústria e na engenharia com foco nas modificações de sua microestrutura tornam-se essenciais, haja vista o mapeamento de seu desempenho mecânico para aplicações dos mesmos. Nesse sentido, os materiais metálicos são constantemente avaliados com o objetivo de propor modificações em sua microestrutura que resultam na ampliação dos campos de aplicações, ofertando maior segurança e melhor desempenho mecânico, (AZEVEDO, 2013; BAUER, 2007; LIMA, 2012; VALIEV; LANGDON, 2006).

O titânio (Ti) e suas ligas são amplamente utilizados no campo médico em aplicações ortopédicas, assumindo papel crucial neste setor como um dos principais biomateriais do mercado. Diversas investigações têm sido desenvolvidas nas últimas décadas buscando melhorias na fabricação de produtos à base de titânio visando diversas aplicações, tais como, em ambientes de alta capacidade de corrosão, no setor aeroespacial, na produção de equipamentos industriais e no campo médico como já foi citado. As ligas de titânio dos tipos β e β -metaestável, são promissoras devido às propriedades como biocompatibilidade, alta resistência mecânica e baixo módulo de elasticidade. As ligas de Ti constituem um grupo de biomateriais que apresentam o módulo de elasticidade mais próximo ao osso humano, (SILVA, 2017; SORDI et al., 2012; CHEN; THOUAS, 2015; ZHOU; NIINOMI, 2009; HUANG et al., 2022).

São inúmeras as aplicações do titânio que necessitam de aumento de desempenho mecânico com o objetivo de atender determinadas demandas industriais, e para responder a essas necessidades da engenharia, são empregadas ligas a base de titânio. A liga Ti-6Al-4V empregada na indústria aeronáutica, adquiriu nova função, sendo empregada como biomaterial em aplicações ortopédicas, porém, problemas relacionados a sua biocompatibilidade limitam o seu emprego. Os elementos de liga vanádio e alumínio são tóxicos ao corpo humano. A adição de

elementos de liga é um processo de fabricação muito difundido e utilizado nos meios industriais, porém em alguns casos torna-se inviável por encarecer o beneficiamento do metal. Uma alternativa muito promissora para melhorar as características mecânicas do titânio em seu estado comercialmente puro é o refino da microestrutura empregando técnicas de processamento de deformação plástica severa (SPD). Dentre as técnicas de SPD, a Prensagem em Canais Equiangulares (ECAP) é muito promissora. Estudos comprovam 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 ECAP promove o refinamento dos grãos da microestrutura do material resultando no aumento da resistência mecânica e da ductilidade. O processamento via ECAP consiste na prensagem do material em dois canais com secções transversais idênticas, com intersecção em um ângulo de canal (Φ) e ângulo de curvatura (Ψ), que promove a deformação plástica via cisalhamento simples, preservando a área da secção transversal original do material deformado, (BERNARDI, 2009; VALIEV; LANGDON, 2014).

A deformação via ECAP promove homogeneidade de deformação da microestrutura do material processado, sendo que as principais variáveis de processo são: número de passes, rota de processamento e tipo de matriz de deformação que é definida pelos ângulos de canal (Φ) e curvatura (Ψ), (DUNNE, 1998; MATHAUDHU et al., 2005).

O objetivo dessa dissertação foi analisar a deformação a frio do titânio comercialmente puro (Ti CP) através do método de Prensagem em Canais Equiangulares (ECAP) empregando o programa de modelagem numérica ABAQUS para efetuar o mapeamento das deformações em diferentes regiões dos corpos de prova. A validação do modelo numérico foi realizada através da comparação dos resultados da simulação com resultados experimentais de medidas de dureza Vickers no plano Y dos corpos de prova de Ti CP processados por ECAP. Os experimentos foram realizados com 1, 2, 4, 6 e 8 passes, na rota de processamento A, na temperatura ambiente e matriz de deformação com ângulos de canal ($\Phi = 120^\circ$) e curvatura ($\Psi = 0^\circ$).

Os trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal de Sergipe no P²CEM por Santos (2018), que estudou o processamento ECAP de forma experimental com amostras de nióbio e principalmente por Silva (2017), que estudou o processamento ECAP de forma experimental com amostras de titânio comercialmente puro e ligas de titânio-nióbio, serviram como norte na obtenção de informações e parâmetros do presente estudo. A motivação deste trabalho foi pautada na ausência de estudos realizados com a análise da homogeneidade da deformação do Ti CP processado via ECAP empregando o mapeamento de microdureza em planos de deformação específicos e comparando os dados experimentais com dados obtidos por simulação computacional por elementos finitos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da deformação plástica via Prensagem em Canais Equiangulares (ECAP) em titânio comercialmente puro (Ti CP) por meio de modelos de simulação numérica para avaliar a homogeneidade de deformação do processo ECAP e validar os resultados da simulação comparando-os com dados experimentais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar numericamente o Ti CP deformado via ECAP na rota A em temperatura ambiente;
- Analisar por meio do software Abaqus o efeito do número de passes via ECAP e estudar a deformação efetiva com auxílio de representação da escala PEEQ na etapa de pós processamento;
- Mapear os níveis de deformação e a homogeneidade de deformação do corpo de prova durante todo o processamento via ECAP no plano Y com o auxílio da escala PEEQ na etapa de pós processamento;
- Comparar o modelo de simulação numérica executado no Abaqus com o auxílio da escala PEEQ na etapa de pós processamento com valores experimentais das medidas de dureza no plano Y de corpos de prova processados via ECAP.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TITÂNIO

Para suprir o grande crescimento na demanda por implantes ortopédicos, vem sendo necessária a busca constante por alternativas de materiais com características que os enquadrem na categoria de biomateriais. O titânio comercialmente puro (Ti CP) e as suas ligas são utilizados em larga escala nos campos aeroespaciais e marítimos, além de serem utilizados como biomateriais na medicina, devido à sua alta resistência mecânica, excelente resistência à corrosão e ao calor, e boa biocompatibilidade, (HUANG et al., 2022; ZHOU; NIINOMI, 2009).

Os biomateriais utilizados como implantes ortopédicos está relacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas, devendo possuir boa biocompatibilidade, boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa processabilidade e módulo de elasticidade próximo ao do osso humano (10 GPa a 40 GPa), (ABDEL-HADY GEPREEL; NIINOMI, 2013; EMI, 2014; GEETHA et al., 2009; PEREIRA, 2015).

Um metal utilizado como biomaterial deve possuir propriedades mecânicas adequadas aos tipos de cargas as quais será submetido e apresentar funcionalidade em relação à interação com o tecido ósseo. O desempenho mecânico adequado promove uma interação de equilíbrio na transferência de cargas entre o metal e o osso, evitando a reabsorção óssea que provoca a perda da estabilidade mecânica e causa danos à saúde do paciente. Devem ser levados em consideração no momento da produção ou seleção de um biomaterial o módulo de elasticidade, a resistência à tração, a ductilidade e a tenacidade, (CHEN; THOUAS, 2015; ZHOU; NIINOMI, 2009).

As ligas de aço inoxidável e as ligas de Co-Cr são exemplos de ligas metálicas empregadas como biomateriais. As ligas de aço inoxidável, devido ao elevado módulo de elasticidade, ocasionam desgaste pontual por atrito entre a prótese e o osso, enquanto as ligas Co-Cr, além do alto módulo de elasticidade (240 GPa), apresentam toxicidade ao organismo devido à presença do elemento Co. Em função desses problemas apresentados, o titânio e suas ligas ganharam relevância, pois apresentam baixo módulo de elasticidade se comparado aos materiais citados anteriormente, cerca de 100 GPa, e não possuem efeito tóxico ao organismo se utilizado na forma comercialmente pura ou com elementos de liga especiais, (GRIZA et al., 2014; PEREIRA, 2015).

A seleção dos elementos de liga para produção das ligas de titânio deve ser realizada com muito critério. Os elementos de liga promovem melhorias em relação na resistência à tração, ductilidade, resistência à corrosão e redução do módulo de elasticidade, porém, em alguns casos ocasionam efeitos negativos em se tratando das aplicações biomédicas. O exemplo da liga Ti-6Al-4V que foi o biomaterial mais utilizado em aplicações ortopédicas nos últimos anos, porém estudos recentes demonstraram que esta liga de titânio apresenta grande toxicidade ao corpo devido aos seus altos teores de vanádio e alumínio, (BANERJEE; WILLIAMS, 2013; ELIAS et al., 2013; SILVA, 2017; WU et al., 2017; ZHAO et al., 2008).

O Ti CP possui como a sua principal característica a transformação alotrópica, que é a transição de fases que o material apresenta. A fase β possui estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) e apresenta estabilidade a partir da temperatura de fusão até a temperatura β -transus, ou seja, de 1680 °C até 882 °C. Na temperatura β -transus, ocorre transição alotrópica de fases, onde é formada a fase α com estrutura hexagonal compacta (HC) e estabilidade abaixo dessa temperatura. A Figura 1 mostra as células unitárias e os planos de deslizamento das fases α e β do titânio, (BANERJEE; WILLIAMS, 2013; SILVA, 2017; ZHAO et al., 2008).

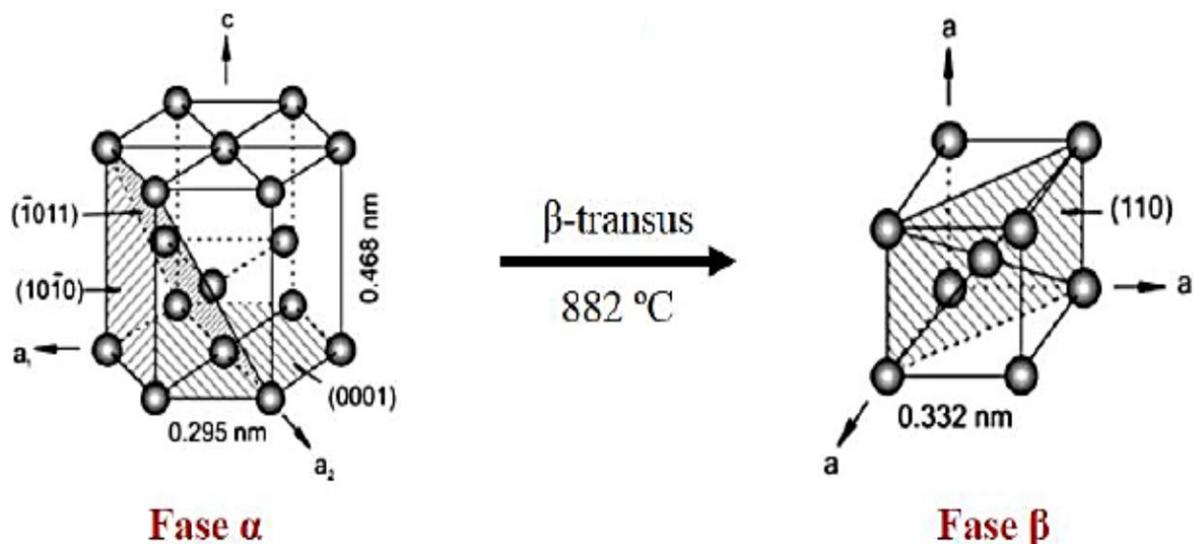


Figura 1. Células unitárias e os planos de deslizamento das fases α e β do titânio. Fonte: Banerjee; Williams (2013).

Os fatores econômicos também devem ser levados em consideração, haja vista os grandes custos na fabricação das ligas metálicas a base de titânio, justificados por fatores como a promoção de atmosferas controladas, pelo processo ser desenvolvido em altas temperaturas para fundição dos metais, e no geral demandar de estruturas e equipamentos de alta complexidade e tecnologia para que o processo de fabricação seja bem sucedido, (BAUER, 2007; SILVA, 2017).

O Ti CP pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas sem a necessidade de emprego de elementos de liga. O processo de deformação plástica via Prensagem em Canais Equiangulares (ECAP), promove a elevação de suas propriedades, tornando o Ti CP comparável e em alguns casos até superior à liga comercial Ti-6Al-4V. Quando se analisa o campo dos biomateriais, visando aplicações ortopédicas, a eliminação dos elementos de liga é um fator importante e no caso específico do titânio é muito mais vantajoso por este ser um metal não nocivo ao organismo, (BANERJEE; WILLIAMS, 2013; ELIAS et al., 2013; SILVA, 2017; VALIEV; LANGDON, 2006; WU et al., 2017; ZHAO et al., 2008).

O ECAP é uma maneira muito eficaz para a obtenção de materiais com refinamento de grãos e melhoria de propriedades mecânicas pontuais voltadas a aplicações biomédicas, (SANTOS, 2018; SILVA, 2017; VALIEV; LANGDON, 2006). Alguns estudos vêm analisando o Ti em seu estado puro nos últimos anos por meio da aplicação do processamento via ECAP, indicando ótimos resultados e comprovando que essa técnica apresenta grande potencial, gerando amplas possibilidades da produção de biomateriais com granulometria ultrafina e com ótimas propriedades mecânicas em larga escala, (GU et al., 2020; ROODPOSHTI et al., 2015; SILVA, 2017; WU et al., 2017; ZHAO et al., 2008).

3.2 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SEVERA

As técnicas de deformação plástica severa (SPD) são processos de conformação que impõe grandes deformações ao material sem provocar mudanças dimensionais da peça trabalhada, permitindo a obtenção de materiais de alta resistência mecânica. Os primeiros relatos descritos da aplicação dos processamentos de SPD para obtenção de microestruturas de granulometria ultrafina

(UFG) e propriedades excepcionais de materiais apareceram na literatura russa em 1981, (SEGAL; REZNIKOV; DROBYSHEVSKIY, 1981; VALIEV; LANGDON, 2006).

Nos processos de SPD a mudança permanente da forma de um corpo sólido ocorre com a aplicação de uma força acima de seu limite de escoamento. Essa deformação é causada pelo deslizamento relativo de planos atômicos, o que indica a geração e movimento de discordâncias, (VALIEV et al., 2012). Os metais produzidos por SPD apresentam granulometria UFG, com grãos submicrométricos (100-1000 nm) ou nanométricos (menor que 100nm), (VALIEV; LANGDON, 2014).

Embora as propriedades físicas e mecânicas dos metais sejam determinadas por vários fatores, o tamanho de grão do material é um fator dominante na determinação das propriedades e aplicações finais do mesmo, (VALIEV; LANGDON, 2006).

De acordo com DHAL et al. (2017), dentre as principais características microestruturais determinantes nas propriedades dos materiais que são submetidos aos processos de SPD, estão: tamanho e orientação dos grãos, características dos sub grãos, textura cristalográfica e tamanho e distribuição de partículas de segunda fase.

Além de gerar um significativo aumento de resistência do material, os processos de SPD apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais de fabricação de materiais com granulação ultrafina, pois não introduzem porosidades ou contaminações no material trabalhado, (MU et al., 2008).

Os materiais que são processados por SPD relacionam características microestruturais desenvolvidas no processo, melhorando não só a forma e o tamanho dos grãos, como também a estrutura dos seus contornos, fator esse que é crucial, permitindo o alcance das propriedades mecânicas desejadas para sua utilização na indústria, (DHALL; PANIGRAHI; SHUNMUGAM, 2017; MU; HU; GOTTSTEIN, 2008; VALIEV; LANGDON, 2006 e 2014).

3.3 PRINCIPAIS MÉTODOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SEVERA

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), (AZUSHIMA et al., 2008; SABIROV; MURASHKIN; VALIEV, 2013).

3.3.1 Laminação acumulativa (Accumulative Roll-Bonding - ARB)

Segundo TSUJI et al. (2003), a ARB é a deformação plástica severa realizada com a laminação de chapas, placas ou barras, no qual o material é cortado em dois, empilhado e laminado, de forma que as partes empilhadas se unam. Após a laminação, o material é novamente cortado, empilhado e submetido à nova laminação. As superfícies internas do material a ser empilhado devem ser limpas, retirando-se impurezas como graxas e gorduras, e promovendo também o lixamento destas. O processo de corte, empilhamento e laminação pode ser repetido sucessivas vezes até atingir a deformação desejada, Figura 2, (AZUSHIMA et al., 2008; LEE et al., 1999).

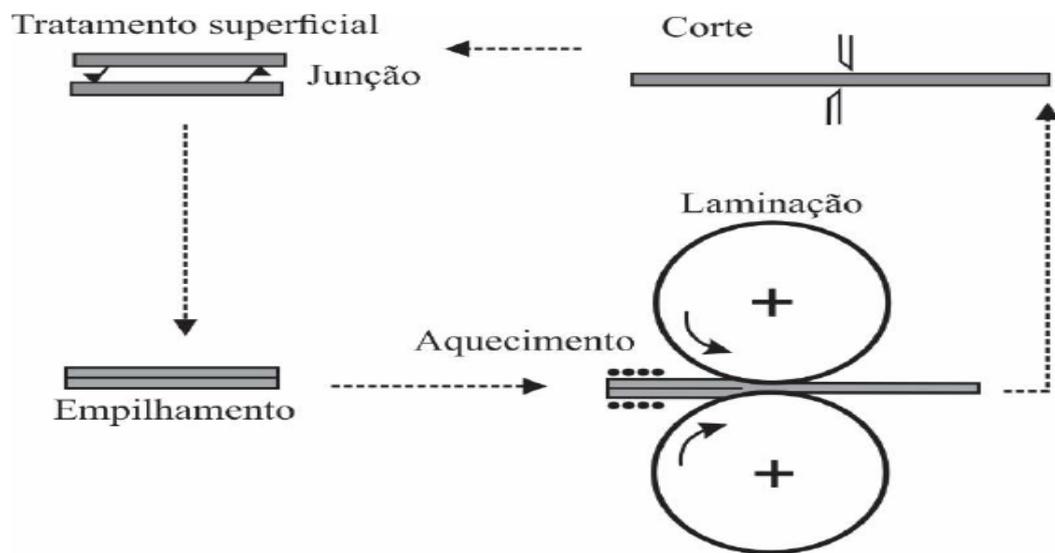


Figura 2. Esquema do processo de deformação por laminação acumulativa (ARB).
Fonte: Azushima et al. (2008).

3.3.2 Torção sob elevada pressão (High Pressure Torsion - HPT)

A HPT consiste em submeter um material, que geralmente apresenta-se em forma de disco, a uma deformação por torção, produzida por um punção sob alta pressão de compressão aplicado na superfície do material. As forças de atrito existentes entre o punção e a superfície do material geram tensões de cisalhamento que produzem a deformação, sendo esta tanto maior quanto maiores o número de revoluções e o raio do disco e quanto menor sua espessura inicial, Figura 3, (AZUSHIMA et al., 2008; VALIEV et al., 2006; ZHILYAEV; LANGDON, 2008).

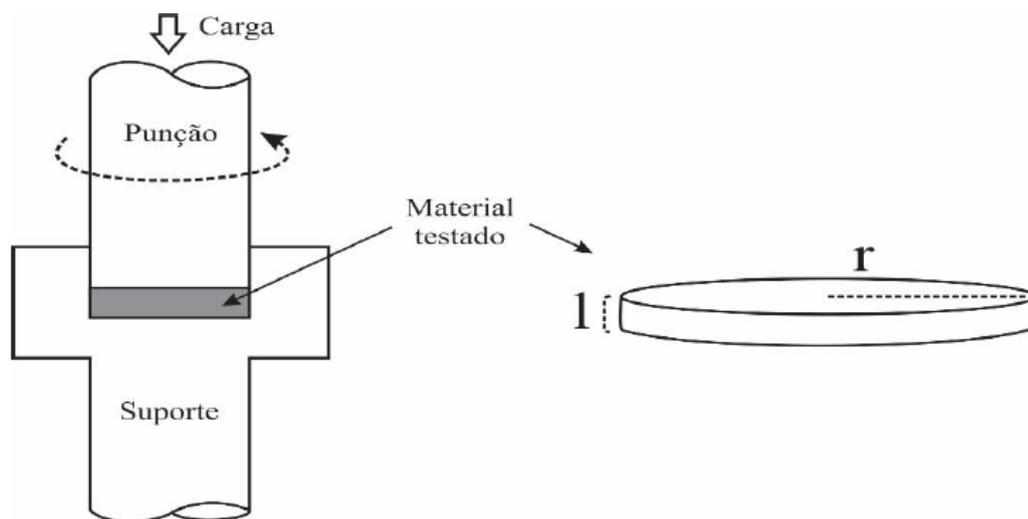


Figura 3. Esquema do processo de deformação por torção em alta pressão (HPT).
Fonte: Azushima et al. (2008).

3.3.3 Processo de prensagem em canais equiangulares (Equal Channel Angular Pressing - ECAP)

O ECAP foi introduzido pela primeira vez por Segal e seus colegas entre 1970 e 1980 no Instituto de Minsk na antiga União Soviética. O objetivo foi o desenvolvimento de um processo de moldagem de metais, onde altas tensões poderiam ser introduzidas em tarugos metálicos por cisalhamento simples. Embora o objetivo tenha sido alcançado, esses resultados receberam pouca atenção da comunidade científica. A partir dos anos 90 quando os relatórios e visões gerais começaram a serem tratados com maior atenção, o potencial do uso do ECAP foi visto

como alternativa na produção de metais com granulação ultrafina e com melhor desempenho das propriedades mecânicas. Ótimos resultados foram obtidos por Valiev alguns anos depois, através de pesquisas que possibilitaram a obtenção de materiais com granulação ultrafina por meio do ECAP, (ADEDOKUN, 2011; SEGAL; REZNIKOV; DROBYSHEVSKIY, 1981; VALIEV; LANGDON, 2006).

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; SEGAL; ALFORD, 2004; VALIEV; LANGDON, 2006).

O ECAP torna possível através do refinamento microestrutural a aplicação de Hall-Petch, onde a formação de elevada fração de contornos de alto ângulo produzida pela deformação plástica do processo, eleva os limites de escoamento e de resistência do material processado, (BERNARDI, 2009; VALIEV; LANGDON, 2006).

Antes de serem submetidos à deformação, os componentes (canais da matriz e o lingote) devem passar por lubrificação, com o objetivo de reduzir o atrito entre as partes, o que facilita e promove maior trabalhabilidade no processo. Os lingotes obrigatoriamente devem ser produzidos na mesma geometria dos canais da matriz de deformação (cilíndrico ou quadrado), permitindo dessa forma uma deformação homogênea em todo o corpo do lingote. O processamento via ECAP consiste em inserir o lingote no primeiro canal e aplicar carga no punção para pressionar o lingote a escoar entre os canais de entrada e saída onde é produzida a deformação plástica. Na interseção entre os canais ocorre o cisalhamento do material. O processo é concluído com a retirada do punção, seguido pela retirada do lingote deformado do

segundo canal como pode ser visto na Figura 4, (ADEDOKUN, 2011; VALIEV et al., 2006).

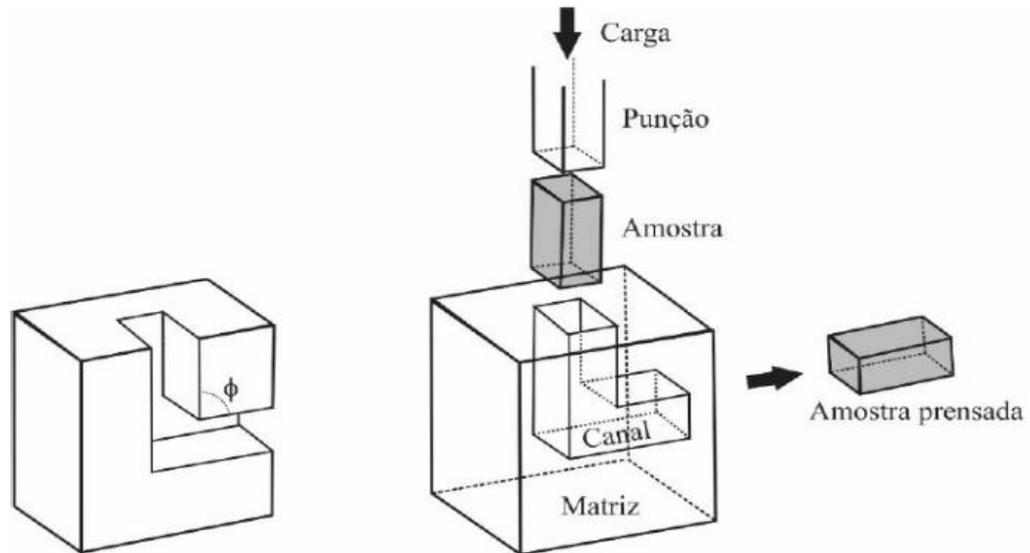


Figura 4. Processo de deformação por ECAP. Fonte: Valiev; Langdon (2006).

No processo ECAP foi adotada uma convenção para os planos de deformação observados na Figura 5. 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).

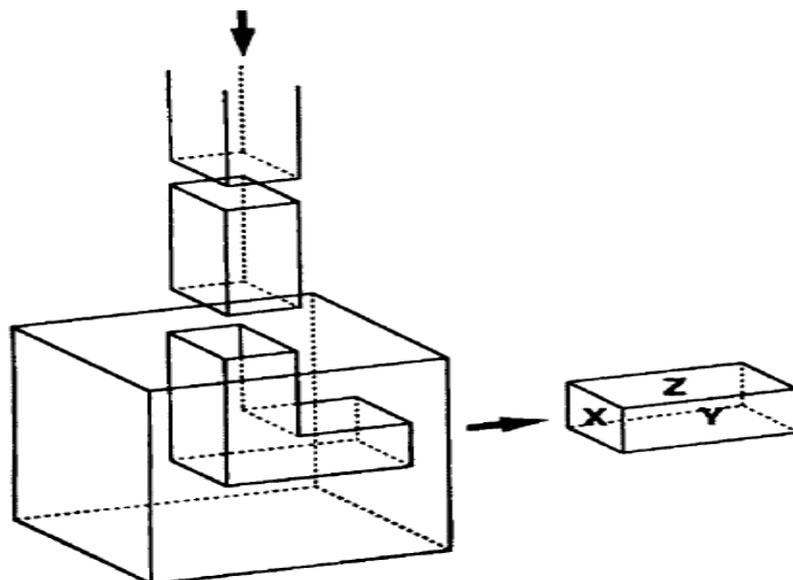


Figura 5. Planos de deformação. Fonte: Valiev; Langdon (2006).

3.3.3.1 Variáveis de processo que influenciam o ECAP

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: número de passes, rotas de processamento, ângulos de canal (Φ) e de curvatura (Ψ) e temperatura de prensagem, (VALIEV; LANGDON, 2006).

a) Quantidade de passes

A quantidade de passes é o número de vezes que a amostra foi processada, ou seja, indica quantas vezes o lingote ou corpo de prova passou pelo ciclo de extrusão nos canais da matriz. Essa variável de processo possibilita a elevação do nível de deformação total do material, promovendo maior homogeneidade de deformação e maior refino microestrutural, que determinam as propriedades mecânicas do material, (SORDI et al., 2012; VALIEV; LANGDON, 2006). A granulometria ultrafina obtida no processo ECAP, promove a elevação da resistência mecânica, ductilidade e tenacidade do material. Outra vantagem do processo é que as amostras processadas por ECAP não modificam sua geometria, tão pouco suas

dimensões iniciais através dos passes, podendo assim serem processadas várias vezes, melhorando o potencial de refino de grão a cada ciclo de passagem nos canais, (FERRASSE; SEGAL; ALFORD, 2004; VALIEV; LANGDON, 2006).

b) Rotas de processamento

De acordo com ADEDOKUN (2011) e NAKASHIMA et al. (2000), nos processos ECAP existem rotas de processamento que consistem na rotação do material a cada passe, ativando diferentes sistemas de escorregamento. As rotas de processamento são: A (não há rotação da amostra entre os passes), B_A (rotação em 90° em sentidos opostos entre os passes), B_C (rotação em 90° no mesmo sentido entre os passes), C (rotação de 180° entre os passes) detalhadas na Figura 6.

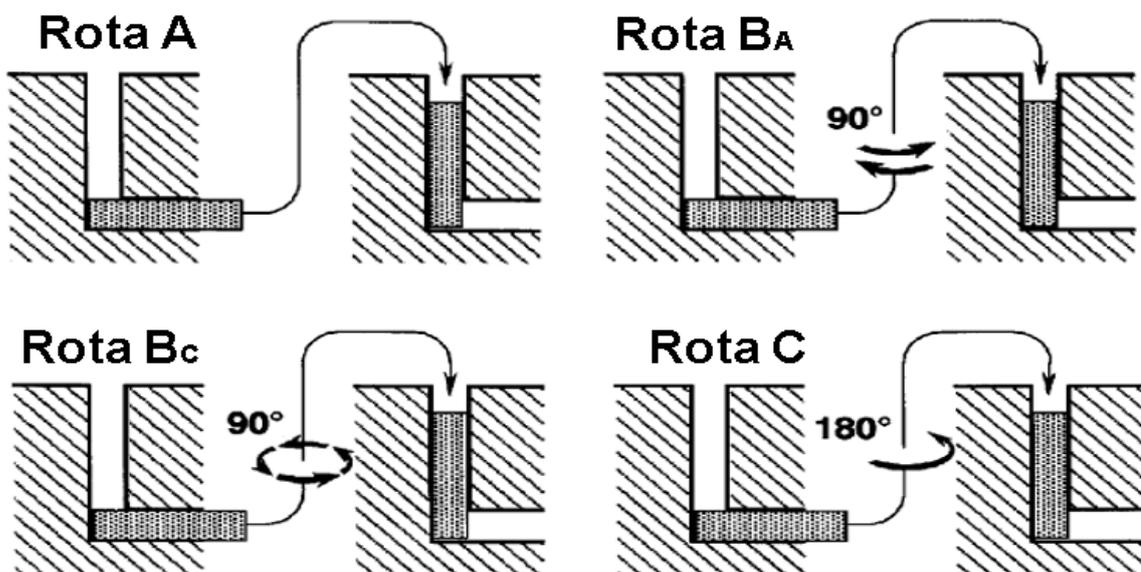


Figura 6. Rotas de processamento: Rota A, Rota B_A, Rota B_C e Rota C. Fonte: Valiev; Langdon (2006).

c) Ângulo de canal (Φ) e Ângulo de curvatura (Ψ)

No processo ECAP o material recebe a carga de compressão do punção e escoar no interior dos canais da matriz. Os canais da matriz se interceptam com os

ângulos de canal Φ e de curvatura ψ , que são variáveis importantes de processo, Figura 7(a). A natureza da deformação imposta é de cisalhamento simples que ocorre quando a amostra passa através da curvatura da matriz, observado na Figura 7(b), onde o plano de cisalhamento está entre dois elementos adjacentes numerados como 1 e 2, (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 às 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).

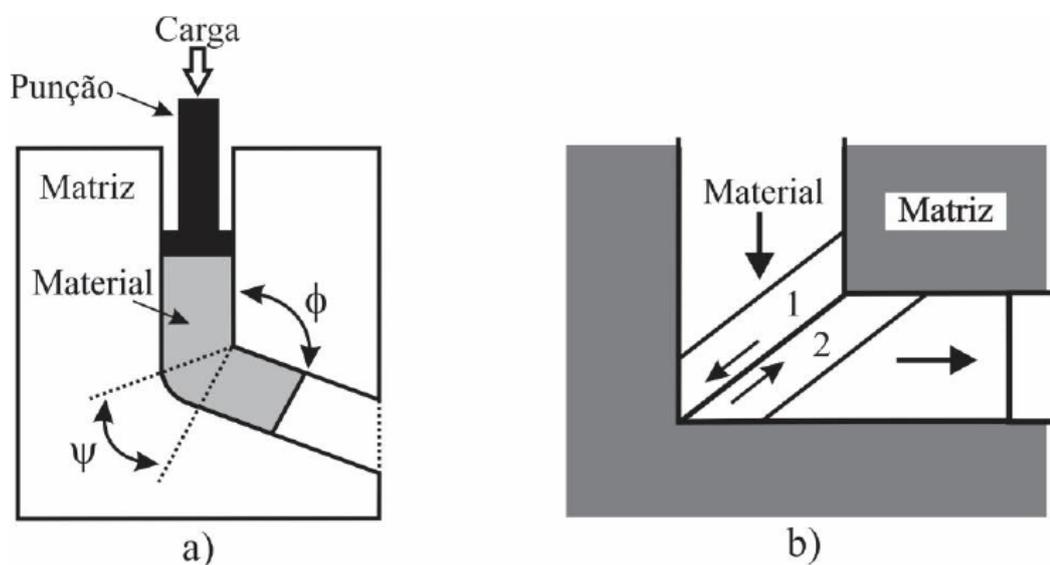


Figura 7. Processo de deformação por ECAP. (a) Ângulo de canal Φ e ângulo de curvatura ψ . (b) Plano de cisalhamento no processamento por ECAP. Fonte: Valiev; Langdon (2006).

d) Temperatura de prensagem

A variável temperatura depende do tipo de material a ser processado, pois existem materiais que não permitem a deformação a frio via ECAP. A resposta de um material deformado plasticamente a frio e a quente será diferente, portanto, a microestrutura apresentará características e propriedades distintas nas duas condições de processamento. Quanto maior for a temperatura de prensagem na deformação maior será o tamanho dos grãos, como também maior será a fração de contornos de baixo ângulo. Em contrapartida quanto menor for a temperatura associada ao processo ECAP melhor será o refino de grãos com as deformações impostas ao material processado, promovendo assim maior fragmentação de contornos de alto ângulo, acarretando na elevação da energia interna armazenada favorecendo a obtenção da granulometria UFG, (VALIEV; LANGDON, 2006 e 2011).

3.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

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 à integração de toda a geometria para a análise e 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 utilizada 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 denominadas de malhas, (VIEIRA; COELHO, 2020).

A importância da simulação por MEF em estudos para obtenção da qualidade nas respostas mais próximas possíveis da realidade, vem tomando grande espaço nos meios científicos e industriais, ganhando fundamental importância no planejamento e eficiência da aplicação de recursos financeiros, em melhorias pontuais na otimização dos produtos e processos já existentes, tornando possível por meio de estudos analíticos o desenvolvimento de outras tantas soluções seguindo caminhos mais objetivos em busca de uma conclusão prática mais assertiva, (AZEVEDO, 2003; BELUCO, 2011).

Modelos de elementos finitos que discutem a mecânica dos sólidos têm sido amplamente discutidos em estudos. Esses modelos trabalham com malhas adaptáveis à geometria da peça e deformação efetiva, necessitando de alto suporte computacional e precisão dos softwares de simulações, devido à enorme complexidade dos cálculos. A aplicação de softwares comerciais de modelamento capazes de expressarem as equações de equilíbrio de forças com base na mecânica do contínuo e das equações diferenciais parciais torna-se necessária no desenvolvimento desses trabalhos para que os mesmos sejam viáveis, (AZEVEDO, 2003; GIORJÃO, 2019; NASCIMENTO et al., 2016; SALLES, 2008; VAZ, 2011; VIEIRA; COELHO, 2020).

3.4.1 Critério das tensões de von Mises

O critério das tensões de Von Mises trata-se da combinação dos efeitos das tensões atuando em um estado vetorial triplo de forças, onde é possível afirmar que um material dúctil irá falhar caso a energia associada à mudança de forma dele seja submetida a um carregamento multiaxial, ultrapassando a energia de distorção de um corpo de prova produzido com o mesmo material e submetido a um ensaio uniaxial de tração, (AZEVEDO, 2003; PINHO, 2013).

Isso possibilita a comparação dos valores das tensões de von Mises com as propriedades do material estudado. Quando a tensão de Von Mises, atrelada às análises de elementos finitos de um determinado material dúctil, for maior que o limite de escoamento, o material será deformado plasticamente. Este é um critério amplamente utilizado na análise de trabalhos e estudos que envolvem a aplicação de metais, (AZEVEDO, 2003; NAKASONE; YOSHIMOTO; STOLARSKI, 2006; PINHO, 2013; SILVA, 2010).

3.5 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

3.5.1 Softwares que trabalham com o método de elementos finitos

É possível destacar a utilização de três softwares que trabalham com o Método dos Elementos Finitos com deslocamento vetorial por meio de conceitos de aproximação pelas equações na condição do equilíbrio Lagrangiano: Deform 3D™, Ansys Workbench e Abaqus (ALMEIDA et al., 2020; VIEIRA; COELHO, 2020; ZHANG et al., 2016).

O software Deform 3D™ vem sendo utilizado em um amplo campo de aplicações industriais e de pesquisa, provando ser altamente eficaz. As modelagens de processos que passem por tratamentos de deformação mecânica podem ser realizadas pelo Deform 3D™, pois o software mensura a dureza, tensão residual, deformação e outras características importantes dos materiais, (ALMEIDA et al., 2020; ZHANG et al., 2016).

O software Ansys Workbench trata-se de uma ferramenta muito poderosa, com uma grande biblioteca que utiliza o MEF para várias finalidades de resultados. Proporciona informações completas e capacidade de simulações muito próximas à

realidade, com interface gráfica simples, documentações e material de referência completo, (VIEIRA; COELHO, 2020).

O software Abaqus possui bastante versatilidade, possibilitando assim sua utilização em diversas áreas da engenharia, no setor automobilístico, aeroespacial e em diversas investigações acadêmicas, (PINHO, 2013; SILVA, 2010).

A capacidade do Abaqus inclui habilidades de resolução de problemas como análises estáticas e dinâmicas. O procedimento de análise do software se subdivide em três etapas. Na primeira etapa ocorre o pré-processamento, onde é feita a modelagem da estrutura, a definição do tipo de elemento, constantes características do elemento analisado e o material a ser estudado, assim como a inserção de suas propriedades, ainda nessa etapa são numerados os nós e as barras. A segunda etapa é de solução, onde é feita a definição dos tipos de forças atuantes, condições de apoio e os tipos de análises a serem escolhidas, sendo elas estáticas e/ou dinâmicas. A terceira etapa é a de pós-processamento, onde são apresentados os resultados da segunda etapa, sendo possível utilizar o módulo de análise para a retirada do maior número de dados do trabalho executado, (PINHO, 2013; SILVA, 2010; SIMULIA, 2020).

Após análises em torno das características e particularidades de cada um dos softwares citados acima, juntamente aos seus métodos de soluções associados ao desenvolvimento desse estudo, por meio das configurações das malhas e nós, interfaces gráficas, banco de dados, capacidade computacional disponível, integrações dos módulos, documentações e materiais de referências, e principalmente a disponibilidade de uma edição estudantil que atendesse o estudo, optou-se pela utilização do Abaqus para o presente trabalho.

A escolha do software Abaqus para o desenvolvimento dessa dissertação foi realizada somente após testes de simulação com os softwares Deform 3D™ e software Ansys. Portanto, a escolha foi fundamentada na leitura sobre os recursos e características dos softwares e consolidada com testes de simulação, que possibilitaram tomar a decisão de seleção do Abaqus com consciência.

3.5.2 Apresentação do software Abaqus

Em termos de significado, a palavra Abaqus é derivada do grego Aba-kalaculus, tendo como significado memória da solução. O Abaqus é um software de simulação numérica que utiliza o Método dos Elementos Finitos para resolver diversos problemas de engenharia, (PINHO, 2013; SILVA, 2010).

A SIMULIA uma marca da empresa Dassault Systemes SA é quem detém os direitos comerciais do software. Através do programa Abaqus é possível alcançar a resolução das equações no estado de equilíbrio por meio do princípio dos trabalhos virtuais, onde cada ponto material é função das suas próprias coordenadas e do tempo, (PINHO, 2013; SILVA, 2010).

Este programa usa o Método dos Elementos Finitos do deslocamento, tendo como base a aproximação das condições de equilíbrio de um determinado corpo através do ponto de vista lagrangiano. No momento do pré-processamento o usuário poderá inserir no módulo gráfico Abaqus os dados da geometria possibilitando compor as características da peça a ser analisada, (SILVA, 2010; SIMULIA, 2020).

O usuário poderá definir as características iniciais da geometria a ser analisada posteriormente por meio dos cálculos numéricos no Abaqus como, (SIMULIA, 2020):

- A geometria e a estrutura da peça;
- As propriedades do material;
- Os limites de carregamentos;
- Os vetores de deslocamento de força;
- As Amplitudes entre os eixos de movimento e velocidade da peça associadas ao tempo;
- As condições e estados de fronteira;
- As interações entre os componentes que sofrerão contato durante as movimentações;
- As etapas de toda a análise efetuada, bem como a natureza linear ou não linear;
- As discretizações da estrutura em elementos finitos com as malhas e nós da geometria.

As características acima ainda podem ser criadas ou manipuladas através do ficheiro de entrada ASCII, porém com um nível menor de interação entre usuário e software, exigindo ainda nesse caso um nível considerável de conhecimento em

linguagens de programação estruturada aplicada a softwares computacionais, (SILVA, 2010).

A realização da análise pode ser realizada de duas formas: a) utilizando o Abaqus/Standard, o qual consiste numa análise com integração implícita, ou b) utilizando o Abaqus/Explicit com a integração explícita para a resolução de problemas semi-estáticos lineares e não-lineares com dinâmica associada a movimentação contínua, (SIMULIA, 2020).

A resposta de pós-processamento, que é o objetivo principal do presente estudo, são as deformações pontuais ou os conjuntos de deformações pontuais no software, que são representadas por uma escala conhecida por PEEQ, sigla em inglês para *Equivalent Plastic Strain at Integration Points* (Deformação Plástica Equivalente nos Pontos de Integração). Essencialmente, é uma medida escalar de todos os componentes da deformação plástica equivalente em cada posição no modelo criado, (SIMULIA, 2020).

Através desse software é possível promover análises de problemas de alta complexidade de quase todos os tipos, como aqueles que envolvem grandes deformações, geometrias complexas, e interações entre materiais distintos, nas diversas áreas da engenharia, obtendo como consequência uma análise cuidadosa e muito próxima a situações reais.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ECAP

Alguns trabalhos recentes envolveram o estudo do ECAP, via simulação numérica 3D, para realizar a comparação com dados experimentais de medidas de dureza em regiões de um material deformado plasticamente. Os trabalhos envolvem a análise de corpos de prova processados via ECAP em um único passe, porém poucos estudos analisaram numericamente em 3D o processo através de múltiplos passes e efetuaram o comparativo com as medidas experimentais de dureza por região. A análise da dureza em diferentes regiões dos corpos de prova possibilita avaliar a homogeneidade na distribuição das deformações impostas pelo ECAP, haja vista a complexidade do acúmulo de deformações, às dificuldades de adequar a movimentação do tarugo entre os passes e a adaptação necessária da malha do modelo tridimensional, necessitando de um processamento computacional elevado para tal finalidade, (BASAVARAJ; CHAKKINGAL; KUMAR, 2009; LEO et al., 2007; MAHALLAWY et al., 2010; SUO et al., 2006).

Dessa forma, foi realizada uma revisão da literatura, buscando-se trabalhos consolidados sobre a temática, no intuito de alcançar o estado da arte a respeito da aplicação da simulação numérica associada com dados experimentais em torno da homogeneidade de deformação no ECAP.

Su; Lu; Lai (2007) concluíram que são necessários múltiplos passes para a efetividade do ECAP, onde analisaram a uniformidade da distribuição de deformação plástica em um material processado via ECAP usando o software de elementos finitos Abaqus 3D. Levaram em consideração os parâmetros: ângulo de canal Φ , ângulo de curvatura Ψ , velocidade de prensagem, atrito e rota de processamento, e efetuaram a variação dos mesmos para avaliar os efeitos na homogeneidade de deformação. Concluíram que um único passe de ECAP foi incapaz de produzir deformações homogêneas no corpo de prova e que a distribuição de deformações pode ser melhorada selecionando os parâmetros de processamento apropriados, onde múltiplos passes de ECAP melhoraram significativamente a homogeneidade da deformação.

Basavaraj; Chakkingal; Kumar (2009), avaliaram a influência do ângulo do canal no endurecimento de uma liga de alumínio, onde desenvolveram um trabalho

realizando a simulação 3D do processo ECAP, utilizando o software Abaqus 3D, para diferentes ângulos de canal em uma liga de alumínio endurecida por deformação (AA6101). Concluíram que modelos 2D não são adequados para as análises do ECAP devido à alta complexidade da geometria sob o efeito de elevadas deformações. O estudo comprovou que a homogeneidade de deformação é beneficiada por ângulos de canais maiores.

Ren; Zhao; Xu (2010) investigaram o comportamento de deformação e a microestrutura da liga de magnésio AZ31 sujeito a um passe por ECAP a 250 °C através de simulação numérica utilizando o software comercial Deform 3D, e compararam a um estudo experimental. Concluíram que o ângulo de canal está diretamente ligado a distribuição das deformações efetivas por toda a peça de trabalho, identificaram que mesmo com um passe foi possível produzir um potencial de refino na microestrutura do material. Para obter um alto nível de distribuição uniforme de deformação e um material com granulometria ultrafina (UFG) com contornos de grão de alto ângulo, seria necessário adotar o processo de deformação por múltiplos passes, estudar a rota de processamento mais efetiva e as variáveis de processamento de maneira mais detalhada.

Abd El Aal (2017, 2021), realizou uma série de Simulações elementos finitos (FEM) 3D utilizando o software de simulação numérica Deform 3D™, com validação experimental por meio do processo de deformação plástica de alumínio por ECAP, e processos derivados do ECAP que utilizam a extrusão direta em apenas um passe. Ao investigar o comportamento carga-deslocamento, as características de deformação plástica e a homogeneidade de deformação plástica efetiva do Al-1080 deformado por diferentes processos de conformação o estudo foi capaz de concluir que os resultados obtidos através da simulação numérica são condizentes e se encaixam ao comparativo com as medidas de microdureza obtidas de forma experimental, porém não foi capaz de avaliar os processos de extrusão de forma mais detalhada em função da limitação no aprofundamento das análises.

Zhang et al. (2016), avaliaram o grau de homogeneidade da liga Ti-50,8%Ni via simulação numérica com o software Deform 3D™ comparando com os dados experimentais do processo ECAP. Os resultados mostraram que houve relação entre os resultados experimentais e a simulação numérica, que apontaram a evolução gradual de deformações com o aumento do número de passes através das aferições

de microdureza, juntamente com o alcance de homogeneidade microestrutural do material em consonância com o modelo de tensões atrelado ao método de elementos finitos executado no estudo.

A Figura 8(a) mostra o modelo do MEF criado para simulação numérica no estudo de Zhang et al. (2016), incluindo o punção de prensagem, o tarugo e a matriz ECAP com $\phi = 120^\circ$ e $\psi = 60^\circ$. O tarugo utilizado para análise foi de secção cilíndrica com diâmetro de 10 mm e comprimento de 60 mm. A Figura 8(b) mostra as seções planas do tarugo analisadas através do ECAP processado experimentalmente e na simulação.

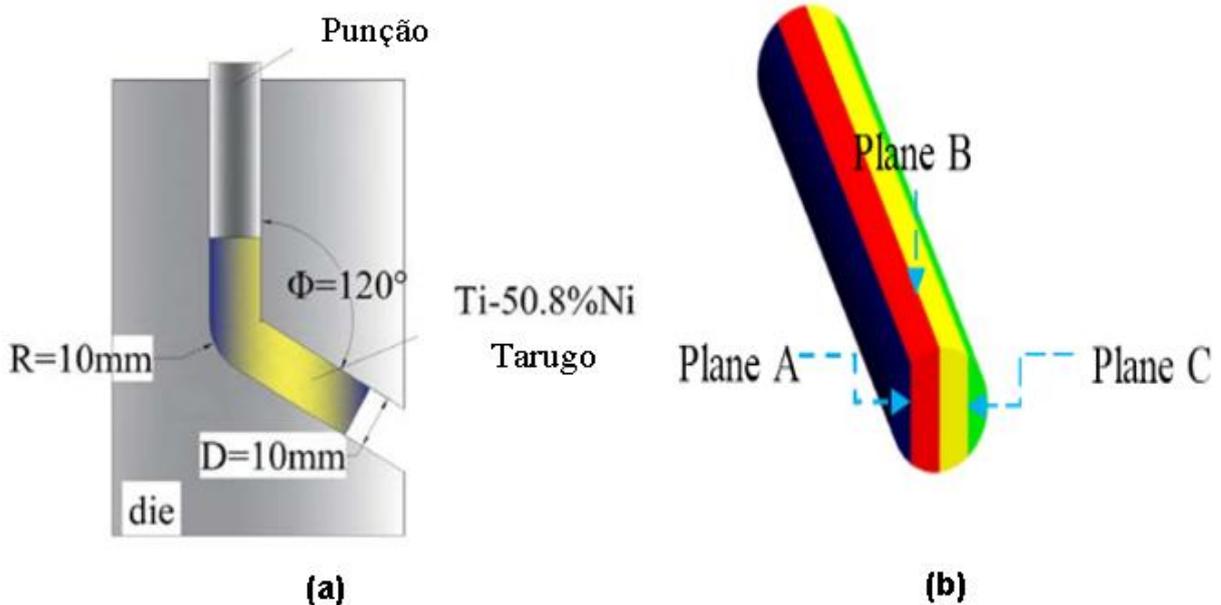


Figura 8: (a) Modelo para simulação numérica do ECAP. (b) Seções do plano obtidas através do tarugo ECAP processado na simulação e no trabalho experimental. Fonte: Zhang et al. (2016).

Os resultados apresentados no estudo de Zhang et al. (2016) relacionaram pontos tomados no software Deform 3D™, onde o grau de homogeneidade na distribuição de deformação foi calculado a partir dos pontos médios de deformação do modelo de simulação por um coeficiente matemático chamado desvio padrão de deformação ou *strain standard deviation* - SSD, com sua relação representada por meio da Equação 1:

$$SSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{avg})^2}{n}} \quad (1)$$

Onde: ε_i é a magnitude da deformação plástica no ponto i e ε_{avg} é a deformação plástica média dos pontos em cada plano no tarugo simulado.

Quanto menor o valor de SSD, melhor a homogeneidade da distribuição de deformação.

Para investigar a homogeneidade da deformação em cada plano do tarugo processado, foi necessário medir a deformação média em cada plano. Foram tomados 100 pontos para medir a variação de deformação em cada plano. O comprimento da zona examinada foi de 20 mm ao longo da amostra deformada. A zona do meio representa o centro do plano B, a zona superior e a zona inferior são simétricas e a distância é de 0,6 mm entre os pontos aferidos.

As distribuições das deformações nos planos A, B e C para 1, 3, 4 e 8 passes foram apresentados como resultados do trabalho de Zhang et al. (2016), visto na Figura 9. Os resultados mostraram que de maneira geral a deformação média aumentou à medida que o número de passes aumentou, cada plano mostrou o seu comportamento individual de deformação em cada passe e a homogeneidade de deformação com a aumento do número de passes. O cálculo do SSD mostrou associação entre a homogeneidade de deformação numérica e a experimental.

O software Deform 3D™ no estudo de Zhang et al. (2016) se mostrou fator limitante no mapeamento das deformações e utilização da ferramenta computacional, necessitando de técnicas matemáticas externas aplicadas ao estudo. O software deveria ser capaz de efetuar os cálculos de forma mais rápida, com maior precisão, com um pós-processamento mais efetivo, com resultados mais pontuais a nível das regiões deformadas nos planos analisados, característica essa necessária em estudos que envolvam homogeneidade de deformação no ECAP através das análises por elementos finitos. Não foram apresentados resultados plotados no pós-processamento do software limitando assim o estudo a descrição subjetiva dos dados obtidos numericamente.

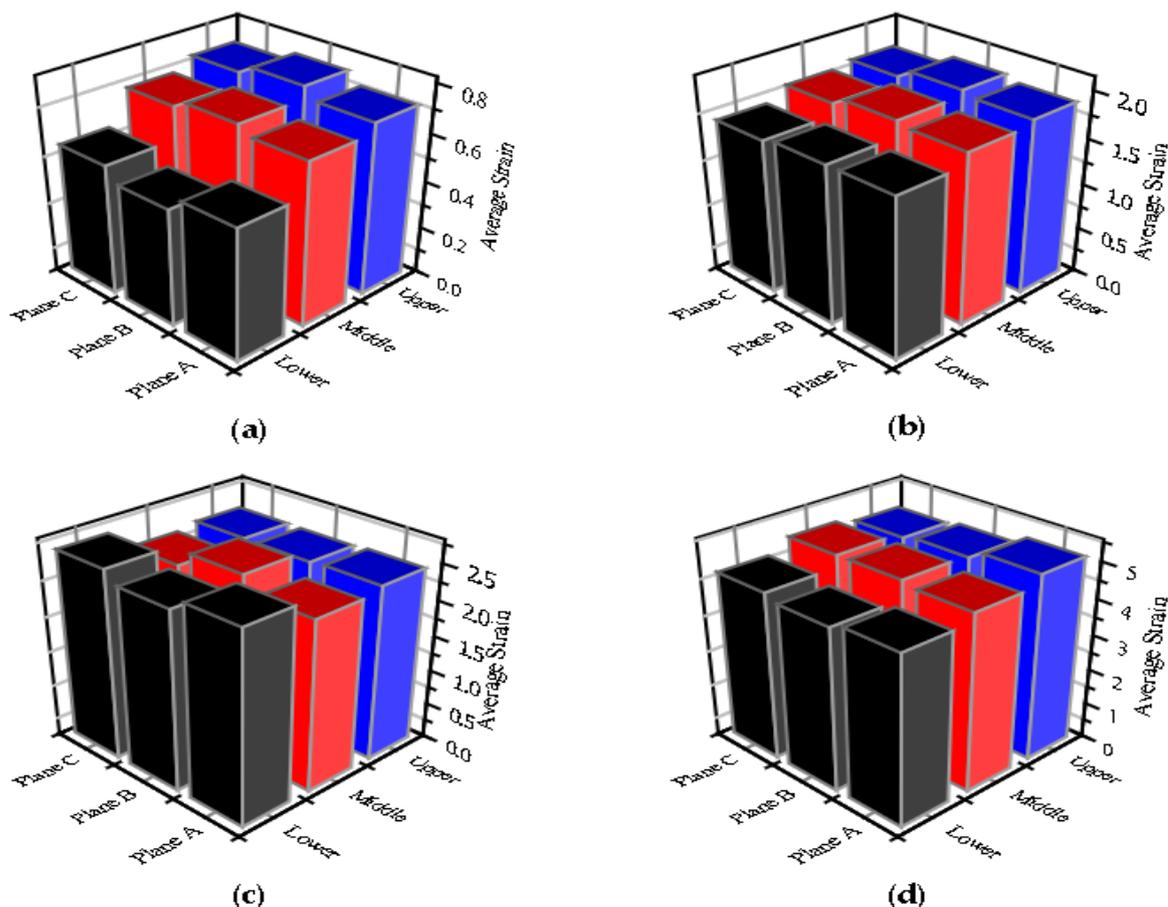


Figura 9: Distribuição média das deformações em três planos da liga Ti-50,8%Ni processada via ECAP em múltiplos passes: (a) 1 passe, (b) 3 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Zhang et al. (2016).

Awang Sh'ri et al. (2019) efetuaram uma comparação entre a análise experimental e a simulação numérica utilizando o software Abaqus 3D com o objetivo de avaliar os níveis de deformação de uma liga de alumínio aeronáutica, processada em duas matrizes, com ângulos de canal $\Phi = 120^\circ$ e $\Phi = 126$, em até oito passes. Os resultados foram promissores e mostraram relação entre as análises experimental e por simulação numérica, indicando que quanto menor o ângulo de canal maior a deformação da peça, quanto maior o número de passes maiores foram o acúmulo de deformação e a homogeneidade de deformação.

A Figura 10 mostra o perfil do modelo da matriz com $\varphi = 120^\circ$ modelada no software Abaqus para o estudo desenvolvido por Awang Sh'ri et al. (2019). Foram utilizados dois conjuntos de matrizes rígidas nas análises. As matrizes foram cadastradas como corpo rígido para evitar qualquer deformação e foram fixadas por

ponto referencial no plano para evitar possíveis deslocamentos delas. Uma das matrizes foi modelada com o ângulo de canal de $\varphi = 120^\circ$, como apresentado no modelo, e a outra com o ângulo de canal de $\varphi = 126^\circ$, e ambas as matrizes empregaram o ângulo de curvatura de $\psi = 20^\circ$. O estudo foi realizado com 1, 2, 4 e 8 passes de deformação.

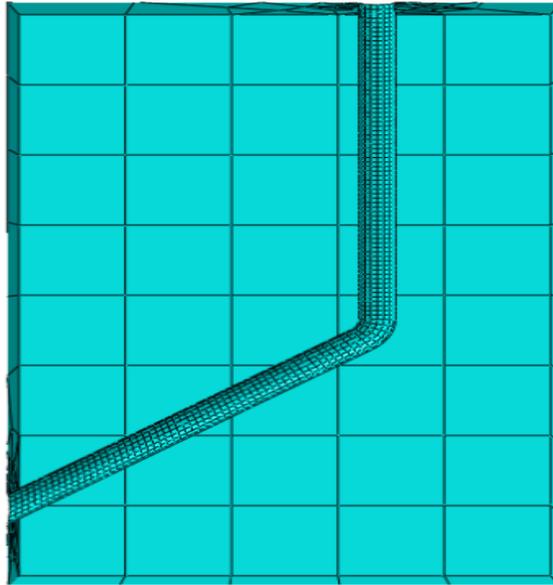


Figura 10: Corte em vista da matriz ECAP com ângulo de canal de $\Phi = 120^\circ$ e a divisão em malha. Fonte: Awang Sh'ri et al. (2019).

Os resultados do estudo de Awang Sh'ri et al. (2019) sobre a influência do ângulo de canal e do número de passes na distribuição de deformação plástica equivalente da escala PEEQ são mostrados na Figura 11, para $\varphi = 120^\circ$, e na Figura 12, para $\varphi = 126^\circ$. As duas matrizes produziram o endurecimento por deformação das amostras em analogia aos dados obtidos experimentalmente por meio do comparativo entre as medidas de dureza e a análise numérica.

No primeiro passe, como mostra a Figura 11(a), é possível observar uma distribuição de deformações não uniformes com maiores níveis de acumulação no topo das amostras após o passe. À medida que o número de passes aumenta, conforme observado nas Figuras 11(b) a 11(d), é possível observar que distribuição dos níveis acumulados de deformação ficam mais homogêneos em todo o tarugo, com níveis mais elevados na região superior do corpo de prova.

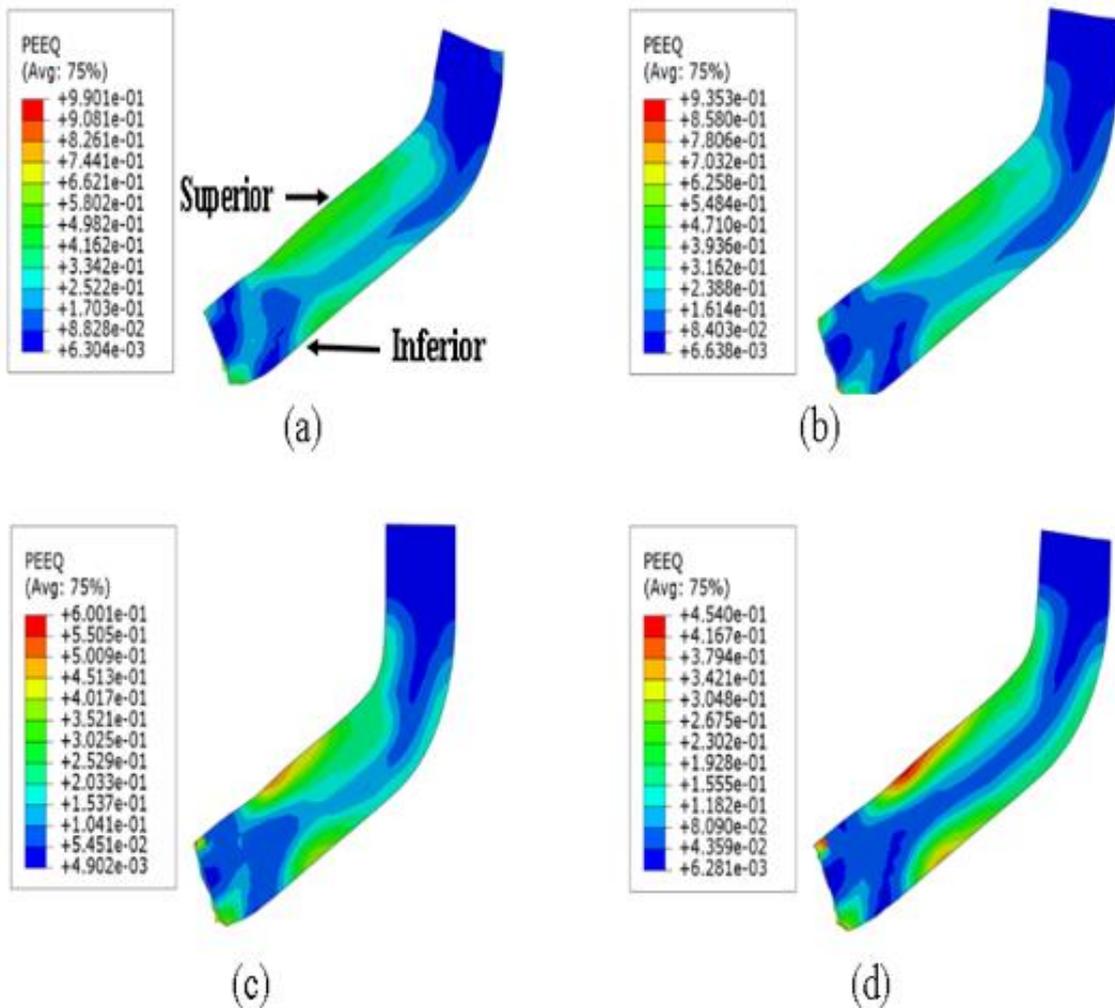


Figura 11: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano Y com $\varphi = 120^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Awang Sh'ri et al. (2019).

Foi observada uma tendência semelhante no tarugo processado na matriz de $\varphi=126^\circ$ mostrada na Figura 12. Porém os valores da deformação na matriz de $\varphi = 126^\circ$ é menor do que na matriz de $\varphi = 120^\circ$. A distribuição de deformação é mais homogênea em toda a amostra processada com $\varphi = 126^\circ$ no decorrer de todos os passes em comparação com $\varphi = 120^\circ$, (AWANG SH'RI et al., 2019).

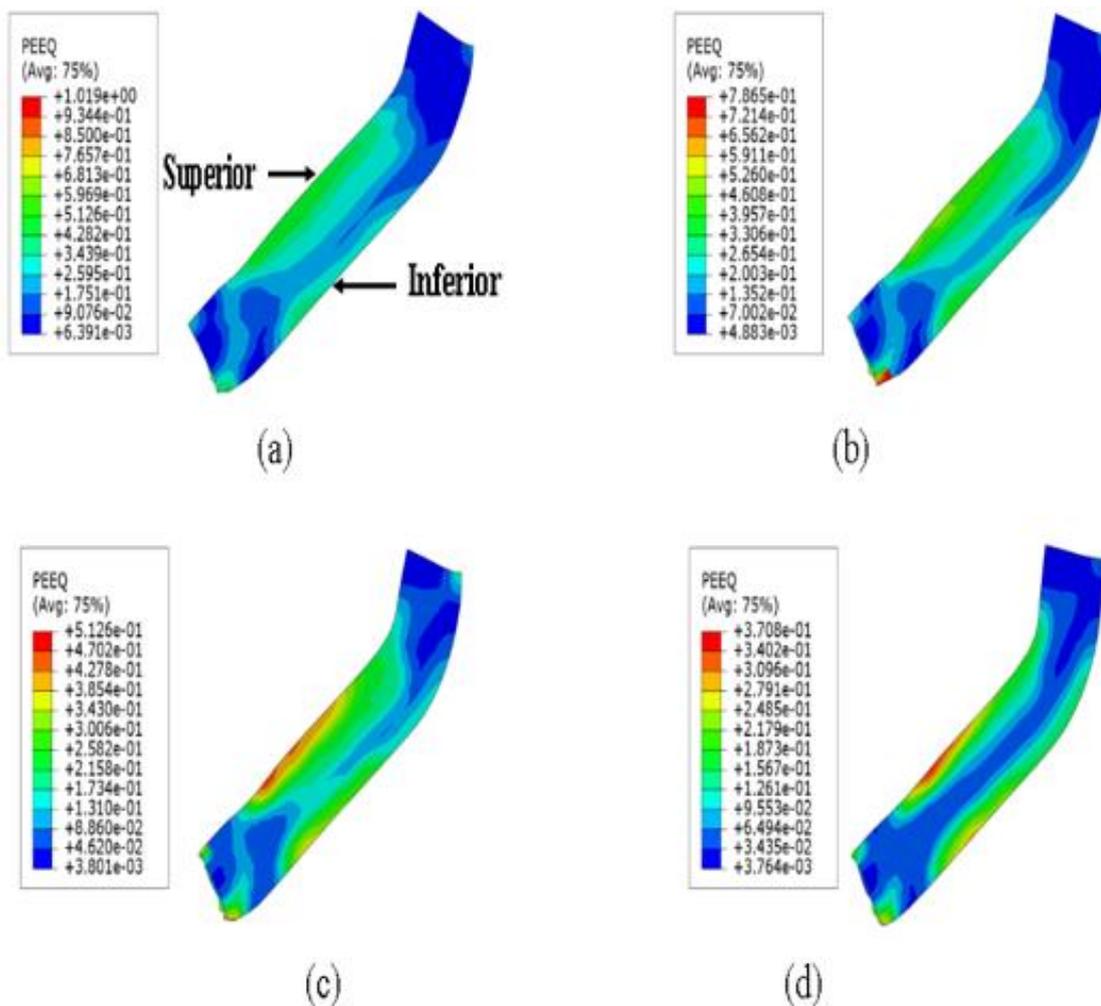


Figura 12: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano Y com $\varphi = 126^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Awang Sh'ri et al. (2019).

As Figuras 13 e 14 do estudo de Awang Sh'ri et al. (2019) mostram a deformação no plano X para matrizes de 120° e 126° , respectivamente. No plano X do tarugo é possível observar a variação na distribuição dos níveis de deformações a partir da seção superior para a inferior do corte do tarugo, indicando que ocorreu o mecanismo de encruamento no processo.

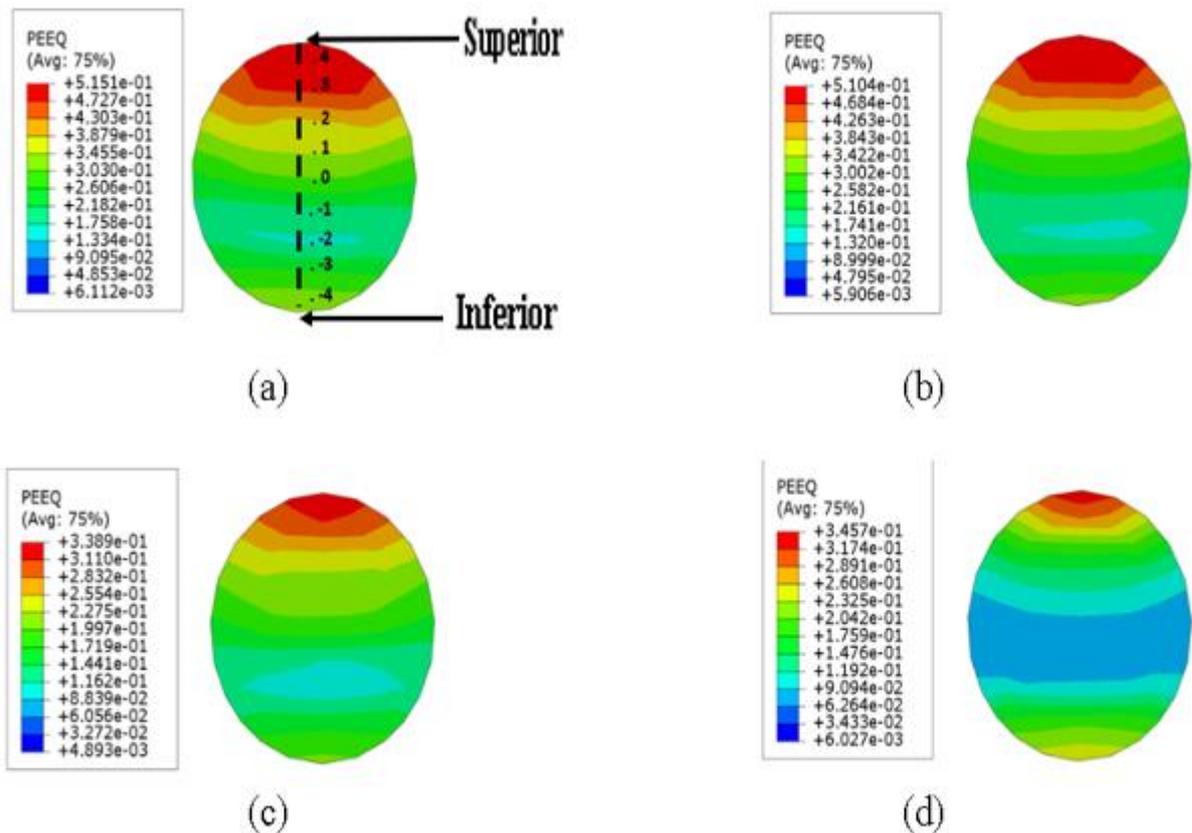


Figura 13: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano X com $\varphi = 120^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Awang Sh'ri et al. (2019).

A variação nos níveis em escala PEEQ no tarugo em vista mostra que os maiores valores de deformação estão localizados na parte superior do plano. Observa-se que os níveis de deformação diminuem à medida que se desloca para o centro do plano, porém volta a se elevar à medida que se move para a parte inferior. Como pode ser visto por meio das Figuras 13 e 14, a região vermelha escura que indica os maiores níveis de deformação está reduzindo à medida que o número de passes aumenta. Isso é um forte indício de que a microestrutura parou de se recrystalizar, onde a deformação das passagens anteriores fragmentou os grãos em um tamanho menor. No entanto, na passagem final, a microestrutura fragmentada é mais homogênea em toda a amostra de acordo com a aproximação dos níveis de deformação. Assim, o valor de deformação se tornou menor do que no passe anterior e o efeito do refinamento de grão pôde ser observado. A tendência para $\varphi = 126^\circ$ se

mostrou a mesma para $\varphi = 120^\circ$, porém apresentando níveis de deformação menores no comparativo, (AWANG SH'RI et al., 2019).

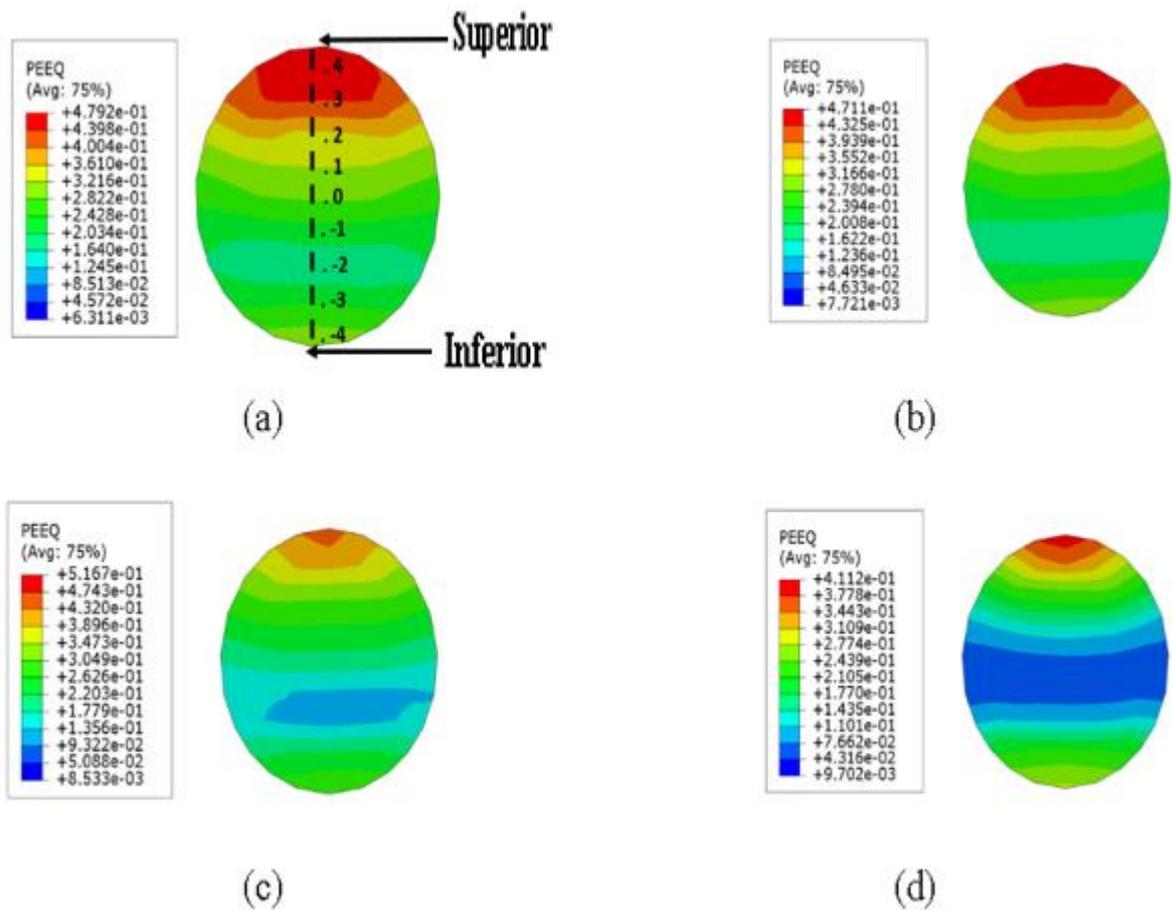


Figura 14: Vistas com apresentação da escala PEEQ no plano X com $\varphi = 126^\circ$ para: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Awang Sh'ri et al. (2019).

Wongsa-Ngam et al. (2021) desenvolveram um estudo que envolveu a simulação numérica do ECAP, utilizando o software Abaqus 3D analisando as deformações totais de uma liga Cu-Zr, empregando matriz de deformação com secção circular, ângulo de canal $\Phi = 110^\circ$, ângulo de curvatura $\Psi = 20^\circ$, rota de processamento Bc e deformados até 8 passes. Os dados da simulação numérica foram comparados aos valores de dureza obtidos no estudo de Wongsa-Ngam; Kawasaki; Langdon (2012), que foi bem sucedido no intuito de mapear a homogeneidade de deformação em até oito passes pelos canais por meio do software Abaqus com comparação experimental.

A Figura 15 mostra a modelagem desenvolvida no estudo de Wongsangam et al. (2021), onde foi utilizado um corpo de prova na forma cilíndrica com diâmetro de 10 mm e comprimento de 70 mm. Uma matriz contínua cadastrada como corpo rígido e fixada no plano foi utilizada com um ângulo de canal $\Phi = 110^\circ$ e um ângulo de curvatura de $\Psi = 20^\circ$ na rota de processamento Bc até um total de 8 passes.

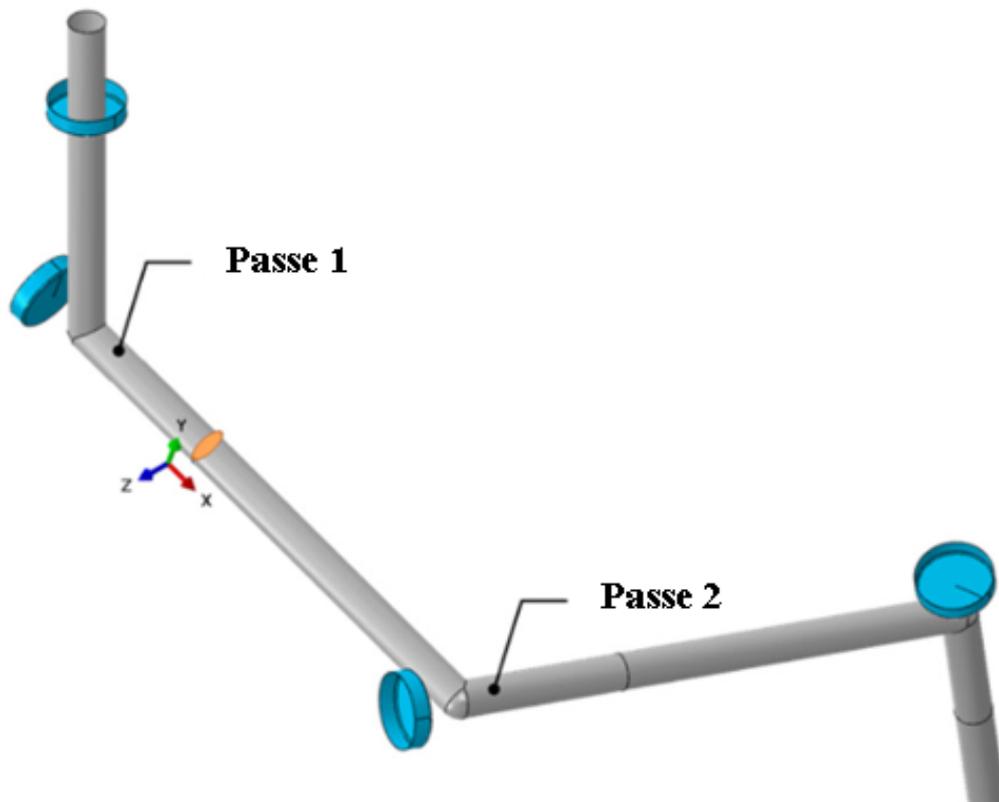


Figura 15: Esquema da modelagem via simulação numérica para o ECAP em matriz contínua para deformação. Fonte: Wongsangam et al. (2021).

Níveis intensos de plasticidade encontrados no tarugo processado por ECAP quando ele é pressionado através da região de interseção das duas partes do canal da matriz é uma característica fundamental do processo. Essa característica pode ser comumente denotada como zona de deformação plástica (ZDP), (WONGSANGAM et al., 2021).

Os resultados do estudo de Wongsangam et al. (2021), mostraram que a variação na distribuição das deformações plásticas equivalentes na ZDP diminuiu à medida que o número de passes aumentou: de 0,13 a 0,88 para um passe e de 5,10

a 5,70 para oito passes, resultando no desenvolvimento de um grau razoável de homogeneidade de deformação em passes consecutivos. A Figura 16 mostra essa evolução.

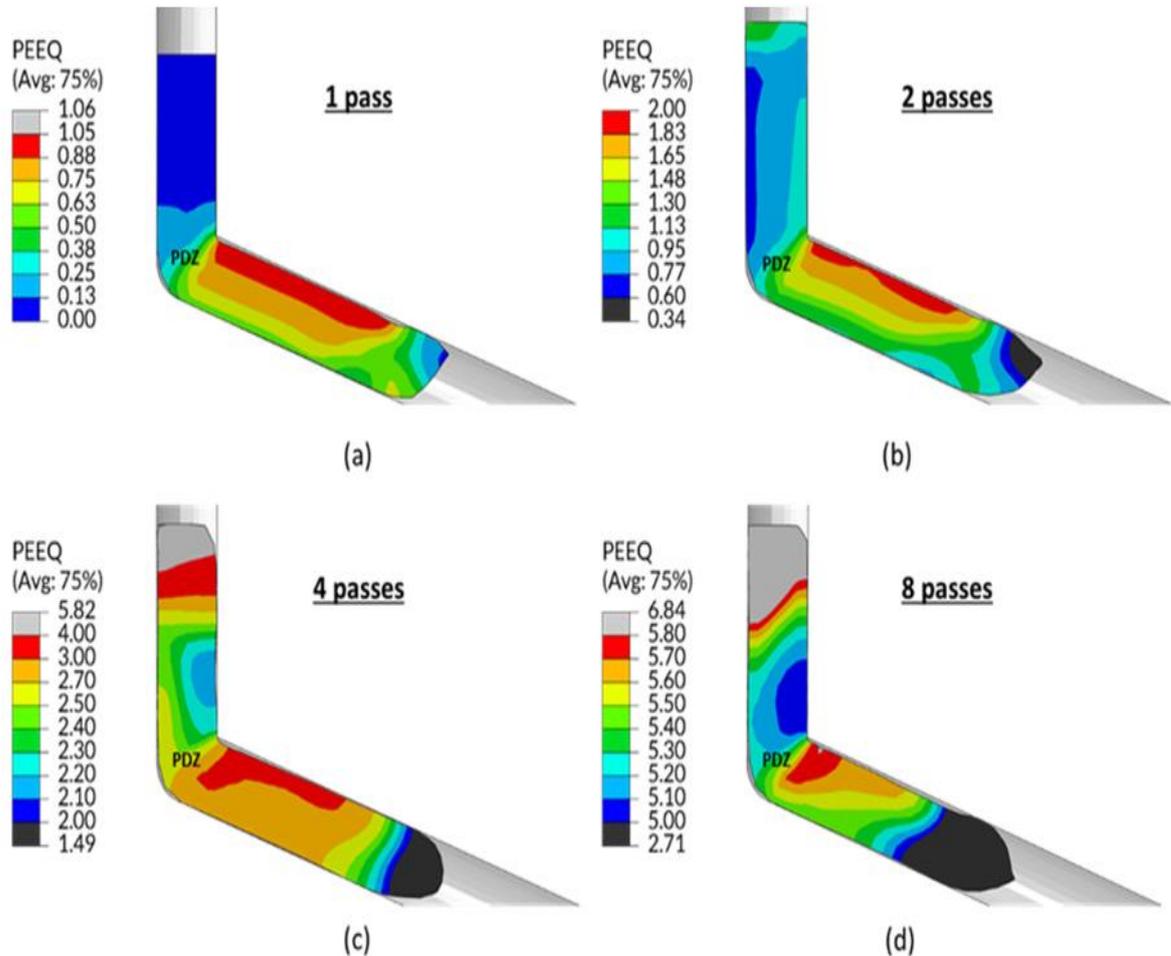


Figura 16: Contornos de distribuição de deformação plástica equivalentes do tarugo durante o processamento via ECAP: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Wongsan-Ngam et al. (2021).

A Figura 17 mostra os resultados do estudo de Wongsan-Ngam et al. (2021) que destacam os contornos de distribuição de deformação plástica equivalentes ao longo do tarugo deformado via ECAP após diferentes números de passes. Observa-se que há uma variação significativa na deformação plástica equivalente da parte inferior seguindo para a parte superior do tarugo no primeiro e no segundo passes, como mostrado nas Figuras 17(a) e (b), porém com a evolução do processo ECAP e o

aumento do número de passes é possível perceber que essa variação é gradualmente eliminada.

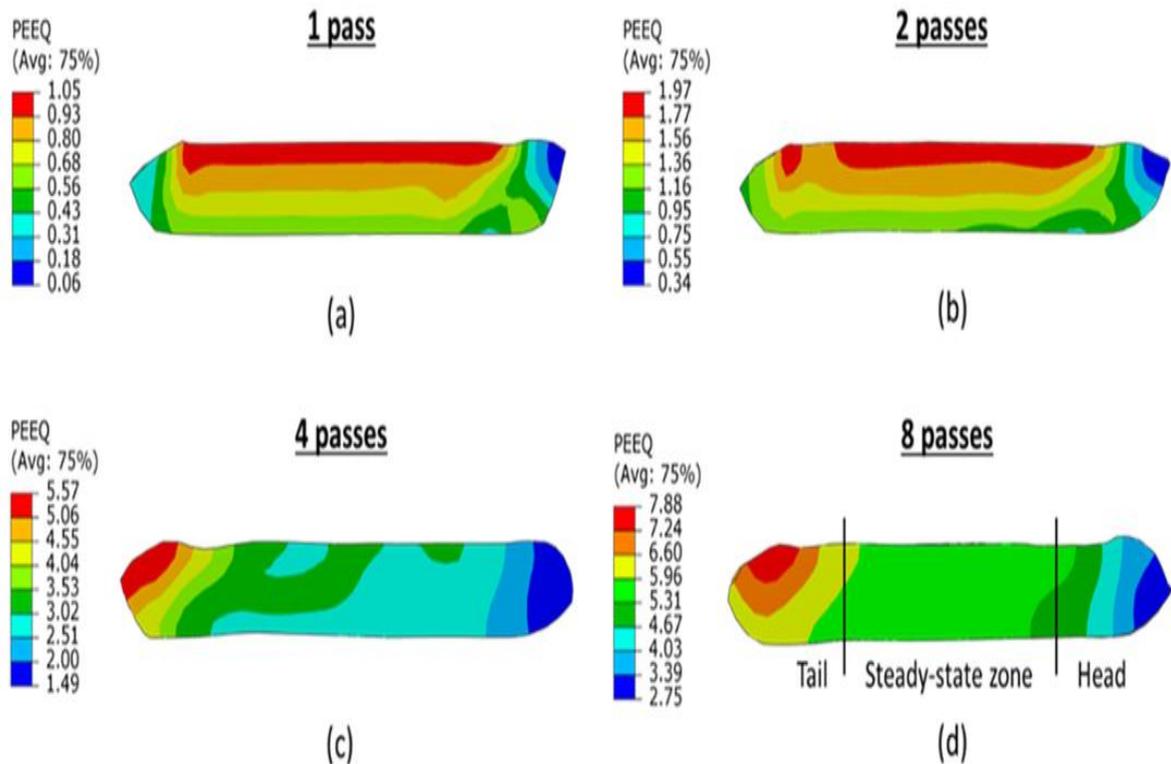


Figura 17: Distribuição dos níveis de deformação plástica equivalentes ao longo do comprimento do tarugo processado via ECAP: (a) 1 passe, (b) 2 passes, (c) 4 passes e (d) 8 passes. Fonte: Wongsan-Ngam et al. (2021).

O estudo de Wongsan-Ngam et al. (2021) concluiu que a peça de trabalho pode ser convenientemente dividida em três regiões correspondentes: a cabeça, a zona central intermediária de estado estacionário e a cauda. A zona de estado estacionário é a região de maiores níveis de homogeneidade localizada entre a cabeça não uniformemente deformada a esquerda do tarugo e a cauda com os níveis mais baixos de deformação na parte direita como mostra a Figura 18. Os resultados do trabalho foram correlacionados ao estudo experimental e apresentaram correlações diretas com as medidas de dureza, comprovando e corroborando com a análise via simulação numérica.



Figura 18: Ilustração esquemática mostrando as regiões da análise. Fonte: Wongsan-
Ngam et al. (2021).

Tanto para o estudo de Awang Sh'ri et al. (2019) quanto para o de Wongsan-
Ngam et al. (2021) o software Abaqus se mostrou a ferramenta mais adequada para
o desenvolvimento de análises pelo método numérico via elementos finitos, por
fornecer uma metodologia clara para obtenção dos resultados, por adequar a análise
ao processamento ECAP de forma efetiva e por oferecer os resultados no pós-
processamento de maneira mais objetiva e de interpretação direta com ganho de
tempo, e integração dos cálculos aos dados obtidos no estudo.

Como visto, a análise por elementos finitos do processamento de um
determinado material via ECAP torna-se um estudo de alta complexidade, por
envolver uma série de circunstâncias de grande dificuldade para o desenvolvimento
do mesmo, porém os poucos trabalhos consolidados cientificamente mostram que há
grande efetividade da modelagem numérica quando se é elaborada de maneira
correta, seguindo-se do uso correto dos softwares disponíveis, efetuando-se uma
análise preferencialmente associada a experimentos realizados e que seja possível a
comparação, possibilitando assim identificar a validade da simulação.

A abordagem da análise numérica por apenas um passe de ECAP é sem
dúvidas o modelo mais difundido, por se tratar de um estudo de baixa complexidade
e que não envolve grande solicitação computacional, tão pouco grande capacidade
do operador solucionar situações de programação das amplitudes de movimento,
análises de carga e análise dos vetores de deslocamento, pois são reduzidos os
movimentos e percursos nesse tipo de estudo.

A aplicação da modelagem por elementos finitos por apenas um passe de ECAP como visto nos estudos acima citados acaba se tornando de baixo potencial para a análise do processamento como um todo, impossibilitando: o mapeamento dos níveis de deformação a cada passe, a análise da homogeneidade na evolução do processo, estudos de deformações envolvendo os ângulos Φ e Ψ de forma mais ampla e outras análises mais complexas que envolvam um maior detalhamento e progressão do ECAP com a elevação do número de passes.

A simulação numérica por múltiplos passes é a forma mais precisa para se analisar o ECAP, por mapear de maneira detalhada os níveis de deformação do processamento, possibilitando assim uma análise completa e de alto potencial de respostas para a obtenção de resultados que envolvam um determinado material, em contrapartida como foi visto nos estudos citados acima esse modelo de análise numérica é de alta complexidade e poucos estudos foram desenvolvidos neste âmbito. Muito se justifica essa escassez, por esse tipo de estudo com elementos finitos necessitar de alto poder computacional e alto domínio do software utilizado por parte do operador para desenvolver as soluções virtuais necessárias na programação do processamento, de maneira a ofertar ampla segurança e respostas mais próximas aos retornos obtidos na forma prática ou experimental.

5 METODOLOGIA

5.1 ESTUDO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA COMPARAÇÃO COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A metodologia do trabalho consistiu em empregar os dados experimentais da dissertação de SILVA (2017), realizada no P²CEM da Universidade Federal de Sergipe (UFS), e compará-los com os resultados obtidos na simulação numérica do presente estudo. Foram comparados os resultados das medidas de dureza, obtidos experimentalmente com a deformação via ECAP, aos obtidos no presente trabalho por meio da escala PEEQ na simulação por elementos finitos.

O estudo de Silva (2017) analisou o comportamento mecânico do Ti CP deformado via ECAP, empregando os seguintes parâmetros de processamento: matriz com ângulo de canal de 120°, ângulo de curvatura de 0°, rota de processamento A, com 1, 2, 4, 6 e 8 passes e deformação a frio. Silva (2017) utilizou corpos de prova na forma de blocos prismáticos de base quadrada (6 mm x 6 mm) e altura de 10 mm, formados pelo empilhamento de lâminas de Ti CP com o objetivo de analisar o comportamento das deformações nas regiões externas do corpo de prova, lâminas em contato com as paredes da matriz, e nas regiões internas dos corpos de prova, lâminas com contato interno, visto na Figura 19.

O trabalho experimental Silva (2017) foi desenvolvido adotando a posição dos corpos de prova de modo que as lâminas ficassem na posição paralela à face 1 da matriz de deformação, como observado na Figura 19. Foram realizadas análises no plano Y.

Os dados do trabalho de Silva (2017) foram empregados como informações para a simulação no software Abaqus: a) corpo de prova, b) rota de processamento, c) número de passes, d) velocidade de deformação, e) tipo de matriz de deformação ECAP, f) plano de análise e g) durezas das amostras processadas no ECAP.

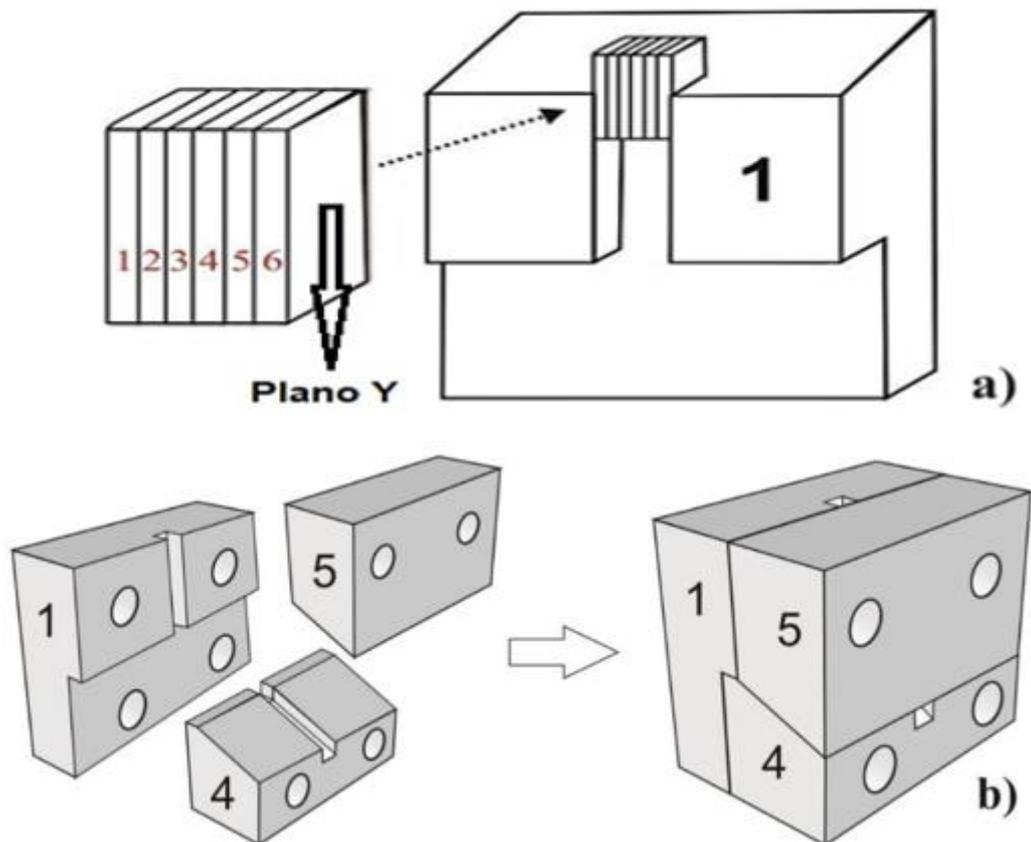


Figura 19. a) Corpo de prova composto por lâminas de Ti CP, sentido da deformação na matriz ECAP e plano de análise b) Desenho esquemático da matriz utilizada para a formação do canal de $\Phi=120^\circ$. Fonte: Silva (2017).

5.2 PROCEDIMENTOS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO ECAP

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

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;
- Tratamento dos resultados para análise final.

a) Pré-processamento

O software comercial Abaqus edição estudantil 2020 foi usado para simular o processamento ECAP do Ti CP com 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 passes. A peça de trabalho e a geometria utilizada foram modeladas de acordo com descrições em experimentos anteriores realizados no estudo de Silva (2017).

A etapa de pré-processamento Foi iniciada no software Abaqus, onde foi dado início para implementação dos dados, foi inserido o tipo de modelagem, 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 corpo de prova foi modelado na forma de bloco maciço com base quadrada de 6 x 6 mm e comprimento de 10 mm. O processamento virtual empregou uma matriz

de canal interno com as mesmas dimensões de base quadrada de 6 mm², configurado como sólido de corpo rígido, com ângulo de canal $\Phi = 120^\circ$ e ângulo de curvatura de $\Psi = 0^\circ$. A modelagem prosseguiu com a criação do punção como elemento de geometria planar e mesma secção dimensional do tarugo de 6 mm², também configurado como sólido de corpo rígido, cuja função é pressionar e produzir o escoamento do corpo de prova nos canais da matriz ECAP. 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 modulo de pré-processamento do Abaqus.

Foi possível determinar as condições das deformações plásticas do material por meio dos dados obtidos na curva tensão x deformação do titânio comercialmente puro retirados do estudo de Zhang et al. (2020), visto na Figura 20.

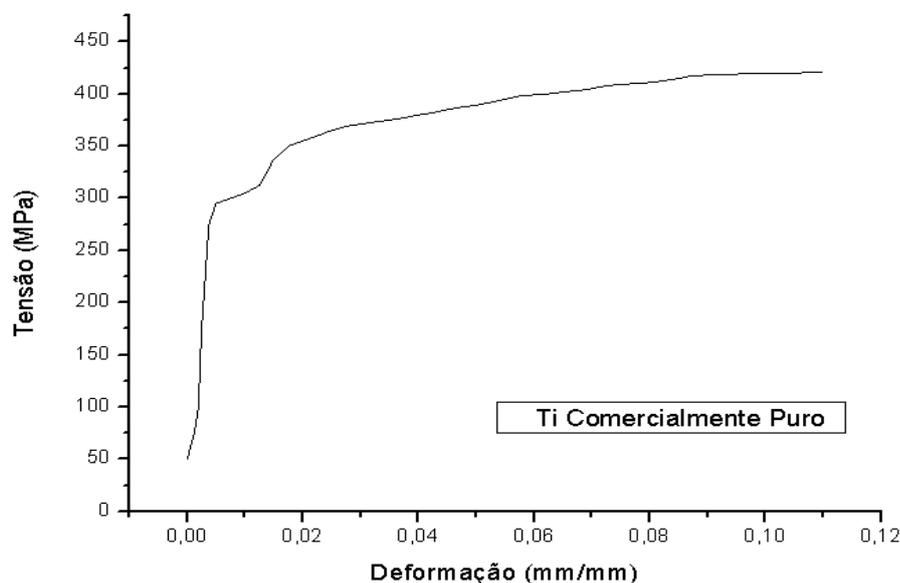


Figura 20. Curva tensão x deformação do titânio comercialmente puro. Adaptado de Zhang et al. (2020).

Os valores das propriedades físicas e elásticas do titânio: densidade, módulo de Young e coeficiente de Poisson, foram retirados de Bauer (2007) & Lima (2012), observados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas e elásticas do titânio.

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

Fonte: Bauer (2007) & Lima (2012).

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. No módulo de montagem do Abaqus, a matriz foi multiplicada gerando-se seis matrizes, denominada de matriz contínua, o punção também foi multiplicado por seis vezes, e foram realizadas as montagens dos componentes formando uma estrutura com a matriz contínua, que junto com conjunto de punções e o tarugo formaram um hexágono geométrico tridimensional. A Figura 21 ilustra o modelo elaborado do ECAP na interface de desenvolvimento do Abaqus com o corpo de prova interno na matriz.

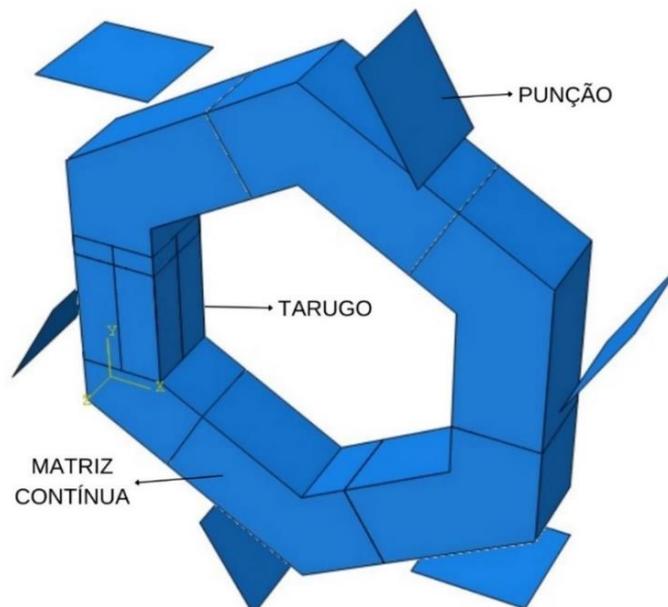


Figura 21. Modelo desenvolvido para a simulação do ECAP.

No módulo de implementação foram inseridos os dois passos da simulação: passo inicial com condições e estados iniciais de equilíbrio e repouso, e o passo 1 com as condições de desempenho da simulação voltados a dinâmica explícita, onde todos os oito passes foram inseridos. O tempo total foi de 167,85 segundos com incremento de tempo automático, avaliação em elemento por elemento, e fator de escala de tempo para correlacionar diretamente o tempo ao espaço total percorrido pelo corpo de prova. A simulação exigia uma quantidade de rotações e movimentos de alta complexidade de modo que 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 inércia 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 entre o tarugo e a matriz contínua de deformação;
- Interações de superfície entre o tarugo e o conjunto de punções;
- 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 atrito nas interações foi determinado em 0,1 valor esse recomendado para processamentos utilizando o lubrificante MoS₂.

As cargas e condições de contorno foram configuradas, onde a matriz contínua por meio de pontos referenciais foi fixada 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 edição estudantil habilita ao usuário a geração de até 1.000 nós, dessa forma por meio de diversas análises foi possível definir a configuração de malhas para os três elementos envolvidos: corpo de prova, matriz e punção. O corpo de prova é o elemento foco de análise deste estudo e necessitou de maior divisão, dessa forma ele foi refinado com 360 elementos para conseguir o melhor mapeamento das deformações e das tensões pontuais aplicadas em cada região do corpo de prova. Visando a comparação com os dados experimentais com divisão em 6 lâminas foi analisada partição do corpo de prova quanto a sua malha dividida em 10 linhas e 6 colunas.

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.

A configuração de dinâmica atendeu a um padrão explícito linear com otimizações na interpretação do software durante o processo, como segue a vista com detalhamento tridimensional da peça em pré-processamento com aplicação e inserção da malha ilustrada na Figura 22.

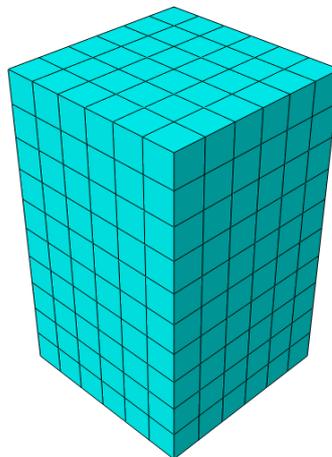


Figura 22. Vista tridimensional do corpo de prova em divisão com os elementos e malhas.

b) Processamento

O processamento começou 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 8 passes. Foi selecionada 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.

A situação do material simulado em forma de tarugo a cada passe foi plotada no plano Y externamente para a análise do mapeamento atrelado aos níveis de deformação do primeiro ao oitavo passe.

Foram plotadas as imagens com a escala PEEQ do plano Y referentes aos passes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em duas regiões do tarugo: externamente e internamente. A região interna foi obtida partindo a secção do tarugo ao meio em 3 mm, que foi correspondente ao trabalho de Silva (2017), que empregou corpos de prova constituído por lâminas e analisou as lâminas 1 e 3. A lâmina 3 estava na distância de em 3 mm da superfície do corpo de prova, ou seja, no centro do corpo de prova. As medidas de dureza foram realizadas nessas lâminas, no plano Y e representando as regiões externa e interna, como mostra o detalhamento do procedimento na Figura 19.

Foi efetuado um mapeamento das deformações para o plano Y externo no intuito de entender melhor o comportamento dessa região do corpo de prova de forma individualizada em cada passe de ECAP e discutir a disposição dos níveis de

deformação impostas no tarugo analisando a homogeneidade de deformação no plano.

As imagens plotadas com a escala PEEQ no plano Y nas regiões externa e interna, obtidas na simulação do Abaqus, foram utilizadas para a comparação com as medidas de dureza no plano Y obtidas externamente na lâmina 1 e internamente na lâmina 3 do estudo experimental de SILVA (2017). Essa análise foi realizada no intuito de identificar as deformações impostas no tarugo e estudar a homogeneidade agora entre duas regiões do tarugo, sendo possível dessa forma associar os dois estudos correlacionando os resultados dos mesmos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 MAPEAMENTO DAS DEFORMAÇÕES DO TI CP A CADA PASSE DE ECAP NO PLANO Y

O corpo de prova foi dividido teoricamente em três regiões para facilitar a discussão: cabeça, centro e cauda. A Figura 23 (a) mostra o corpo de prova na posição horizontal, com as três regiões, e o plano Y objeto de análise, localizado externamente. As malhas foram inseridas no ambiente do software Abaqus previamente aos passes. No lado esquerdo da Figura 23 (a) é possível observar a escala PEEQ que é responsável pelo mapeamento e verificação das deformações e dos níveis de deformações que o corpo de prova foi sujeito durante o processamento.

A Figura 23 (b) mostra o corpo de prova na posição vertical inserido na matriz ECAP com ângulos de canal ($\Phi = 120^\circ$) e de curvatura de ($\Psi = 0^\circ$). O punção que aplica a carga é posicionado na cabeça do corpo de prova. O modelo desenvolvido para a simulação do ECAP, da Figura 21, consiste em uma sequência de matrizes da Figura 23 (b).

A Figura 23 (c) mostra o corpo de prova na posição horizontal após a deformação plástica.

A discussão dos resultados da simulação realizada no software Abaqus, tomando como referência a Figura 23, destaca a divisão em três regiões teóricas do corpo de prova, a região central, a cabeça e a cauda. Na região central do corpo de prova ocorre o cisalhamento do processo de deformação ECAP, portanto, trata-se do principal local de análise. Na cabeça e cauda o cisalhamento é menos intenso, sendo que na cabeça é aplicada a carga, via punção, e na cauda ocorre a contato com a matriz após a aplicação da carga.

O estudo das três regiões possibilita a análise da homogeneidade de deformação do processo ECAP ao longo dos passes.

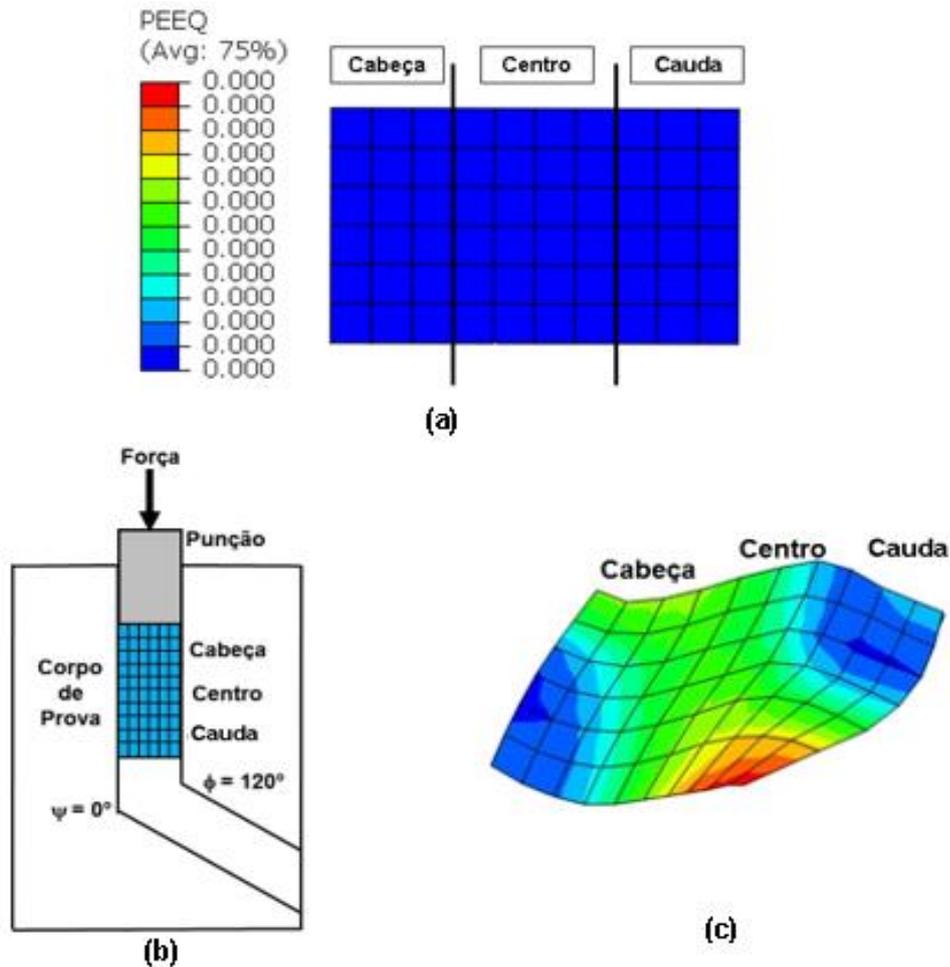


Figura 23. (a) Corpo de prova na posição horizontal com divisão em três regiões: cabeça, centro e Cauda. Visão do plano Y na condição sem deformação ECAP. (b) Corpo de prova na posição vertical na matriz ECAP com o punção. (c) Corpo de prova posição horizontal após a deformação.

Na Figura 24 é observado o plano Y externo do corpo de prova após o primeiro passe de deformação por ECAP simulado por meio do software Abaqus. A análise empregando a escala PEEQ identificou o alto potencial de deformação aplicado, principalmente na parte central do corpo de prova onde ocorre a deformação plástica.

A região central do corpo de prova foi submetida a intensa plasticidade que ocorre na interseção entre os canais da matriz, onde ficam localizados os ângulos de canal e curvatura. Essa região de interseção no momento da deformação e passagem do corpo de prova produz o que pode denominada por zona de deformação plástica - ZDP, (WONGSA-NGAM et al., 2021).

A região ZDP produz deformação por cisalhamento, ou seja, o corpo de prova é deformado por meio da ativação dos planos de deslizamento que são correlacionados à movimentação das discordâncias, apresentando predominância de níveis de deformação em escala entre 0,276 e 0,635, Figura 24. A cabeça do corpo de prova apresentou baixo nível de deformação e grande heterogeneidade de deformação.

A cauda, na parte inferior direita, Figura 24, de forma pontual possui a maior incidência de deformações, sendo essa região a que está em contato com o ângulo de curvatura ($\Psi = 0^\circ$) da matriz na parte interna de intersecção entre os canais. O ângulo de curvatura baixo assume a maior responsabilidade por essa grande deformação pontual, devido ao corpo de prova em mobilidade de rotação não conseguir efetuar o giro de forma suave, necessitando da geração de grande atrito com a matriz naquela região para conseguir complementar a totalidade de sua rotação entre os canais da matriz e promovendo dessa forma o mecanismo pontual de encruamento.

A deformação ECAP com 1 passe não ofereceu grande cisalhamento na região central e pequena homogeneidade de deformação na análise global do corpo de prova no plano Y.

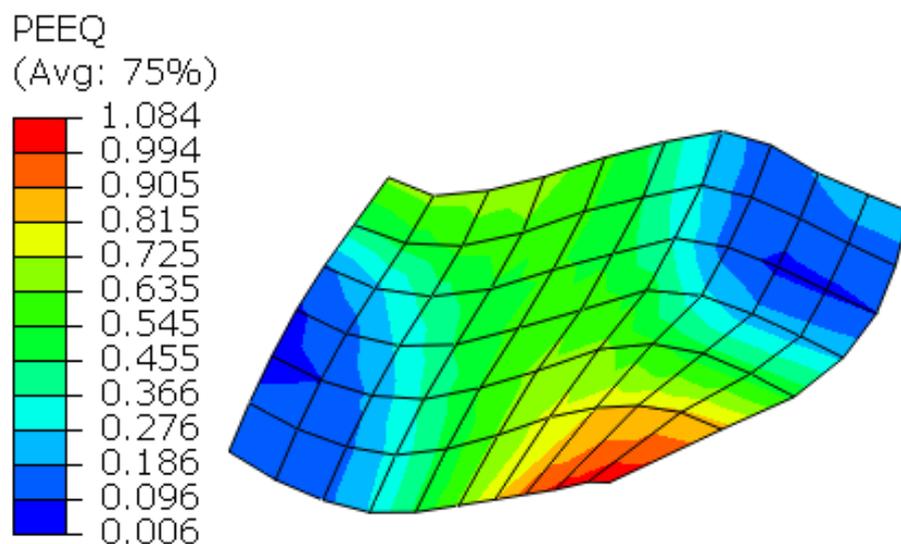


Figura 24. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 1 passe de deformação ECAP.

No segundo passe por ECAP, visto na Figura 25, foi observada uma pequena elevação da homogeneidade de deformação, onde todo o plano do corpo de prova analisado já passou parcialmente por 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.

A região central do corpo de prova, que pertence à ZDP e onde a deformação é gerada por meio da ativação dos planos de deslizamento das discordâncias, é a região mais destacada por possuir características apresentáveis de igualdade ou similaridade nos níveis de deformação, predominantemente homogênea e com valores em escala entre 0,426 e 0,973 com elevação média dos níveis de deformação entre 0,150 e 0,338 em comparação ao primeiro passe.

A cabeça e a cauda do corpo de prova ainda possuem os menores níveis de deformação em relação à região central. A cabeça na parte superior concentra pontualmente o maior nível de deformação, justificado pelo atrito entre o punção, o corpo de prova e a matriz na região do canto externo entre a intersecção dos canais promovendo encruamento pontual em parte da amostra. A cauda na parte inferior, diferente do primeiro passe, apresentou índices menores de deformação devido ao mecanismo de encruamento no primeiro passe que modificou substancialmente a estrutura, gerando no segundo passe, menor atrito entre o corpo de prova e a matriz na região correlata ao ângulo do canto interno ao canal, ou seja, o maior encruamento no passe 1 reduziu atrito no passe 2. Entretanto, percebe-se ainda que a região possui níveis pontuais elevados de deformação gerada por atrito se comparada às demais regiões deformadas.

A deformação com 2 passes de ECAP não ofereceu homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise do plano Y externamente, considerando uma análise global do corpo de prova, porém, nota-se a elevação constante no acúmulo dos níveis de deformação em todas as regiões.

Em relação ao primeiro passe ocorreu um aumento da homogeneidade de deformação, caracterizado pelo aumento da região verde em maior parte ao longo do corpo de prova. Com a elevação da homogeneidade de deformação nas regiões da cabeça e cauda e da região do centro do corpo de prova em relação à Figura 24.

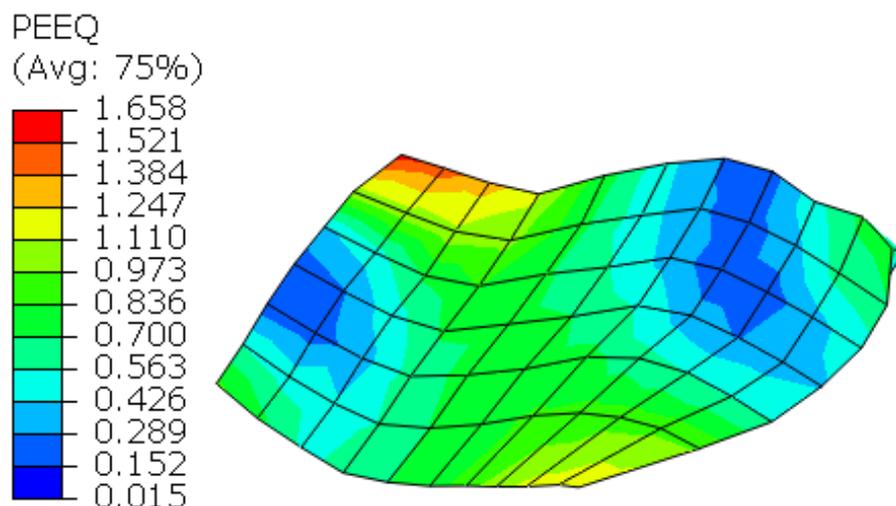


Figura 25. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 2 passes de deformação ECAP.

A Figura 26 apresentou os níveis de deformação do corpo de prova deformado via ECAP em 3 passes. Observa-se a elevação dos níveis de deformação e na região mais ao centro do corpo de prova essa elevação foi mais significativa. A deformação em escala foi mais homogênea com predominância em escala entre 0,496 e 0,978 com elevação da deformação em comparação ao segundo passe entre 0,070 e 0,005. A região central do corpo de prova, Figura 26, comparando-se com as Figuras 24 e 25, observa-se analogia entre os resultados com relação ao comportamento da região central. A principal informação foi a mudança de escala que representa um aumento nos limites de deformação.

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

Na cabeça do corpo de prova 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 à maior interação por contato via atrito gerada pelo mecanismo de deformação no giro do tarugo submetido ao ECAP no momento de intersecção entre os canais.

Na cauda do corpo de prova, canto inferior direito, a deformação ocasionada pelo contato entre tarugo e matriz produziu uma movimentação abrupta muito elevada

dos planos de deslizamento, gerando concentração de tensões, encruamento pontual e em consequência a geração de deformações muito elevadas. ainda no primeiro passe mudando a forma rapidamente do corpo de prova como já foi discutido. O valor desse nível de deformação manteve-se constante e tendendo a se igualar às deformações efetivas da região central.

A deformação ECAP com 3 passes não ofereceu homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise externa do plano Y, considerando uma análise global do corpo de prova, porém, a evolução do acúmulo de deformação permanece se elevando a cada passe.

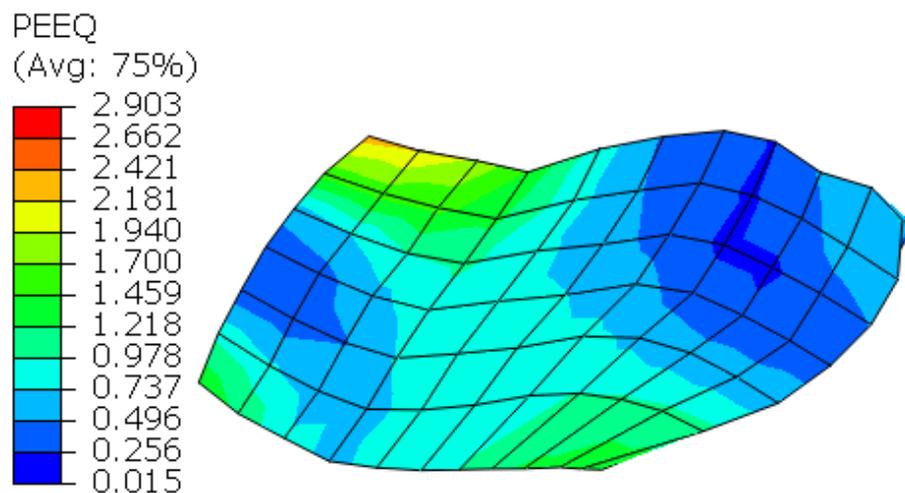


Figura 26. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 3 passes de deformação ECAP.

No quarto passe de deformação ECAP, mostrado na Figura 27, os níveis de deformação impostos ao corpo de prova seguiram a tendência de elevação e obedeceram ao comportamento discutido nos passes anteriores.

No quarto passe de deformação, Figura 27, a região central apresentou comportamento análogo ao obtido com três passes, Figura 26. Ou seja, as deformações com 3 e 4 passes mantiveram o mesmo comportamento na deformação via o ECAP. Na Figura 27 ocorre a continuidade do aumento do limite de deformação observado em relação à Figura 26.

A região do centro apresentou maior homogeneidade, com predominância em escala entre 0,574 e 1,133, e elevação entre 0,078 e 0,155 no incremento dos níveis

em escala de deformação comparados ao terceiro passe. As regiões da cabeça e da cauda do corpo de prova continuam sendo as de maior heterogeneidade, com a cabeça apresentando o maior nível em escala de deformação na parte superior esquerda.

Foi observado uma tendência nos níveis de deformação médios da cauda na parte superior direita de serem menores que as demais regiões, enquanto os níveis de deformação da cabeça assumiram a maior heterogeneidade até o quarto passe. As deformações associadas ao centro da peça continuaram demonstrando boa elevação, comprovando ter esta região a maior homogeneidade dos níveis de deformação, em função do aumento do número de passes.

A deformação ECAP por 4 passes mostra uma tendência de homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise externa do plano Y na região mais ao centro do corpo de prova, devido à ZDP, porém, de forma global ainda existe uma grande heterogeneidade nas demais regiões do plano analisado.

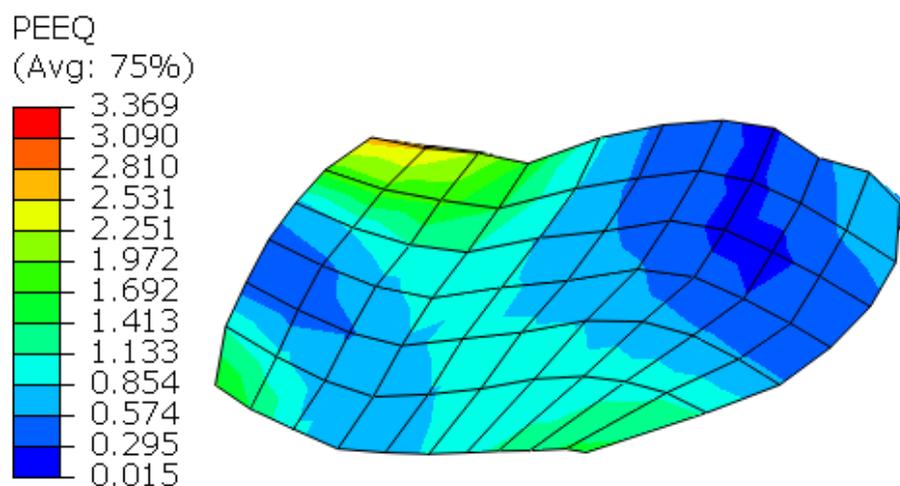


Figura 27. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 4 passes de deformação ECAP.

O quinto passe de ECAP, visto na Figura 28, continuou destacando o grande acúmulo de deformações na região central do corpo de prova, tornando cada vez mais homogênea essa região em função do 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.

Na região central, Figura 28, foi observado que ocorreu um aumento no limite de deformação, caracterizado pela mudança da cor da região central do corpo de prova, em relação às Figuras 26 e 27, onde houve a predominância do azul claro. Os passes 3 e 5 representaram mudanças significativas de comportamento, são dois pontos de inflexão.

Na região da cabeça, mais ao centro, e na região da cauda, na parte superior direita do corpo de prova, existem duas fendas de baixo nível de deformação que vêm evoluindo desde o primeiro passe isso se deve a região não ser atingida pela ZDP durante o processamento de forma incisiva.

A deformação ECAP com 5 passes continuou demonstrando 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. A heterogeneidade continuou diminuindo à medida em que se elevou o número de passes, ficando as maiores deformações nas extremidades próximas aos cantos das regiões da cabeça e da cauda do corpo de prova.

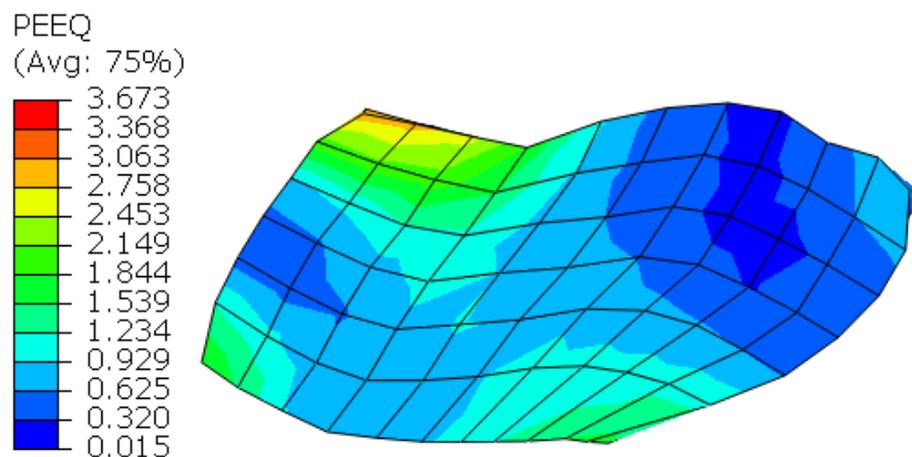


Figura 28. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 5 passes de deformação ECAP.

Os limites de deformação estão coerentes com a evolução do processo ECAP em relação ao aumento do número de passes. As deformações com 5 passes, Figura 28, e 6 passes, Figura 29, mantiveram o mesmo comportamento na deformação via o ECAP.

No sexto passe de deformação ECAP, visto na Figura 29, o corpo de prova continua apresentando no centro da peça concentrações ainda maiores nos níveis de deformação, com tendência de aproximação entre os valores, característica essa que representa a tendência de homogeneidade com a aproximação das escalas. Essa é a região mais homogênea do plano analisado e apresenta a 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 ECAP com 6 passes continuou demonstrando boa tendência de homogeneidade nos níveis de deformações impostas para a análise externa do plano Y na região central do corpo de prova. Na cauda do corpo de prova é observada uma estabilização e tendência a igualar os níveis de deformação do centro do corpo de prova. A parte superior direita da cauda tende a apresentar os menores níveis de deformação, sendo a região com menor média de deformação, apresentando ainda uma fenda de baixa deformação que aumenta a cada passe de deformação, próxima ao limite da região central do corpo de prova.

A região da cabeça, na parte superior esquerda, continua sendo a região com os maiores níveis pontuais de deformação em escala e apresenta 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 cauda citada anteriormente, porém de menor proporção e maior nível de deformação em escala. No primeiro passe, as regiões encruadas da cabeça do corpo de prova, parte superior esquerda, e a região da cauda, parte inferior direita, ainda continuam apresentando os maiores níveis de deformação, no entanto, com a elevação do número de passes estão passando a apresentar níveis de deformações mais próximos aos níveis do centro da peça, essa tendência foi notada nos estudos de Awang Sh'ri et al. (2019) e Wongsan-Ngam et al. (2021) de forma similar.

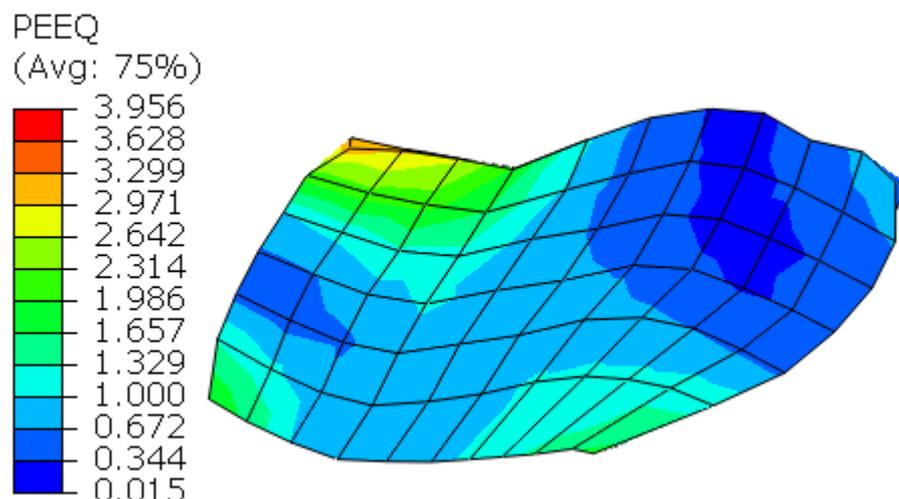


Figura 29. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 6 passes de deformação ECAP.

Os limites de deformação continuaram coerentes com a evolução do processo ECAP em relação ao aumento do número de passes, as Figuras 28, 29 e 30 apresentam comportamento análogo, ou seja, as deformações com 5, 6 e 7 passes mantiveram o mesmo comportamento na deformação via o ECAP.

O sétimo passe de processamento por ECAP, visto na Figura 30, destacou o aumento da homogeneidade nos níveis de deformações presentes na região do centro do corpo de prova. Os níveis em escala de deformação apresentaram valores máximos nas regiões mais próximas das partes de contato com 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 corpo de prova continua apresentando grande heterogeneidade, com os máximos na parte superior esquerda, permanecendo estes valores concentrados em escala, porém continua mostrando forte tendência de estabilização análogo ao passe anterior. A cauda do corpo de prova continuou a apresentar os menores níveis de deformação na parte superior, porém a parte inferior apresentou boa estabilização e tendeu a se igualar aos níveis homogêneos da parte central do tarugo como observado anteriormente.

As duas fendas de menor nível de deformação, tanto na cabeça, com níveis máximos em escala de 0,745, quanto na cauda, com níveis máximos em escala de

0,380 permaneceram em destaque. A cauda, na parte superior, se destaca como o local que foi sujeito aos menores níveis de deformação no plano Y até o sétimo passe.

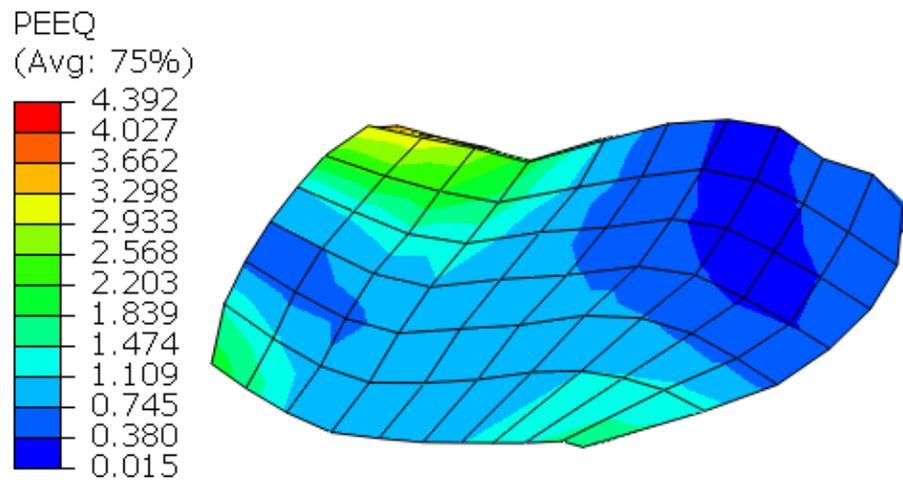


Figura 30. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 7 passes de deformação ECAP.

Os limites de deformação continuaram coerentes com a evolução do processo ECAP em relação ao aumento do número de passes, as Figuras 28, 29, 30 e 31 apresentaram comportamento análogo, ou seja, as deformações com 5, 6, 7 e 8 passes mantiveram o mesmo comportamento na deformação via o ECAP.

No oitavo e último passe por ECAP, observado na Figura 31, a região do centro do corpo de prova se consolidou como a região mais homogênea de todo o processo, apresentando níveis de deformação com as menores variações e valores predominantes 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 corpo de prova, com predominância bem destacada na escala entre 0,818 e 1,220, indicando dessa forma boa tendência ao estado estacionário nessa região, constatado pela pequena variação nos limites em escala.

A cabeça do corpo de prova foi a região que apresentou maior heterogeneidade nos níveis de deformação impostos, sendo a parte superior 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 à estabilização se aproximando aos níveis da região central do corpo de prova, 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 continuou 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 cauda do corpo de prova 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. A parte inferior direita dessa região apresentou 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 cauda 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.

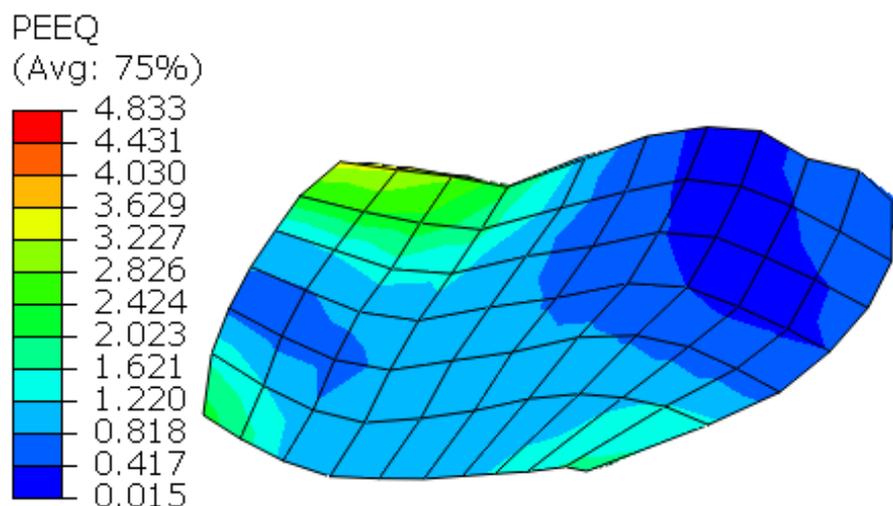


Figura 31. Corpo de prova analisado externamente no plano Y com 8 passes de deformação ECAP.

A análise global da escala PEEQ na região central dos corpos de prova foi realizada, pois nesta região ocorre a deformação plástica mais severa, via

cisalhamento. A análise nessa região possibilita verificar o processo de deformação ECAP com maior objetividade.

A Figura 32 mostra o gráfico com a evolução no acúmulo dos níveis de deformação na região do centro do corpo de prova em função do número de passes no processo ECAP, apresentando a evolução e o crescimento dos valores. O segundo passe na linha de máximos apresentou 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 do material simulado.

A evolução na disposição dos pontos durante o ECAP mostrou que na elevação do número de passes o material acumulou os maiores níveis de deformação. Esses resultados corroboram com os resultados experimentais obtidos por Silva (2017) ao deformar Ti CP por ECAP.

A partir do terceiro passe ocorreu a estabilização nos incrementos do acúmulo nos níveis de deformação, ficando a escala de mínimos bem destacada e com tendência à redução da angulação a partir do sexto passe, indicando a constância dos valores de incremento. A escala de máximos demonstra tendência crescente indicando potencial de elevação dos níveis, estudos mais detalhados com a elevação do número de passes se tornam necessários para ampliação da análise dos estágios de estabilização e saturação com promoção do estado estacionário.

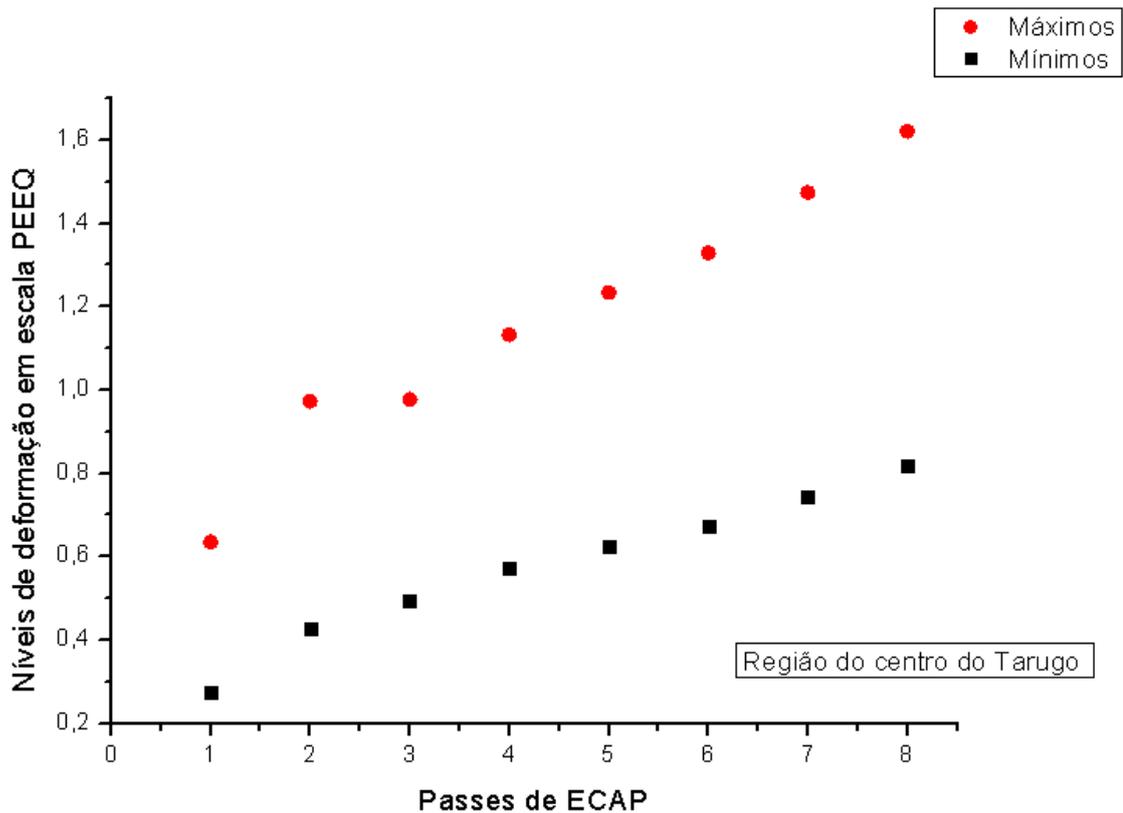


Figura 32: Evolução no acúmulo dos níveis de deformação na região do centro do corpo de prova durante o processo ECAP.

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 corpo de prova, na parte superior, apresentou os maiores níveis de concentração no acúmulo de deformação, porém com altos índices de heterogeneidade de deformação. Já a região da cauda do corpo de prova, na parte superior, apresentou a menor concentração no acúmulo de deformação no decorrer do processo.

As regiões da cabeça, parte inferior, e da cauda, a parte inferior, do corpo de prova apresentaram boa estabilização nos níveis em escala de deformação no decorrer dos passes, tendendo a ficarem muito próximas ou até a igualarem aos níveis

de deformação apresentados na região do centro do corpo de prova ao fim do processamento. Esses resultados apontaram a bons indícios de que a microestrutura parou de se recrystalizar nessas regiões nos passes iniciais. Resultados similares foram obtidos por meio dos estudos de Awang Sh'ri et al. (2019) e Wongsan-Ngam et al. (2021) que identificaram que regiões submetidas a severas deformações e apresentaram altos níveis em escala nos primeiros passes, tenderam a estabilizar no decorrer do processamento ECAP indicando boa estabilização nos últimos passes.

6.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS EXPERIMENTAIS E OS DA SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

No trabalho de Silva (2017) foi realizado um estudo experimental sobre a homogeneidade de deformação do Ti CP processado via ECAP, analisando-se as regiões externa e interna de corpos de prova formados pelo empilhamento de lâminas de titânio. Os resultados experimentais de Silva (2017) foram utilizados para comparação aos resultados de simulação numérica por elementos finitos do presente trabalho, que também analisou as regiões externa e interna de corpos de prova. Ambos os trabalhos analisaram o plano Y.

Nos corpos de prova formados pelo empilhamento de lâminas de Ti CP do trabalho de Silva (2017) as lâminas 1 e 3 foram designadas respectivamente como as planos externo e interno. Na Tabela 2 são mostrados os valores de microdureza Vickers das lâminas 1 e 3 deformados via ECAP com 1, 2, 4, 6 e 8 passes do estudo de Silva (2017).

Os resultados do trabalho de Silva (2017) mostraram aumento de dureza com o aumento do número de passes, indicando a melhoria das propriedades mecânicas decorrente do refino de grão do Ti CP. A análise metalográfica das amostras deformadas indicou o refino microestrutural produzido pelo processo ECAP. Foi observado que a região externa dos corpos de prova analisados apresentou valores mais elevados de dureza em relação à região interna.

Os resultados de Silva (2017) mostraram que a região externa apresentou valores de dureza superiores aos da região interna em todos os passes. A dureza do Ti CP sem deformação foi de 146 ± 5 HV com elevação de aproximadamente 15,75% em relação ao primeiro passe. O aumento de dureza foi pequeno entre os passes 1,

2 e 4 de aproximadamente 8,28% sendo registrado aumento significativo nos passes 6 e 8 de aproximadamente 23,15%.

Tabela 2. Valores de microdureza para o Ti CP não deformado e deformado via ECAP na condição de lâminas perpendiculares.

Condição	Plano Externo:	Plano Interno:
Perpendicular	Lâmina 1	Lâmina 3
Não deformado	146 ± 5 HV	146 ± 5 HV
1 passe	169 ± 15 HV	159 ± 13 HV
2 passes	173 ± 10 HV	168 ± 9 HV
4 passes	183 ± 12 HV	175 ± 10 HV
6 passes	203 ± 10 HV	198 ± 8 HV
8 passes	250 ± 6 HV	235 ± 7 HV

Fonte: (SILVA 2017).

A Figura 33 mostra que os níveis de deformação impostos nas regiões externa e interna do corpo de prova deformado com 1 passe via ECAP apresentaram boa correlação entre os resultados experimentais e os simulados. Onde os planos externo e interno do corpo de prova apresentam comportamento análogo, com pequena diferença na seção da cauda.

O plano externo do corpo de prova, Figura 33(a), apresentou níveis superiores aos indicados no plano interno, Figura 33(b), mostrando também que a região da cauda na parte superior foi sujeita aos menores níveis de deformação, entre 0,006 e 0,095, e quase não apresentou modificação com relação ao seu estado inicial, sem deformação. A região central do corpo de prova manteve boa homogeneidade nos planos externo e interno e apresentaram valores muito próximos, com pouca variação nos 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, observados na cor verde do mapa de contorno. Os resultados alcançados por Awang Sh'ri et al. (2019) e Wongsangam et al. (2021) corroboraram com os do presente trabalho.

As imagens plotadas do corpo de prova cortado internamente apresentam linhas que indicam tendência de deformação por cisalhamento das malhas no interior

do material, essa representação pode ser vista nas figuras com indicação correspondente ao plano interno seccionado das Figuras 33 a 37.

Dessa forma, foi comprovado que existe 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.

A região da cauda, na parte inferior, apresentou os maiores níveis de deformação, e a região da cabeça, na parte superior, logo em seguida, porém, a região central possui os índices mais homogêneos de deformação, comportamento observado nos planos externo e interno do plano Y. Os resultados corroboram com os observado também nos estudos de Su et al. (2007).

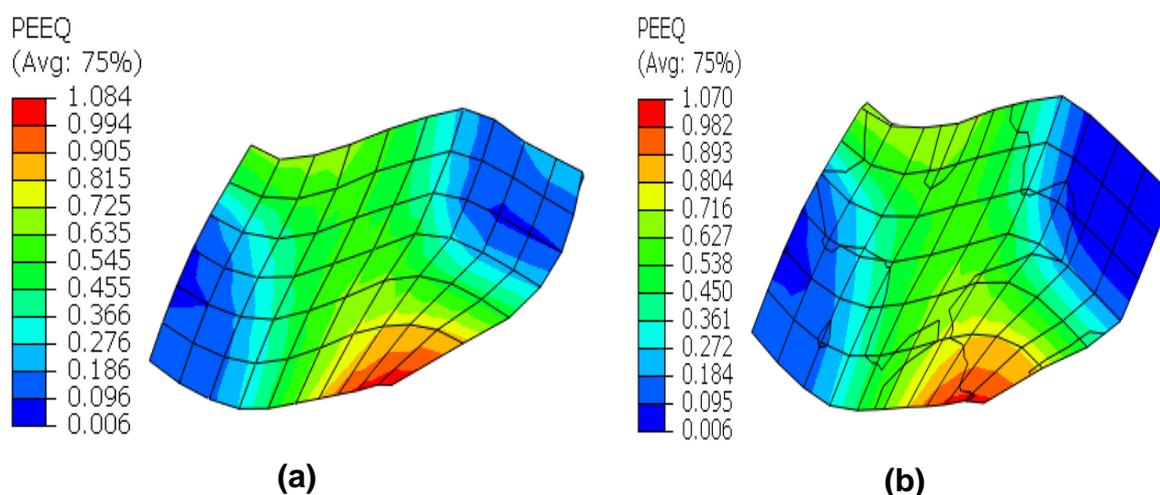


Figura 33. Corpo de prova com 1 passe de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.

Para o segundo passe por ECAP, mostrado na Figura 34, a simulação continua apresentando correlação com os dados experimentais, onde a região da cauda na parte superior do plano interno, Figura 34(b), continua a ser a parte com os menores 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 os planos externo e interno. Os planos externo e

interno possuem comportamento semelhantes, onde na região da cauda, o plano interno apresentou menor deformação do que no plano externo.

A análise da homogeneidade entre os planos externo e interno apresentou níveis de deformação muito próximos na região central do tarugo, com elevação desses níveis de deformação durante o processamento e aproximação dos valores vistos em escala se comparados ao primeiro passe. Nos planos interno e externo os níveis de deformação foram entre 0,426 e 0,973, com diferença entre os níveis em escala de 0,547 nessa parte. Na parte superior da região da cabeça, o plano externo apresentou níveis de deformação ligeiramente maiores, com valor máximo de 1,521, que o plano interno com valor máximo de 1,384, mostrando pequena redução do valor máximo de deformação na escala PEEQ na comparação dos planos.

A redução ocorreu pela interação de contato superficial entre corpo de prova, o punção e a matriz com deformação severa no ângulo de canal Φ , gerando elevada deformação superficial se propagando no plano interno, porém com pequena redução no interior do tarugo pela limitação relacionada aos planos de deslizamento na microestrutura. Resultados similares foram alcançados por Wongsa-Ngam et al. (2021), deformando uma liga de cobre via ECAP.

As incertezas nas medidas experimentais das durezas no segundo passe mostraram que existiu uma pequena aproximação dos níveis de deformação com consequente homogeneidade, se comparadas ao primeiro passe, com 10 HV no plano externo e 9 HV no plano interno. Na simulação numérica houve a mesma tendência, onde foi possível observar que os valores apontados na escala PEEQ reduziram os incrementos de distanciamento entre máximos e mínimos praticamente ficando iguais na região central do corpo de prova. As medidas de dureza também possuem relação direta com os valores médios em escala destacados nos resultados da simulação, indicando correlação entre os estudos experimental e de simulação. Demonstrando que até o segundo passe existem ótimos indícios de homogeneidade de deformação entre as partes externa e interna do plano Y.

Foi observado também que que as regiões cabeça-cauda do corpo de prova desfavorecem bastante a análise por média associada ao estudo por gerar grandes incertezas das medidas, devido ao baixo potencial de deformação, indicando nessas duas partes grande heterogeneidade nos níveis de deformação em comparação ao centro do corpo de prova.

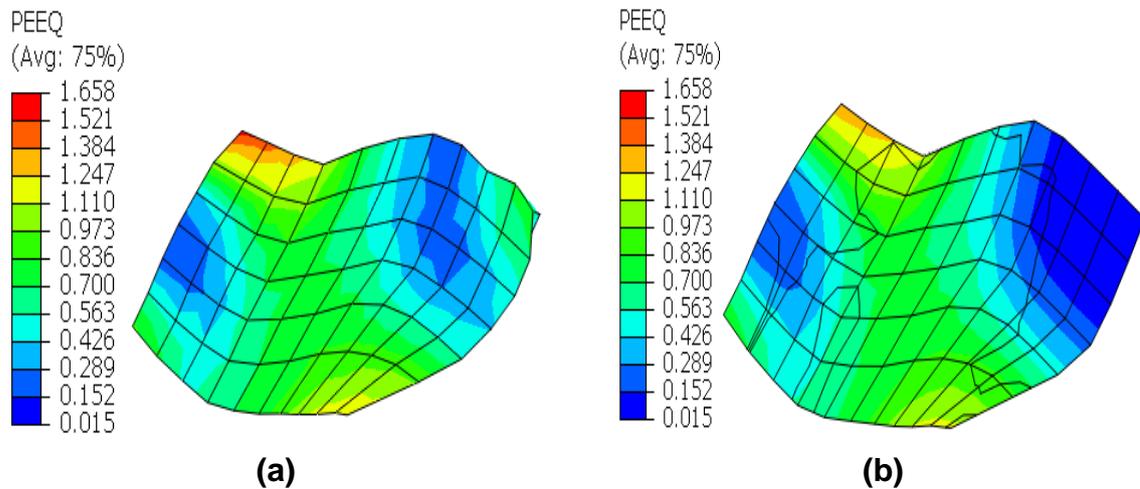


Figura 34. Corpo de prova com 2 passes de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.

É possível observar através da Figura 35 que os planos externo e interno possuem comportamento diferente. As seções da cabeça e da cauda, nos planos interno e externo, apresentaram menor deformação. A seção central dos planos interno e externo, apresentaram mudança de cor: verde para azul. A seção central do plano interno apresentou mudança para azul mais escuro, enquanto seção central do plano externo em azul claro, em ambos os planos foi notado o acúmulo nos níveis de deformação em relação a evolução do processo e de acordo com o ECAP realizado de forma experimental.

O quarto passe por ECAP, mostrado na Figura 35, apresentou valores acumulados e com considerável elevação dos níveis de deformação, demonstrando boa evolução do processamento com o aumento do número de passes e indicando associação direta dessa variável à elevação dos níveis de deformação. A homogeneidade de deformação presente na região central do corpo de prova com o favorecimento da ZDP, continuou a se elevar no decorrer dos passes com valores predominantes entre 0,574 e 1,133 no plano externo, e no plano interno valores predominantes entre 0,574 e 0,854, mostrando uma pequena diferença entre os níveis de deformação presentes nas duas regiões do plano analisado. O plano interno passou a apresentar pequena diferença em comparação ao plano externo, porém sem grande discrepância e com níveis de deformação muito próximos, fato também

observado de forma similar por Wongsan-Ngam et al. (2021) através dos resultados de seu estudo.

A região da cabeça e a região da cauda, na parte superior principalmente continuaram apresentando altos níveis de heterogeneidade de deformação em comparação com a região central, nos planos externo e interno do corpo de prova. Na região da cabeça na parte superior foram observados os maiores níveis de deformação, com máximo de 2,531 bem propagado no plano se mantendo nesse valor também na região interna.

A região da cauda, na parte superior do corpo de prova, no plano interno, continuou 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. Foi observado a presença de 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 corpo de prova.

Os valores obtidos por meio da simulação continuaram crescendo de forma análoga às medidas de dureza e permaneceram 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 foi possível observar que os valores apontados na escala PEEQ praticamente mantiveram os incrementos de distanciamento entre máximos e mínimos na região central do tarugo principalmente, porém com valores reduzidos nas extremidades do corpo de prova, principalmente no plano interno do plano seccionado na parte direita.

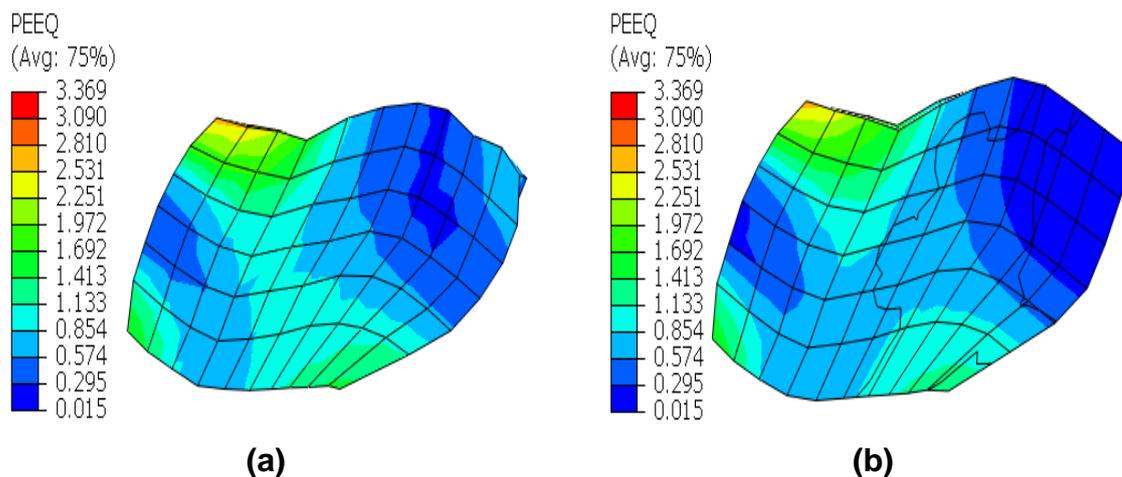


Figura 35. Corpo de prova com 4 passes de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.

É possível observar por meio da Figura 36 que os planos externo e interno possuem comportamento semelhante na escala PEEQ. As seções da cabeça e da cauda, nos planos interno e externo, apresentaram menor deformação do que a externa. A seção central, nos planos interno e externo, apresentou mudança, onde estavam na cor azul mais escuro observado na Figura 35 e passou a uma coloração de azul mais claro em predominância, Figura 36.

No sexto passe por ECAP, observado na Figura 36, foi possível identificar a presença das escalas praticamente nos mesmos limites e níveis de deformação na parte da região central do corpo de prova. A região central apresentou as maiores concentrações de níveis de deformações entre 0,672 e 1,329 com predominância de duas cores no mapeamento de contorno do corpo de prova, nos planos externo e interno. O plano interno continuou apresentando os menores valores médios em relação ao plano externo, com a região da cauda 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 região da cabeça na parte superior do corpo de prova continuou apresentando os maiores valores acumulados de deformação, com bons índices de homogeneidade nos dois planos. Foi observado, nos demais locais dessa parte heterogeneidade dos níveis de deformação por média, onde no plano externo indicou

valores entre 0,344 e 0,672 e no plano interno com valores entre 0,015 e 0,672, indicando dessa forma o plano interno com menores acúmulos nos níveis de deformação.

Houve uma pequena redução nas incertezas das medidas experimentais de dureza, apresentando 10 HV no plano externo e 8 HV no plano interno. Na simulação numérica as escalas, principalmente na seção central, também se aproximaram e passaram a apresentar valores em escala com níveis mais próximos e mais homogêneos nos planos externo e interno, indicando que as duas regiões se tornaram mais homogêneas com a elevação do número de passes.

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

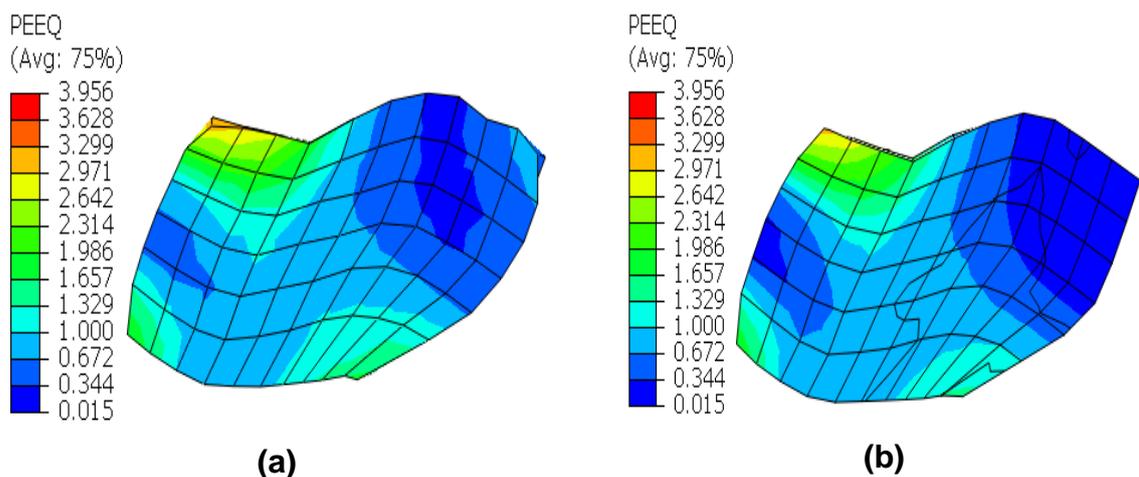


Figura 36. Corpo de prova com 6 passes de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.

No oitavo e último passe via ECAP, observado na Figura 37, a elevação das médias das medidas experimentais de dureza da Tabela 2, respectivamente de 250 HV e 235 HV nos planos externo e interno, foram justificadas devido ao aumento da

densidade de discordâncias e bandas de cisalhamento do material, que é característica associada ao processamento ECAP. Na simulação numérica, os valores em escala também se elevaram na mesma proporção, sendo possível dessa forma associar diretamente o aumento das medidas experimentais de dureza aos resultados obtidos na simulação numérica no decorrer do ECAP, alcançando o registro dos maiores níveis de deformação neste último passe. A comparação entre os estudos experimental e de simulação apresentaram grande correlação, e estão em consonância com resultados da literatura, como os alcançados nos estudos de Alateyah et al. (2021, 2022) e Wongsangam et al. (2021).

A região da cabeça na parte 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 região da cabeça, foi possível identificar uma pequena heterogeneidade entre os planos externo e interno, 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 diferença entre as regiões.

A região da cauda na parte inferior apresentou valores praticamente iguais em ambos os planos externo e interno, com níveis de deformação muito próximos ou iguais entre 0,818 e 1,621. Na região da cabeça na parte inferior 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. A região central continuou se mostrando ser a parte com o mais alto índice de homogeneidade de deformação de todo o processamento.

A parte que engloba a região da cauda na parte superior do tarugo foi a que apresentou em proporção os menores níveis de deformação ao final do ECAP nos dois planos. O plano interno nessa parte apresentou níveis de deformação em escala muito baixos entre 0,015 e 0,417, indicando níveis de heterogeneidade nas arestas dessa parte no comparativo entre os planos. A região da cauda na parte superior do corpo de prova tanto no plano externo quanto no interno, no decorrer dos passes foi o local que apresentou os menores níveis de deformação, sendo dessa forma uma região com a mais baixa concentração de deformação.

A região central do corpo de prova continuou demonstrando boa evolução e aproximação entre os níveis em escala, indicando que quanto mais central e próxima ao início da formação da ZDP for direcionada a análise, mais características visíveis de homogeneidade serão apresentadas e identificadas entre os planos externo e interno no decorrer de todos os passes.

O oitavo passe, apresentou níveis de deformação em escala predominantes nas duas regiões entre 0,818 e 1,220 com o plano interno indicando predominantemente nas partes mais afastadas do centro valores entre 0,417 e 0,818 que são também apresentados no plano externo, porém com menor intensidade e menor propagação. Esses valores em escala indicam boa homogeneidade na região central e boa aproximação entre os níveis em escala de deformação. Correlação essa destacada no estudo experimental através da aproximação das incertezas nas medidas de dureza, apresentando valores de 6 HV na região externa e 7 HV no plano interno, 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 o plano externo apresenta níveis pouco homogêneos devido à propagação dos níveis de deformação de mesma natureza em direção às arestas do corpo de prova. No plano interno os níveis de heterogeneidade são levemente 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. Foi observado 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, e no oitavo passe foi reduzida tendência de distorção das malhas do plano interno.

Na região central com direção à parte inferior direita, ocorre uma acomodação dos planos de deslizamento e conseqüente 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 do processo. O resultados de Wongsan-Ngam et al. (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 indicando 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 na passagem final, a microestrutura fragmentada já estava em níveis tão elevados de homogeneidade em todo o corpo de prova, demonstrado pela boa aproximação dos níveis de deformação que indicaram a 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. Comportamento demonstrado 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.

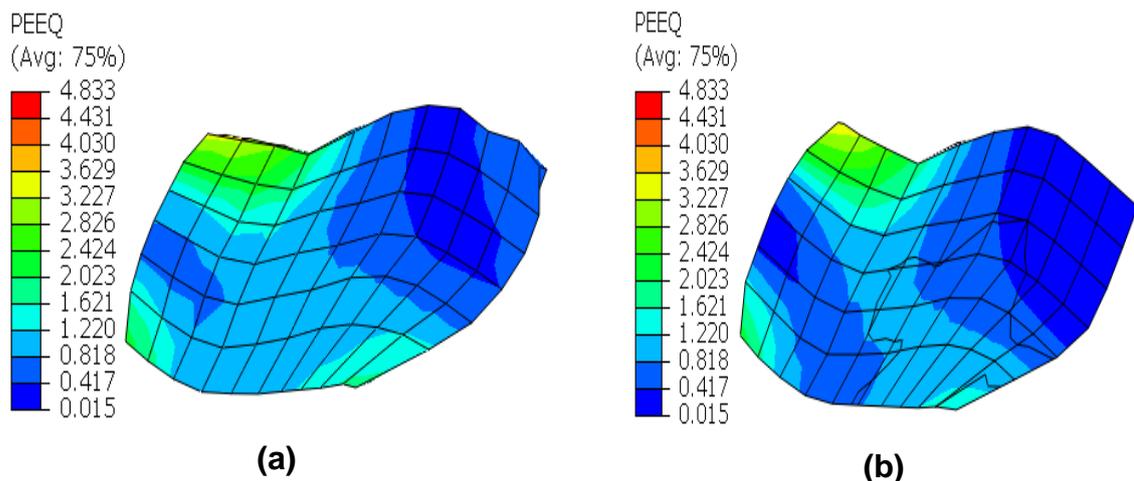


Figura 37. Corpo de prova com 8 passes de deformação ECAP. Plano Y: (a) externo e (b) interno.

Os resultados de Silva (2017) mostraram que o Ti CP deformado por ECAP apresentou estrutura homogênea nas regiões interna e externa. Indicando que a maior homogeneidade do Ti CP foi observada nas pequenas diferenças dos valores das medidas de dureza das regiões externa e interna no plano Y, que foi de aproximadamente 5%, mantendo-se constante para todos os passes realizados experimentalmente.

A simulação numérica indicou tendência similar por meio das análises dos valores em escala PEEQ e complementou o estudo experimental por meio do mapeamento por partes do corpo de prova, verificando os locais com os maiores e os menores níveis de deformação e que poderiam promover redução da homogeneidade de deformação.

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. Na literatura, Wongsan-Ngam et al. (2021) também constataram essa limitação do ECAP. Todos os passes por simulação ilustraram geometrias e formas do tarugo idênticas às obtidas experimentalmente.

7 CONCLUSÕES

- a) 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.
- b) O mapeamento das deformações no plano Y se mostrou efetivo no intuito de analisar os níveis de deformação de forma superficial, mostrando que as regiões da cabeça e cauda do tarugo são desfavoráveis ao processo, fornecendo níveis de deformação heterogêneos nessas regiões em todos os passes, é indicado que as regiões que englobam a cabeça e a cauda do tarugo devam ser removidas ao fim do processo, pois são as partes com maior heterogeneidade nos níveis de deformação visando a utilização estrutural do titânio comercialmente puro deformado via ECAP na rota de processamento A.
- c) Foi identificado que a região do centro do tarugo apresentou muito boa homogeneidade de deformação com níveis em escala se aproximando a cada passe, concluindo o ECAP com níveis muito próximos e destacados nos contornos da análise, onde os valores mínimos indicados por meio da Figura 32 apresentaram boa estabilização dos incrementos e tendência a constância nos níveis de deformação, corroborando com a presença do 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 demonstram bons indícios de elevação dos níveis de deformação através da angulação na dispersão dos pontos plotados.
- d) 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 ao fim do processo.
- e) 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.

f) A associação tanto no mapeamento dos níveis de deformação do plano Y quanto do comparativo entre a simulação numérica e o estudo experimental do plano Y externamente e internamente, mostraram que a análise das deformações promovidas por meio do ECAP em torno da homogeneidade de deformação é um trabalho complexo que requer integração desses estudos para melhor conhecimento dos resultados alcançados por meio do processo, fornecendo dessa forma dados mais detalhados e amplos que geram maior segurança e controle do processamento.

g) Com o aumento do número de passes a homogeneidade de deformação assumiu tendência de elevação, fator comprovado por meio da aproximação entre os níveis de deformação, sendo possível observar com maior detalhamento a partir do quarto passe.

h) 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 ZDP 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.

i) 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.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Estudo numérico sobre a variação da homogeneidade de deformação no plano Z de acordo com a variação do ângulo de curvatura do Ti CP na rota A;
- b) Simulação numérica com comparação experimental por discretizações matemáticas do plano Y via medidas de dureza utilizando o nióbio comercialmente puro na rota Bc;
- c) Estudo do efeito do *die angle* na deformação via ECAP do Ti CP na rota A;
- d) 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 ;
- e) Plotagens do ECAP para analisar a região no plano X do Ti CP;
- f) Análise por elementos finitos dos níveis de deformação em diferentes rotas de processamento para o Ti CP;
- g) Análise por elementos finitos da homogeneidade de deformação para diferentes ângulos de canal $\Phi=110^\circ$ e $\Phi=120^\circ$ para o Ti CP na rota A;
- h) Estudo numérico do ECAP para redução da zona morta por meio da utilização de contrapressão no canal de saída da matriz de deformação;
- i) Estudo numérico com comparação experimental utilizando lâminas paralelas em um passe via ECAP do Ti CP no plano Z analisando o efeito das zonas dos ângulos Φ e Ψ ;
- j) Estudo numérico da evolução da zona de deformação plástica – ZDP do Ti CP processado por ECAP na rota A em até oito passes com corte radial do plano X da zona deformada para análise e mapeamento das deformações;
- k) Simulação numérica com comparação experimental por discretizações matemáticas via medidas de dureza utilizando o nióbio comercialmente puro na rota Bc utilizando diferentes ângulos de curvatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD EL AAL, M. I. 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)**, v. 27, n. 6, p. 1338–1352, 2017.

ABD EL AAL, M. I. Prediction of hardness distribution during SPD process based on FEM simulations: Case study of ECAP and HPT processes. **Materials Research Express**, v. 8, n. 8, 2021.

ABDEL-HADY GEPREEL, M.; NIINOMI, M. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 20, p. 407–415, 1 abr. 2013.

ADEDOKUN, S. T. A Review on Equal Channel Angular Extrusion as a Deformation and Grain Refinement Process. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)**, v. 2, p. 360–363, 2011.

ALATEYAH, A. I. et al. Experimental and numerical investigation of the ecap processed copper: Microstructural evolution, crystallographic texture and hardness homogeneity. **Metals**, v. 11, n. 4, 2021.

ALATEYAH, A. I. et al. 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**, v. 17, p. 1491–1511, 1 mar. 2022.

ALMEIDA, N. G. S. et al. Hardness, Microstructure and Strain Distributions in Commercial Purity Aluminum Processed by Multi Directional Forging (MDF). **Materials Research**, v. 23, n. 4, p. 12, 2020.

AWANG SH'RI, D. N. et al. Finite element simulation of equal channel angular pressing: Effect of die angle and number of passes. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 16, n. 1, p. 6402–6414, 2019.

AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1º ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

AZEVEDO, A. G. Monocristais e policristais, uma avaliação dos métodos de obtenção e caracterização. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 11, n. 2, p. 442–454, 23 dez. 2013.

AZUSHIMA, A. et al. Severe plastic deformation (SPD) process for metals. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, p. 716–735, 31 dez. 2008.

BANERJEE, D.; WILLIAMS, J. C. Perspectives on Titanium Science and Technology. **Acta Materialia**, The Diamond Jubilee Issue. v. 61, n. 3, p. 844–879, 1 fev. 2013.

BASAVARAJ, P. V.; CHAKKINGAL, U.; KUMAR, P. T. S. Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing

using 3D finite element simulation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 1, p. 89–95, 1 jan. 2009.

BAUER, J. R. DE O. **Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V fundidos em diferentes ambientes**. Tese de Doutorado—São Paulo, SP: Universidade de São Paulo, 2007.

BELUCO, J. A. **Simulação Computacional do Roleteamento de Eixo Virabrequim de Compressor Monocilíndrico de Ferro Fundido Nodular Austemperado**. Dissertação de Mestrado—Belo Horizonte - MG: Universidade Federal de Minas Gerais, mar. 2011.

BERNARDI, H. H. **Processamento e caracterização microestrutural de nióbio deformado plasticamente por extrusão em canal angular**. Tese de Doutorado—São Paulo, SP: Universidade de São Paulo (USP). Escola de Engenharia de Lorena, 17 abr. 2009.

CHEN, Q.; THOUAS, G. A. Metallic implant biomaterials. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 87, p. 1–57, 1 jan. 2015.

DHAL, A.; PANIGRAHI, S. K.; SHUNMUGAM, M. S. Insight into the microstructural evolution during cryo-severe plastic deformation and post-deformation annealing of aluminum and its alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 726, p. 1205–1219, 5 dez. 2017.

DUNNE, F. P. E. Inhomogeneity of microstructure in superplasticity and its effect on ductility. **International Journal of Plasticity**, v. 14, n. 4, p. 413–433, 1 jan. 1998.

ELIAS, C. N. et al. Ultrafine grained titanium for biomedical applications: An overview of performance. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 4, p. 340–350, 1 out. 2013.

EMI, E. T. P. **Caracterização das propriedades mecânicas de osso irradiado, utilizando ensaios destrutivos e não destrutivos**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 26 fev. 2014.

FERRASSE, S.; SEGAL, V. M.; ALFORD, F. Texture evolution during equal channel angular extrusion (ECAE): Part II. An effect of post-deformation annealing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 372, n. 1, p. 235–244, 15 maio 2004.

GEETHA, M. et al. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. **Progress in Materials Science**, v. 54, n. 3, p. 397–425, 1 maio 2009.

GIORJÃO, R. A. R. **Análise experimental e numérica dos fenômenos térmicos, mecânicos e metalúrgicos do processo de soldagem por atrito com pino não consumível em liga de magnésio AZ31**. Dissertação de Mestrado—São Paulo, SP: Universidade de São Paulo, 9 abr. 2019.

GRIZA, S. et al. Microstructure and mechanical properties of hot rolled TiNbSn alloys. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 56, p. 200–208, 1 abr. 2014.

GU, Y. et al. Microstructure and tensile anisotropy of pure Ti processed by up-scaled RD-ECAP. **Materials Characterization**, v. 168, 2020.

HUANG, Z. et al. Effects of Different Annealing Cooling Methods on the Microstructure and Properties of TA10 Titanium Alloys. **Journal of Materials Research and Technology**, 3 maio 2022.

LEE, S.-H. et al. Strengthening of Sheath-Rolled Aluminum Based MMC by the ARB Process. **Materials Transactions, JIM**, v. 40, p. 1422–1428, 1 dez. 1999.

LEO, P. et al. Properties and deformation behaviour of severe plastic deformed aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 182, n. 1, p. 207–214, 2 fev. 2007.

LIMA, G. G. DE. **Propriedades mecânicas e de biotividade de filmes anódicos de titânio, contendo íons de Ca e P, submetidos a tratamentos térmicos e de hidrotérmicos**. Dissertação de Mestrado—Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

MAHALLAWY, N. E. et al. 3D FEM simulations for the homogeneity of plastic deformation in Al–Cu alloys during ECAP. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 6, p. 1404–1410, 15 mar. 2010.

MATHAUDHU, S. et al. Severe plastic deformation of bulk Nb for Nb₃Sn superconductors. **Applied Superconductivity, IEEE Transactions on**, v. 15, p. 3438–3441, 1 jul. 2005.

MU, S. J.; HU, W. P.; GOTTSTEIN, G. Investigations on Deformation Behavior and Microstructure of Ultrafine Grained Two Phase Al-Mn Alloy Fabricated by Confined Channel Die Pressing. **Materials Science Forum**, v. 584–586, p. 697–702, 2008.

NAKASHIMA, K. et al. Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains. **Materials Science and Engineering: A**, v. 281, n. 1, p. 82–87, 15 abr. 2000.

NAKASONE, Y.; YOSHIMOTO, S.; STOLARSKI, T. A. **Engineering analysis with ANSYS software**. Amsterdam: Elsevier, 2006.

NASCIMENTO, S. F. et al. Análise Numérica e Experimental da Deformação Durante a Laminação Assimétrica para Diferentes Relações de Velocidade Tangencial na Liga AA1050. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 12, 2016.

PEREIRA, B. L. **Avaliação das propriedades mecânicas e da adesão de filmes de óxidos obtidos por anodização em substrato de nióbio**. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 2015.

PINHO, A. G. DE. **Modelação e otimização de ferramentas de conformação plástica de chapa**. Dissertação de Mestrado—Aveiro: Universidade de Aveiro, 2013.

REN, G.; ZHAO, G.; XU, S. Numerical Simulation and Experimental Study of AZ31 Magnesium Alloy Deformation Behavior in ECAP. **Advanced Materials Research**, v. 148–149, p. 227–231, 1 out. 2010.

ROODPOSHTI, P. S. et al. Microstructural approach to equal channel angular processing of commercially pure titanium—A review. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 25, n. 5, p. 1353–1366, 1 maio 2015.

SABIROV, I.; MURASHKIN, M.; VALIEV, R. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development. **Materials Science and Engineering A**, v. 560, p. 1–24, 10 jan. 2013.

SALLES, F. P. **Aplicação do Método de Elementos Finitos para Aprimoramento da Análise de Motores de Indução Trifásicos Acionados por Inversores**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, maio 2008.

SANTOS, R. T. F. DOS. **Estudo da deformação de nióbio empregando a técnica de prensagem em canais equiangulares (ECAP)**. Dissertação de Mestrado—São Cristóvão, SE: Universidade Federal de Sergipe, 22 fev. 2018.

SEGAL, V. M.; REZNIKOV, V.; DROBYSHEVSKIY, A. Plastic Working of Metals by Simple Shear. **Russian Metallurgy**, v. 1, p. 99–105, 1981.

SILVA, S. M. DA. **Simulação numérica e otimização em conformação plástica de chapas metálicas**. Dissertação de Mestrado—Aveiro: Universidade de Aveiro, 2010.

SILVA, K. F. D. **Efeito do processo ECAP sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga Ti-35Nb-0,15Si e do Ti CP**. São Cristóvão, SE: Universidade Federal de Sergipe, 2017.

SIMULIA. **Abaqus User's Manual**. CA, USA: Abaqus Inc.: Palo Alto, 2020.

SORDI, V. L. et al. Microstructure and tensile strength of grade 2 titanium processed by equal-channel angular pressing and by rolling. **Journal of Materials Science**, v. 47, n. 22, p. 7870–7876, 1 nov. 2012.

SU, C. W.; LU, L.; LAI, M. O. 3D finite element analysis on strain uniformity during ECAP process. **Materials Science and Technology**, v. 23, n. 6, p. 727–735, 1 jun. 2007.

SUO, T. et al. The simulation of deformation distribution during ECAP using 3D finite element method. **Materials Science and Engineering: A**, v. 432, n. 1, p. 269–274, 25 set. 2006.

TSUJI, N. et al. ARB (Accumulative Roll-Bonding) and Other New Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials. **Advanced Engineering Materials**, v. 5, p. 338–344, 16 maio 2003.

VALIEV, R. Z. et al. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. **JOM**, v. 58, n. 4, p. 33–39, 1 abr. 2006.

VALIEV, R. Z. et al. Superstrength of nanostructured metals and alloys produced by severe plastic deformation. **The Physics of Metals and Metallography**, v. 113, n. 13, p. 1193–1201, 1 dez. 2012.

VALIEV, R. Z.; LANGDON, T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. **Progress in Materials Science**, v. 51, n. 7, p. 881–981, set. 2006.

VALIEV, R. Z.; LANGDON, T. G. Achieving Exceptional Grain Refinement through Severe Plastic Deformation: New Approaches for Improving the Processing Technology. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 42, n. 10, p. 2942–2951, 1 out. 2011.

VALIEV, R. Z.; LANGDON, T. G. Report of International NanoSPD Steering Committee and statistics on recent NanoSPD activities. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 63, p. 12, 8 ago. 2014.

VAZ, L. E. **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. 1º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VIEIRA, D. DA S.; COELHO, N. DE A. Utilização do Método dos Elementos Finitos no Estudo Térmico de Elementos Simples de Concreto. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 6, p. 16, 2020.

WONGSA-NGAM, J. et al. Numerical Investigation of Plastic Strain Homogeneity During Equal-Channel Angular Pressing of a Cu-Zr Alloy. **Crystals**, v. 11, p. 1505, 3 dez. 2021.

WONGSA-NGAM, J.; KAWASAKI, M.; LANGDON, T. G. The development of hardness homogeneity in a Cu–Zr alloy processed by equal-channel angular pressing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 556, p. 526–532, 30 out. 2012.

WU, H. et al. Fabrication of an Ultra-Fine Grained Pure Titanium with High Strength and Good Ductility via ECAP plus Cold Rolling. **Metals**, v. 7, n. 12, p. 563, dez. 2017.

XAVIER, D. G. **Análise de Tensões e Deformações Mecânicas em Conexões Protéticas de Implantes Straumann pelo Método de Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado—Belo Horizonte - MG: Pontifícia Universidade Católica, 2011.

ZHANG, D. et al. Simulation and Experimental Investigation for the Homogeneity of Ti49.2Ni50.8 Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing. **Metals**, v. 6, p. 45, 25 fev. 2016.

ZHANG, Y. et al. Mechanical and biological properties of Ti–(0–25 wt%)Nb alloys for biomedical implants application. **Regenerative Biomaterials**, v. 7, n. 1, p. 119–127, 1 fev. 2020.

ZHAO, X. et al. Microstructure and properties of pure titanium processed by equal-channel angular pressing at room temperature. **Scripta Materialia**, v. 59, n. 5, p. 542–545, 1 set. 2008.

ZHILYAEV, A. P.; LANGDON, T. G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. **Progress in Materials Science**, v. 53, n. 6, p. 893–979, 1 ago. 2008.

ZHOU, Y.-L.; NIINOMI, M. Ti–25Ta alloy with the best mechanical compatibility in Ti–Ta alloys for biomedical applications. **Materials Science and Engineering: C**, Development of Nanostructures for Medicine Special Issue. v. 29, n. 3, p. 1061–1065, 30 abr. 2009.