



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Processos de Deformação Plástica Severa

Cecilia Resende Soares

Ouro Preto, junho de 2023

Cecilia Resende Soares

Processos de Deformação plástica severa

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia Metalurgista.

Orientadora: Prof.^a Maria Aparecida Pinto

Coorientadora: Prof.^a Paula Cibely Alves Flausino

Ouro Preto, junho de 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S676p Soares, Cecilia Resende.
Processos de deformação plástica severa. [manuscrito] / Cecilia
Resende Soares. - 2023.
29 f.: il..

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.
Coorientadora: Profa. Dra. Paula Cibely Alves Flausino.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Deformações e tensões - Deformação Plástica Severa (DPS). 2.
High-PressureTorsion (HPT). 3. Laminação (Metalurgia). 4. Extrusão
Angular em Canal (EAC). I. Pinto, Maria Aparecida. II. Flausino, Paula
Cibely Alves. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 669

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Cecília Resende Soares

Processos de deformação plástica severa

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista

Aprovada em 07 de Junho de 2023

Membros da banca

Dr.^a Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr.^a Paula Cibely Alves Flausino - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr.^a Nayara Aparecida Neres da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Daniel Fraga Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/06/2023



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/07/2023, às 10:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0551371** e o código CRC **27A6AE29**.

RESUMO

Os processos de Deformação Plástica Severa (DPS) têm sido pesquisados e utilizados como métodos para obtenção de metais e ligas metálicas com elevada resistência mecânica, por meio de refino de grão, aliado à elevada densidade de discordâncias. Esses processos, como quaisquer outros, apresentam vantagens, como, não ser necessário realizar qualquer tipo de tratamentos térmicos depois do processamento, não é necessário um controle rígido das temperaturas atingidas e a inexistência de poros nas peças finais. Como desvantagens relacionadas ao processo, pode-se citar que a deformação plástica aplicada é muito maior, comparada com a deformação aplicada em outros processos de conformação mecânica, exigindo uma carga de trabalho muito grande, os estudos são restritos a materiais com baixo limite de escoamento e também há um impasse na mudança da escala laboratorial para a escala industrial. Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as características do processo de DPS e uma descrição acerca das diferentes técnicas de DPS, entre elas: Torção sob alta pressão (HPT); Extrusão em canal angular (ECAP); *Accumulative Roll-Bonding* (ARB) e Forjamento multidirecional (MDF).

Palavras-chave: Deformação Plástica Severa. Torção sob alta pressão. Extrusão em canal angular. *Accumulative Roll-Bonding*. Forjamento multidirecional.

ABSTRACT

The Severe Plastic Deformation (SPD) processes have been researched and used as methods for obtaining metals and metallic alloys with high mechanical resistance, through grain refining, combined with the high density of dislocations. These processes, like any others, have advantages, such as: it is not necessary to carry out any type of heat treatment after processing, it is not necessary to strictly control the temperatures reached and the absence of pores in the final parts. As disadvantages related to the process, it can be mentioned that: the applied plastic deformation is much greater, compared to the deformation applied in other mechanical forming processes, requiring a very large workload, the studies are restricted to materials with low yield strength and there is also an impasse in moving from laboratory to industrial scale. In this work, a literature review was carried out about the characteristics of the SPD process and a description of different SPD techniques, including: High Pressure Torsion (HPT); Equal Channel Angular Pressing (ECAP); Accumulative Roll-Bonding (ARB) and Multi Directional Forging (MDF).

Keywords: *Severe Plastic Deformation. High Pressure Torsion. Equal Channel Angular Extrusion. Accumulative Roll-Bonding. Multi Directional Forging.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 4. 1 - (a) Deformação por escorregamento e (b) deformação por maclação em monocristal submetido a uma tensão cisalhante τ	13
Figura 4. 2 - Representação esquemática do equipamento para HPT	14
Figura 4. 3 - Ilustração do processo ARB	16
Figura 4. 4 - Influência da temperatura de laminação	17
Figura 4. 5 - Representação do princípio de funcionamento da ECAP, mostrando o material passando pelo interior da matriz e sofrendo cisalhamento	19
Figura 4. 6 - As quatro rotas de processamento por ECAP	20
Figura 4. 7 - Representação esquemática do MDF.....	21
Figura 4. 8 - Representação do MDF para as diferentes condições de processamento, compressão: a) livre; b) com restrição em uma direção; c) confinado	22

LISTA DE SIGLAS

ARB - *Accumulative Roll-Bonding*

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

DPS - Deformação Plástica Severa

ECAP - Extrusão em canal angular

HPT - Torção sob alta pressão

IF – Interstitial Free

MAC - *Multi Axial Compression*

MDF - Forjamento multidirecional

UFG - Granulometria ultrafina

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	10
2.1	Objetivo Geral.....	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
3	METODOLOGIA.....	11
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
4.1	Deformação Plástica.....	12
4.2	Deformação Plástica Severa (DPS).....	13
4.3	Deformação Plástica Severa por Torção sob alta pressão (HPT).....	14
4.4	Deformação Plástica Severa por <i>Accumulative Roll Bonding</i> (ARB).....	15
4.5	Deformação Plástica Severa por Extrusão em Canal Angular (ECAP).....	18
4.6	Deformação Plástica Severa por Forjamento Multidirecional (MDF).....	21
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
6	CONCLUSÕES.....	26
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho será apresentada, dentro do universo da conformação mecânica de metais, um estudo bibliográfico dos vários processos de deformação plástica severa. O termo conformação refere-se a um conjunto de técnicas que visa modificar a forma da peça, podendo ser classificado em dois grupos: processos mecânicos e processos metalúrgicos. No primeiro, as transformações do formato são estimuladas por tensões externas, com a possibilidade de altas temperaturas, porém sem liquefazer o metal da peça. No segundo, as mudanças podem também estar relacionadas a tensões externas ocorrendo liquefação do metal devido às altas temperaturas. Os processos mecânicos, no geral, são formados pelos processos de conformação plástica, na qual as tensões são menores que o limite de resistência à ruptura do material, não ocorrendo retirada de material da peça. Atingindo-se a tensão limite de escoamento ocorre o início da deformação plástica (FERREIRA, 2006).

Os processos de conformação mecânica tradicionais não produzem peças com grãos ultrafinos, sendo o tamanho de grão mínimo conseguido na ordem de 1mm a 10mm. Os processos de Deformação Plástica Severa (DPS) proporcionam um refino dos grãos dentro da faixa submicrométrica ou mesmo nanométrica (DINIZ *et al.*, 2014; LOPES, 2020).

Segundo Valiev *et al.* (2006), as técnicas de DPS hoje são descritas como “qualquer método de conformação plástica sob uma tensão elevada que pode ser usado para impor uma alta deformação no sólido sem a introdução de qualquer mudança significativa nas dimensões gerais da amostra e com a habilidade de produzir um refino de grão excepcional” (VALIEV *et al.*, 2006).

Os processos de DPS têm despertado muito interesse uma vez que o refino de grão obtido na peça em deformação é imponente ao longo de sua espessura, possibilitando utilidades estruturais e obtenção de uma estrutura com granulometria ultrafina (UFG). Vale destacar que o tamanho de grão pequeno não é o único parâmetro necessário para se conseguir as características diferenciadas de peças submetidas a DPS (GODOI, 2018).

Na DPS a presença de grãos ultrafinos, além de promover o aumento da resistência mecânica de várias ligas, favorece a ductilidade o que pode proporcionar grandes quantidades de deformação plástica a altas temperaturas e, com a imposição de baixas taxas de deformação,

pode levar à superplasticidade (NIEH, WADSWORTH, SHELBY, 2005). A superplasticidade nos materiais é influenciada por outros critérios envolvendo a peça, entre eles: os constituintes do contorno de grão a qual interfere no deslizamento de contorno de grão (o deslizamento em uma fase heterogênea ocorre de maneira mais rápido do que em uma fase homogênea), grãos equiaxiais, alto ângulo de desorientação entre os grãos e ocorrência de precipitados de segunda fase. Este último critério é imprescindível uma vez que durante a DPS as peças podem ficar sujeitas a altas temperaturas mais de uma vez e, sem essas partículas de segunda fase, poderia acontecer um crescimento de grão, não favorecendo a ocorrência de um material superplástico (DINIZ *et al.*, 2014).

O grande interesse nos materiais submetidos a processos de DPS é devido ao aumento significativo da resistência mecânica desses, consequência da presença de grãos ultrafinos. No presente trabalho foi elaborada uma revisão bibliográfica sobre as diferentes técnicas de DPS, podendo-se destacar algumas, entre elas: Torção sob alta pressão (HPT); Extrusão em canal angular (ECAP); *Accumulative Roll-Bonding* (ARB) e Forjamento multidirecional (MDF).

2 OBJETIVOS

Para o desenvolvimento desse trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos:

2.1 Objetivo Geral

Apresentar uma revisão bibliográfica sobre o método de Deformação Plástica Severa e os processos que envolvem esse tipo de deformação.

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever as características do processo de Deformação Plástica Severa;
- Descrever os tipos de processos que envolvem a deformação plástica severa
 - Torção sob alta pressão (HPT)
 - Extrusão em canal angular (ECAP)
 - *Accumulative Roll-Bonding* (ARB)
 - Forjamento multidirecional (MDF).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi uma pesquisa de fontes de referência para realizar uma revisão bibliográfica acerca do método de Deformação Plástica Severa e processos que envolvem esse tipo de deformação. Para tanto, foi realizado um levantamento de publicações dos últimos dez anos sobre o tema em artigos, livros, monografias, teses e dissertações, a leitura e seleção do material com registro dos dados relevantes e, em seguida, a análise e discussão dos dados para elaboração da monografia.

A pesquisa foi realizada por meio do portal periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), utilizando o acervo da lista de base de dados *Web of Science e Springer Book Archives*, cujo acesso está disponível para a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica acerca das principais características e os principais processos de deformação plástica severa.

4.1 Deformação Plástica

As técnicas de conformação plástica requerem boa plasticidade dos materiais envolvidos, visto que esses precisam se deformar com maior facilidade, permanecendo com certa resistência para suportar os esforços recorrentes do processo de conformação. Por isso, exige-se equilíbrio em conformabilidade, habilidade do material suportar a deformação plástica e resistência mecânica a fim de que o processo ocorra sem rupturas das peças. A conformabilidade e resistência mecânica são dois parâmetros incompatíveis sendo um desafio para as indústrias uni-los nos processos de conformação para alcançar os objetivos do processo: uma granulometria ultrafina dos materiais. Isso decorre do fato que o refino de grão é o único mecanismo de endurecimento capaz de promover um aumento na resistência mecânica e tenacidade ao mesmo tempo (FERREIRA, 2006).

Um material metálico sob esforço mecânico alcança uma tensão limite, chamada tensão limite de escoamento, momento que se inicia a deformação plástica. A deformação pode ocorrer por dois meios estruturais no cristal do material: escorregamento e maclação (FERREIRA, 2006). No primeiro, a deformação plástica acontece por deslizamento de planos de índices baixos e em direções preferenciais na estrutura cristalina do material (Figura 4.1a). São planos e direções que precisam de menor energia para que ocorra a deformação, formando os sistemas de deslizamento (FERREIRA, 2006). Os átomos movem-se em várias distâncias de um átomo para outro, de modo a dar continuidade à estrutura cristalina. Na maclação (Figura 4.1b) parte da estrutura sofre um desnível em relação à outra parte, na qual, diferente do escorregamento, os planos deslocam-se para manter uma continuidade nas distâncias deslocadas pelos átomos de plano em relação aos átomos de outro plano (FERREIRA, 2006). O processo de deformação também envolve tensões de cisalhamento sendo essa a tensão necessária para que o plano se desloque sobre outro (FERREIRA, 2006).

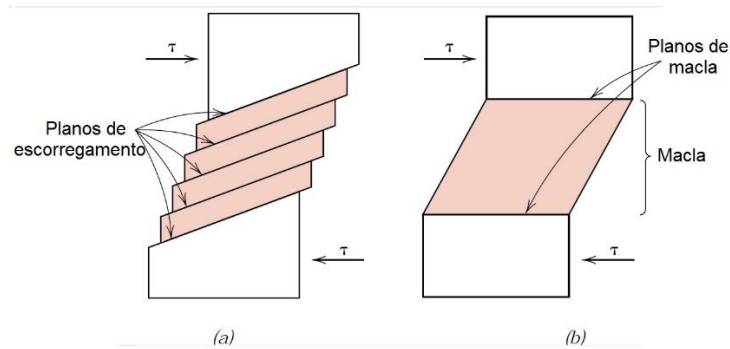


Figura 4. 1 - (a) Deformação por escorregamento e (b) deformação por maclação em monocristal submetido a uma tensão cisalhante τ
(CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2013)

4.2 Deformação Plástica Severa (DPS)

A maneira como os materiais metálicos se comportam mecanicamente está diretamente relacionado ao tamanho de grão que a estrutura do material metálico apresenta, uma vez que a resistência mecânica aumenta cada vez que o tamanho do grão diminui. Uma oportunidade que tem sido recorrente, devido à eficácia do processo e atendimento dos objetivos de refino dos grãos nas estruturas metálicas, é por meio de técnicas de Deformação Plástica Severa. Esses processos de DPS são estabelecidos como forma de conformação plástica que requer uma grande tensão aplicada, estabelecendo uma alta deformação na peça submetida, obtendo grãos ultrafinos na estrutura e sem modificar as dimensões gerais da peça (GODOI, 2018).

A redução do tamanho de grãos de peças metálicas pelos métodos de DPS é considerável, sendo que são os que oferecem maior refino de grão, alcançando valores inferiores a $1\mu\text{m}$, chegando a 10nm em alguns processos. As temperaturas de processamento em DPS variam desde a temperatura ambiente atingindo cerca de 500°C (CALADO, 2012). Observando que várias características dos metais estão diretamente relacionadas ao tamanho do grão na estrutura cristalina, o método de DPS produz materiais com especificidades distintas (FIGUEIREDO e LANGDON, 2012).

As técnicas de DPS, como qualquer outro método de refino de grão, apresentam vantagens e desvantagens. As vantagens se associam à não necessidade de realizar qualquer tipo de tratamentos térmicos depois do processamento, não é necessário um controle rígido das temperaturas atingidas e a inexistência de poros nas peças. Entre as desvantagens observa-se que a deformação plástica aplicada é muito maior, comparada com a deformação aplicada em

outros processos de conformação mecânica, exigindo uma carga de trabalho muito grande, que restringe os estudos a materiais com baixo limite de escoamento e também há um impasse na mudança da escala laboratorial para a escala industrial (CALADO, 2012).

4.3 Deformação Plástica Severa por Torção sob alta pressão (HPT)

A técnica de torção sob alta pressão (*High Pressure Torsion* - HPT) é uma das técnicas mais eficazes para obtenção de uma granulometria ultrafina podendo ser aplicada em materiais com alta dureza em função da pressão hidrostática elevada (ZHANG *et al.*, 2017). Peças em formato de discos são utilizadas no método de HPT como mostrado na Figura 4.2. A amostra com o diâmetro entre 10mm e 15mm e espessura de 1mm é alojada entre duas matrizes e submetida a uma carga uniaxial de pressão (P) e, então, deformado por torção por meio da rotação de uma das matrizes (LOPES, 2020).

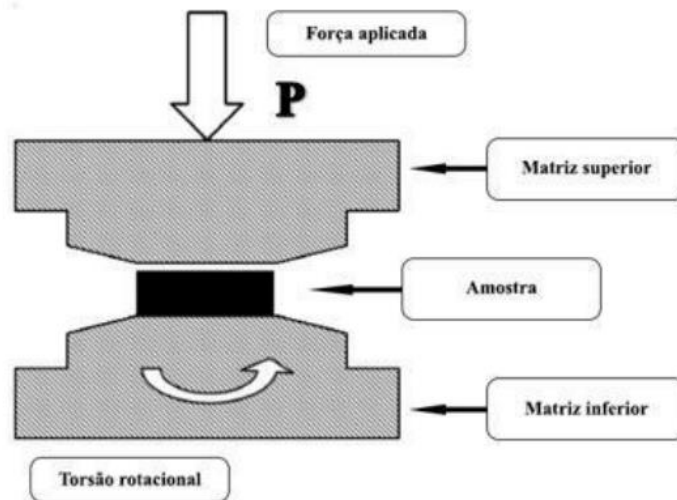


Figura 4. 2 - Representação esquemática do equipamento para HPT (LOPES, 2020).

Alguns detalhes restringem a pressão aplicável nessa técnica uma vez que o material da amostra flui limitando o aumento da pressão e, além disso, a pressão não pode ser maior que a resistência à compressão das matrizes (EDALATI e HORITA, 2016).

A deformação de cisalhamento, γ , durante a rotação no processo HPT é dada pela Equação 4.1, desde que a espessura do disco permaneça constante durante a deformação.

$$\gamma = \frac{r\theta}{h} \quad 4.1$$

Na Equação 4.1, r é a distância do centro do disco, $\theta = 2\pi N$ é o ângulo de rotação em radianos (N é o número de voltas) e h é a espessura do disco. Apesar da confiabilidade da Equação 3.1, há alguns argumentos que reorganizam o cálculo da deformação equivalente abordando o cálculo de deformação de torção, sendo as três Equações 4.2, 4.3 e 4.4 as principais usadas (EDALATI e HORITA, 2016).

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad 4.2$$

$$\varepsilon = \ln(\gamma) \quad 4.3$$

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{\gamma}{2} + \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}} \right) \quad 4.4$$

A primeira, Equação 4.2, é a mais aceita como sendo a equação físico-matemática mais adequada para os cálculos de deformação equivalente para grandes deformações de cisalhamento na DPS.

A relevância das técnicas de HPT tem se mostrado significativa uma vez que características como aumento da resistência mecânica, aumento da condutividade térmica e elétrica, aumento da resistência à corrosão, superplasticidade, dentre outras propriedades funcionais são atingidas e são de extrema importância para aplicação em peças metálicas trabalhadas (LOPES, 2020; EDALATI e HORITA, 2016).

4.4 Deformação Plástica Severa por *Accumulative Roll Bonding* (ARB)

A DPS por Accumulative Roll Bonding (ARB) ou Junção por Laminação Acumulada (JLA) ou é uma variação da junção por laminação a frio, sendo um método aplicado para superar as limitações que outros processos de DPS apresentam, como as técnicas da Extrusão em Canal Angular (ECAP) e da Torção sob Alta Pressão (HPT) que possuem baixa produtividade e dimensões reduzidas das amostras. O ponto mais vantajoso da ARB é a aplicação da acessibilidade da laminação convencional, como mostrado na Figura 4.2 (GODOI, 2018).

As peças, em formato de chapas, são lixadas e limpas com solventes orgânicos para eliminação da sujeira, assim consegue-se uma soldagem melhor entre as chapas. Considerando a estabilidade mecânica da amostra, a qualidade da junção é de extrema importância uma vez que uma junção de baixa qualidade pode conduzir ao início de falha, diminuindo a deformação do material (CALADO, 2012; GODOI, 2018).

As chapas são submetidas à laminação de maneira sobreposta para se conseguir uma única chapa, que é posteriormente cortada e duas seções idênticas, empilhadas e relaminadas. As fases de laminar as chapas em conjunto, fazer corte no centro de seu comprimento, preparação superficial, empilhamento das partes obtidas e relaminação se repete continuamente, sendo todo processo conduzido sob temperaturas moderadas e suficientes para obter uma soldagem bem feita entre as chapas, não interferindo na ductilidade da peça. A faixa de temperatura não pode ultrapassar a temperatura de recristalização do material, o que acarretaria o cancelamento das deformações acumuladas durante o processo de colaminação (CALADO, 2012).

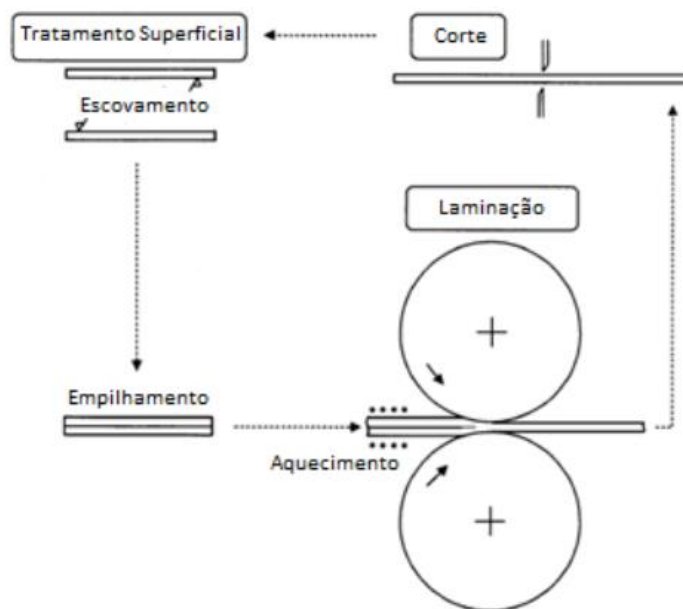


Figura 4. 3 - Ilustração do processo ARB (GODOI, 2018)

O maior destaque das técnicas de ARB é a capacidade de refino de grão. A granulometria do material se relaciona de forma direta com as propriedades mecânicas do

mesmo. Quanto às propriedades em tração percebe-se que, após o procedimento de ARB, tem-se um aumento da resistência mecânica e uma diminuição no alongamento dos grãos. Outro aspecto relacionado à granulometria refinada é a dureza, uma vez que seu aumento está ligado ao número de passes no processo. Segundo Su *et al.* (2014) “após o 1º passe houve um aumento significativo no valor da dureza, por volta de 2 vezes o valor inicial”. Esse impacto se deve à tensão de cisalhamento que a superfície da amostra fica submetida devido ao atrito entre os cilindros e as chapas (amostras), assim, quanto mais ciclos de ARB processados, mais uniforme o perfil da espessura (SU *et al.*, 2014).

Outro detalhe importante é a temperatura de processo, que deve ser definida com todos os cuidados. A temperatura influencia a laminação na resistência da junção e observa-se que, em temperaturas mais levadas, as junções podem ser mais resistentes, como mostrado na Figura 4.4.

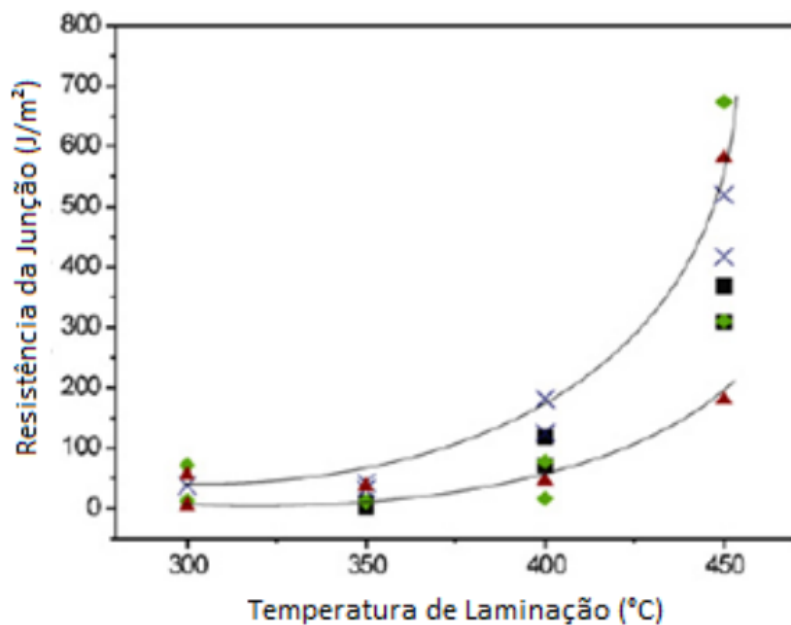


Figura 4. 4 - Influência da temperatura de laminação (GODOI, 2018)

Entretanto, a definição da temperatura de processo utilizada deve ser estudada e analisada já que baixas temperaturas causam ductilidade insuficiente, resultando em uma junção de baixa qualidade, enquanto que temperaturas muito elevadas (acima da temperatura de

recristalização do material) podem causar o cancelamento da deformação acumulada (GODOI, 2018).

Desta forma observam-se mais vantagens do processo ARB: a aplicação de grande quantidade de deformação, sem afetar acentuadamente as dimensões da amostra, proporcionando materiais de alta resistência mecânica sem adição de elementos de liga ou tratamento termomecânicos. Outras vantagens desse processo são a não exigência de maquinário com alta capacidade de carga e matrizes caras; ter produtividade contínua e elevada; e possibilitar uma quantidade de material produzido não limitada. Os principais pontos negativos são alta probabilidade de ocorrência de defeitos devido a uma junção não efetiva e a manutenção da textura típica de laminação convencional (EIZADJOU, MANESH; JANGHORABAN, 2009).

Contrapondo o processo ARB com outras técnicas de DPS, a ARB mostra maior potencial para produção em grande escala, obtendo-se peças com dimensões suficientes para aplicações práticas, e tem sido estudado, principalmente, como uma rota de processamento de chapas de aços livres de intersticiais (aços IF) (SAITO *et al.*, 1999)

As propriedades de materiais obtidas por processamento ARB evidenciam a evolução microestrutural e a formação de grãos ultrafinos como consequência de um processo de recristalização dinâmica contínua. Esse processo de recristalização é caracterizado pela subdivisão de grãos e recuperação e migração de curta distância de subcontornos de grãos para formar grãos de alto ângulo de desorientação. Esses grãos de alto ângulo são os que mais influenciam nas propriedades mecânicas dos materiais metálicos, como o limite de escoamento, limite de resistência, tenacidade e superplasticidade (TSUJI *et al.*, 2003).

4.5 Deformação Plástica Severa por Extrusão em Canal Angular (ECAP)

No universo de DPS um dos processos mais conhecidos é a extrusão em canal angular (ECAP). Essa técnica se baseia em aplicar uma força sobre uma amostra metálica, forçando sua passagem por uma matriz que possui dois canais de seção transversal iguais, com intersecção

em um ângulo ϕ (ângulo pode variar de $60^\circ < \phi < 135^\circ$, comum utilizar 90°), como mostra a Figura 4.5 (QUARTIERMEISTER, 2017)

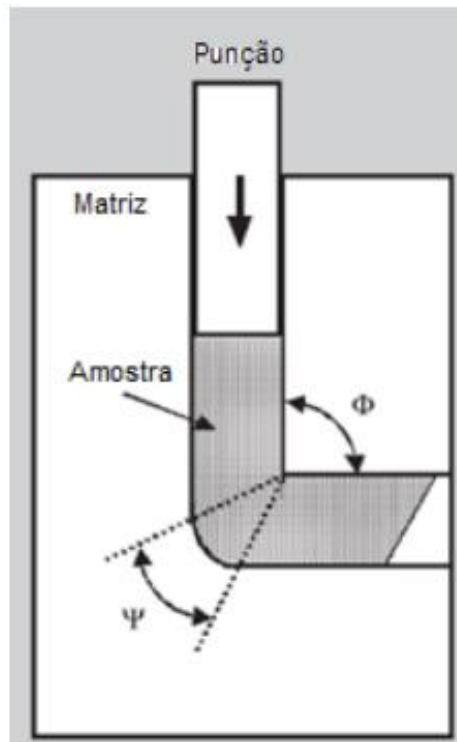


Figura 4. 5 - Representação do princípio de funcionamento da ECAP, mostrando o material passando pelo interior da matriz e sofrendo cisalhamento (VALIEV *et al.*, 2006).

A deformação se dá por cisalhamento, paralelo ao plano comum dos canais, que está direcionado ao redor desse plano. Entretanto, alguns estudos mostraram que na realidade o cisalhamento é espalhado sobre a zona de deformação (VERLINDEN, 2005). A deformação equivalente ϵ_N pode ser calculada a partir da Equação 4.5:

$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\psi}{2} + \frac{\phi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\psi}{2} + \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad 4.5$$

Desconsiderando o atrito, a expressão chama a atenção para os ângulos Ψ (ângulo do canto redondo da matriz) e ϕ (ângulo de cruzamento dos canais com seções transversais idênticas), como também o número de passes (N) no processo (VERLINDEN, 2005).

Como os canais possuem seção transversal idêntica, o formato da peça permanece o mesmo e, por isso, em tese, o processo pode se repetir N vezes. Se essa seção transversal tem eixo de simetria no valor 4, a peça pode ser submetida a rotação em 90° ou 180° , em relação à direção de extrusão, antes de ser colocada novamente na matriz (VERLINDEN, 2005).

Outro critério essencial no ECAP é o caminho dos passes. São estipulados quatro caminhos, como evidenciado na Figura 4.6. Cada caminho influencia diretamente a microestrutura final da peça, uma vez que, em cada um deles há ativação de sistemas de ativação diferentes (QUARTIERMEISTER, 2017). Quatro rotas básicas foram estabelecidas nas quais o processo pode ser repetido (LANGDON *et al.*, 2000).

1

Rota A: A rotação é de 0° entre cada passe.

Rota B_A: A rotação é de 90° entre cada passe, alterando o sentido de rotação no passe seguinte.

Rota B_C: A rotação é de 90° entre cada passe, mantendo sempre o mesmo sentido de rotação no passe seguinte.

Rota C: A rotação é de 180° entre cada passe.

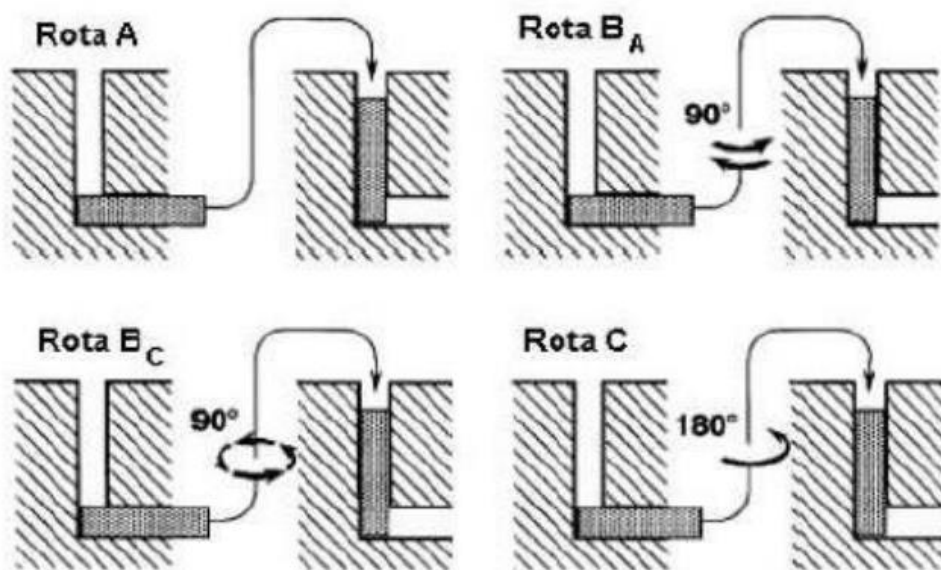


Figura 4. 6 - As quatro rotas de processamento por ECAP (LANGDON *et al.*, 2000)

Observando por meio da atividade de deslocamento, ocorre uma mudança de caminho da deformação entre 2 passagens do ECAP. Essa mudança depende do ângulo da matriz φ e do ângulo de rotação ϕ . Em geral pode-se dizer que o ECAP produz tamanhos de grão de 300nm a 500nm (VERLINDEN, 2005). E como outros métodos de DPS, o ECAP eleva as propriedades mecânicas dos materiais acarretando um aumento no limite de escoamento e no limite de resistência à medida que acontecem os passes (QUARTIERMEISTER, 2017).

Como em qualquer outro processo, há algumas desvantagens no processo de ECAP que devem ser citadas. É um método descontínuo e tem limitações se o objetivo é aumentar a escala de produção. Outro ponto, o volume útil da peça (parte uniforme, com superfície livre de defeitos) é muitas vezes pequeno, pois a fração da peça que é submetida à zona de cisalhamento recebe a deformação e os grãos ultrafinos são formados (VERLINDEN, 2005).

4.6 Deformação Plástica Severa por Forjamento Multidirecional (MDF)

A técnica de processamento por Forjamento Multidirecional (MDF) ou Multi Axial Compression (MAC) é baseada em realizar sequências de compressões, alternando as direções nas quais as deformações são aplicadas, como ilustrado na Figura 4.7 (ALMEIDA, 2021).

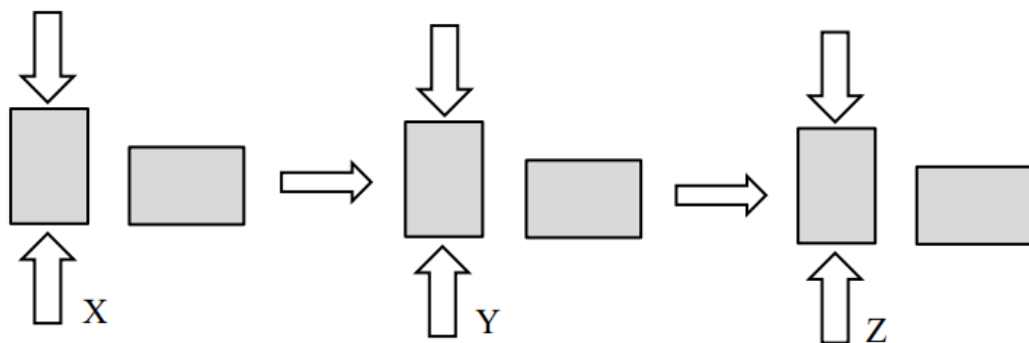


Figura 4. 7 - Representação esquemática do MDF (ALMEIDA, 2017).

A cada sequência, a peça é submetida a três forjamentos sequenciais ao longo dos eixos ortogonais, mudando-se em 90° a direção da deformação aplicada entre as inúmeras compressões e aplicando uma quantidade igual de deformação a cada passe. A técnica é

planejada de modo que, ao final de cada ciclo, a peça volte com suas dimensões originais ao longo dos eixos X, Y e Z (FLAUSINO, 2021).

A deformação obtida neste processo é menos homogênea se comparada ao ECAP e HPT. Nas referências são encontrados diferentes modos que abrangem o MDF com compressão livre, compressão com restrição de deformação em uma direção e compressão em matriz fechada conforme mostrado na Figura 4.8 (ALMEIDA, 2017).

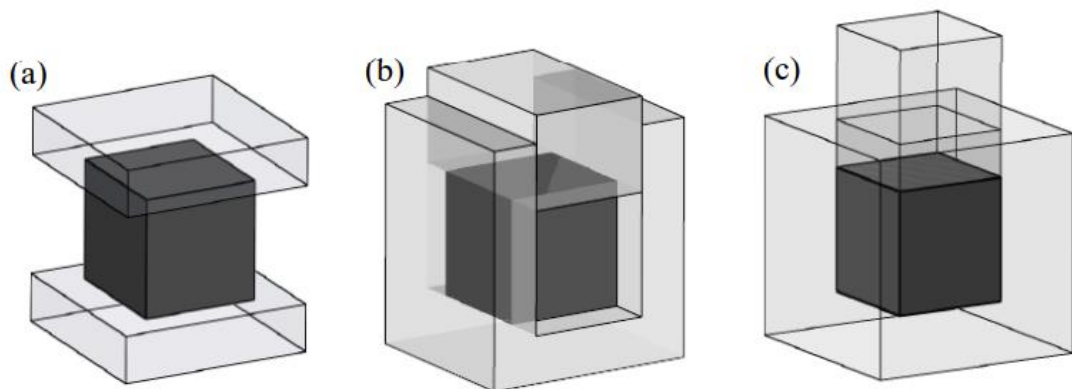


Figura 4. 8 - Representação do MDF para as diferentes condições de processamento, compressão: a) livre; b) com restrição em uma direção; c) confinado (ALMEIDA, 2017).

No MDF com compressão livre, depois da deformação, as superfícies mostram irregularidades e distorções que podem ocasionar desalinhamento da peça em relação ao eixo de processamento, fazendo-se necessária a usinagem das faces para dar sequência ao processo e para que a curva tensão x deformação descreva corretamente o comportamento mecânico da amostra. A etapa de usinagem causa perda de material, podendo ser evitada utilizando matrizes que restrinjam o fluxo de material (FLAUSINO, 2021).

Relacionando o processo de MDF às demais técnicas de DPS, este mostra algumas vantagens como, por exemplo, é a única técnica de deformação plástica severa que permite acompanhar a curva tensão x deformação durante o processamento, é uma técnica simples, qualquer equipamento de compressão pode realizá-lo e pode ser realizado em amostras de grandes dimensões (ALMEIDA, 2021).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os materiais submetidos à deformação plástica requerem características específicas para que a deformação aconteça de forma mais fácil sem causar danos aos materiais. Características essas, por exemplo, como uma boa plasticidade e equilíbrio entre conformabilidade e resistência mecânica as quais evitam rupturas nas peças (FERREIRA, 2006).

A granulometria dos materiais está diretamente relacionada com seu comportamento sendo inversamente proporcional à resistência mecânica do mesmo. A DPS tem se mostrado eficaz atendendo aos objetivos de refino de grão em estruturas metálicas, aplicando uma grande tensão, causando deformação na peça e garantindo grãos ultrafinos sem alterações significativas na peça (GODOI, 2018).

Como em qualquer procedimento, existem vantagens e desvantagens nas técnicas de DPS. As técnicas são vantajosas, pois evitam a necessidade de realizar qualquer tipo de tratamentos térmicos depois do processo, o controle das temperaturas não é rígido e não há poros nas peças. As desvantagens associam-se à deformação aplicada, que é muito maior comparada a outras deformações aplicadas em outros processos de conformação, o que exige um trabalho muito grande, restringe os estudos a materiais com baixo limite de escoamento e também há um impasse na mudança da escala laboratorial para a escala industrial (CALADO, 2012).

Um das técnicas mais importantes de DPS para obtenção de peças sem poros é o HPT. O método de HPT tende a produzir tamanhos de grãos menores e uma fração maior de contornos de grão com ângulos elevados de desorientação (EDALATI e HORITA, 2016). Além disso, o processamento por HPT pode ser usado para a consolidação de partículas finas e permite uma variação contínua definida de tensão, diferentemente da maioria dos processos de DPS. Uma tensão de cisalhamento extremamente alta pode ser alcançada de maneira bem simples e materiais relativamente frágeis ou de alta resistência podem ser fortemente deformados o que, muitas vezes, é impossível por outros processos DPS. Apesar dos materiais processados por HPT apresentarem excelentes propriedades mecânicas, suas aplicações são limitadas a pequenas amostras em forma de disco (LOPES, 2020).

A DPS em *Accumulative Roll Bonding* (ARB) é um método aplicado para superar as limitações que outros processos de DPS apresentam, como as técnicas da Extrusão em Canal Angular (ECAP) e da Torção sob Alta Pressão (HPT) que possuem baixa produtividade e dimensões reduzidas das amostras, tendo como vantagem mais importante a acessibilidade da laminação convencional para o processo (EIZADJOU, MANESH, JANGHORABAN, 2009). Observa-se como vantagens, também, a aplicação de grande quantidade de deformação, sem afetar as dimensões da amostra, proporcionando materiais de alta resistência mecânica, sem adição de elementos de liga ou tratamento termomecânicos, e a não exigência de maquinário com alta capacidade de carga e matrizes caras; ter produtividade contínua e elevada; e possibilitar uma quantidade de material produzido não limitada. As desvantagens estão relacionadas a alta probabilidade de ocorrência de defeitos devido a uma junção não efetiva e a manutenção da textura típica de laminação convencional (GODOI, 2018).

A *Accumulative Roll-Bonding* (ARB) tem sido usada principalmente na produção de chapas e, de maneira similar aos materiais processados por ECAP, as chapas obtidas por ARB apresentam um grande aumento na resistência mecânica e grande redução na ductilidade. Há limitações como a temperatura de trabalho, a qual não pode ser tão alta a ponto de ultrapassar a temperatura de recristalização, o que poderia acarretar no cancelamento das deformações acumuladas durante os sucessivos passes de colaminação e há um limite mínimo de redução de espessura (SAITO *et al.*, 1999).

Já a DPS por Extrusão em Canal Angular (ECAP) é um processo relativamente versátil, pois pode ser utilizado para vários tipos de metais ligas e é uma das técnicas mais viáveis para refinamento de grão em materiais policristalinos, podendo ser feita à temperatura ambiente. As dimensões da seção transversal da amostra não sofrem alteração com os passes na matriz (QUARTIERMEISTER, 2017). Um dos parâmetros do processamento é a influência do número de passes que a amostra é submetida, devido ao aumento na resistência do material e dureza. Quando passada mais uma vez pela matriz a deformação vai ficando mais homogênea e os grãos começam a ter um maior refinamento, fazendo da ECAP um processo mais interessante, pois há ganhos em resistência mecânica juntamente com ganhos na plasticidade do material. Apesar disso, é um método descontínuo e há problemáticas em se desejar aumentar a escala de produção. Outro ponto, é o volume útil da peça (parte uniforme, com superfície livre de defeitos) que, muitas vezes, é pequeno (VERLINDEN, 2005).

A DPS por *Multi Directional Forging* (MDF), comparada às demais técnicas de DPS, tem vantagens como ser a única técnica de deformação plástica severa em que se permite acompanhar a curva tensão x deformação durante o processamento e é uma técnica relativamente simples, podendo ser realizado em qualquer equipamento de compressão. Além disso, com o aumento da deformação, obtém-se uma estrutura com contornos de alto ângulo e menor densidade de discordâncias, o que pode conduzir ao amaciamento da peça (FLAUSINO, 2021).

O destaque principal da técnica é a possibilidade de processamento de matérias frágeis, atuando no refino progressivo de grãos. Contudo, após a primeira compressão no processamento por MDF, a peça assume uma forma abaulada (suas laterais ficam arredondadas) e com isso, para as próximas compressões, não se tem mais faces planas a serem comprimidas. Essas distorções geométricas das faces geram alterações no início da curva tensão x deformação, que não mais representaria somente o comportamento do material além de problematizar o posicionamento da peça no processo e garantir a imposição de uma quantidade de deformação específica.

Para eliminar essas limitações, é possível fazer a usinagem das partes abauladas, após cada compressão, evitando os problemas de posicionamento da amostra para a sequência de compressões, os problemas de distorção na curva que representa o comportamento mecânico e garantindo a precisão da quantidade de deformação obtida em cada compressão. Porém, essas usinagens são demoradas e caras (ALMEIDA, 2021).

6 CONCLUSÕES

A partir da pesquisa realizada e da análise elaborada, conclui-se que:

As técnicas de DPS são de grande relevância na obtenção de estruturas ultrafinas dos materiais.

Considerando as limitações dos processos em escala industrial, percebe-se um maior sucesso da técnica de Extrusão em Canal Angular (ECAP), uma vez que abrange variados metais e ligas, sendo significativos os ganhos de resistência mecânica juntamente com ganhos na plasticidade do material.

De maneira geral, apesar das limitações na escala industrial e nas dimensões das amostras, os processos de DPS têm se mostrado eficazes na obtenção de estruturas mais resistentes e ultrafinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, N. G. S. **Desenvolvimento de processamento por deformação multi-axial cíclica e avaliação do comportamento mecânico e evolução microestrutural do alumínio.** 2021. 65f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2021.

ALMEIDA, N. G. S. **Comportamento mecânico da liga al 6351 submetida à extrusão angular em canais iguais e compressão multiaxial cíclica.** 2017. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2017.

CALADO, W. R. **Ultra-refino de grão através de deformação plástica severa por ensaios de torção: simulação do processo arb.** 2012. 234f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

CALLISTER Jr., W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013. 817p.

DINIZ, S.B.; BENATTI, E. A.; PAULA, A. S.; BOLMARO, R. E.; MEIRELLES, B. G. Avaliação das características microestruturais de ligas de alumínio submetidas a técnicas de deformação plástica severa. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 69, 2014, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2014, p. 520-531.

EDALATI, K.; HORITA, Z. A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988. **Materials Science and Engineering**, v.652, p. 325-352., 2016.

EIZADJOU, M.; MANESH, H.D.; JANGHORABAN, K. Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 474, p. 406-415, 2009.

FERREIRA, R.A.S. **Conformação Plástica: Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos.** 2. ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 2006. 245 p.

FIGUEIREDO, R. B.; LANGDON, T. G. Fabricating ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation: A review of developments in Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 1, p. 55–62, 2012.

FLAUSINO P. C. A. **Influência da amplitude de deformação e da deformação acumulada na evolução microestrutural e comportamento mecânico do cobre processado por forjamento multidirecional**. 2021. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2021.

GODOI, R. P. **Estudo da deformação plástica severa por junção por laminação assimétrica acumulada (JLAA) do alumínio AA1050**. 2018. 111f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, SP, Brasil, 2018.

LANGDON, T.G.; FURUKAWA, M.; NEMOTO, M.; HORITA, Z. Using equal channel angular pressing for refining grain size, **Journal of Operations Management**, v. 52, p. 30-33, 2000.

LOPES, D. R. **Resistência à corrosão em solução de Hank de ligas e compósitos de magnésio submetidos à deformação plástica severa por torção sob alta pressão**. 2020. 101f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2020.

NIEH, T.G.; WADSWORTH, J.; SHELBY, O.D. **Superplasticity in Metals and Ceramics**. 2 ed. New York: Cambridge University Press, 2005. 287 f.

QUARTIERMEISTER, M. V. **Estudo da resistência à corrosão de ligas de alumínio com grãos ultrafinos obtidos por deformação plástica severa através do processo ECAP**. 2017. 98f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil, 2017.

SAITO, Y.; UTSUNOMIYA H.; TSUJI, N.; SAKAI, T. Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process. **Acta Materialia**, v. 47, n. 2, p. 579-583, 1999.

SU, L.; LU, C.; LI, H.; DENG, G.; TIEU, K. Investigation of ultrafine grained AA1050 fabricated by accumulative roll bonding. **Materials Science & Engineering**, v. 614, p.148-155, 2014.

TSUJI, N.; SAITO, Y.; LEE, S. H.; MINAMINO, Y. ARB (Accumulative Roll-Bonding) and Other New Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials. *Advanced*. **Engineering Materials**, v. 5, p. 338-344, 2003.

VALIEV, R.Z.; ESTRIN, Y.; HORITA, Z.; LANGDON, T.G.; ZEHETBAUER, M.J.; ZHU, Y.T. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation. **Journal of the Minerals, Metals and Materials Society**, v.58 p. 33-39, 2006.

VERLINDEN, B. Severe Plastic Deformation of Metals. **Journal of Metallurgy**. v. 11, n. 203, p. 165-182, 2005.

ZHANG, C.; GUAN, S.; WANG, L.; ZHU, S.; CHANG, L. The microstructure and corrosion resistance of biological Mg-Zn-Ca alloy processed by high-pressure torsion and subsequently annealing. **Journal of Materials Research**, v. 6, n.32, p.1061-1072. 2017.