



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MÊCANICA**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA Al 6351**  
**SUBMETIDA À EXTRUSÃO ANGULAR EM CANAIS IGUAIS**  
**E COMPRESSÃO MULTIAXIAL CÍCLICA**

**NATANAEL GERALDO E SILVA ALMEIDA**

**Belo Horizonte, 07 de fevereiro de 2017.**

Natanael Geraldo e Silva Almeida

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA Al 6351  
SUBMETIDA À EXTRUSÃO ANGULAR EM CANAIS IGUAIS  
E COMPRESSÃO MULTIAXIAL CÍCLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Teresa Paulino Aguiar.

Universidade Federal de Minas Gerais

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

Universidade Federal de Minas Gerais



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

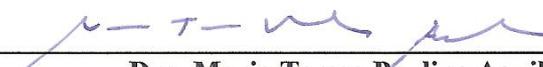
**"COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA AL 6351 SUBMETIDA À  
EXTRUSÃO ANGULAR EM CANAIS IGUAIS E COMPRESSÃO  
MULTIAXIAL CÍCLICA"**

**NATANAEL GERALDO E SILVA ALMEIDA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Processos de Fabricação".

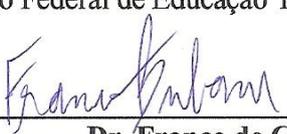
Dissertação aprovada no dia 07 de fevereiro de 2017.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar**  
Orientadora - Dpto. de Engenharia de Materiais e Construção Civil/UFMG

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Paulo Roberto Cetlin**  
Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de MG/CEFET

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Franco de Castro Bubani**  
Centro Atômico Bariloche/CONICET

A447c	<p>Almeida, Natanael Geraldo e Silva.</p> <p>Comportamento mecânico da liga Al 6351 submetida à extrusão angular em canais iguais e compressão multiaxial cíclica [manuscrito] / Natanael Geraldo e Silva Almeida. - 2017.</p> <p>90 f., enc.: il.</p> <p>Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar. Coorientador: Paulo Roberto Cetlin.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Metais - Extrusão - Teses. 3. Metais - Deformação - Teses. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Cetlin, Paulo Roberto, 1946-. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p>CDU: 621(043)</p>
-------	---

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE GRÁFICOS.....	8
RESUMO .....	11
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Caminho de Deformação.....	17
3.1.1 Encruamento.....	18
3.1.2 Amaciamento.....	25
3.2 Deformação Plástica Severa.....	31
3.2.1 Torção sob Elevada Pressão.....	32
3.3.2 União por laminação acumulativa.....	32
3.3.1 Extrusão Angular em Canais Iguais.....	33
3.3.2 Deformação multi-axial cíclica.....	38
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
4.1 Materiais.....	47
4.2 Métodos.....	47
4.2.1 Ensaio de Microdureza.....	47
4.2.2 Recozimento.....	48
4.2.3 Fabricação dos corpos de prova para ECAP.....	48
4.2.4 ECAP.....	48
4.2.5 Fabricação dos corpos de prova para compressão.....	50
4.2.6 Ensaios de compressão uniaxial.....	52
4.2.7 Simulações.....	52
4.2.8 Teste de salto de velocidade de deformação.....	53

4.2.6 MAC .....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
5.1 Ensaio de Microdureza.....	56
5.2 ECAP .....	57
5.3 Ensaio de compressão uniaxial .....	58
5.3.1 Simulações.....	60
5.3.2 Sensibilidade da tensão à velocidade de deformação .....	63
5.4 MAC .....	66
6 CONCLUSÕES .....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Interação de duas discordâncias aresta com formação de degrau em uma delas.....	19
FIGURA 3.2 – Interação de duas discordâncias aresta com formação de degrau em ambas. .	19
FIGURA 3.3 - Interação de duas discordâncias a) espiral-aresta b) espiral-espiral.....	20
FIGURA 3.4 – Representação de uma discordância contornando partículas de segunda fase.....	24
FIGURA 3.5 – Imagem gerada por microscopia eletrônica de transmissão de precipitados Ni-Cr cisalhados por discordâncias. ....	24
FIGURA 3.6– Representação do processamento por HPT. ....	32
FIGURA 3.7– Representação do processamento por ARB.....	33
FIGURA 3.8– Representação do processamento por ECAP.....	34
FIGURA 3.9 – Regiões de cisalhamento em matrizes de ECAP .....	34
FIGURA 3.10 – Rotas comumente adotadas no processamento por ECAP. ....	35
FIGURA 3.11– Planos de cisalhamento para sequência de passes de ECAP. ....	36
FIGURA 3.12 – Bandas de cisalhamento obtidas no processamento por ECAP.....	36
FIGURA 3.13 – Representação esquemática do MAC. ....	38
FIGURA 3.14– Representação esquemática do MAC para as diferentes condições de processamento, compressão: a) livre; b) com restrição em uma direção; c) confinado. ....	39
FIGURA 4.1 – Fluxograma do andamento do trabalho .....	46
FIGURA 4.2 – Corpo de prova para ECAP .....	48
FIGURA 4.3 – Matriz de ECAP: a) Matriz desmontada; b) Matriz montada.....	49
FIGURA 4.4 – Punções utilizados no processamento por ECAP .....	50
FIGURA 4.5 – Fabricação de corpo de prova de compressão: a) Corpo de prova sendo processado; b) Corte do corpo de prova pós ECAP; c) Corpo de prova para compressão uniaxial. ....	51
FIGURA 4.6 – Corpo de prova para compressão uniaxial.....	51
FIGURA 4.7 – Matriz de MAC: a) Matriz desmontada; b) Matriz montada.....	54
FIGURA 4.8 – Representação esquemática do processo de compressão multiaxial .....	55
FIGURA 5.1 – Distribuição de deformação na superfície dos corpos de prova após corte: a) CP sem corte; b) cortado com aresta de 8 mm; c)cortado com aresta de 16mm.....	62

FIGURA 5.2 – Distribuição no centro do corpo de prova antes do corte. .... 62

FIGURA 5.3 – Corpo de prova após compressão: a) amplitude de 0,2; b) amplitude de 0,8. .66

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 – Representação dos possíveis efeitos obtidos com a deformação cíclica.....	17
GRÁFICO 3.2 – Representação esquemática do patamar de escoamento .....	21
GRÁFICO 3.3 – Representação esquemática do efeito Portevin-Le Chatelier no ferro.....	21
GRÁFICO 3.4 – Teste de salto da taxa de deformação.....	22
GRAFICO 3.5 – Representação do efeito Bauschinger. ....	26
GRÁFICO 3.6 – Curvas dureza x deformação para aços com 0,28 e 0,44% de C com diferentes quantidades de pré-deformação. ....	27
GRÁFICO 3.7 – Curvas tensão x ciclos de deformação de Al comercialmente puro pré-deformado em 0,2 e diferentes amplitudes de deformação. ....	28
GRÁFICO 3.8 – Curvas tensão efetiva x deformação efetiva de tração, torção cíclica e tração com posterior torção cíclica.a) aço; b) latão.....	29
GRÁFICO 3.9 – Curvas tensão efetiva x deformação efetiva de tração, torção cíclica e tração do material deformado por torção cíclica. a) aço; b) latão. ....	29
GRÁFICO 3.10- Curvas tensão de trefilação x deslocamento para diferentes passes de trefilação de um aço baixo carbono.....	30
GRÁFICO 3.11– Curvas tensão de engenharia x deformação de engenharia do Cu em diferentes condições. ....	31
GRAFICO 3.12 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al 1100 recozido e recozido e processado multi-axialmente com diferentes amplitudes de deformação.....	40
GRAFICO 3.13 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al 1100 recozido, recozido e processado por MAC e recozido, pré-deformado e processado por MAC.....	41
GRAFICO 3.14 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al 1100 recozido, recozido, pré-deformado e processado por MAC e monotônica após MAC.....	42
GRÁFICO 3.15 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do processamento por MAC do Al comercialmente puro. ....	43
GRÁFICO 3.16 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al comercialmente puro recozido, processado por ECAP e 12 compressões cíclicas.....	44
GRAFICO 4.1-Representação dos picos de tensão gerados devido envelhecimento dinâmico .....	54
GRAFICO 5.1 – Cargas médias e amplitude de carga máxima durante cada passe de ECAP.	58

GRÁFICO 5.2 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido, recozido e processado por 1 passe de ECAP, recozido e processado por 4 passes de ECAP e a regressão. ....	60
GRÁFICO 5.3 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira obtidas por análise por elementos finitos.....	61
GRAFICO 5.4 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e recozido e processado por 4 passes de ECAP com variação da velocidade de compressão. ....	63
GRAFICO 5.5 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material recozido....	64
GRAFICO 5.6 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e recozido e processado por 1 passe de ECAP. ....	65
GRAFICO 5.7 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e recozido e processado por 4 passes de ECAP.....	65
GRAFICO 5.9 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 4 ciclos de MAC.....	68
GRAFICO 5.10 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 3 ciclos de MAC.....	68
GRAFICO 5.11 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 2 ciclos de MAC.....	69
GRAFICO 5.12 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 1 ciclo de MAC.....	69
GRAFICO 5.13 – Comparação das compressões uniaxiais após MAC do material recozido.	70
GRAFICO 5.14 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC.....	71
GRAFICO 5.15 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 4 ciclos de MAC.....	72
GRAFICO 5.16 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 3 ciclos de MAC. ....	73
GRAFICO 5.17 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 2 ciclos de MAC. ....	73
GRAFICO 5.18 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 1 ciclo de MAC.....	74

GRAFICO 5.19 – Comparação das compressões uniaxiais após MAC do material processado por 1 passe de ECAP. ....	75
GRAFICO 5.20 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido, processado por 1 passe de ECAP e processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC após o ECAP. ....	76
GRAFICO 5.21 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 4 passes de ECAP e 4 ciclos de MAC.....	77
GRAFICO 5.22 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material processado por 4 passes de ECAP e 3 ciclos de MAC.....	77
GRAFICO 5.23 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material processado por 4 passes de ECAP e 2 ciclos de MAC.....	78
GRAFICO 5.24 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material processado por 4 passes de ECAP e 1 ciclos de MAC.....	78
GRAFICO 5.25 – Comparação das compressões uniaxiais após MAC do material processado por 4 passes de ECAP.....	79
GRAFICO 5.26 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido, processado por 4 passes de ECAP e processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC após o ECAP. ....	80
GRAFICO 5.27– Evolução do limite de escoamento para os 3 tipos de processamento em relação ao número de ciclos de MAC.....	81

## RESUMO

A extrusão angular em canais iguais (*Equal Channel Angular Pressing*, ECAP) é um processo de deformação plástica severa (*Severe Plastic Deformation*, SPD) no qual é possível processar amostras com grandes dimensões em etapas sucessivas, o que permite alta produtividade. A compressão multiaxial cíclica (*Multi Axial Compression – MAC*) é um processo com o qual se pode obter SPD, submetendo o material a compressões sucessivas. De acordo com a literatura, deformações cíclicas podem levar ao amaciamento do material. Neste contexto seria interessante associar a extrusão angular em canais iguais e a compressão multiaxial cíclica de forma a se obter um material metálico com propriedades diferenciadas. No caso do Al e suas ligas, essa associação de processos poderia ser de grande interesse, pois essa gama de propriedades diferenciadas se somaria ao baixo custo, baixo peso específico, resistência à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica, boa ductilidade e acabamento atrativo dessas ligas. Neste trabalho analisou-se o comportamento mecânico de amostras da liga Al 6351 recozidas e processadas por extrusão angular em canais iguais, em 1 e 4 passes, e compressão multiaxial cíclica, em 1, 2, 3 e 4 ciclos, por meio de ensaios de compressão. Para o estudo foram projetadas matrizes para ECAP e MAC a fim de realizar os processamentos estudados. Os resultados mostram que o ECAP aumenta significativamente a resistência mecânica do material e o aumento não é proporcional ao número de passes. Após processado por MAC, no geral, o material apresenta maior taxa de encruamento que o material recozido e pouca variação no limite de escoamento.

**Palavras-chave:** Deformação plástica severa, Extrusão angular em canais iguais, Deformação multiaxial cíclica.

## ABSTRACT

Equal Channel Angular Pressing (ECAP) is a severe plastic deformation process of metals that can supply samples with large dimensions at high production rates. Multi Axial Compression (MAC) is also a severe plastic deformation process where high strains can be reached by successive compressions. Cyclic and multi-axial deformation can lead to material softening in previously work hardened metals. It is thus expected that a material processed by ECAP followed by MAC would have outstanding mechanical properties. If Al and its alloys are subjected to such process it would be possible to obtain a material which with has low cost, low density, corrosion resistance, good thermal and electrical conductivity, good surface finish (intrinsic of Al and its alloys) in addition to the outstanding mechanical properties achieved by ECAP followed by MAC processing. The mechanical properties of an Al6531 aluminum alloy were analyzed under different conditions: annealed, after 1 and 4 passes of ECAP and after 1, 2, 3 and 4 cycles of MAC, utilizing special ECAP and MAC dies. The results show that processing by ECAP leads to an increase in material strength and that this is not dependent on the number of passes. MAC processing after ECAP led to some decrease in the strength of the material and to an appreciable increase in its work hardening capacity.

**Key words:** Severe plastic deformation, Equal channel angular pressing, Multi axial compression.

# 1. INTRODUÇÃO

Os metais são amplamente utilizados em diversas aplicações devido principalmente às suas propriedades mecânicas. Na maioria dos casos são de particular interesse metais com baixa massa específica, boas ductilidade e tenacidade, e alta resistência mecânica.

Os principais métodos utilizados para aumento de resistência mecânica dos metais são: solução sólida, precipitação/envelhecimento, encruamento e refino de grão. Os três primeiros métodos promovem o aumento da resistência mecânica, mas causam uma diminuição da tenacidade (DIETER, 1981). A redução do tamanho de grão é um método muito utilizado, pois promove o aumento da resistência mecânica e da tenacidade do material. No entanto apesar da obtenção de grãos muito pequenos não ser um processo trivial (DIETER, 1981), tamanhos de grão inferiores a 1µm tem sido obtido através de deformação plástica severa (SABIROV *et al.* 2013).

A deformação plástica severa (*severe plastic deformation-SPD*) é utilizada para reduzir os grãos à escala nanométrica. As principais técnicas de SPD são: torção sob elevada pressão (*high pressure torsion-HPT*) (ZHILYAEV e LANGDON, 2008), união por laminação acumulativa (*accumulative roll bonding-ARB*) (SAITO *et al.* 1998), extrusão angular em canais iguais (*Equal Channel Angular Pressing, ECAP*) (VALIEV e LANGDON, 2006) e compressão multiaxial cíclica (Multi Axial Compression - MAC, também conhecido como Multi Axial Forging – MDF) (VALIEV *et al.*, 2000, SAKAI *et al.*, 2014 e 2009, ZHU *et al.*, 2011). Dentre esses processos destaca-se o ECAP e MAC. Com o ECAP é possível processar amostras com grandes dimensões, em etapas sucessivas, o que permite alta produção (JIN *et al.* 2012). Com o MAC se vislumbra a possibilidade de aumento da ductilidade do material uma vez que estudos de ARMSTONG *et al.* (1982) relatam o amaciamento e consequente aumento de ductilidade após o material ser submetido à deformação cíclica, em função da condição inicial do material, da amplitude e taxa de deformação, assim como do número de ciclos.

O Alumínio e suas ligas têm baixo custo, baixo peso específico, resistência à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica, boa ductilidade e acabamento atrativo (ASM, 1990). Um

ponto importante para a vasta aplicação das ligas de alumínio é a capacidade que este material tem de se combinar com a maioria dos metais de engenharia. Os elementos mais frequentes em ligas de alumínio são: Cu, Si, Mg, Zn e Mn. Outros elementos podem estar presentes com a finalidade de refino de grão ou conferir alguma propriedade específica (Fe, Cr, Ni e outros). A liga de Alumínio 6351 é utilizada em carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, estruturas solicitadas, reboques, vagões ferroviários, elementos estruturais, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química e alimentícia, telhas, cumeeiras, rufos, calhas, forros, construção civil, fachadas e embarcações, dentre outras aplicações. (ASM, 1990)

Neste contexto seria interessante associar ECAP e MAC de forma a se obter um material metálico com propriedades diferenciadas. No caso do Al e suas ligas, essa associação de processos poderia ser de grande interesse, pois essa gama de propriedades diferenciadas se somaria às características, supracitadas, encontradas nestas ligas.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho visa avaliar o comportamento mecânico à compressão da liga de alumínio 6351 submetida a 1 e 4 passes de ECAP com posterior deformação cíclica multiaxial (MAC).

Para isso os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

- 1- estudar a influência do processamento multiaxial nas propriedades mecânicas do material recozido;
- 2- avaliar a influência do processamento por ECAP no comportamento mecânico do material recozido;
- 3- analisar o comportamento mecânico do material recozido submetido a ECAP seguido de processamento multiaxial;
- 4- avaliar a influência das condições de deformação cíclica no desempenho mecânico do material.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Caminho de Deformação

A conformação mecânica comumente promove alteração na forma e nas propriedades mecânicas dos metais. Usualmente ocorre um aumento da resistência mecânica e uma diminuição da ductilidade devido ao fenômeno de encruamento. A magnitude do encruamento depende das características do material, das condições impostas na conformação e, também, do caminho pelo qual o material é deformado. Após uma pré-deformação plástica é possível que uma deformação ulterior com um carregamento diferente promova o amaciamento do material.

Segundo CHUNG E WAGONER (1986), com a variação do sentido de deformação pode-se obter dois efeitos distintos. O efeito 1 é caracterizado pelo menor limite de escoamento e aumento da taxa encruamento, comparado ao material processado uniaxialmente. O efeito 2 ocorre com maior tensão limite de escoamento, comparado ao carregamento uniaxial, com posterior amaciamento do material (GRA. 3.1).

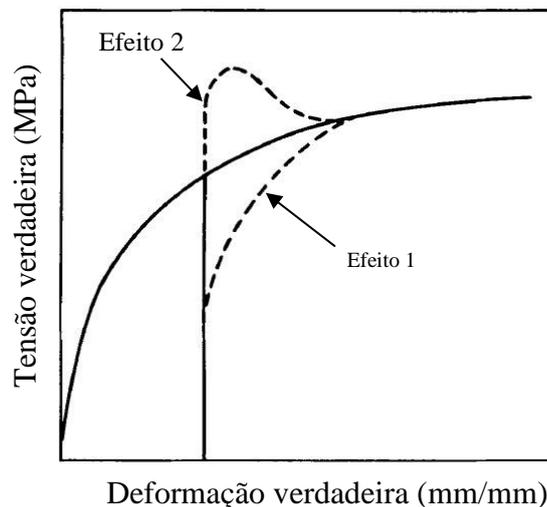


GRÁFICO 3.1 – Representação dos possíveis efeitos obtidos com a deformação cíclica.

FONTE: CHUNG e WAGONER, 1986.

### 3.1.1 Encruamento

Em 1934 Polanyi, Orowan e Taylor explicaram, simultânea e isoladamente, que a deformação plástica ocorre, prioritariamente, pelo deslizamento das discordâncias. Dessa forma, a capacidade de um metal se deformar plasticamente está associada à capacidade de movimentação das discordâncias (DIETER, 1981). No entanto, as discordâncias podem encontrar obstáculos ao seu deslizamento, o que dificulta a deformação plástica. Se o processamento mecânico for a frio se observa, comumente, que o metal se torna mais resistente com a deformação plástica. Esse aumento de resistência se dá pelo fato de que as discordâncias interagem entre si e com outros obstáculos (soluto, segunda fase, contorno de grão, etc.). Essas interações levam à redução da mobilidade das discordâncias, tornando-se necessária uma tensão maior para movimentar a discordância, ou seja, é preciso uma tensão maior para deformar plasticamente o material. A esse fenômeno se dá o nome de encruamento. O coeficiente de encruamento está associado com a taxa em que o material aumenta a sua resistência mecânica quando deformado. Este coeficiente pode ser estimado pela inclinação da curva tensão-deformação em ensaios uniaxiais de tração ou compressão.

#### 3.1.1.1 Interação discordância-discordância

O fenômeno mais simples que promove o aumento de resistência nos metais é a interação discordância-discordância. Essa interação geralmente ocorre se as discordâncias se moverem em planos de escorregamento distintos. Segundo REED HILL (1982) quando uma discordância se move ela precisa passar pelas discordâncias que interceptam seu plano de escorregamento, o que exige a realização de trabalho, fazendo necessária uma maior tensão para deformar o material.

Quando duas discordâncias em aresta se interceptam ocorre a formação de um degrau em uma ou em ambas, dependendo da relação dos vetores de Burgers, conforme FIG. 3.1 e 3.2.

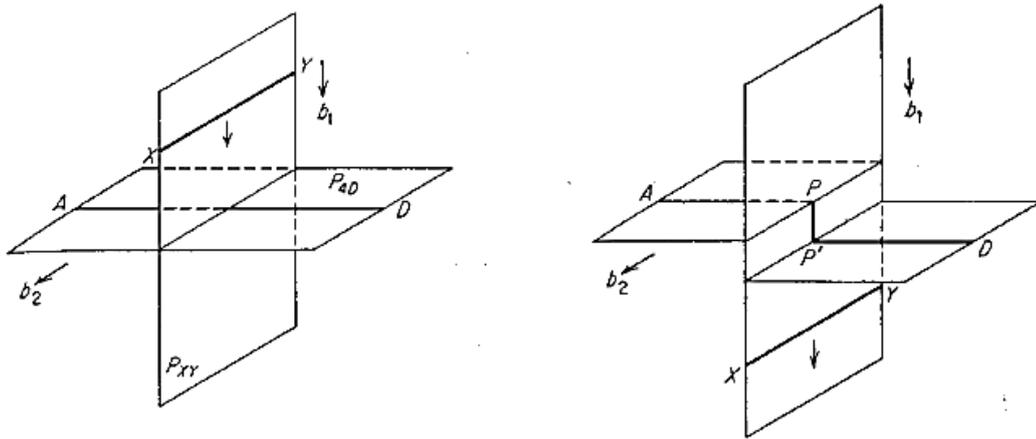


FIGURA 3.1 – Interação de duas discordâncias aresta com formação de degrau em uma delas.  
 FONTE: DIETER, 1981.

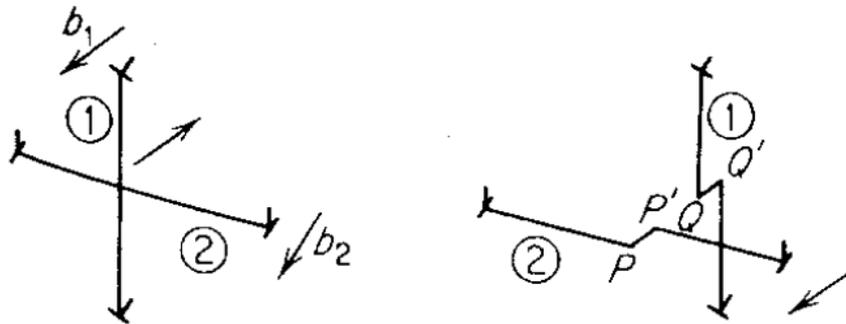


FIGURA 3.2 – Interação de duas discordâncias aresta com formação de degrau em ambas.  
 FONTE: DIETER, 1981.

Quando duas discordâncias em hélice se interceptam, ou uma discordância espiral e uma aresta, ocorre a formação de degrau em ambas (FIG. 3.3). Na maioria dos casos as discordâncias aresta não tem seu movimento bloqueado pela presença de degraus. Os degraus formados em discordâncias espiral apresentam orientação aresta e só podem movimentar livremente tendo mesma linha e vetor de Burgers. A única maneira de uma discordância espiral deslizar para uma nova posição levando junto o degrau é através de um movimento não conservativo deste degrau como a escalagem (processo termicamente ativado).

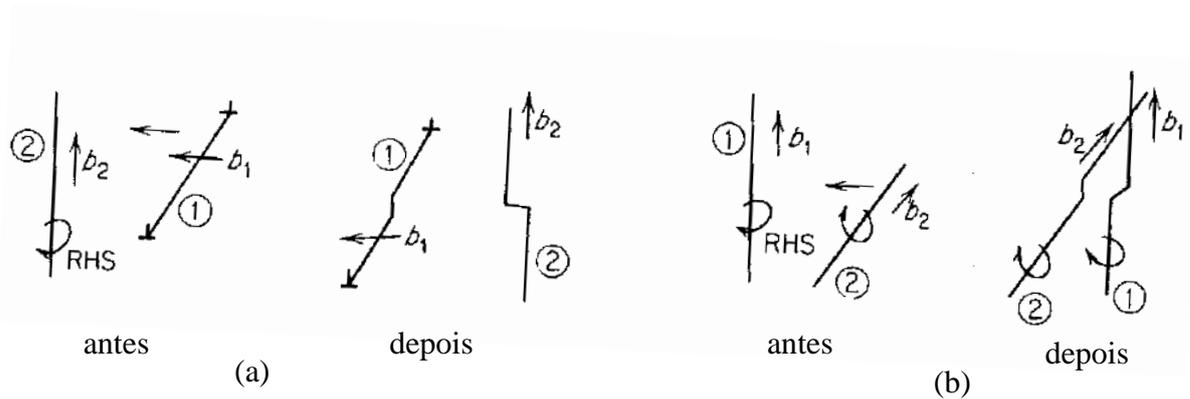


FIGURA 3.3 - Interação de duas discordâncias (a) espiral-aresta (b) espiral-espiral.

FONTE: DIETER, 1981.

#### 3.1.1.4 Interação com o soluto

Geralmente os átomos de soluto deformam a rede cristalina do material base. Dessa forma os átomos de soluto são atraídos em direção às discordâncias como resultado das interações de seus campos de deformação (REED HILL, 1982). O aumento da resistência mecânica por meio de solução sólida se dá devido à dificuldade de movimentação das discordâncias gerada pelo soluto que estabiliza a deslocação ao aliviar seu campo de tensões. A adição de soluto na solução sólida afeta toda a curva tensão deformação, e de acordo com DIETER (1981) conclui-se que os átomos de soluto tem mais influência na resistência ao atrito para o movimento das discordâncias do que no bloqueio estático destas.

Existem diferentes fenômenos associados à interação soluto-deslocação e os principais são: patamar de escoamento, efeito Portevin-Le Chatelier e envelhecimento por deformação.

O patamar de escoamento foi explicado por COTTRELL em 1953; segundo ele os átomos de soluto formam “atmosferas” em torno das discordâncias e provocam sua imobilização ou ancoragem. Com isso para ocorrer a deformação plástica se faz necessária uma tensão superior à necessária para movimentar as discordâncias devido a tensão destinada ao destravamento destas. Essa tensão corresponde ao limite superior de escoamento (GRA. 3.2). O limite inferior representa a tensão necessária para movimentar as discordâncias já destravadas.

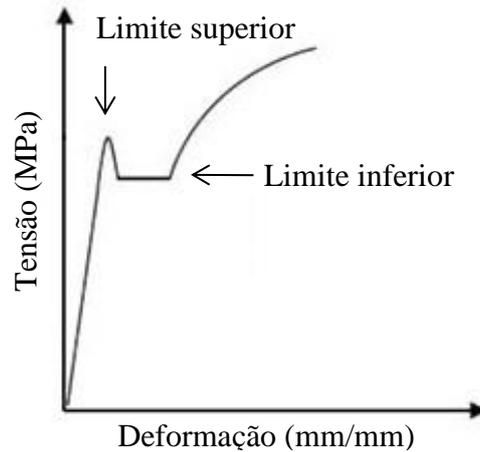


GRÁFICO 3.2 – Representação esquemática do patamar de escoamento

O efeito Portevin-Le Chatelier se manifesta através de serrilhamentos na curva tensão x deformação (GRA. 3.3). Os serrilhamentos ocorrem devido sucessivos escoamentos e envelhecimentos enquanto o corpo de prova é deformado. Se a discordância se move com velocidade moderada ela pode arrastar sua atmosfera de impurezas consigo. Se a discordância se move em velocidades maiores ela sai desta atmosfera, acarretando a queda no escoamento. Os solutos tendo grande mobilidade se movem para as discordâncias, travando-as. Este processo é repetido varias vezes, gerando assim os serrilhamentos (DIETER, 1981).

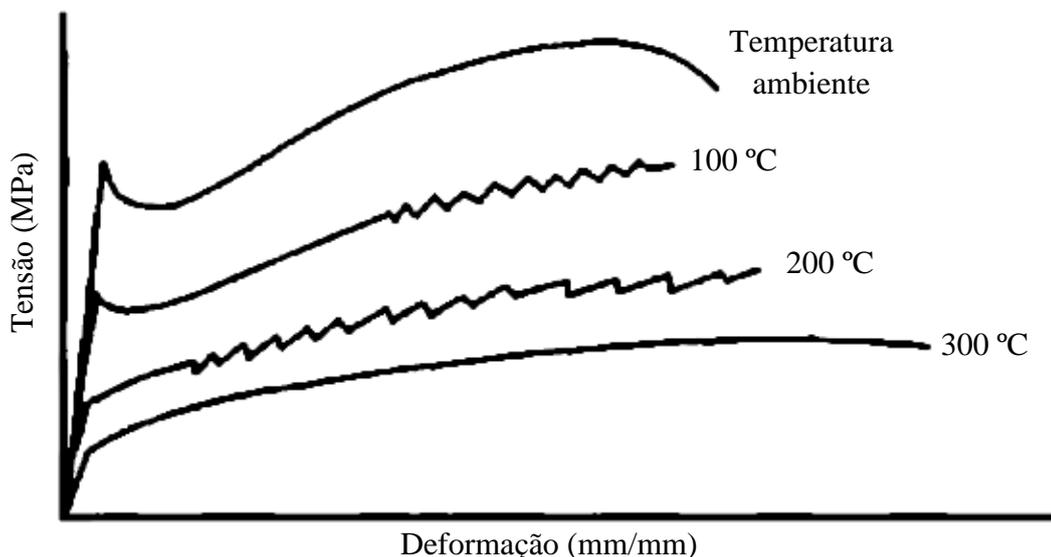


GRÁFICO 3.3 – Representação esquemática do efeito Portevin-Le Chatelier no ferro

FONTE: DIETER, 1981.

Após retomar uma deformação plástica interrompida ocorre envelhecimento por deformação, ou envelhecimento dinâmico, quando os átomos intersticiais migram para as discordâncias

durante a paralização do ensaio, provocando o travamento das discordâncias. Ao recarregar o corpo de prova ocorre o destravamento das discordâncias juntamente com um pico de tensão; após destravar as discordâncias o material retoma seu comportamento padrão. (MEYERS E CHAWLA, 2008, DIETER, 1981)

Materiais que apresentam envelhecimento apresentam picos de tensão durante a transição de taxa de deformação. O envelhecimento dinâmico pode ser quantificado a partir dos picos de tensão. O GRA. 3.4 apresenta curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira da compressão de alumínio comercialmente puro, Al-1%Mg e Al-5%Mg do teste de salto da taxa de deformação realizado por ZHAO *et al.* (2014). Como o Alumínio comercialmente puro não é susceptível a envelhecimento, este não apresenta sensibilidade a variação da taxa de deformação. As ligas Al-Mg apresentam picos durante as transições de taxa de deformação indicando envelhecimento. Pode ser observado serrilhamento em partes das curvas, este fato ocorre devido ao fenômeno Portevin-Le Chatelier.

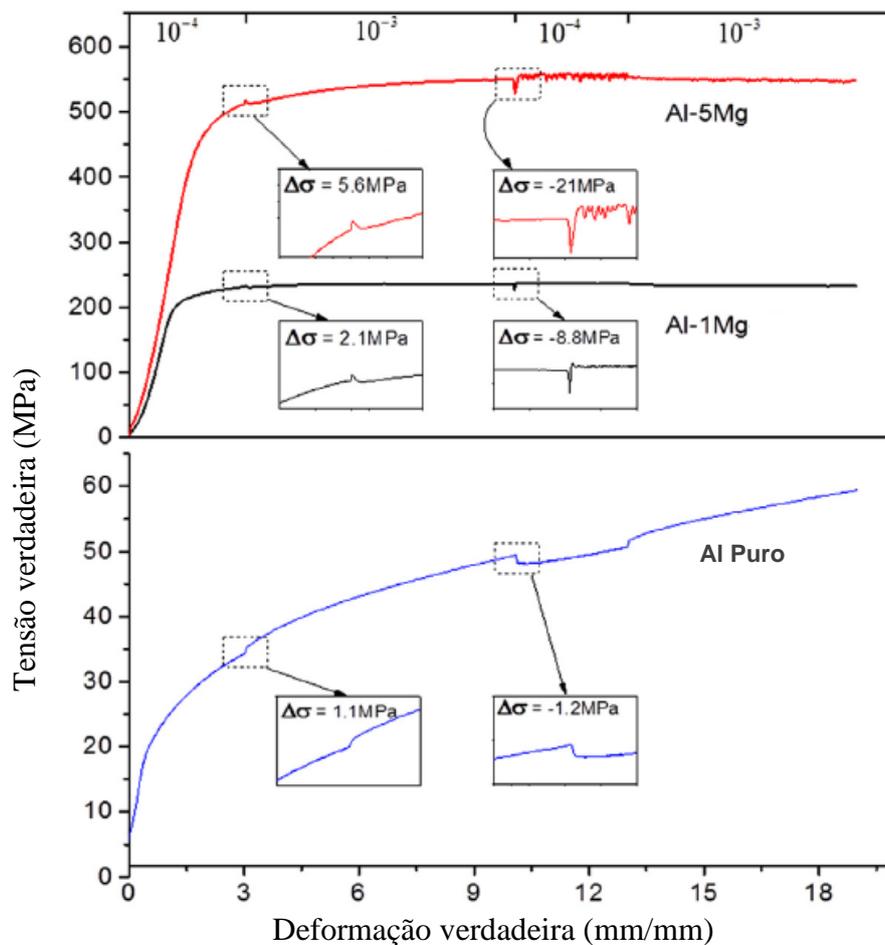


GRÁFICO 3.4 – Teste de salto da taxa de deformação.

FONTE: ZHAO, 2014.

### 3.1.1.2 Interação com contorno de grão

Os sólidos policristalinos são compostos por grãos, que por sua vez são separados por contornos. Um grão difere do outro quanto a orientação, assim os contornos de grão são como uma região de transição entre cristais vizinhos. Quando a desorientação entre os grãos é pequena dá-se o nome contorno de baixo ângulo e o contorno pode ser descrito como um arranjo de discordâncias relativamente simples. (MEYERS E CHAWLA, 2008)

O contorno de grão representa uma barreira ao movimento da discordância. Quando esta fronteira é atingida gera-se uma tensão maior que a requerida para a discordância se movimentar dentro do grão, como tentativa de ultrapassá-la. Com isso quanto maior a quantidade de contornos de grão maior será a tensão necessária para se obter deformação plástica; quanto mais refinado for o grão maior será o volume de contorno de grão. O tamanho de grão na maioria dos casos tem influência direta no limite de escoamento, conforme a equação de Hall-Petch, a seguir:

$$\sigma_e = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Conforme eq. 1, o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho médio de grão ( $d$ ) e  $k$  e  $\sigma_0$  são constantes do material. Segundo REED HILL (1982) esta equação não é válida para grãos muito pequenos (por volta de 40 Å).

O refino de grão é desejável quando se deseja aumentar a resistência mecânica e tenacidade. No entanto, a obtenção de grãos muito pequenos não é um processo trivial (DIETER, 1981). Técnicas de deformação plástica severa têm sido aplicadas para a obtenção de grãos ultrafinos.

### 3.1.1.3 Interação com segunda fase

A presença de uma segunda fase comumente promove o aumento da resistência mecânica dos metais. A segunda fase funciona como obstáculo que precisa ser transposto pela discordância durante seu escorregamento. Segundo REED HILL (1982), com a presença de precipitados as

discordâncias precisam passar por eles ou se movimentar entre eles; para ambos casos a tensão necessária para a movimentação das discordâncias é maior em meio aos precipitados. A discordância pode vencer esse obstáculo contornando ou cortando-o. Em ambos os casos é necessário um trabalho adicional durante a deformação plástica.

A natureza, a morfologia e a distribuição da segunda fase influenciam o caminho e a tensão necessária para que discordância passe por ela. Quando se tem precipitados grandes e incoerentes, tende a ser energeticamente favorável que as discordâncias os contorne (FIG 3.4). Quanto menor a distância entre os precipitados maior é a tensão adicional para contorná-los, a partir de um determinado valor de tensão adicional se torna favorável cortar o precipitado ao invés de contorna-lo.

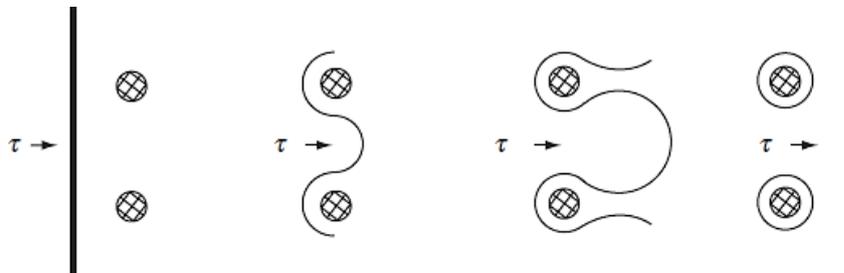


FIGURA 3.4 – Representação de uma discordância contornando partículas de segunda fase.

FONTE: MAYERS e CHAWLA, 2008.

Quando os precipitados são macios e pequenos, coerentes ou não com a matriz, eles podem ser cisalhados e cortados pelas discordâncias (FIG 3.5). Isto ocorre quando os precipitados não tem resistência suficiente para suportar a tensão gerada para contorna-los. (MEYERS e CHAWLA, 2008)

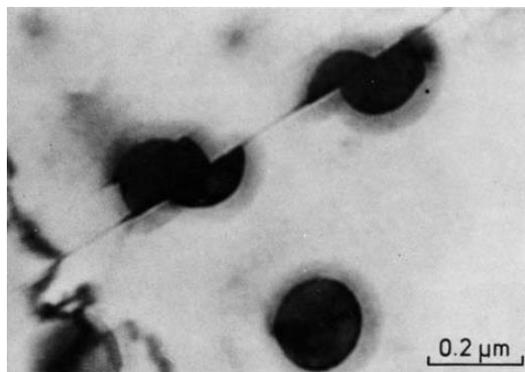


FIGURA 3.5 – Imagem gerada por microscopia eletrônica de transmissão de precipitados Ni-Cr cisalhados por discordâncias.

FONTE: MEYERS e CHAWLA, 2008.

Outro fator importante é a morfologia dos precipitados. Os precipitados nem sempre são esféricos, muitas vezes tem forma de placas, bastões ou agulhas. O endurecimento máximo é produzido por bastões e placas (AGUILAR, 1986).

Uma das formas de se controlar a morfologia e distribuição da segunda fase é o endurecimento por precipitação. O aumento de resistência mecânica por precipitação ou envelhecimento se dá quando se precipita uma segunda fase de uma solução sólida supersaturada. Os precipitados podem estar distribuídos nos contornos ou interior dos grãos. O tratamento térmico responsável pelo envelhecimento consiste em 3 etapas: solubilização, resfriamento e envelhecimento. A solubilização envolve o aquecimento da solução sólida na região monofásica, mantendo por um tempo suficiente para dissolver precipitados solúveis. A etapa de resfriamento consiste em resfriar bruscamente a liga, de modo a evitar precipitados estáveis, obtendo assim uma solução sólida supersaturada. O envelhecimento é a etapa onde o material permanece em temperatura constante, ambiente ou superior. O aumento de resistência mecânica aumenta com o tempo de envelhecimento devido a redução do tamanho dos precipitados (MEYERS E CHAWLA, 2008)..

### 3.1.2 Amaciamento

Um exemplo da influência do caminho de deformação no comportamento mecânico dos metais, promovendo amaciamento, é o efeito *Bauschinger*. Este efeito pode ser observado quando o material é submetido a ciclos de tração e compressão, com mesma amplitude de deformação e se traduz pela histerese que ocorre entre os ciclos (GRA. 3.5). O material ao ser traçado, se deforma plasticamente do ponto A ao ponto B, é descarregado e volta ao repouso no ponto C. Quando se aplica sobre este material um carregamento compressivo, ele se deforma plasticamente do ponto D ao ponto E quando ocorre o descarregamento e se finaliza o ciclo. Observa-se que o limite de escoamento obtido pela compressão ( $\sigma_b$ ) é menor que o registrado na tração ( $\sigma_a$ ), caracterizando amaciamento do material após o processamento mecânico. A linha tracejada representa o caminho que o material seguiria se tivesse a compressão o mesmo comportamento que foi verificado na tração.

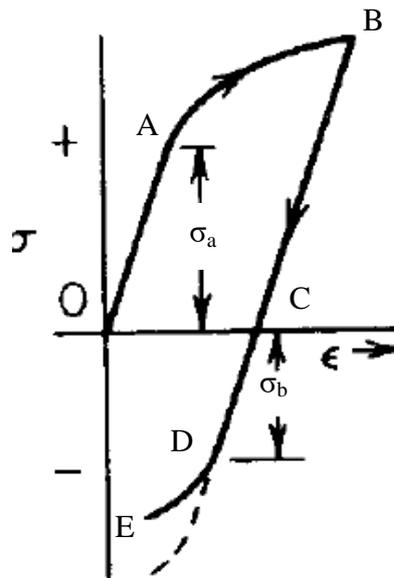


GRAFICO 3.5 – Representação do efeito Bauschinger.

FONTE: DIETER, 1981.

POLAKOWSKI (1951) detectou amaciamento associado ao aumento da deformação, quando submeteu corpos de prova de aço, com diferentes percentuais de Carbono, pré-deformados por tração, à ensaios de compressão. Durante a compressão, após o amaciamento, observa-se que os aços endurecem com tendência a atingir a dureza do corpo de prova comprimido a partir do material recozido (condição antes do amaciamento). No GRA. 3.6 os marcadores com preenchimento branco representam corpos de prova com 0,28% de C e os marcadores com preenchimento preto representam os corpos de prova com 0,44% de C. As curvas tracejadas são referentes aos valores medidos nos corpos de prova tracionados e corpos de prova comprimidos a partir do material recozido. As curvas contínuas representam as medições realizadas no material que sofreu compressão após ser pré-deformado por tração. Cada símbolo indica uma quantidade de pré-deformação, como listado na legenda.

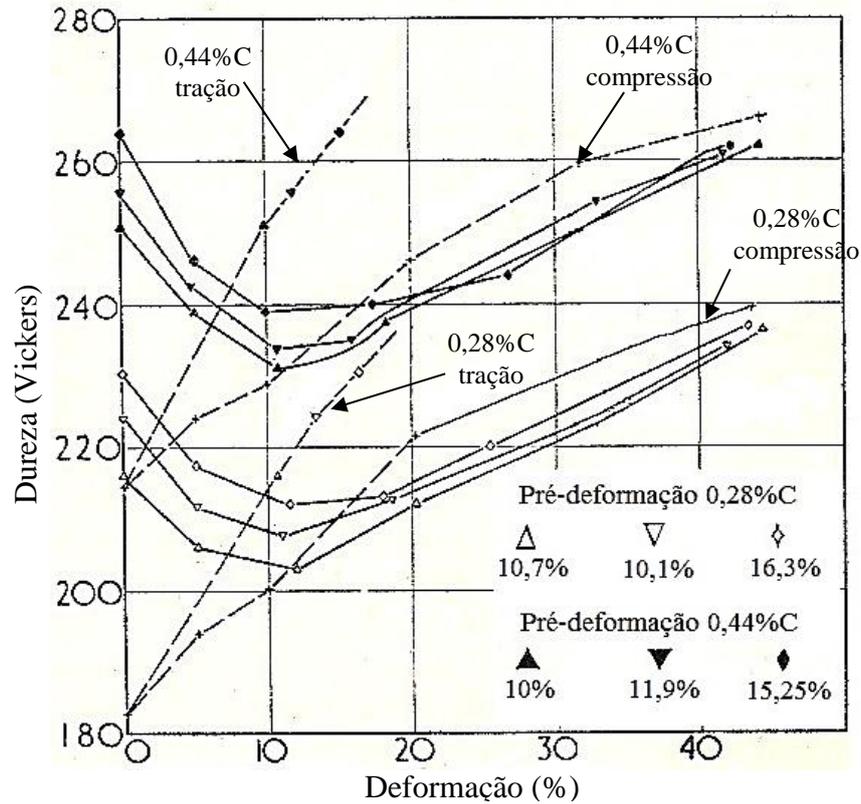


GRÁFICO 3.6 – Curvas dureza x deformação para aços com 0,28 e 0,44% de C com diferentes quantidades de pré-deformação.

FONTE: DIETER, 1981.

COFFIN E TAVERNELLI (1959) observaram a ocorrência de amaciamento ao submeter diversos materiais pré-encruados a carregamento cíclico. Os pesquisadores afirmaram que o carregamento cíclico tende a reestabelecer no material pré-encruado as características mecânicas alteradas pelo encruamento. O GRA. 3.7 mostra a variação do comportamento do material pré-encruado por compressão uniaxial de 20% com a amplitude de deformação no processamento cíclico. Para amplitudes menores se tem amaciamento enquanto para amplitudes maiores se tem encruamento.

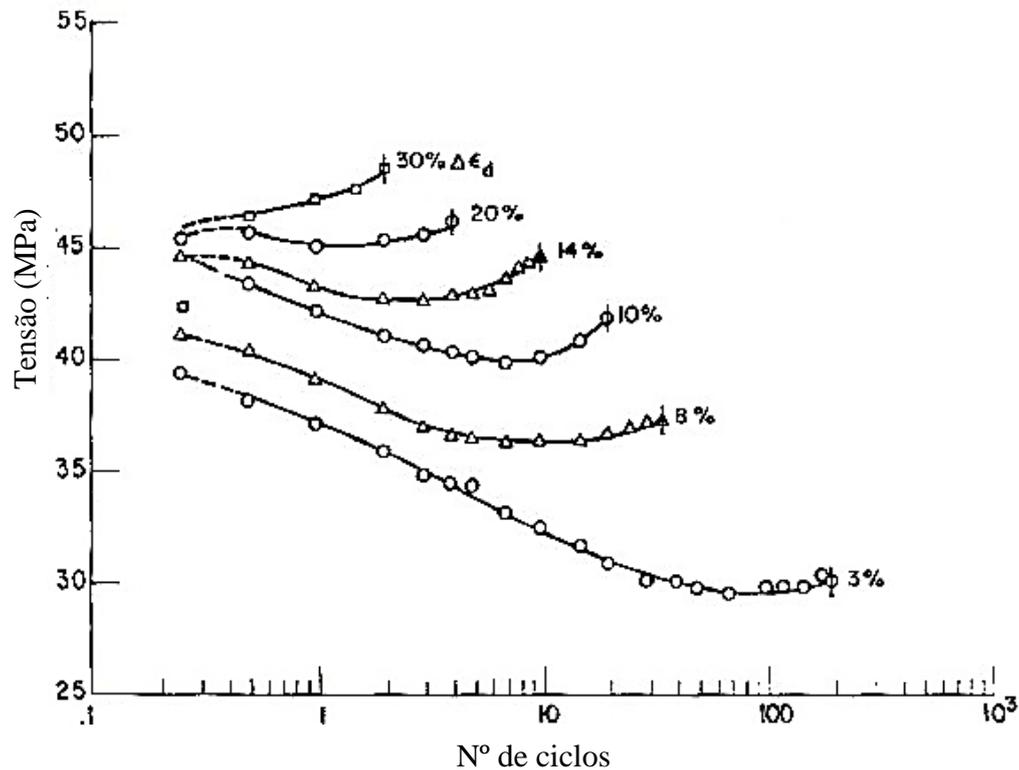


GRÁFICO 3.7 – Curvas tensão x ciclos de deformação de Al comercialmente puro pré-deformado em 0,2 e diferentes amplitudes de deformação.

FONTE: COFFIN E TAVERNELLI, 1959.

CORRÊA *et al.* (2003, 2005 e 2007) avaliou o comportamento de diferentes metais submetidos à torção cíclica. Em 2003, avaliou o comportamento de um aço baixo carbono e latão submetidos a tração, torção cíclica e torção cíclica com pré-deformação por tração. Foi observado que o material submetido a torção cíclica apresenta menores valores de tensão para uma mesma quantidade de deformação quando comparado com o material tracionado (GRA. 3.8 a e b). O material pré-deformado e submetido a torção cíclica também apresentou menores valores de tensão de fluxo quando comparado ao material somente tracionado. O aço apresentou um amaciamento progressivo durante a torção cíclica (GRA. 3.9 a). Quando submetidas a tração, as amostras submetidas à deformação por torção cíclica apresentam maior coeficiente de encruamento que o obtido com a tração pura, para uma mesma quantidade de deformação, para os dois materiais avaliados (GRA. 3.8 c e d).

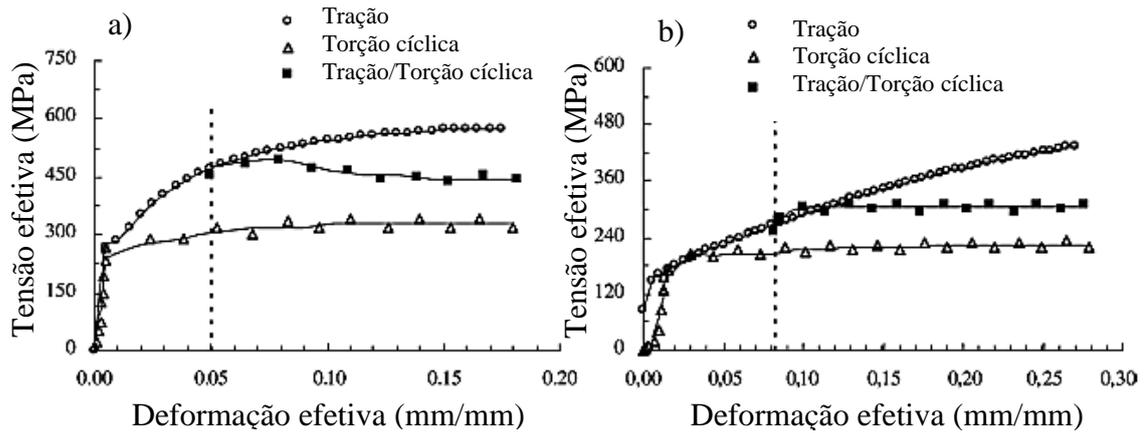


GRÁFICO 3.8 – Curvas tensão efetiva x deformação efetiva de tração, torção cíclica e tração com posterior torção cíclica. a) aço; b) latão.

FONTE: CORRÊA *et al.*, 2003.

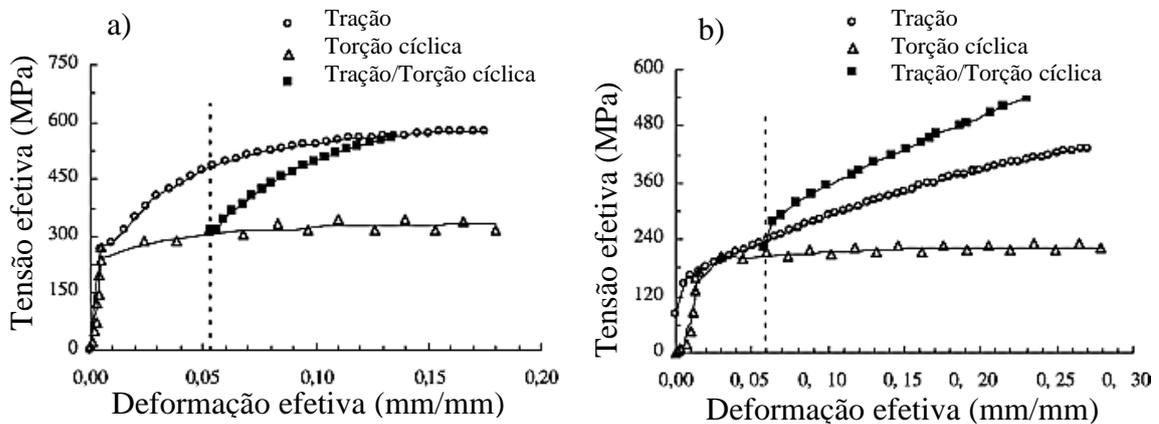


GRÁFICO 3.9 – Curvas tensão efetiva x deformação efetiva de tração, torção cíclica e tração do material deformado por torção cíclica. a) aço; b) latão.

FONTE: CORRÊA *et al.*, 2003.

CORRÊA *et al.* (2005) observou menores tensões de trefilação ao submeter um aço de baixo Carbono à torção cíclica comparando às tensões obtidas na trefilação sem a torção cíclica (GRA. 3.10). CORRÊA *et al.* (2007) trabalhando com o aço inoxidável AISI 304 observou que para este material a torção cíclica não apresenta influência significativa no comportamento mecânico do material. Com estes dois trabalhos, Corrêa evidencia a importância de fatores metalúrgicos específicos de cada material no comportamento destes quando submetidos a deformação cíclica.

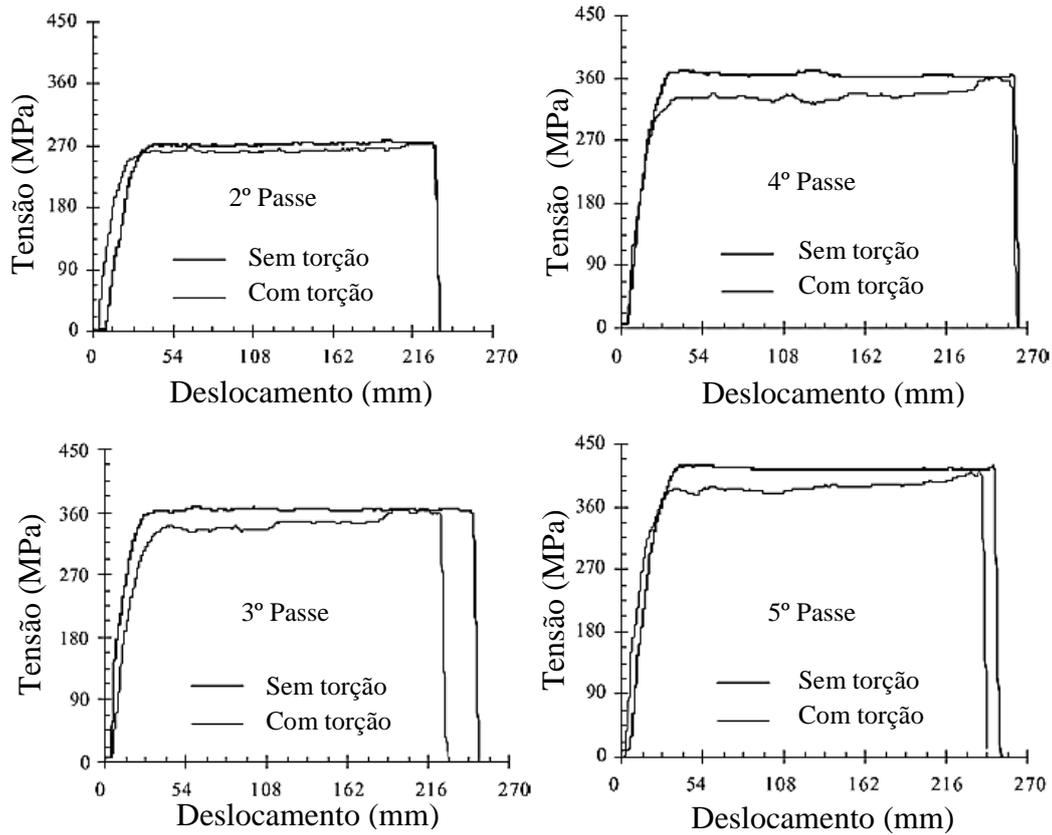


GRÁFICO 3.10- Curvas tensão de trefilação x deslocamento para diferentes passes de trefilação de um aço baixo carbono.

FONTE: CORRÊA *et al.*, 2005.

LI *et al.* (2013) realizou ensaios de compressão em amostras de Cobre eletrolítico submetidas a ciclos de torção. Foram analisadas amostras com grãos grosseiros, laminadas e processadas por ECAP (GRA. 3.11). Os resultados mostram que o material processado por ECAP apresenta amaciamento após o processamento cíclico.

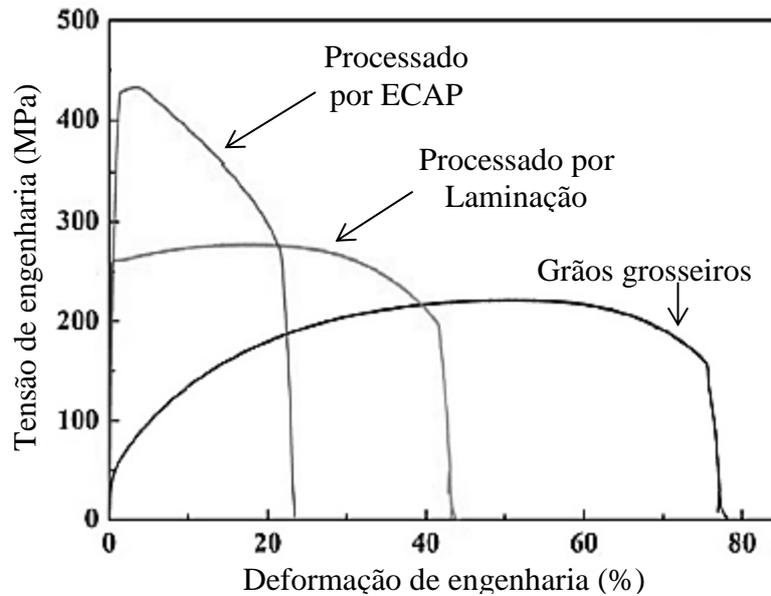


GRÁFICO 3.11– Curvas tensão de engenharia x deformação de engenharia do Cu em diferentes condições.

FONTE: LI et al.,2013.

Trabalhos utilizando a compressão cíclica como deformação plástica severa, com obtenção de amaciamento, foram realizados por KAPOOR *et al.* (2013), FARIA *et al.* (2016), YANG *et al.* (2016) e outros (item 3.3.2).

### 3.2 Deformação plástica severa

Processos de fabricação que envolvem deformação plástica severa (*Severe Plastic Deformation – SPD*) utilizam métodos em que um material metálico é deformado plasticamente até valores muito elevados de deformação. O objetivo da técnica é refinar o tamanho de grão à escala submicrométrica de forma a aumentar a resistência mecânica do metal (segundo a equação de Hall-Petch). Segundo VALIEV *et al.* (2000) este tipo de processamento possibilita a ocorrência da superplasticidade. Dentre as técnicas de SPD, as mais estudadas na literatura são: Torção sob Elevada Pressão (*High Pressure Torsion- HPT*) (ZHILYAEV E LANGDON, 2008), União por Laminação Acumulativa (*Accumulative Roll-Bonding, ARB*) (SAITO *et al.* 1998), Extrusão Angular em Canais Iguais (*Equal Channel Angular Pressing, ECAP*) (VALIEV E LANGDON, 2006) e compressão multiaxial cíclica (*Multi Axial Compression - MAC*) (VALIEV *et al.* 2000, SAKAI *et al.* 2014, ZHU *et al.* 2014).

### 3.2.1 Torção sob Elevada Pressão

O HPT consiste em submeter o material, geralmente em forma de disco de espessura reduzida, inserido em uma matriz, simultaneamente á torção e aplicação de carga uniaxial com o auxílio de um punção (FIG. 3.6). A matriz tem como função impedir a expansão lateral do material durante a aplicação de carga.

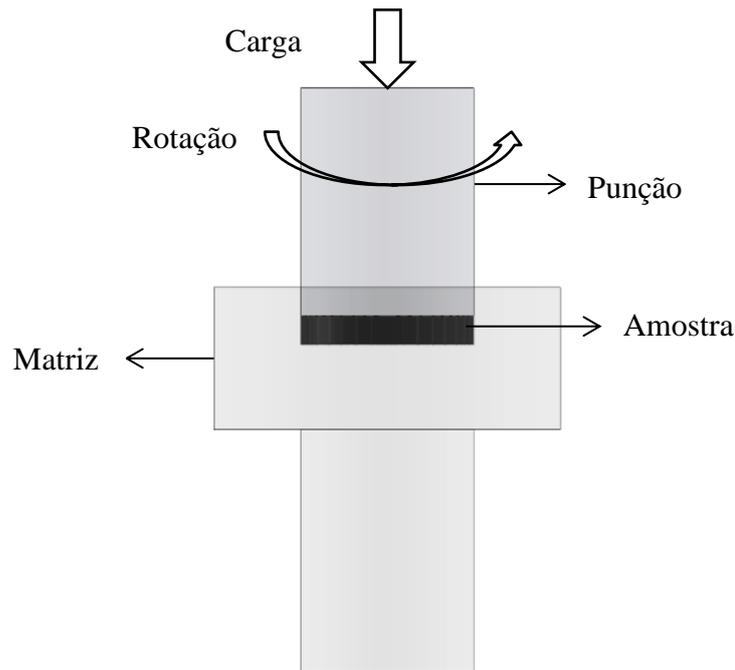


FIGURA 3.6– Representação do processamento por torção sob elevada pressão.

Segundo SABIROV *et al.* (2013), as principais desvantagens do HPT são: o tamanho reduzido das amostras processadas e a heterogeneidade de deformação. No entanto, KAWASAKI (2014) relata que em diferentes pesquisas alguns materiais processados por HPT apresentam uma maior homogeneidade microestrutural quando são impostos a altos valores de deformação.

### 3.3.2 União por laminação acumulativa

O ARB é uma técnica onde duas chapas sobrepostas são laminadas sucessivamente com redução de 50% na espessura, em cada passe: após cada etapa de laminação a chapa obtida é cortada em duas partes iguais, que são superpostas e novamente laminadas (FIG. 3.7). Este

processo pode ser repetido varias vezes, acumulando deformações e refinando os grãos a cada etapa (SAITO *et al.*, 1998).

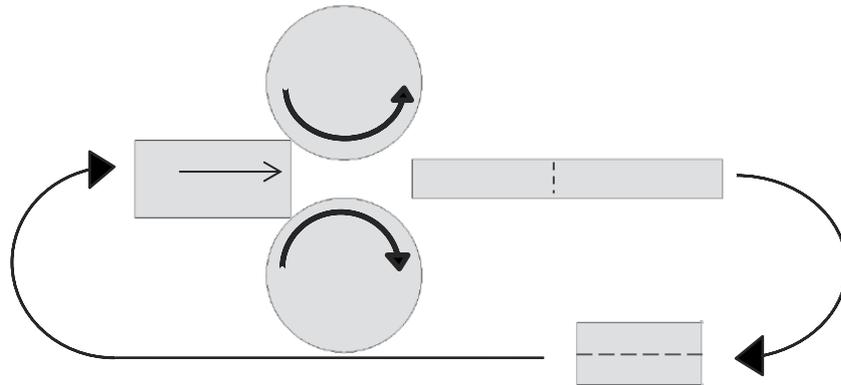


FIGURA 3.7– Representação do processamento por união por laminação acumulativa

De acordo com SABIROV *et al.* (2013), a microestrutura obtida após processamento por ARB é fortemente anisotrópica. Além disso, o processo demanda tempo e requer um equipamento com boa precisão, de forma a se obter uma união de boa qualidade entre as chapas.

### 3.3.1 Extrusão Angular em Canais Iguais

A Extrusão Angular em Canais Iguais (*Equal Channel Angular Pressing, ECAP*) consiste em forçar a passagem do material por dois canais de mesma seção transversal, que formam um ângulo “ $\Phi$ ” entre si (FIG. 3.8). O ângulo do setor referente ao raio do arco externo do canal é chamado “ $\Psi$ ”.

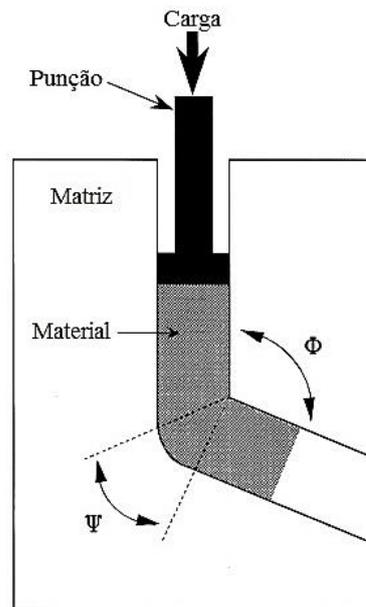


FIGURA 3.8– Representação do processamento por ECAP

FONTE: NAKASHIMA *et al.*, 1998.

Ao ser impulsionado dentro da matriz, o material se movimenta como corpo rígido e sofre deformação por cisalhamento na intercessão dos canais sem que ocorram modificações na sua geometria (SEGAL, 1995). A FIG. 3.9 apresenta a região onde ocorre o cisalhamento durante o processo para dois tipos de matrizes. A FIG. 3.9 (a) mostra uma matriz com  $\Phi$  e  $\Psi$  iguais a  $90^\circ$ : a região interna ao setor gerado pelo ângulo de curva externo na intercessão dos canais é a zona onde ocorre o cisalhamento. Quanto menor  $\Psi$  menor a zona de cisalhamento. A FIG. 3.9 (b) mostra uma matriz com  $\Phi$  igual a  $90^\circ$  e  $\Psi$  igual  $0^\circ$ ; para este caso específico ( $\Psi$  igual  $0^\circ$ ) tem-se um plano de cisalhamento.

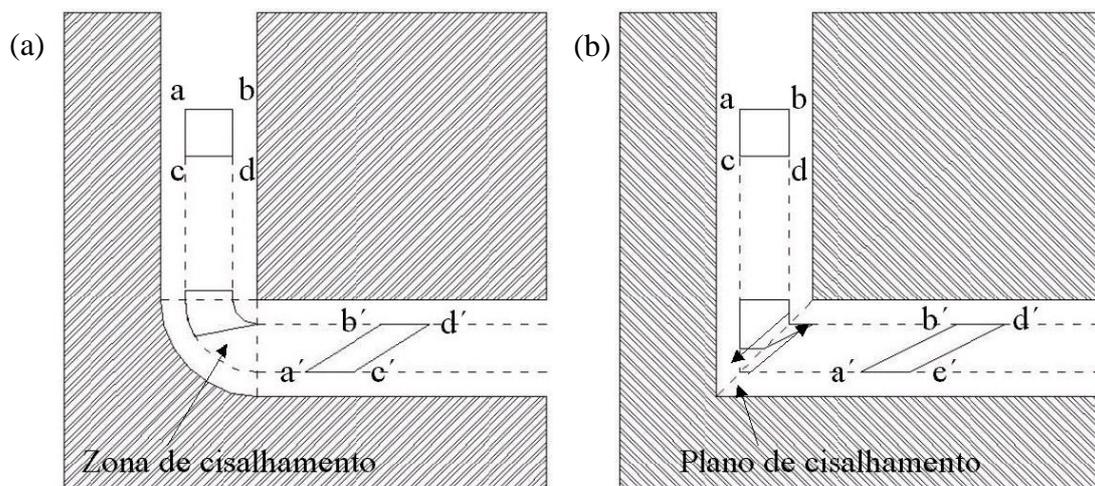


FIGURA 3.9 – Regiões de cisalhamento em matrizes de ECAP.

FONTE: FIGUEIREDO, 2005.

IWAHASHI et al. (1996) desenvolveu uma formulação matemática para calcular a deformação imposta por um passe de ECAP, na região de cisalhamento, a partir dos ângulos característicos da matriz (EQUAÇÃO 2.3). A deformação imposta pelo ECAP diminui ao aumentar os ângulos  $\Phi$  e/ou  $\Psi$ . Geralmente são adotados  $\Phi$  entre  $90^\circ$  e  $120^\circ$  e  $\Psi$  entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

$$e_N = \left[ \frac{2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right] \quad (2.3)$$

Quando se trabalha com mais de um passe de ECAP existem algumas possibilidades de posicionamento do material na entrada da matriz para a sequência de passes. A FIG 3.10 (a) representa o corpo de prova saindo da matriz após o primeiro passe. No(s) passe(s) subsequente(s) é usual seguir as rotas A, B ou C. Para seguir a rota A (FIG 3.10 (b)) o corpo de prova deve ser colocado na entrada na mesma posição em que saiu. A rota B apresenta duas variantes, Ba e Bc: na Rota B<sub>a</sub> o corpo de prova é rotacionado em  $90^\circ$  no eixo x e  $180^\circ$  no eixo y, na rota Bc o corpo de prova é rotacionado em  $90^\circ$  no eixo x e não é rotacionado no eixo y. Para seguir a rota C o corpo de prova deve ser rotacionado  $180^\circ$  no eixo x.

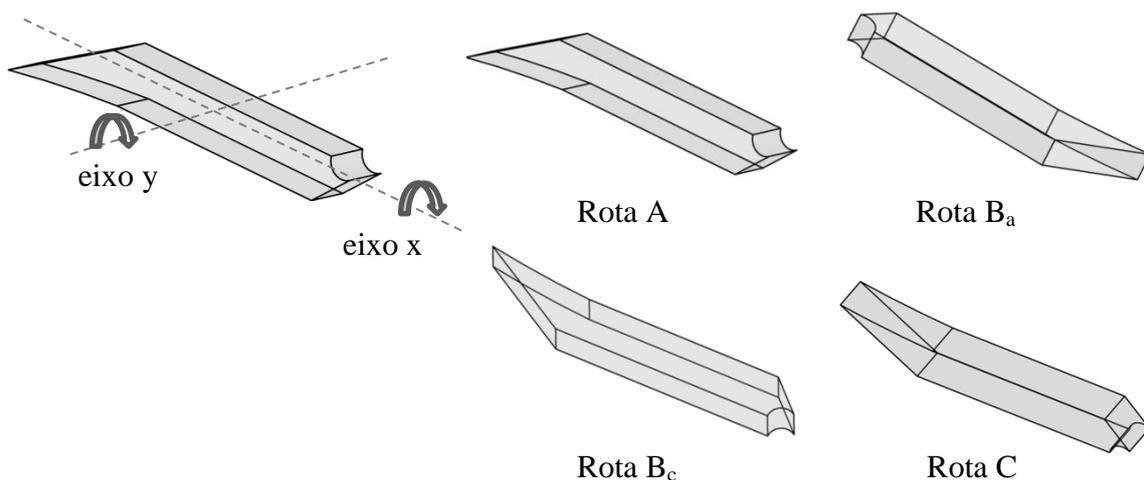


FIGURA 3.10 – Rotas comumente adotadas no processamento por ECAP.

ZHU E LOWE (2000) identificaram os planos de cisalhamento ativados durante a sequência de passes no processamento por ECAP para diferentes rotas conforme FIG 3.11.

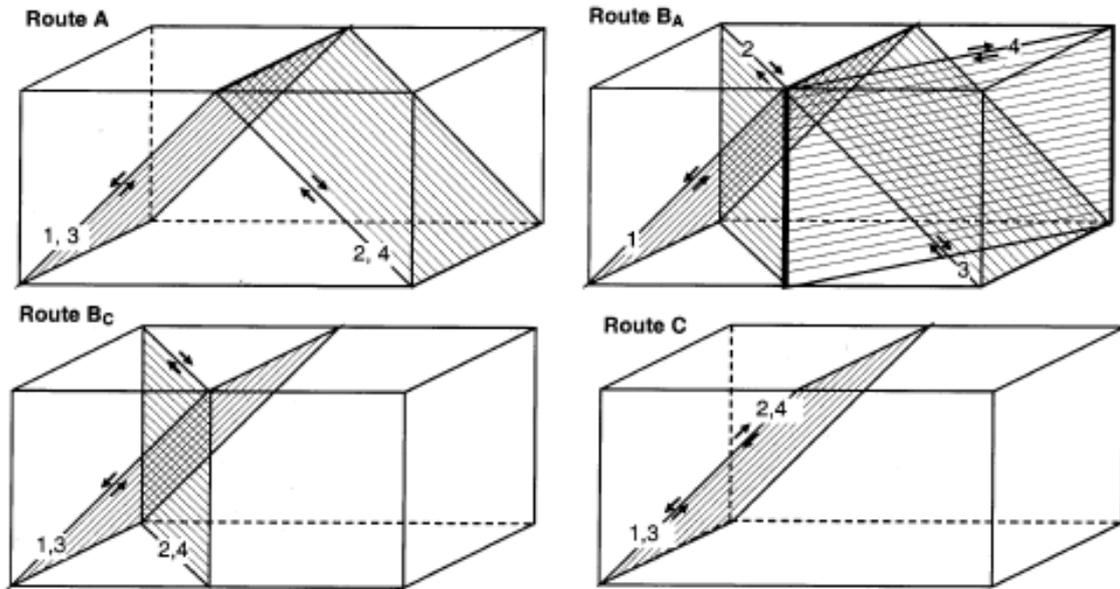


FIGURA 3.11– Planos de cisalhamento para sequência de passes de ECAP.

FONTE: ZHU *et al.*, 2000.

Após análise por microscopia eletrônica de transmissão, IWAHASHI (1998) concluiu que 1 passe de ECAP provoca a formação de bandas de cisalhamento que formam um ângulo de  $45^\circ$  com as faces superior e inferior do corpo de prova, quando observadas através do plano perpendicular ao plano de cisalhamento. Ele afirmou também que a microestrutura obtida após o processamento depende da rota adotada. Segundo seus estudos a rota B tem uma evolução de bandas que favorece a obtenção mais rápida de grãos equiaxiais. A FIG. 3.12 mostra as bandas de cisalhamento obtidas por SHAERI *et al.* (2015) em estudos realizados utilizando a liga Al 7075.



FIGURA 3.12 – Bandas de cisalhamento obtidas no processamento por ECAP.

FONTE: SHAERI *et al.*, 2015.

Estudos recentes analisam a influência do material e da presença de segunda fase no processamento por ECAP; no início dos estudos do ECAP eram utilizados na maioria dos casos materiais comercialmente puros.

NIKULIN *et al.* (2012) visando identificar a influência dos elementos de liga e a presença de segunda fase durante o processamento por ECAP da liga de Al-Mg-Mn (Al 1561) relatou que a 360°C obteve precipitados equiaxiais de  $Al_6Mn$  de alta resistência com tamanho médio de aproximadamente 25 nm. Segundo autor, a presença destes precipitados promove a geração de discordâncias e estabelece novos contornos de grão.

Estudos utilizando a liga Al-10%Si realizados por CARDOSO *et al.* (2013) afirmam que ocorre refino similar das partículas de Si para todas as temperaturas adotadas e que a variação da temperatura tem um efeito no tamanho dos grãos obtidos; 500-700 nm para 4 passes de ECAP em temperatura ambiente e 900 nm para o mesmo processamento a 300°C.

JIANG *et al.* (2011) e SONG *et al.* (2013) relatam aumento da resistência a corrosão com o aumento de passes de ECAP. Ao trabalhar com Al-11%Si JIANG *et al.* (2011) afirma que este efeito pode ser atribuído à maior homogeneidade da fase secundária devido a sequência de passes no processamento por ECAP.

A deformação plástica associada ao processamento por ECAP pode induzir envelhecimento dinâmico quando realizado em temperatura favorável e fornece ao material um grande ganho na resistência mecânica em razão a alta densidade de discordâncias e a nucleação de precipitados devido a concentração de tensões durante o processamento (VASEGHI *et al.*, 2010). TABATABAEI *et al.*, (2010) processaram uma liga Al-Mg-Si-Cu a fim de avaliar o envelhecimento dinâmico em diferentes temperaturas e taxas de deformação, chegando à conclusão de que com temperatura 150 °C e taxa de deformação  $0,0025 \text{ s}^{-1}$  se obtém maior limite de escoamento e para as temperaturas de 150 e 200 °C ocorre aumento na resistência elétrica que atribuíram aos precipitados finos devido o envelhecimento dinâmico.

SUH *et al.* (2016) relatam redução da anisotropia de chapas laminadas da liga de magnésio AZ31 ao submetê-las a ECAP utilizando uma rota D, que consiste em rotacionar o material

90° no plano da chapa. O autor mostra que através da rota D foi possível obter microestrutura mais homogênea com grãos menores e mais equiaxiais que em um único passe.

Com o ECAP é possível processar amostras com grandes dimensões, em etapas sucessivas, o que permite alta produção (JIN *et al.* 2012). VALIEV E LANGDON (2006) afirmam que devido aos benefícios do processamento por ECAP breve esta técnica será utilizada industrialmente.

### 3.3.2 Deformação multi-axial cíclica

O MAC consiste basicamente em realizar compressões sequenciais no material alterando-se a direção na qual é aplicada a deformação (VALIEV *et al.*, 2000), conforme ilustrado na FIG. 3.13. A homogeneidade de deformação obtida através deste processamento é menor se comparada ao ECAP e HPT.

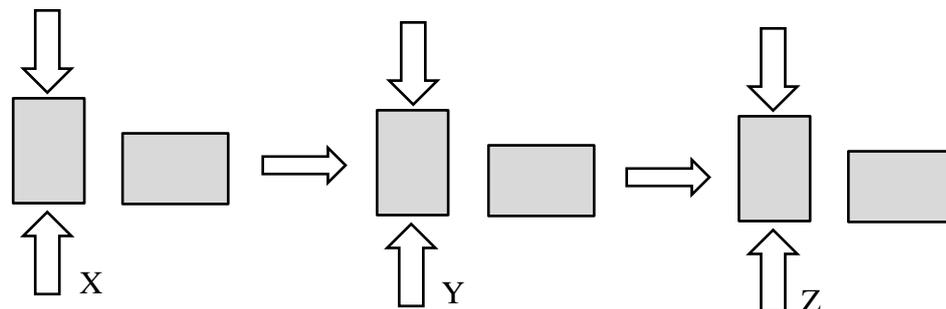


FIGURA 3.13 – Representação esquemática do MAC.

Na literatura são descritos trabalhos envolvendo deformação multiaxial cíclica com compressão livre (ARMSTRONG *et al.*, 1982; PADAP *et al.*, 2009 e FARIA *et al.*, 2016), compressão com restrição de deformação em uma direção (GURAO *et al.*, 2013, XU *et al.*, 2013) e compressão em matriz fechada (KAPOOR *et al.*, 2013 e LIU *et al.*, 2015), conforme representado na FIG. 3.14.

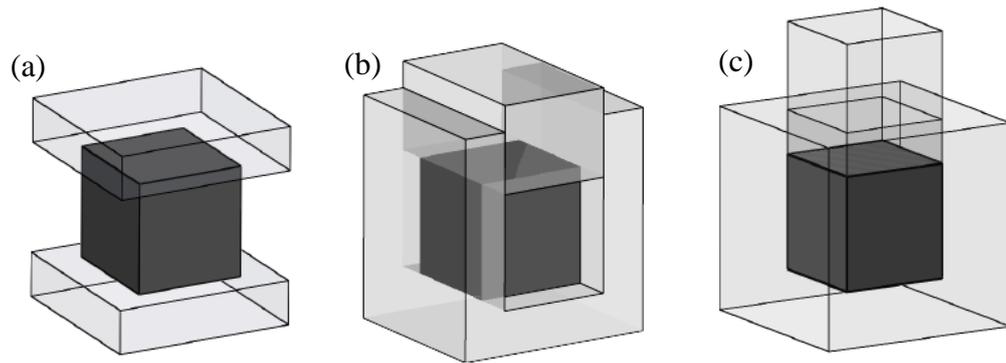


FIGURA 3.14– Representação esquemática do MAC para as diferentes condições de processamento, compressão: a) livre; b) com restrição em uma direção; c) confinado.

Um dos primeiros estudos relacionados à deformação multi-axial cíclica, senão o primeiro, foi realizado por ARMSTRONG *et al.* (1982), adotando amplitude de deformação de 0,075 a 0,33. Estudos recentes comumente adotam maiores amplitudes de deformação: KAPOOR *et al.* (2013) e YANG *et al.* (2016) utilizam amplitude de deformação de 0,78 e 0,8 respectivamente.

Ao trabalhar com a liga Al 1100 ARMSTRONG *et al.* (1982) realizou compressões multiaxiais cíclicas livres. No GRA. 3.12 é possível observar que o material processado ciclicamente apresenta comportamento diferente do processado uniaxialmente. A compressão cíclica promove menor encruamento no material e o comportamento depende da amplitude de deformação, quanto maior a amplitude de deformação maior a tensão necessária para uma mesma quantidade de deformação.

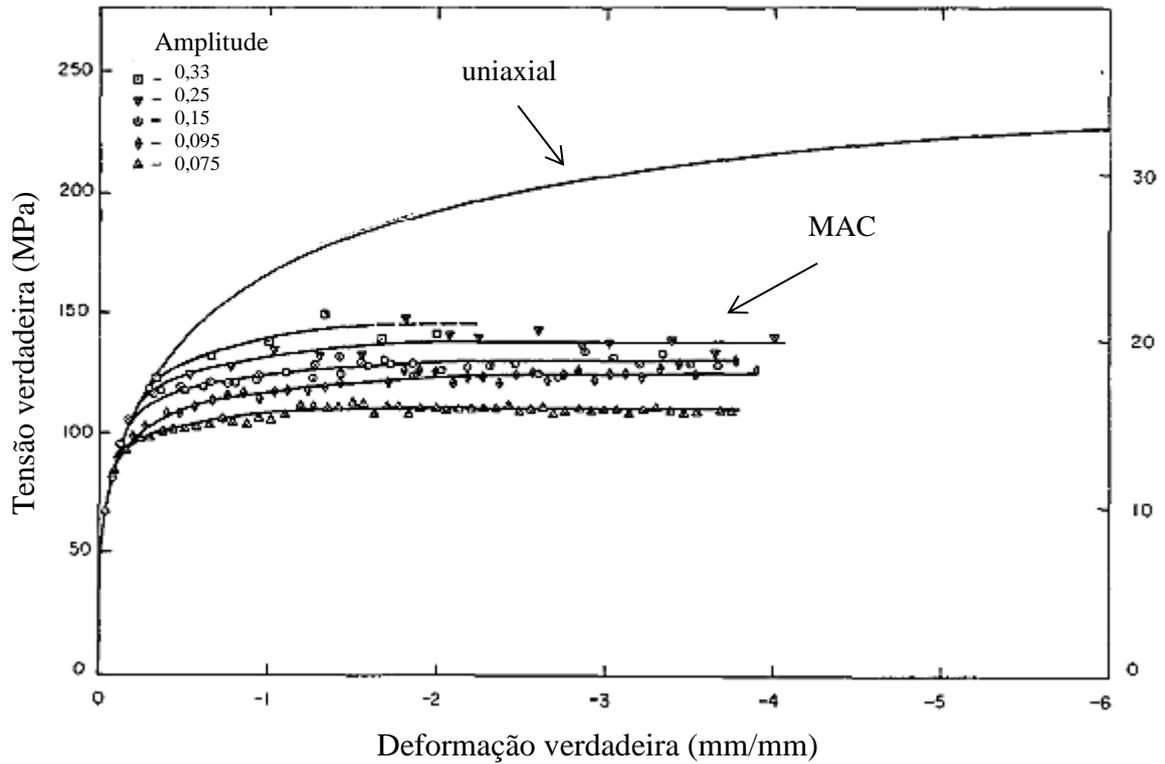


GRAFICO 3.12 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al 1100 recozido e recozido e processado multi-axialmente com diferentes amplitudes de deformação.

FONTE: ARMSTRONG *et. al.*, 1982.

O GRA. 3.13 apresenta curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al 1100 recozido, processado por MAC e pré-deformado e processado por MAC, obtidas por ARMSTRONG *et al.* (1982). É visto que o material pré-deformado apresenta amaciamento quando submetido à deformação cíclica.

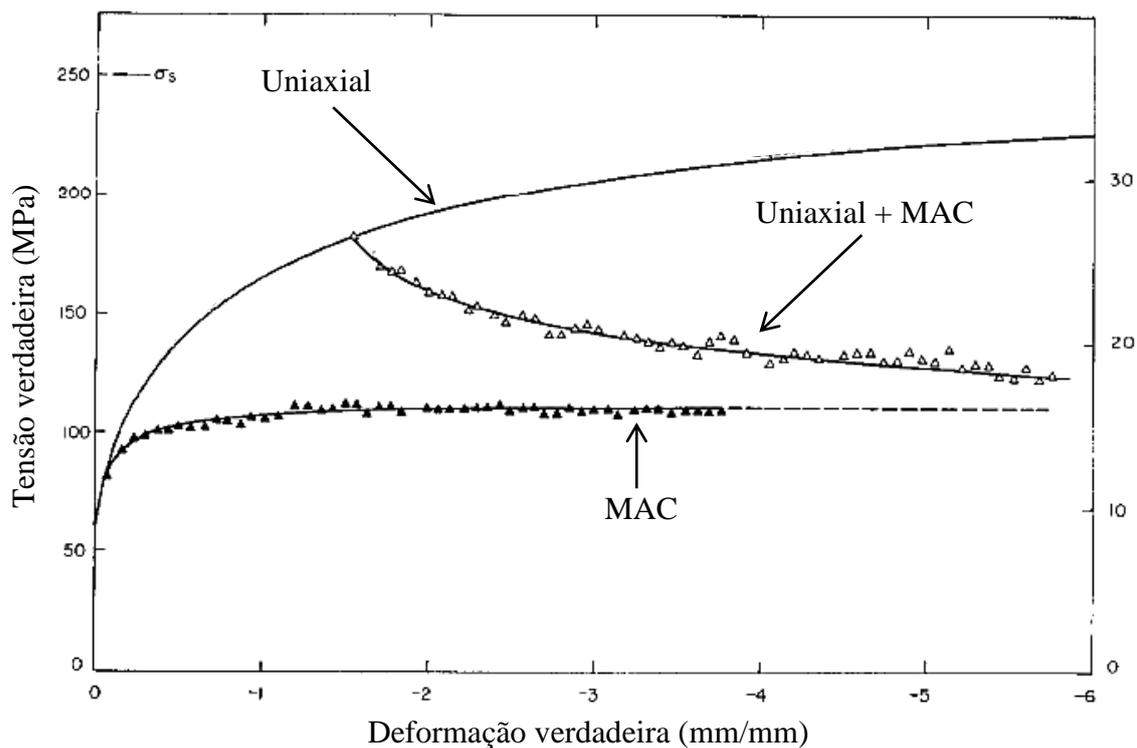


GRAFICO 3.13 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al 1100 recozido, recozido e processador por MAC e recozido, pré-deformado e processado por MAC.

FONTE: ARMSTRONG, 1982.

O GRA. 3.14 mostra a curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material recozido, a curva do material pré-deformado uniaxialmente e processado ciclicamente com amplitude de deformação de 0,15 e a curva monotônica após a compressão cíclica. É visto que após a deformação cíclica o material apresenta taxa de encruamento superior a obtida pelo carregamento monotônico para uma mesma quantidade de deformação. (ARMSTRONG *et al.*, 1982)

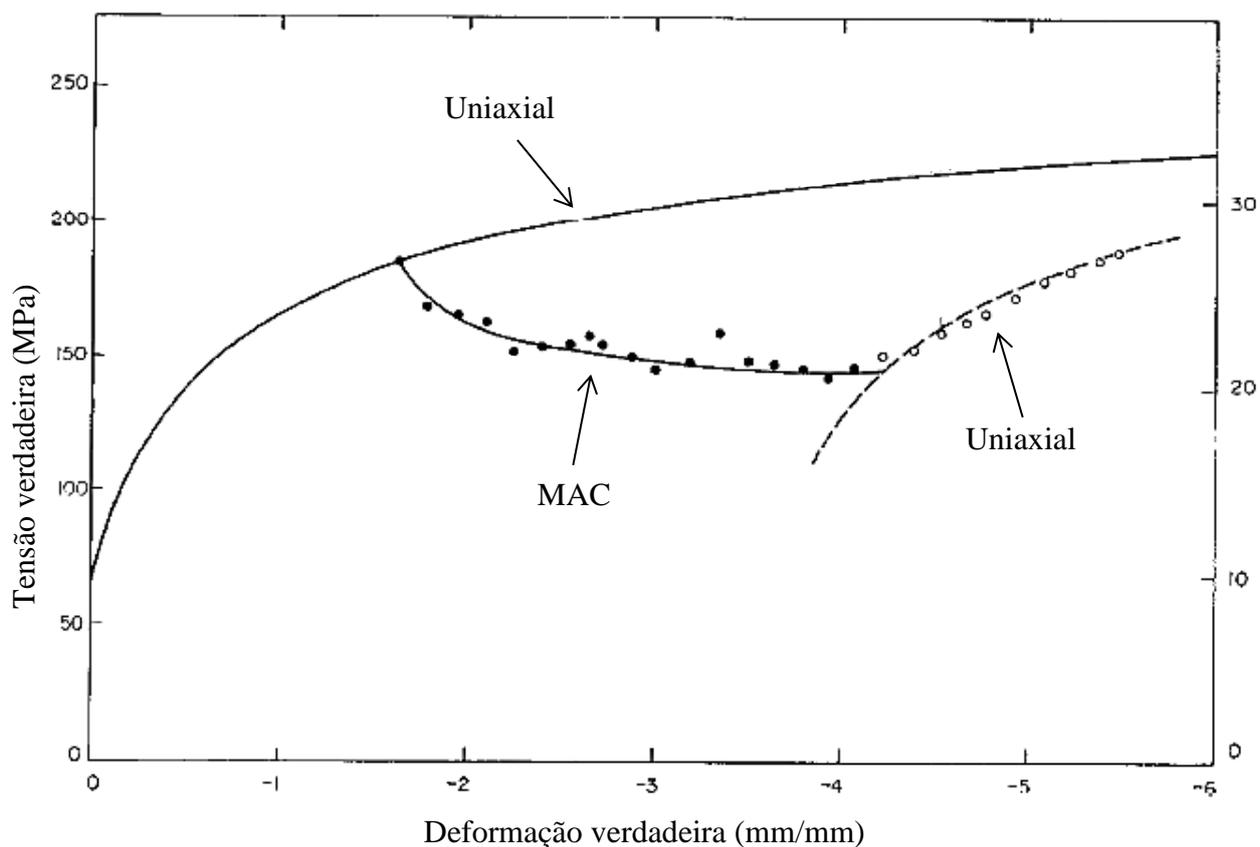


GRAFICO 3.14 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al 1100 recozido, recozido, pré-deformado e processador por MAC e monotônica após MAC.

FONTE: ARMSTRONG, 1982.

ARMSTRONG *et al.* (1982) observaram que no carregamento uniaxial a quantidade de células e subgrãos por unidade de área aumentou com o aumento da deformação e no carregamento multiaxial essa quantidade se manteve constante após 3,0 de deformação. O material processado uniaxialmente e multiaxialmente na sequência apresentou grande influência do processamento uniaxial, apresentando maior área com emaranhados que o material processado multiaxialmente sem processamento prévio. Segundo os autores possivelmente este é o principal fator responsável pela diferença do comportamento mecânico do material nas duas condições.

No GRA. 3.15 são apresentadas as curvas tensão x deformação do processamento cíclico do Alumínio comercialmente puro obtidas por KAPOOR *et al.* (2013) a partir de compressões confinadas. Verifica-se a ocorrência de picos de tensão no final de cada compressão. Isto ocorreria quando as faces do corpo de prova tocam as paredes da matriz. Os pesquisadores atribuíram o amaciamento observado ao refino de grão e formação de subgrãos, e associaram

o aumento do número de ciclos à diminuição da densidade de discordâncias. Entretanto, segundo XU *et al.* (2013) o MAC realizado a temperatura ambiente apresenta baixa homogeneidade de deformação, alta densidade de discordâncias e micro estrutura mal definida. Segundo os pesquisadores para obter uma maior homogeneidade são necessários 35 ciclos de MAC a 100 °C.

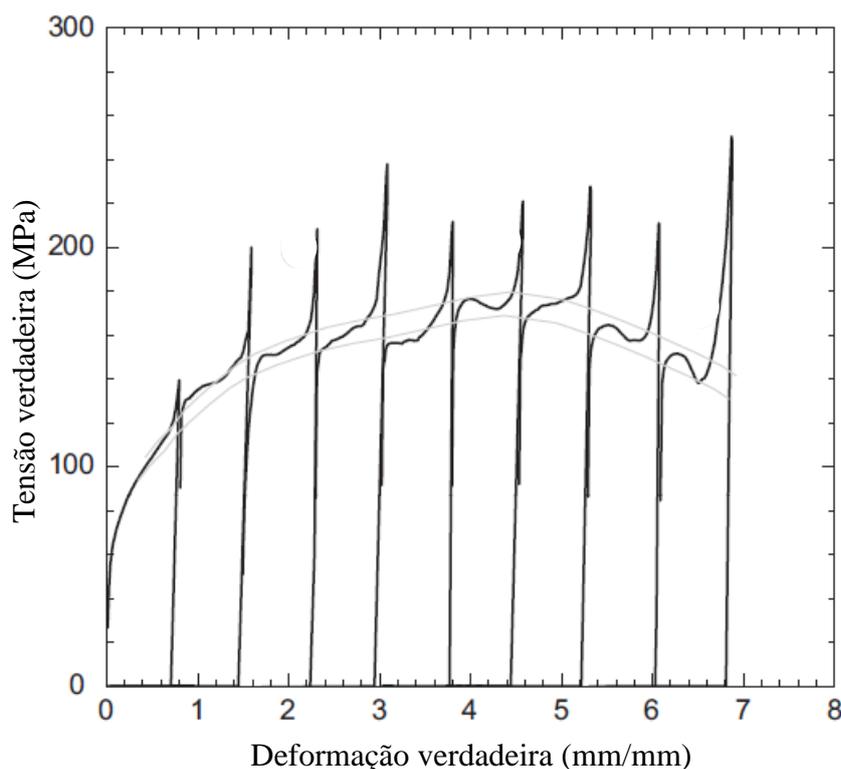


GRÁFICO 3.15 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do processamento por MAC do Al comercialmente puro.

FONTE: KAPOOR *et al.*, 2013.

Ao comparar o comportamento do Alumínio comercialmente puro e da liga Al-4%Mg, submetidas a MAC, YANG *et al.* (2016) relatam que após um ciclo de 3 compressões multiaxiais ambos os materiais apresentaram grãos alongados e alta densidade de discordâncias. Com o aumento do número de ciclos são formados grãos equiaxiais no interior dos grãos alongados devido o acúmulo de discordâncias

Segundo VALIEV *et al.* (2000), diversos estudos relatam que materiais nanoestruturados tem comportamento diferenciado quando submetidos à deformação cíclica. FARIA *et al.* (2016) processaram multiaxialmente Al comercialmente puro após pré-deformação por um passe de

ECAP. Conforme apresentado na GRA. 3.16, pode ser observado que o processamento cíclico após ECAP promove amaciamento no material e aumento da taxa de encruamento quando comparado ao processamento monotônico após o ECAP. Segundo os autores seria possível ajustar experimentalmente a amplitude de deformação e o número de ciclos de compressão a fim de obter diferentes propriedades mecânicas.

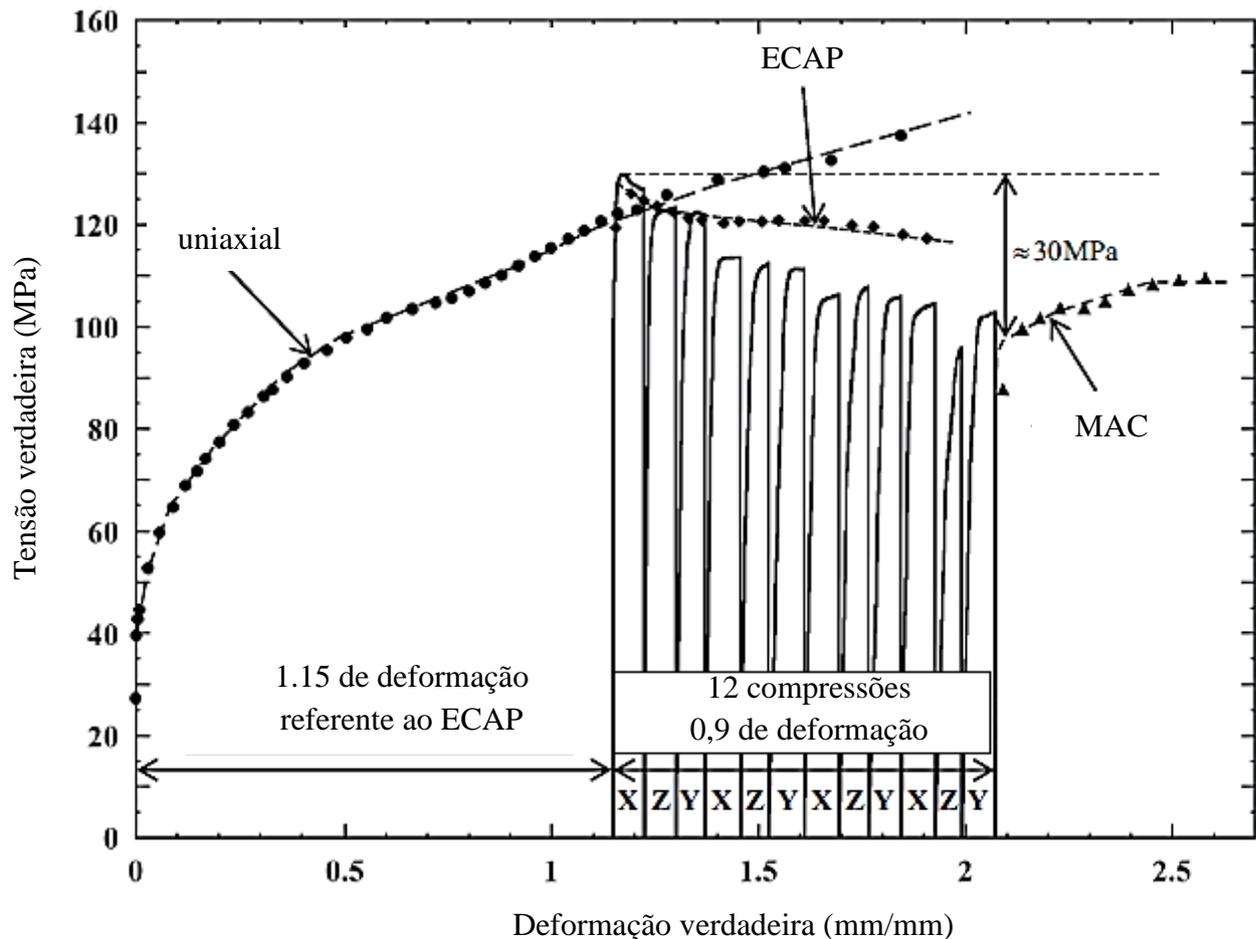


GRÁFICO 3.16 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do Al comercialmente puro recozido, processador por ECAP e 12 compressões cíclicas.

FONTE: FARIA *et al.*, 2016.

Trabalhos na literatura relatam dificuldades na execução de compressões multiaxiais devido à ocorrência de abaulamento no corpo de prova. Este abaulamento estaria associado à heterogeneidade de deformação oriunda do atrito entre o corpo de prova e os pratos de compressão (HOCKETT, 1959). ARMSTRONG *et al.* (1982) relatam a necessidade de usar as faces do corpo de prova, pois o abaulamento gerado durante o processamento, dificulta a sequência de compressões. FARIA *et al.* (2016) relatam dificuldade na obtenção das curvas

tensão-deformação devido o abaulamento. Segundo XU *et al.* (2013) a matriz que restringe a deformação em uma direção foi adotada para que não ocorresse abaulamento e a sequência de compressões pudesse ser feita sem ser necessária a usinagem das faces a serem comprimidas. Segundo KAPOOR *et al.* (2013) quando se realiza o MAC em uma matriz com duas paredes é necessário ter um controle da quantidade de deformação e isto é resolvido ao adotar uma matriz fechada, assim sempre que a matriz estiver preenchida o material terá a mesma quantidade de deformação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência do ECAP seguido de MAC no comportamento mecânico da liga Al 6351 foi realizado experimentalmente. O trabalho consistiu em submeter a liga recozida (REC) ao ECAP e à deformação multiaxial cíclica com o corpo de prova (CP) confinado. A pesquisa seguiu a sequência exposta pelo fluxograma da FIG. 4.1.

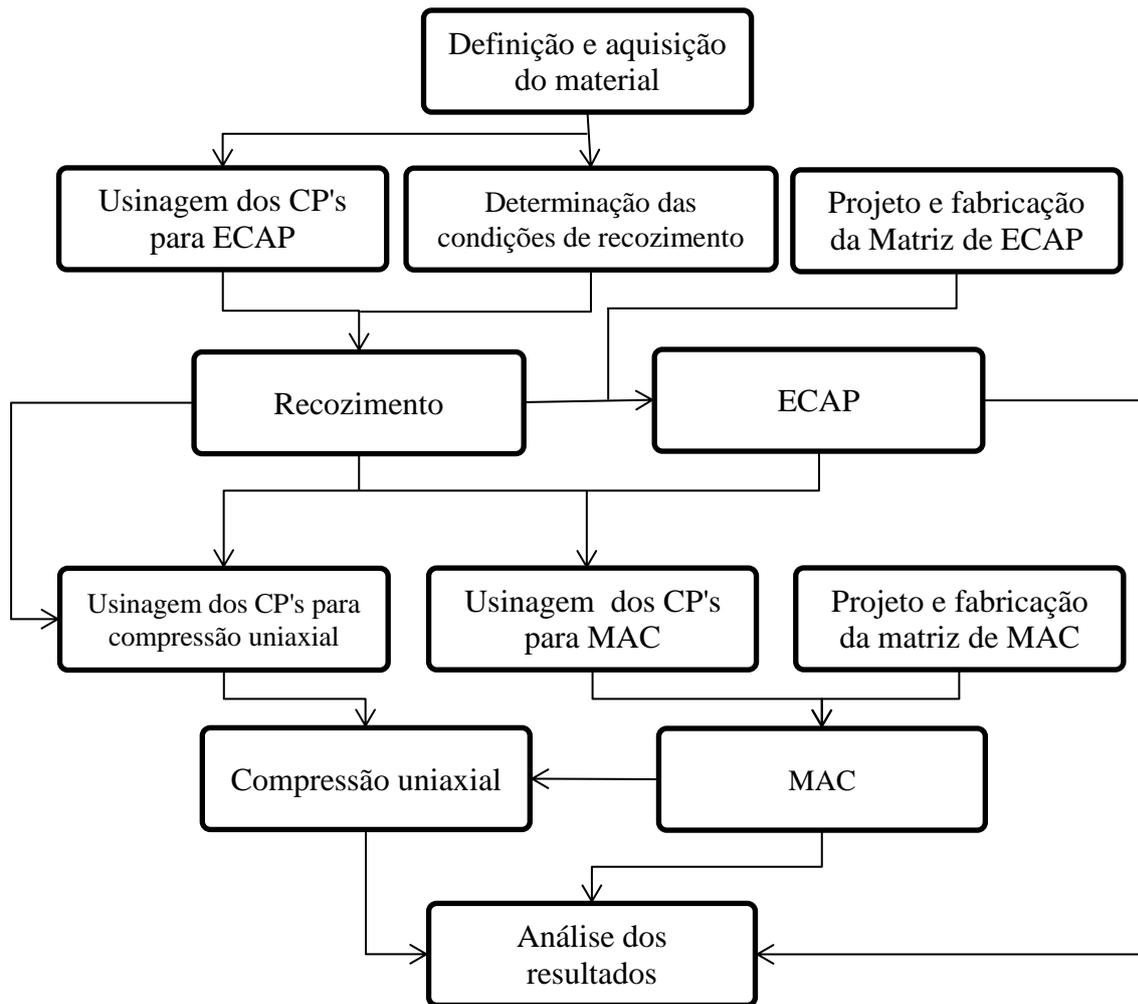


FIGURA 4.1 – Fluxograma do andamento do trabalho

## 4.1 Materiais

O material utilizado neste trabalho foi a liga Al 6351, adquirida em forma de barras de seção transversal quadrada com aresta de 15,8 mm. A Tabela 4.1 apresenta a composição química atestada pelo fornecedor.

TABELA 4.1 – Composição química do material.

Composição química da liga Al 6351									
Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Percentual	1,30	0,50	0,10	0,80	0,80	0,30	0,20	0,20	Balanço

## 4.2 Métodos

Inicialmente, foram realizadas medições de microdureza no material como recebido. Em função dos resultados, foi feito o recozimento do material após testes preliminares. Corpos de prova do material recozido foram usinados para o processamento por ECAP. A partir do material recozido e do recozido e processado mecanicamente foram fabricados corpos de prova que foram submetidos a compressões uniaxiais e MAC.

### 4.2.1 Ensaio de Microdureza

Com o objetivo de avaliar o grau de encruamento do material adquirido, corpos de prova de 15,8 x 15,8 x 10 mm foram submetidos a ensaios de microdureza Vickers. As medições foram realizadas em um microdurômetro Mitutoyo, com capacidade de carga de 1 kgf, alocado no laboratório de metrologia do departamento de engenharia mecânica da UFMG. Foram realizadas 5 medições em cada um dos 3 corpos de prova analisados, utilizando 500 gf.

Também foram realizados ensaios de microdureza, utilizando o mesmo procedimento descrito acima, em corpos de prova do material após recozimento sob diferentes condições (testes de recozimento) a fim de validar a efetividade do tratamento térmico.

#### 4.2.2 Recozimento

Em função dos valores obtidos nas medições de microdureza do material como recebido, foram realizados estudos para determinação das condições adequadas de recozimento, com base em informações da literatura (ASM, 1990). Os testes foram realizados em amostras de 15,8 x 15,8 x 10 mm em um forno INTI modelo FT1300 com potência de 15 kW. Durante o recozimento, foram utilizados o controlador do forno e um termômetro digital Minipa modelo MT-306, previamente aferido, para garantir a confiabilidade das medições. O recozimento dos corpos de prova já usinados foi feito a 400 °C por 1 hora.

#### 4.2.3 Fabricação dos corpos de prova para ECAP

Corpos de prova para recozimento e posterior ECAP foram cortados a partir do material como recebido, com comprimento de 80 mm, mantendo a seção transversal da barra como recebido (15,8 x 15,8 mm). O acabamento foi dado por fresamento, FIG. 4.2.



FIGURA 4.2 – Corpo de prova para ECAP

#### 4.2.4 ECAP

As amostras recozidas foram processadas por 1 e 4 passes de ECAP (1ECAP e 4ECAP) . Para as amostras que foram processadas por quatro passes de ECAP foi adotada a rota B<sub>C</sub>. Os corpos de prova foram processados sequencialmente com velocidade constante de

20 mm/min, ou seja, a partir do segundo corpo de prova a amostra processada empurrava a anterior.

A matriz utilizada no processamento por ECAP foi projetada e construída especialmente para este trabalho, a fim de se evitar problemas experimentais detectados em trabalhos anteriores e facilitar a montagem e desmontagem do conjunto (FIG. 4.3). Os canais da matriz tem seção transversal quadrada com aresta de 16 mm. Os canais se interceptam formando um ângulo de 90° entre eles. Com o objetivo de possibilitar o processamento de materiais mais resistentes a frio e a quente, a matriz foi fabricada em aço AISI H13, com posterior têmpera e revenimento que induziram dureza de 52 HRC.

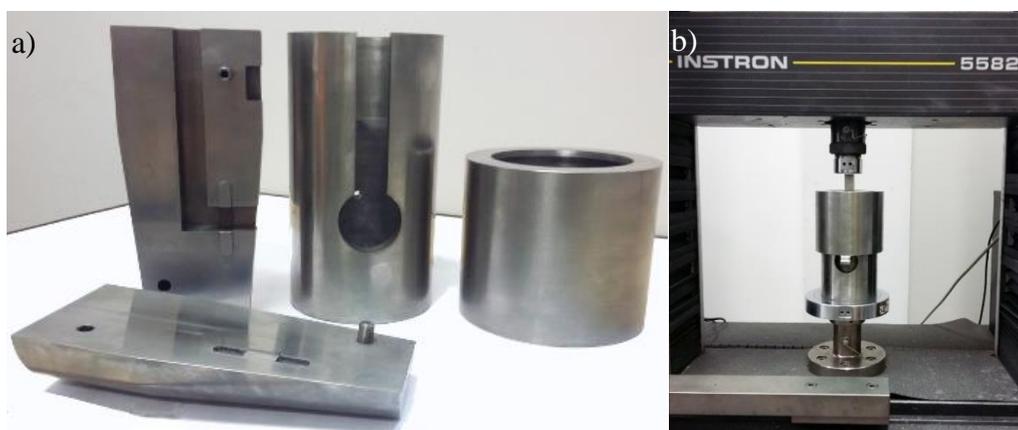


FIGURA 4.3 – Matriz de ECAP: a) Matriz desmontada; b) Matriz montada.

Para forçar a passagem do material através dos canais da matriz foram utilizados punções confeccionados com o mesmo material e tratamento térmico desta. Foram fabricados 3 punções com tamanhos diferentes (40, 80 e 120 mm, com seção transversal quadrada de aresta 15,9 mm) conforme FIG 4.4. A fim de evitar a flambagem dos punções e possíveis danos nestes e/ou na matriz, faz-se necessário sempre utilizar o menor punção possível. A medida que o CP é processado é realizada a troca dos punções. O primeiro passe de ECAP foi realizado em uma máquina de ensaios universal INSTRON modelo 5582 com capacidade de 100 kN, alocada no Laboratório de Ensaio Especiais. Em função da carga necessária para o processamento, a partir do segundo passe de ECAP os CP's foram processados em uma máquina de ensaios universal Shimadzu modelo AGX 300 com capacidade de 300 KN, pertencente ao Laboratório de Materiais Metálicos, ambos os laboratórios fazem parte do departamento de engenharia de materiais e construção da UFMG. Bissulfeto de Molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) foi utilizado como lubrificante na interface matriz/CP durante todo o processamento.



FIGURA 4.4 – Punções utilizados no processamento por ECAP

#### 4.2.5 Fabricação dos corpos de prova para compressão

Corpos de prova para ensaios de compressão uniaxial e multiaxial foram usinados a partir do material nas condições: REC, REC + 1ECAP e REC + 4ECAP. No caso das amostras REC + ECAP, os corpos de prova para compressão foram cortados de maneira a evitar a heterogeneidade de deformação oriunda do processamento por ECAP. A FIG 4.5 a) mostra como o material sai da matriz de ECAP, a figura 4.5b apresenta a parte útil utilizada para fabricação dos corpos de prova de compressão. A parte chanfrada do final do CP (indicada como A) foi descartada. Também foi eliminado um comprimento de 20 mm no início corpo de prova (C), restando assim uma barra de comprimento B cujas superfícies laterais foram usinadas com a profundidade de 2 mm, para cada um dos corpos de prova processados por ECAP.

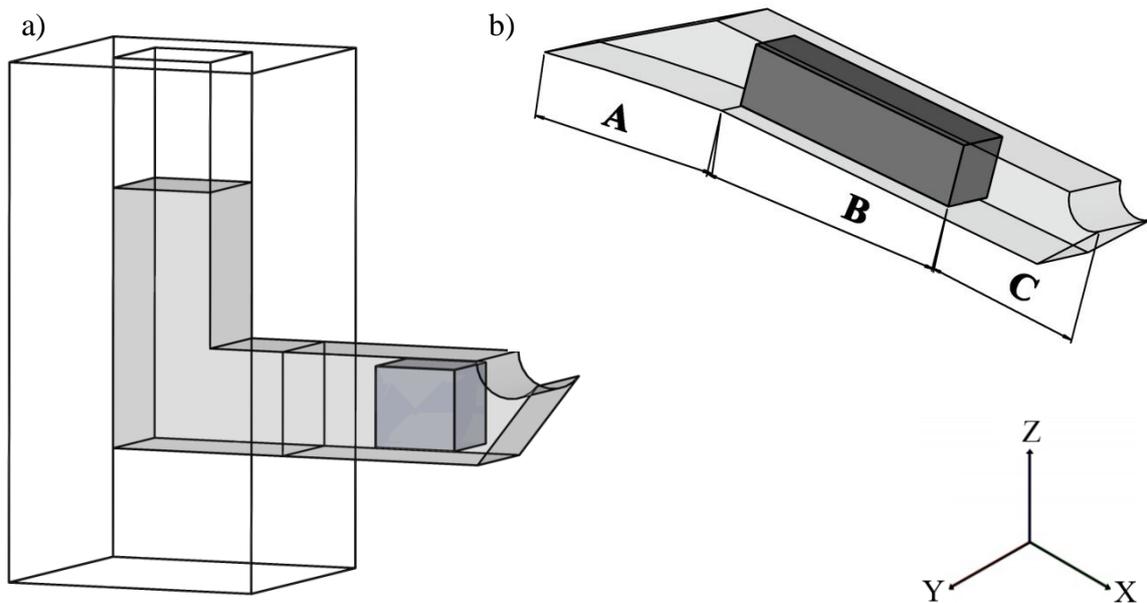


FIGURA 4.5 – Fabricação de corpo de prova de compressão: a) Corpo de prova sendo processado; b) Corte do corpo de prova pós ECAP; c) Corpo de prova para compressão uniaxial.

A partir da barra obtida, foram confeccionados corpos de prova para a compressão uniaxial respeitando-se a razão de 1,5 entre a altura ( $h$ ) e largura ( $l$ ), similar à FIG. 4.6, com a finalidade de evitar a flambagem do CP durante a compressão. Os corpos de prova do material recozido foram fabricados com  $l=15,8$  mm e  $h=23,7$  mm. Os Corpos de prova do material processado por ECAP foram usinados com  $l=12$  mm e  $h=18$  mm.

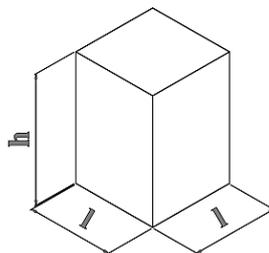


FIGURA 4.6 – Corpo de prova para compressão uniaxial, prismático de dimensões  $h$  e  $l$ .

Os corpos de prova destinados ao processamento por MAC foram usinados com dimensões  $13 \times 12,52 \times 12,06$  mm nas respectivas direções X, Y e Z. Essas dimensões foram escolhidas a fim de garantir a repetibilidade de forma durante a sequência de compressões. Considerando

o material como sendo isotrópico e adotando amplitude de deformação de 0,075, ao realizar a compressão na direção com dimensão de 13 mm essa passa a medir 12,06 mm, a dimensão 12,52 mm se torna 13 mm e a dimensão de 12,06 se deforma para 12,52. Com isso após a compressão o material tem as mesmas dimensões iniciais. Este raciocínio se baseia no processamento livre, assim a matriz é responsável somente para inibir o abaulamento.

#### 4.2.6 Ensaio de compressão uniaxial

As compressões uniaxiais foram realizadas na mesma máquina Instron utilizada na primeira etapa do ECAP. As compressões foram realizadas ao longo do eixo X no material REC, REC + ECAP e REC + ECAP + MAC (para 1 e 4 passes de ECAP e 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC). As compressões uniaxiais realizadas nos materiais que sofreram processamento multiaxial foram executadas no corpo de prova com as dimensões do MAC (13 x 12,52 x 12,06 mm), para os outros casos utilizou-se os CP's fabricados com as dimensões citadas no tópico anterior. Para as compressões uniaxiais foi utilizado Bissulfeto de Molibdênio como lubrificante. Os ensaios foram interrompidos a cada 0,1 de deformação para relubrificar a interface. Para as amostras REC e REC+ECAP (1 e 4 passes) após deformação de 0,8 as laterais dos corpos de prova foram cortadas, de forma a retirar um novo CP no centro do anterior, para mais uma etapa de compressão respeitando a razão de 1,5 entre a altura (h) e largura (l). Os corpos de prova do material recozido foram cortados duas vezes enquanto os CP's do material processado por ECAP foram cortados somente uma vez.

#### 4.2.7 Simulações

Com a análise dos resultados experimentais da compressão uniaxial foram observados saltos de tensão após o corte das laterais dos corpos de prova. Com o objetivo de analisar estes saltos foram realizadas simulações numéricas computacionais pelo método dos elementos finitos a fim de comparar os resultados obtidos com os resultados práticos e validar a hipótese de que o aumento de tensão após o corte dos corpos de prova estava relacionado com o aumento da deformação média. As simulações foram realizadas no software DEFORM®, utilizando a curva tensão x deformação levantada experimentalmente.

A análise por elementos finitos (AEF) foi realizada de forma similar o ensaio experimental. Para todos os casos foi utilizado um corpo de prova (CP) com dimensões 16x16x24 mm para a primeira compressão e atrito de 0,2, adotando uma malha com 25.000 elementos. O CP foi submetido a uma deformação de 0,7 em uma compressão livre. Após isto foram simulados 3 casos distintos para a continuação do ensaio. O primeiro caso segue a compressão livre com o CP da mesma forma que terminou após a primeira compressão. Para o segundo e terceiro casos as faces laterais do CP foram cortadas de forma a se obter uma seção transversal quadrada no centro do corpo de prova com aresta de 8 e 16 mm respectivamente. Foram realizadas medições da deformação e análise da distribuição de deformação média para todos os casos.

#### 4.2.8 Teste de salto de velocidade de deformação

Com a análise dos resultados experimentais da compressão uniaxial também foram observados picos de tensão após cada parada para relubricar a interface corpo de prova-atuadores. Como uma tentativa de explicar os picos de tensão observados nos ensaios de compressão, visando comprovar a hipótese da ocorrência de envelhecimento dinâmico, foram realizados ensaios de compressão uniaxial com salto de velocidade de deformação em corpos de prova na condição recozido e recozido e processado por 4 passes de ECAP. O teste de salto da velocidade de deformação verifica a sensibilidade à variação da taxa média de deformação. Para isto foram utilizadas as velocidades de compressão de 0,05, 0,5 e 0,05 mm/s sequencialmente. COTTRELL (1953) sugeriu uma forma de quantificar a sensibilidade ( $m$ ) de um material à velocidade de deformação (EQUAÇÃO 2). Baseado em COTTRELL, foram adotados  $\sigma_1$  e  $\varepsilon_1$  como sendo os valores de tensão e deformação do ponto antes do pico de tensão e  $\sigma_2$  e  $\varepsilon_2$  como sendo os valores de tensão de deformação para o ponto onde a curva começa a se estabilizar novamente (GRA. 4.1).

$$m = \frac{\log \sigma_2 / \sigma_1}{\log \dot{\varepsilon}_2 / \dot{\varepsilon}_1} \quad (2)$$

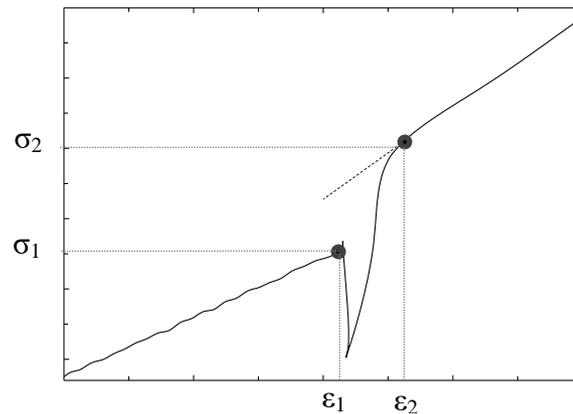


GRAFICO 4.1 – Representação do picos de tensão gerados devido envelhecimento dinâmico

#### 4.2.6 MAC

As compressões multiaxiais foram realizadas nas amostras REC, REC + ECAP (1 e 4 passes). As compressões foram realizadas com as mostras confinadas, pois nos trabalhos de ARMSTRONG *et al.* (1982) e FARIA *et al.* (2015) nota-se que um dos problemas da compressão multi-axial é o abaulamento, que é gerado após a primeira compressão e vai sendo acumulado ao longo do processo. Para o confinamento das amostras durante o processamento foi projetada e fabricada uma matriz em aço AISI D2 temperado e revenido com dureza 56 HC (Figura 4.7).



FIGURA 4.7 – Matriz de MAC: (a) Matriz desmontada; (b) Matriz montada.

A primeira compressão foi dada ao longo do eixo X, nesta direção o corpo de prova tem o maior comprimento (13 mm). Após a compressão as dimensões se invertem em relação aos eixos (FIG. 4.8), as compressões subsequentes foram feitas ao longo do eixo em que o comprimento referente é de 13 mm. A cada 3 ciclos de compressão o corpo de prova volta a ter as dimensões iguais as iniciais para cada eixo. Com o objetivo de evitar a adesão de

Alumínio na matriz, esta foi limpa com álcool, lubrificada com MOLYKOTE e limpa novamente com estopa; este processo foi repetido a cada 24 compressões. Foi adotada a amplitude de deformação de 0,075, com base nos estudos de ARMSTRONG *et al.* (1982), que diz que para menores amplitudes de deformação o efeito de amaciamento é maior, 0,075 foi a menor amplitude adotada em seus estudos.

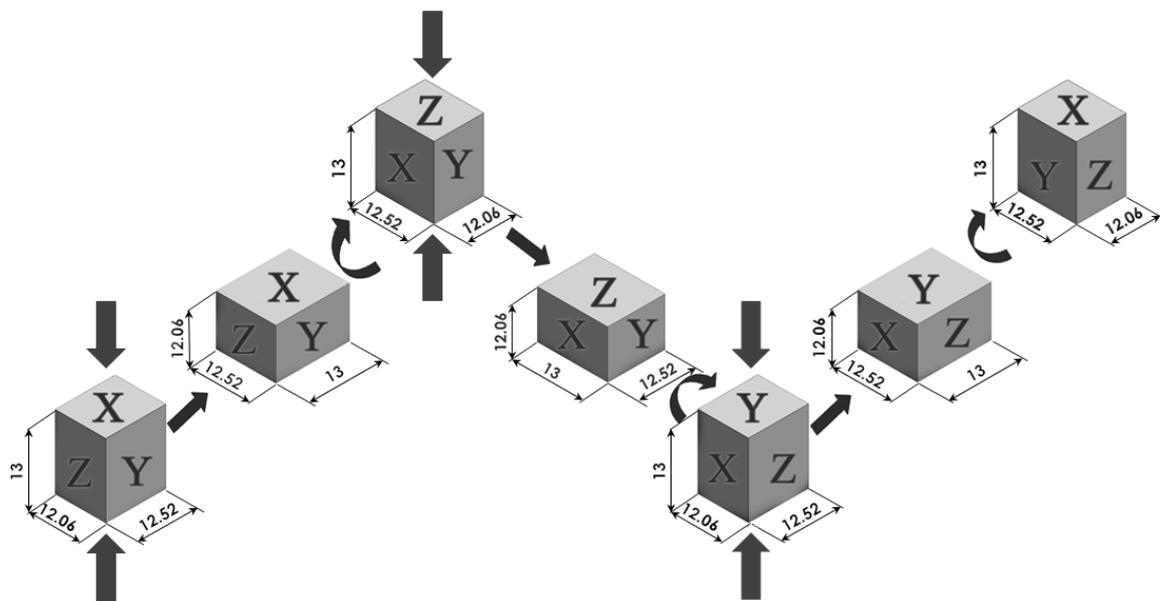


FIGURA 4.8 – Representação esquemática do processo de compressão multiaxial.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaio de Microdureza

Os valores referentes às medidas de microdureza do material como recebido são apresentados na TAB. 5.1. O valor médio dessas medidas é 99,9 HV, valor que segundo ASM (1990) é típico da liga Al 6351 na condição T6 (trabalhado a frio com posterior envelhecimento artificial), o que indicou ser necessário o recozimento do material antes do processamento mecânico.

TABELA 5.1 – Medidas de microdureza no material como recebido.

Amostra	Dureza (HV)		
1	98,7	100,5	100,3
2	103	104,9	102,4
3	96,3	96,1	97,1
Média	99,9		
Máximo	104,9		
Mínimo	96,1		
D. Padrão	3,1		

Dados relativos às medidas de microdureza do material após recozimento são apresentados na TAB. 5.2. Verifica-se que após o recozimento os CP's apresentaram uma dureza média de 36,7 HV. De acordo com a literatura este valor corresponde á dureza da liga Al 6351 na condição recozida (ASM, 1980).

TABELA 5.2 – Medidas de microdureza após recozimento

<b>Barra 1</b>	<b>Barra 2</b>	<b>Barra 3</b>	<b>Barra 4</b>
35,8	37,3	36,6	36,6
35,4	37,3	35,8	35,8
35,1	35,8	35,8	38,1
35,1	37,3	35,8	37,3
37,3	36,6	36,6	38,1
38,1	36,6	37,3	36,6
37,3	37,3	37,3	36,6
36,6	38,1	35,8	35,8
38,1	36,6	35,8	36,6
37,3	37,3	35,8	37,3
35,8	36,6	35,8	37,3
35,8	37,3	35,8	36,6
38,1	35,8	35,1	
39,8	36,6		
38,9	35,8		
38,9	37,3		
35,8	36,6		
Máximo		39,8	
Mínimo		35,1	
Média		36,7	
Desvio padrão		1,0	

## 5.2 ECAP

O processamento por ECAP ao longo de todo este trabalho indicou que a matriz de ECAP projetada e construída se mostrou eficiente para o estudo, pois facilitou a etapa de montagem e preparação para o processamento, reduzindo tempo e trabalho. O sistema de fechamento da matriz eliminou o escoamento de material na interface das bases, existente nas matrizes anteriores quando se utilizavam elevados carregamentos.

O GRA. 5.1 apresenta a variação da carga máxima registrada no processamento por ECAP em função do número de passes dos 20 corpos de prova processados. São apresentados os valores médios e a amplitude de variação da carga máxima em função do número de passes de ECAP. Observa-se que do primeiro para o segundo passe se tem um aumento significativo da carga

máxima, do segundo para o terceiro o aumento é menor, e do terceiro para o quarto há uma queda na carga máxima para a maioria dos corpos de prova analisados. SHAN *et al.* (2001) trabalhando com Alumínio comercialmente puro notou aumento da carga durante o processamento por ECAP adotando a rota C, para o primeiro, segundo e terceiro passes; o quarto passe apresenta valores muito próximos do terceiro contendo pontos com menor carga. HORITA *et al.* (2001) relatam grande aumento de carga do primeiro para o segundo passe e queda de carga após o terceiro passe ao trabalhar com Al 1100 e queda a partir do sexto passe para Al 3004, ambos seguindo a rota B<sub>c</sub>. Desta forma, os resultados encontrados no presente trabalho assemelham-se àqueles relatados na literatura.

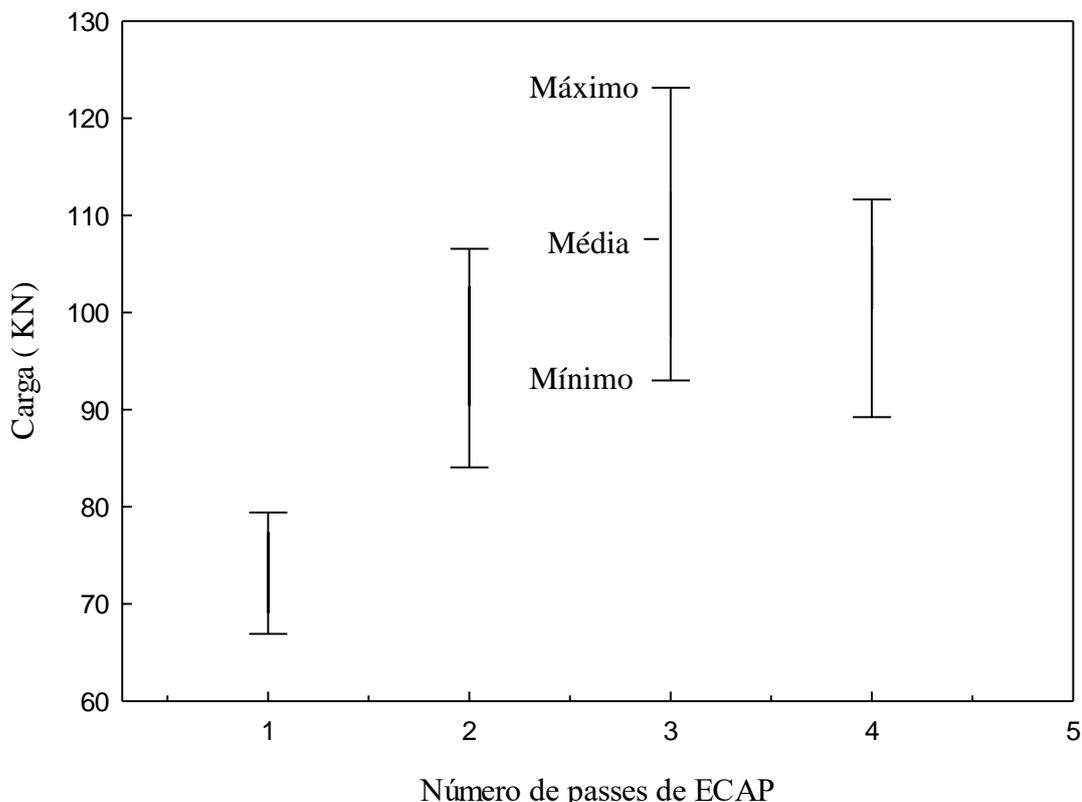


GRAFICO 5.1 – Cargas médias e amplitude de carga máxima durante cada passe de ECAP.

### 5.3 Ensaio de compressão uniaxial

O GRA 5.2 apresenta as curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições: REC, REC+1ECAP, REC+4ECAP e a regressão obtida através da equação deduzida por HOCKETT *et al.*(1959). Observa-se que:

- para a condição REC se tem um crescimento da tensão com o aumento da deformação, que indica encruamento. Para esta condição o material apresentou limite de escoamento de 61,8 MPa, semelhante ao relatado por SHOW *et al.* (2013).
- os dados indicam que o incremento no limite de escoamento não é proporcional ao número de passes de ECAP: o primeiro passe de ECAP tem uma influência maior no limite de escoamento comparado ao material recozido que os três passes posteriores comparados ao primeiro passe. Estes resultados são semelhantes aos encontrados na literatura (ZHAO *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2012).
- o processamento por ECAP aumenta significativamente a tensão ao longo da curva de fluxo do material. Os materiais processados por 1 e 4 passes de ECAP apresentaram limite de escoamento de 189,4 e 218,6 MPa respectivamente. ZHAO *et al.* (2014) e XU *et al.* (2016) apresentam variação de limite de escoamento do material recozido e processado por 1 e 4 passes de ECAP proporcionalmente similares aos valores registrados neste trabalho.
- para as condições REC+1ECAP e REC+4ECAP observa-se o amaciamento do material durante a compressão, de forma semelhante à relatada por EL-DANAF *et al.* (2007), FARIA (2015) e FARIA *et al.* (2016) ambos trabalhando com alumínio comercialmente puro e 1 passe de ECAP e CARDOSO *et al.* (2013) trabalhando com Al-10%Si e até 8 passes de ECAP.
- as curvas apresentam pequenos picos de tensão após as paradas para relubrificação. Foi observado que a magnitude destes picos está associada com a quantidade de deformação prévia, uma vez que para o material recozido estes picos começam a aparecer após 1,0 de deformação, para os materiais processados por ECAP aparecem desde o início da compressão e a amplitude dos picos de tensão cresce na ordem REC, REC+1ECAP e REC+4ECAP, ou seja, do menos deformado para o mais deformado. Essas observações serão discutidas em seção apropriada, apresentada a seguir.

- após o corte dos corpos de prova ocorre um salto de tensões de escoamento. O material aparenta comportamento similar ao registrado antes do corte, porém com um salto de tensão ao longo de toda a curva, como se a tensão fosse acrescida de uma constante. Este efeito foi evidenciado em todas as condições de processamento. Essas observações serão discutidas em seção apropriada, apresentada a seguir.

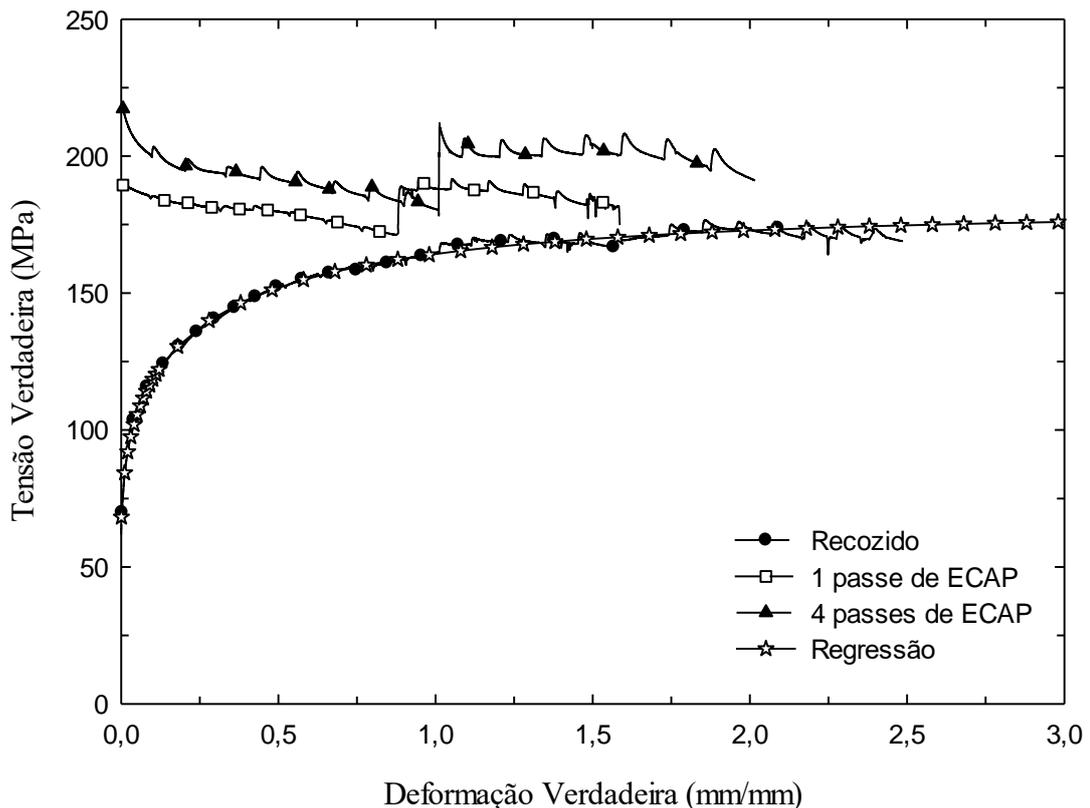


GRÁFICO 5.2 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido, recozido e processado por 1 passe de ECAP, recozido e processado por 4 passes de ECAP e a regressão.

### 5.3.1 Simulações

O GRA. 5.3 apresenta as curvas levantadas a partir das Análises por Elementos Finitos em um gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira. O CP cortado com 16 mm de aresta apresenta comportamento semelhante ao do CP que não foi cortado. O CP cortado com aresta de 8 mm apresenta tensões um pouco menores que os demais.

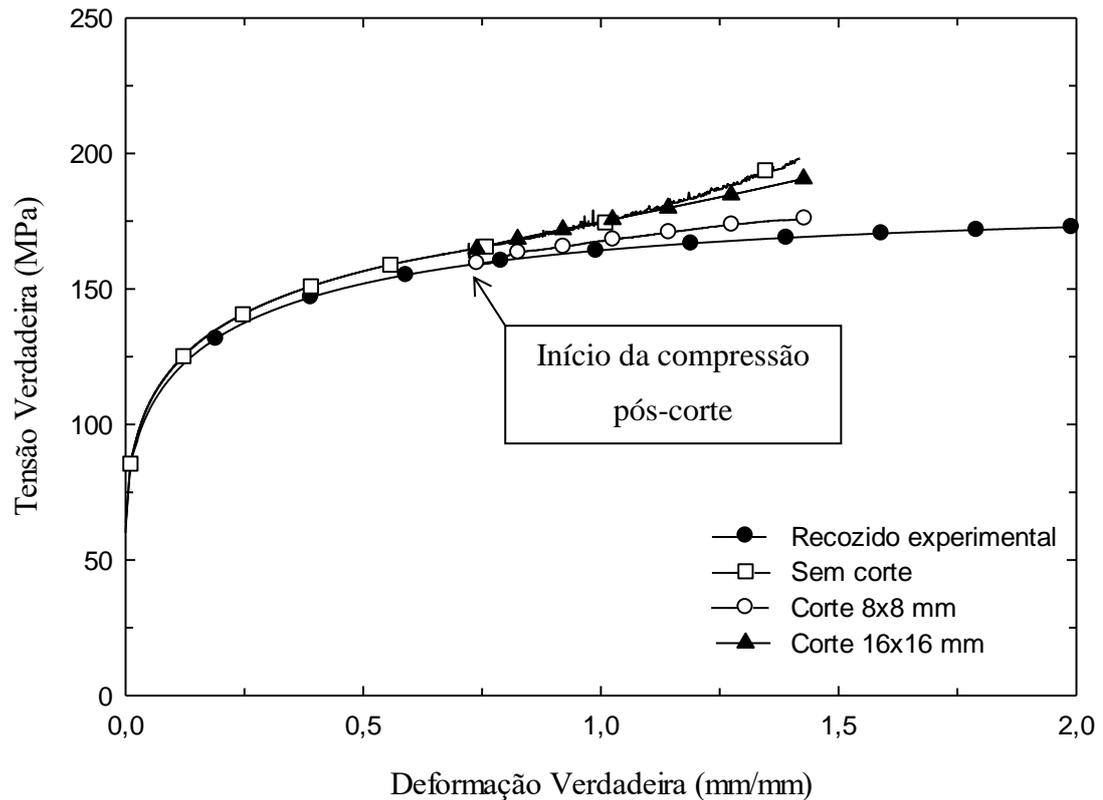


GRÁFICO 5.3 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira obtida por análise por elementos finitos.

Esperava-se que devido à heterogeneidade de deformação e maior concentração de deformação no centro do corpo de prova o valor médio de deformação no corpo de prova aumentasse após o corte, sendo maior para o corpo de prova com aresta de 8 mm que para o corpo de prova com aresta de 16 mm. Se após o corte o material apresentasse uma densidade de deformação maior que antes seria justificado o aumento da tensão após o seu corte, como indicado no GRA. 5.2.

A FIG. 5.1 apresenta a distribuição de deformação para a superfície dos corpos de prova antes e depois dos cortes. A FIG. 5.2 apresenta a distribuição de deformação no centro do corpo de prova antes do corte (seção tracejada na FIG. 5.1 (a)). Percebe-se que a deformação é maior no centro do corpo de prova e diminui à medida que se aproxima das extremidades, como esperado. Porém, a região mais próxima das faces superior e inferior tem deformação menor que aquela das faces retiradas durante o corte, e sua deformação média após o corte é um pouco menor que antes dele, ao contrário do previsto.

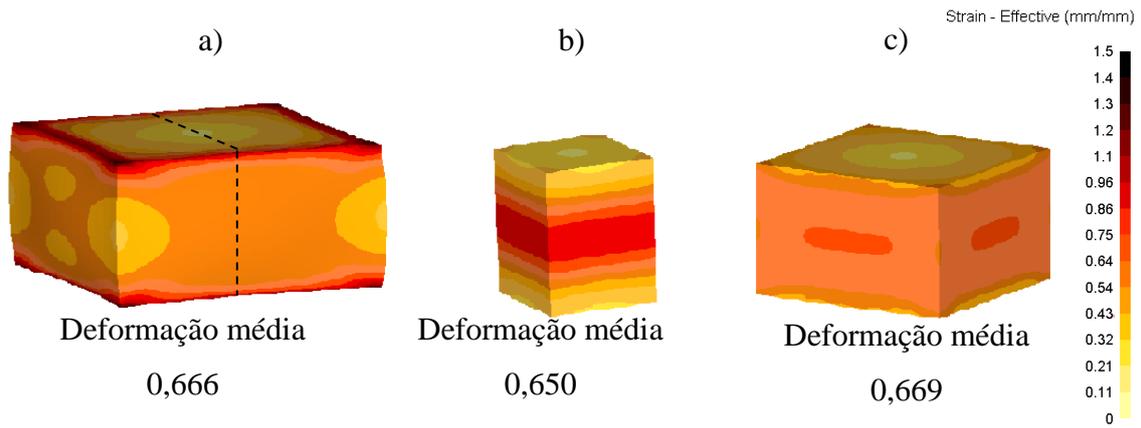


FIGURA 5.1 – Distribuição de deformação na superfície dos corpos de prova após corte: a) CP sem corte; b) cortado com aresta de 8 mm; c) cortado com aresta de 16mm.

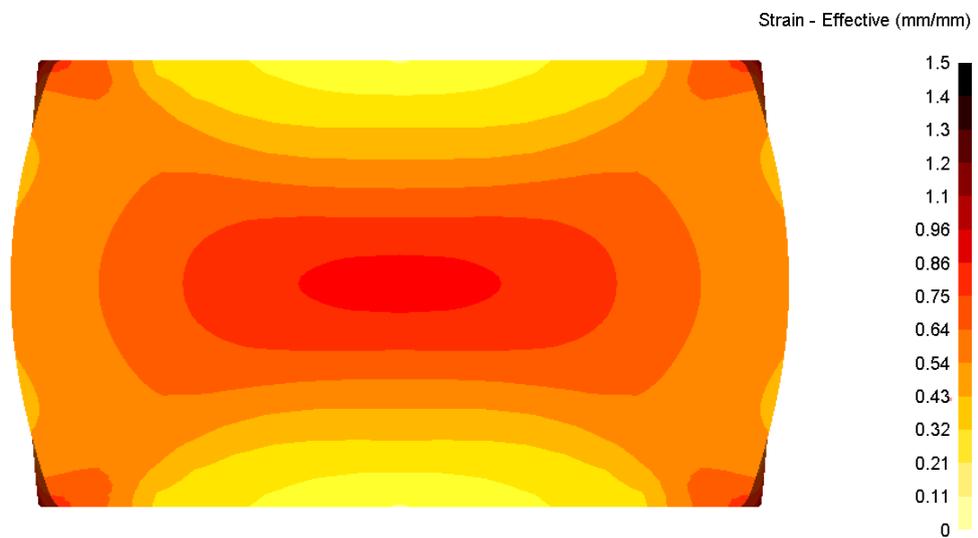


FIGURA 5.2 – Distribuição no centro do corpo de prova antes do corte.

Com estes resultados a elevação da tensão após o corte dos corpos de prova apresentada nos resultados experimentais só pode ser atribuída a fatores não mecânicos e provavelmente metalúrgicos, uma vez que as simulações numéricas não apresentaram o aumento da deformação média, como era esperado.

### 5.3.2 Sensibilidade da tensão à velocidade de deformação

O GRA. 5.4 apresenta as curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira obtidas durante o teste de salto de velocidade de deformação, executado a fim de verificar a sensibilidade ( $m$ ) do material perante a variação de taxa de deformação média.

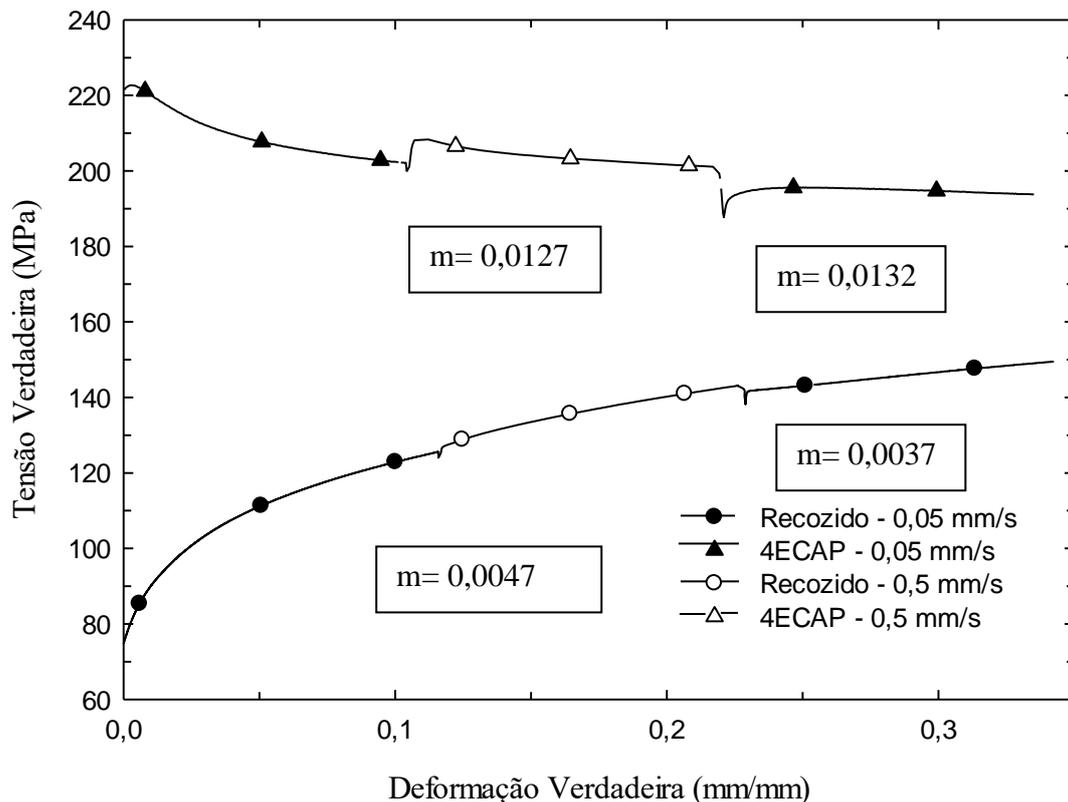


GRAFICO 5.4 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e recozido e processado por 4 passes de ECAP com variação da velocidade de compressão.

O material processado por 4 passes de ECAP se mostrou mais sensível a alteração da velocidade, com maiores picos após a mudança. Resultados similares foram encontrados por ZHAO *et al.* (2014), que trabalhou com Al-Mg e analisou a influência do processamento de SPD no envelhecimento dinâmico. Conclui-se que, à semelhança dos relatos deste autor, a presente liga também é suscetível a envelhecimento dinâmico. Desta forma, acredita-se que o aumento generalizado da tensão após o corte dos corpos de prova é proveniente de envelhecimento estático, durante o período em que o material permaneceu descarregado para a re-usinagem dos corpos de prova, devido o maior período de tempo entre as compressões. E os picos de tensão após cada parada para lubrificação são relativos ao envelhecimento dinâmico.

Como este trabalho não visa avaliar os efeitos do envelhecimento do material, estes picos não serão apresentados nas próximas imagens. As curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira obtidas com o carregamento monotônico do material recozido, recozido e processado por 1 passe de ECAP e recozido e processado por 4 passes de ECAP, onde se retiraram os picos causados pelos descarregamentos para re-lubrificação são exibidas nas GRA. 5.5, 5.6 e 5.7, respectivamente. Os picos foram eliminados com o auxílio de um filtro de suavização de curvas. Para o salto de tensão gerado após os cortes foi medida a amplitude do salto e este valor foi subtraído a todo o restante da curva. O material processado por 1 passe de ECAP apresenta amaciamento conduzindo a tensões de fluxo abaixo daquelas para compressão do material recozido, para níveis iguais de deformação. Para o material processado por 4 passes de ECAP, a situação é similar à descrita anteriormente, mas a tensão de fluxo só cai abaixo das obtidas por compressão, para os mesmos níveis de deformação; após aproximadamente 1,5 de deformação por compressão.

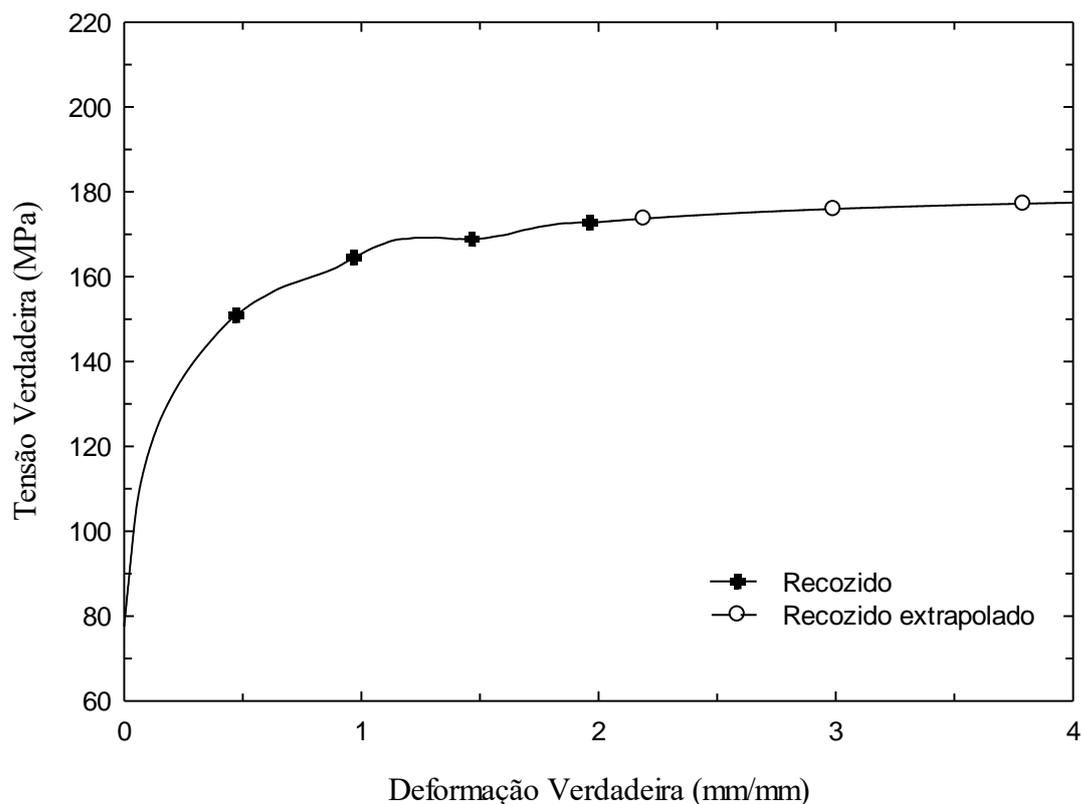


GRAFICO 5.5 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material recozido.

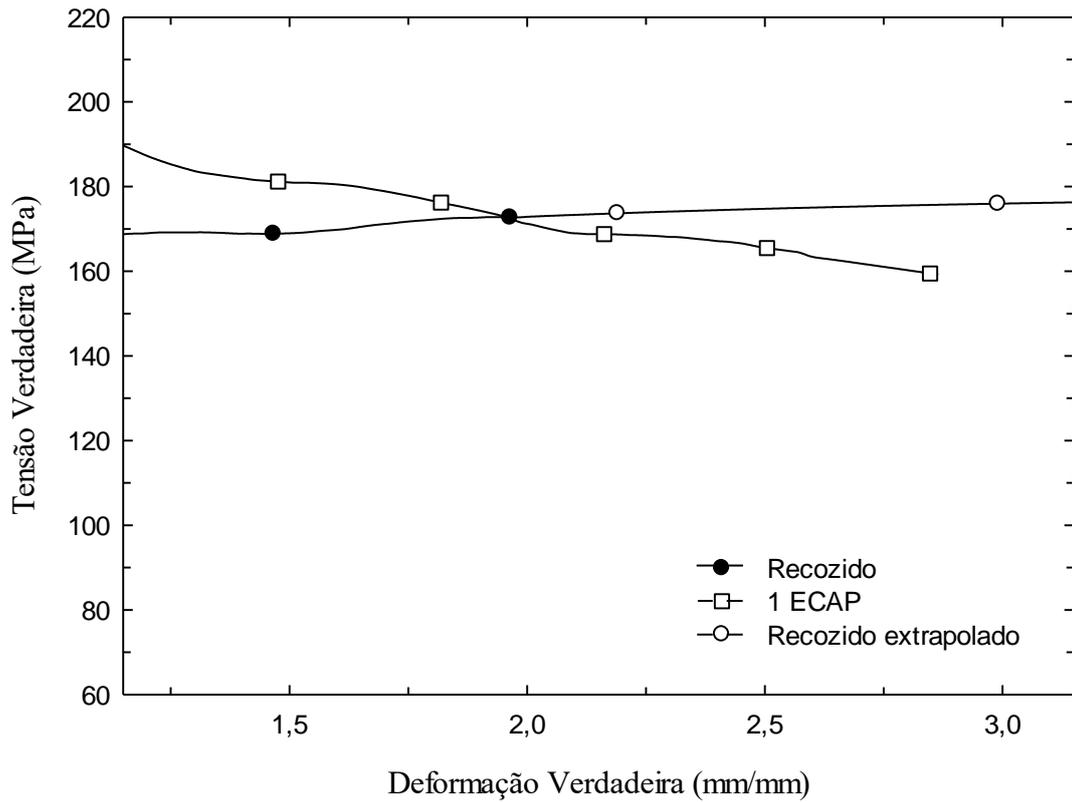


GRAFICO 5.6 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e recozido e processado por 1 passe de ECAP.

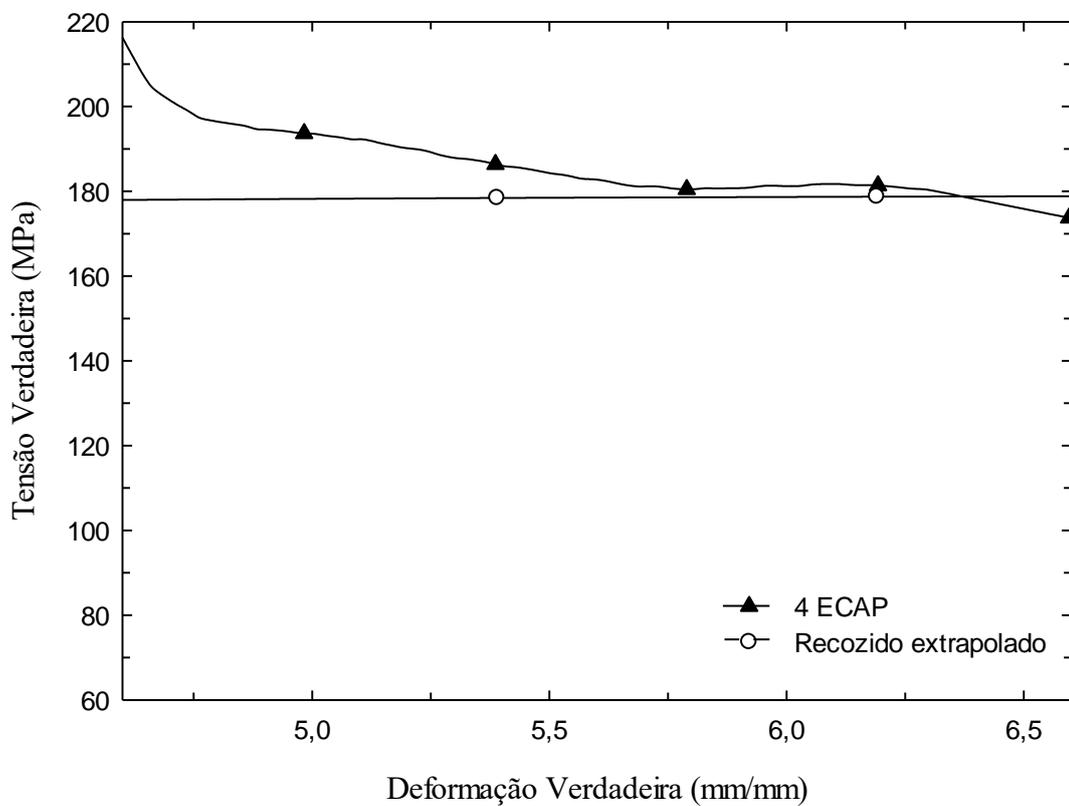


GRAFICO 5.7 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e recozido e processado por 4 passes de ECAP.

Durante os ensaios de compressão uniaxial os CP's de todas as condições avaliadas apresentaram deformação geometricamente não uniforme. Na FIG. 5.3 é possível observar que o CP processado por 1 passe de ECAP após compressão uniaxial apresenta-se distorcido. Tal fato indica a presença de direções preferenciais de deformação (anisotropia). Esse comportamento compromete um pouco os dados coletados, uma vez que a tensão medida para o corpo de prova com a variação do formato seria menor que a tensão que seria medida em um corpo de prova com deformação geométrica uniformemente distribuída.

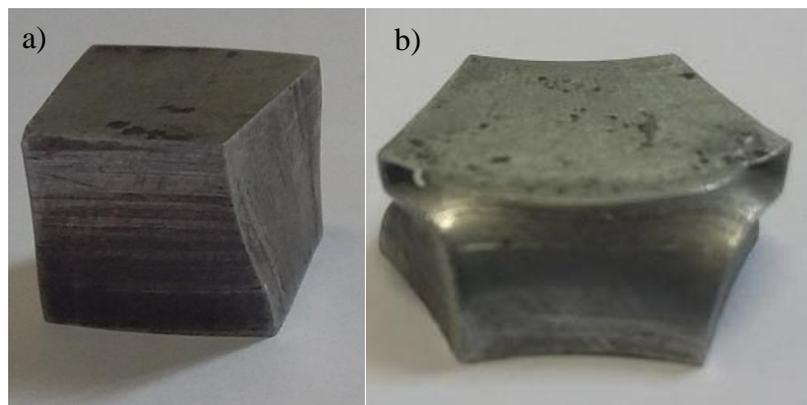


FIGURA 5.3 – Corpo de prova após compressão: a) amplitude de 0,2; b) amplitude de 0,8.

#### 5.4 MAC

A matriz projetada e construída para a realização do processamento por MAC eliminou o abaulamento dos corpos de prova, ao final do processamento, e reduziu o tempo e trabalho de processamento e tratamento de dados. Eliminou a necessidade de alinhar manualmente as amostras com o objetivo de deixá-las perpendicular ao sentido da compressão, o que é necessário quando se tem abaulamento das faces superior e inferior do corpo de prova.

O GRA. 5.8 mostra a curva tensão verdadeira x deformação verdadeira, obtida na primeira compressão durante o MAC do material recozido. Esse perfil não usual em ensaios de compressão se deve ao fato de que quando o corpo de prova se deforma ocorre abaulamento nas laterais e as faces abauladas tocam as paredes da matriz antes de atingir a deformação desejada (0,075). A partir desse momento acentua-se o estado triaxial de tensões.

Com o objetivo de apresentar resultados mais próximos do real, a curva plástica foi considerada até o ponto de inflexão, obtido a partir da variação da inclinação instantânea da curva tensão verdadeira x deformação verdadeira, pois até aproximadamente essa deformação se tem compressão com carregamento uniaxial, como relatado por KAPOOR *et al.* (2013). Para a obtenção do prolongamento da curva foi traçada uma reta com coeficiente angular obtido através da média dos coeficientes angulares dos 5 últimos pontos antes do ponto de inflexão.

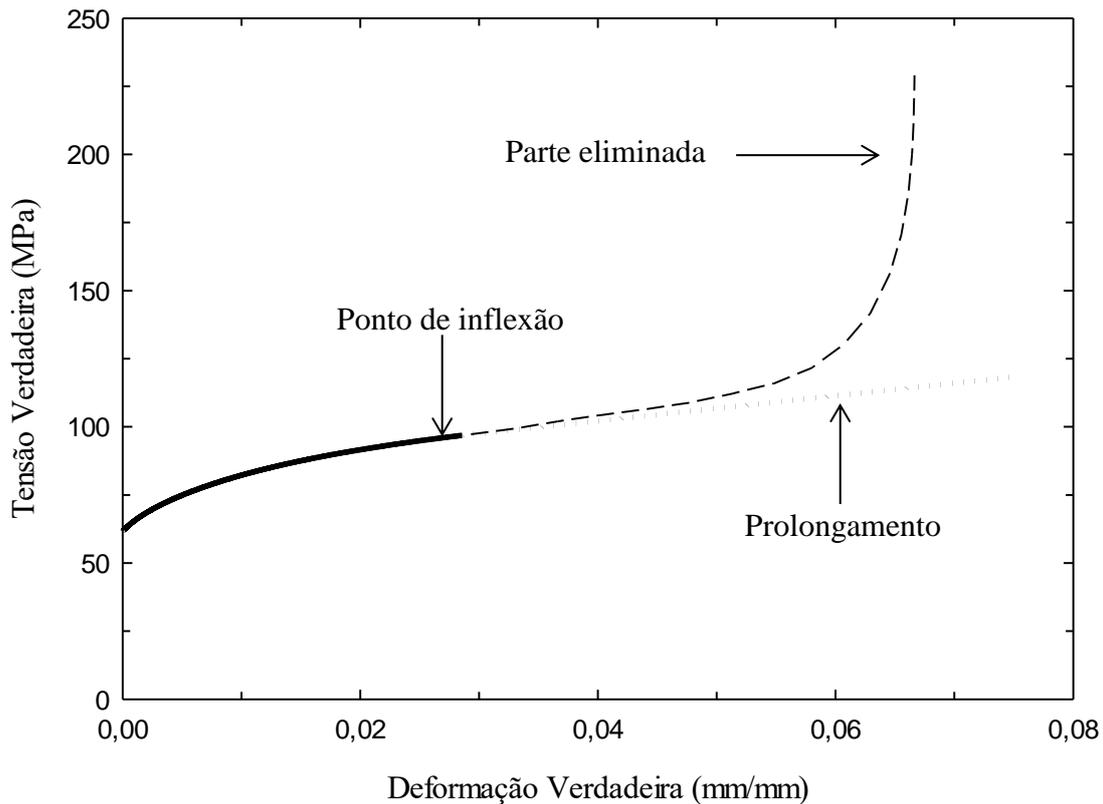


GRAFICO 5.8 – Obtenção da curva do MAC.

Os GRA. 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam as curvas do material recozido processado por 4, 3, 2 e 1 ciclos de MAC (respectivamente), a curva de compressão monotônica do material recozido, e as curvas monotônicas obtidas por compressão após o processamento por MAC em gráficos de tensão verdadeira x deformação verdadeira. Observa-se que para a deformação obtida com a ciclagem dos eixos são necessárias tensões menores que as alcançadas no processamento uniaxial para fornecer quantidade de deformação equivalente. Ao comparar as curvas monotônicas do material REC e REC+MAC é nítido o aumento da taxa de encruamento após o MAC devido o processamento multiaxial cíclico. Resultados similares foram encontrados por ARMSTRONG *et al.* (1982) e FARIA *et al.* (2016), para Al 1100 e Al comercialmente puro, respectivamente.

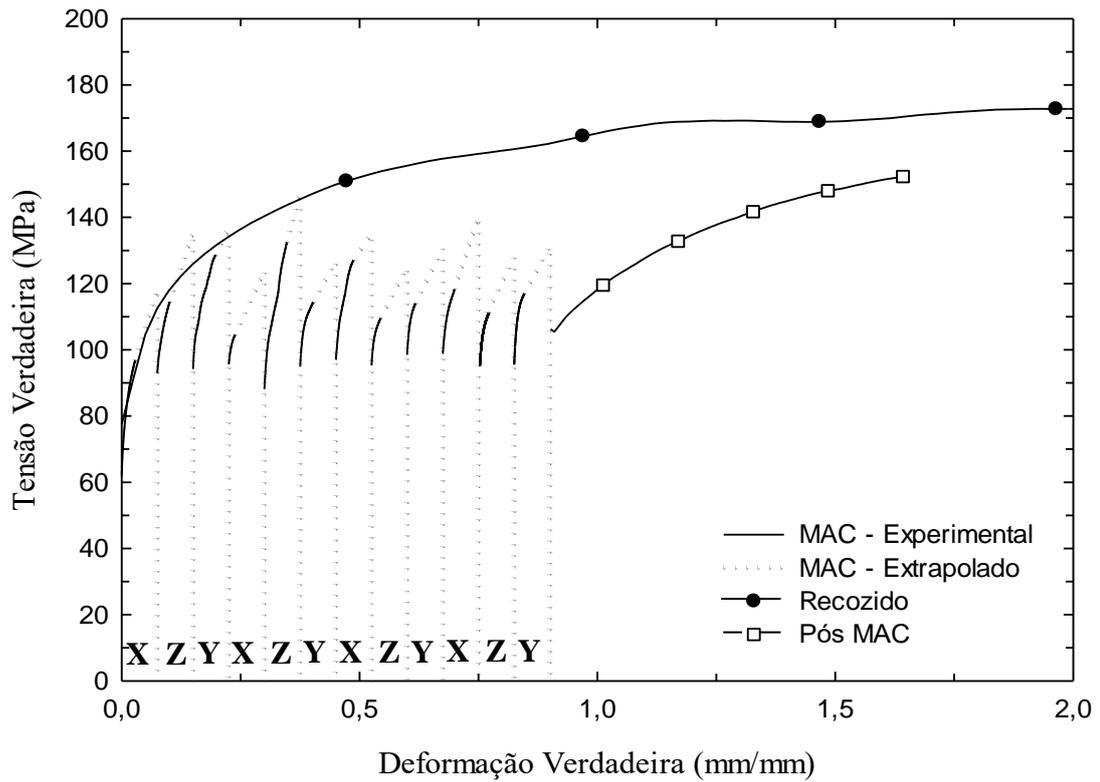


GRAFICO 5.9 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 4 ciclos de MAC

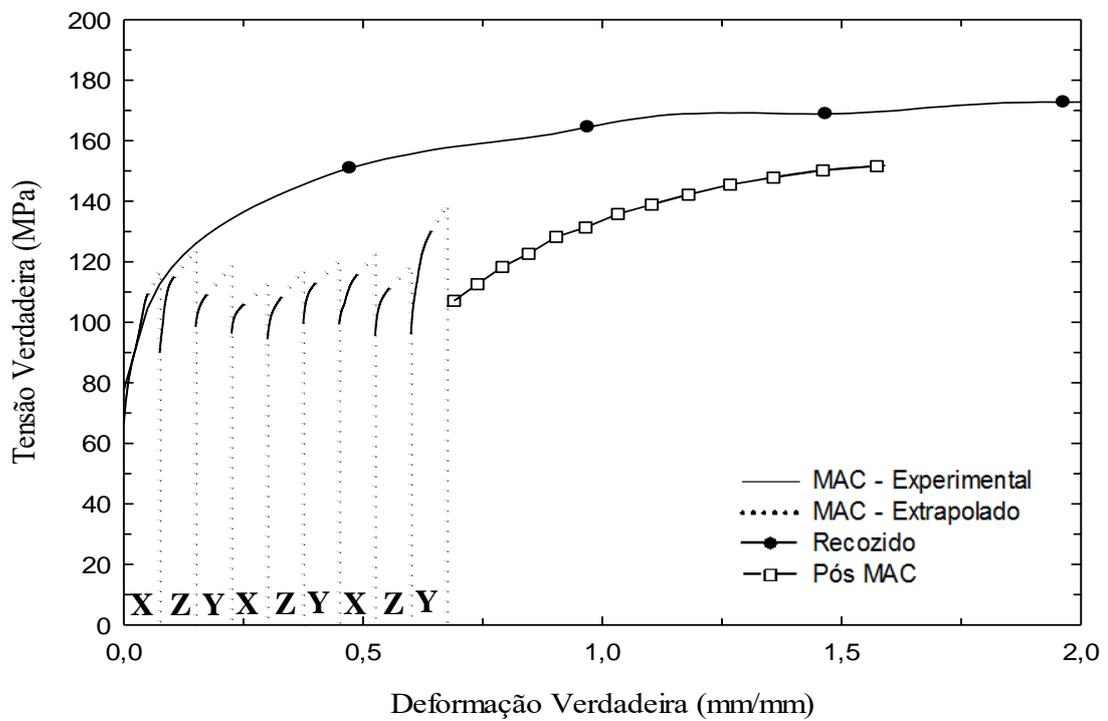


GRAFICO 5.10 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 3 ciclos de MAC

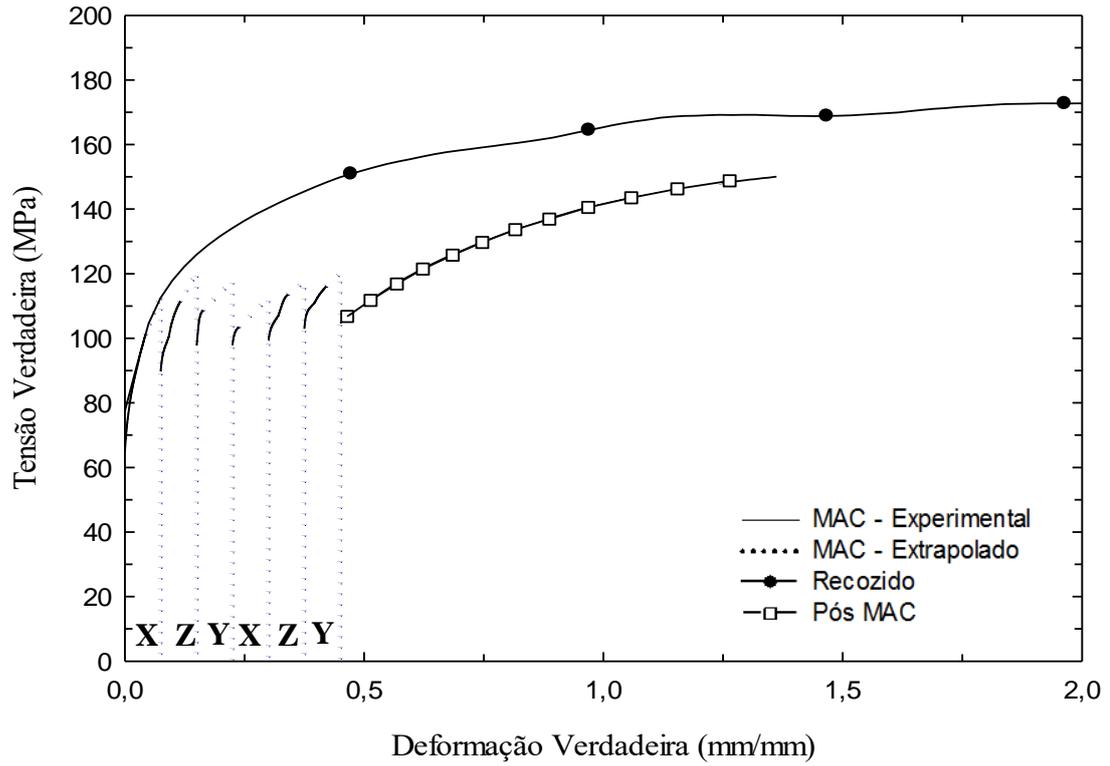


GRAFICO 5.11 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 2 ciclos de MAC

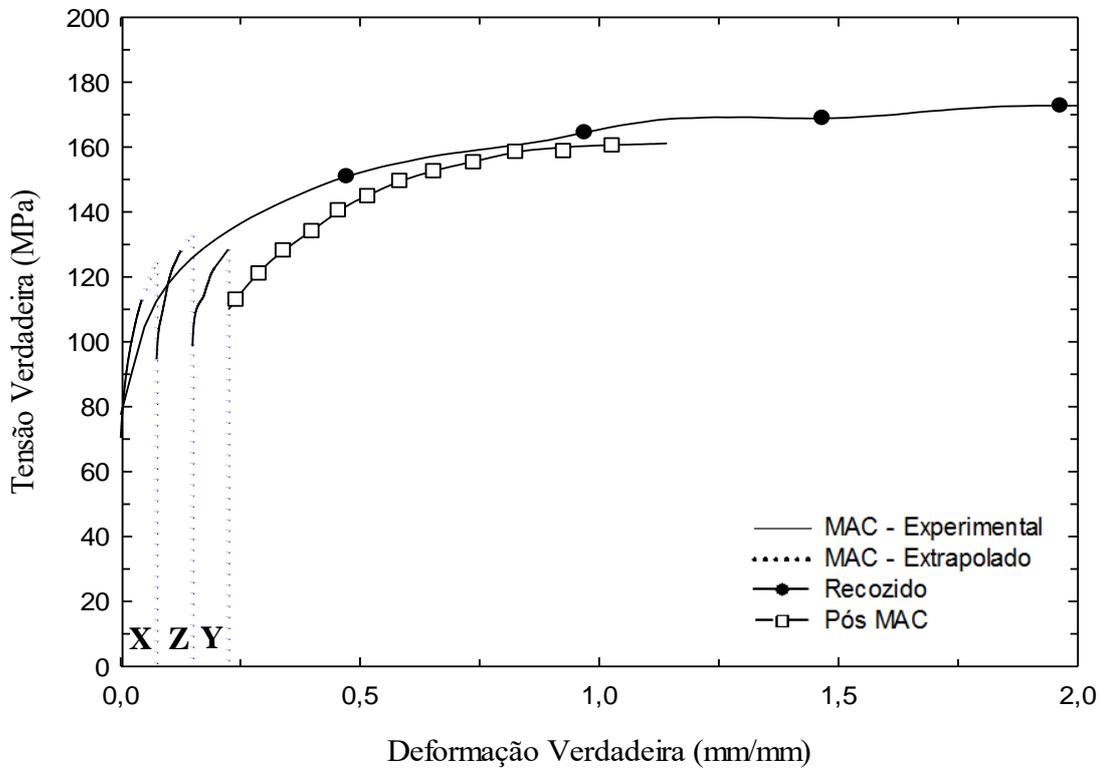


GRAFICO 5.12 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material recozido processado por 1 ciclo de MAC

O GRA. 5.13 apresenta as curvas referentes às compressões uniaxiais após o MAC para as 4 condições mostradas acima sem somar a deformação proveniente do processamento por MAC, a fim de se comparar o limite de escoamento e a taxa de deformação para cada um dos casos. As curvas obtidas a partir do material processado por 2, 3 e 4 ciclos de MAC apresentam limites de escoamento muito próximos e coeficientes de encruamento crescentes à medida que se aumenta o número de ciclos de MAC. A curva referente ao material processado por 1 ciclo de MAC apresenta limite de escoamento e taxa de encruamento superior as demais.

A deformação uniforme do material foi tomada como aquela correspondente ao parâmetro  $((d\sigma/d\varepsilon)/\sigma) = 1$ . A deformação uniforme para o material recozido é de 0,165 e de 0,091, 0,037, 0,046 e 0,086 para o material processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC. Estes dados realçam o fato do material processado por 1 ciclo de MAC ter comportamento mais próximo do material recozido que o material processado por mais ciclos.

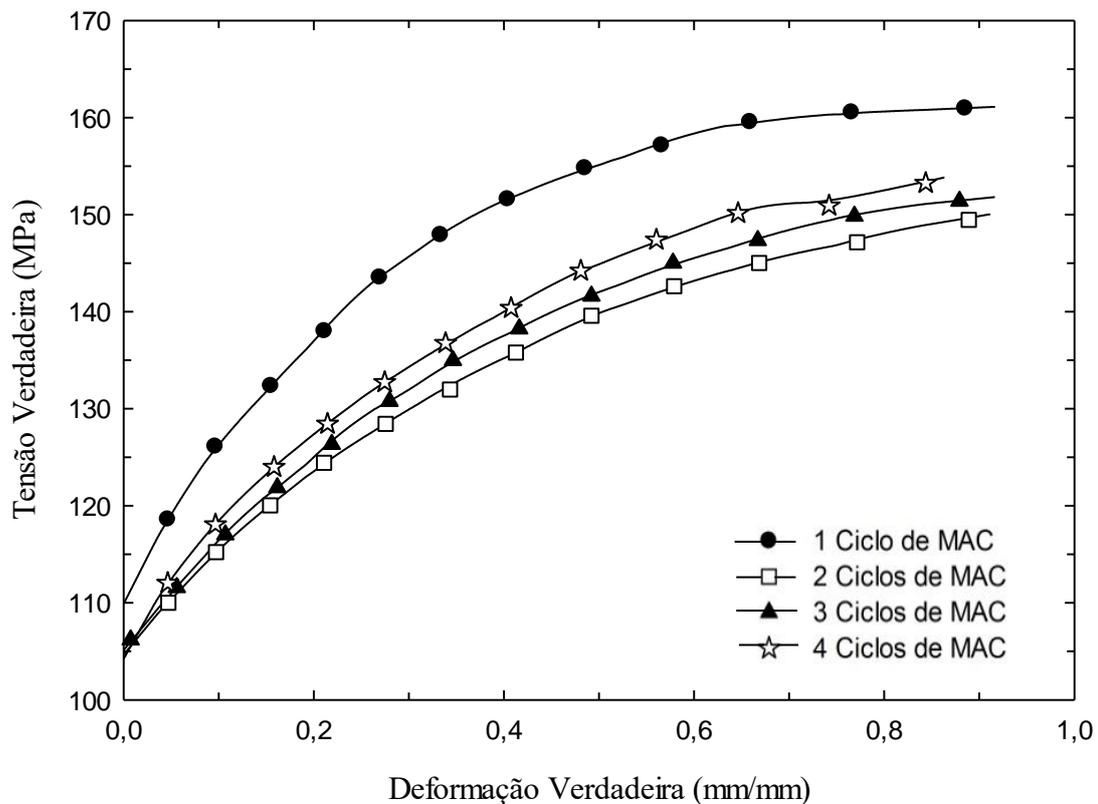


GRAFICO 5.13 – Comparação das compressões uniaxiais após MAC do material recozido.

O GRA 5.14 mostra um gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira com a curva monotônica do material recozido e as curvas de compressão após o processamento por 1,2, 3 e 4 ciclos de MAC, deslocadas de acordo com sua deformação prévia por MAC. Vê-se que:

- Se a deformação uniaxial após o MAC do material recozido fosse um pouco maior o material tenderia a chegar em um mesmo nível de tensões para o processamento em 2, 3 e 4 ciclos. Com isso o material processado por 2 ciclos de MAC teria a mesma condição dos demais com menor deformação acumulada e o material processado por 4 ciclos chegaria nessa condição com uma deformação bem menor após o MAC;
- O comportamento após 1 ciclo de MAC é diferente daquele após um maior número de ciclos, apresentando comportamento mais parecido com o carregamento uniaxial que com o material processado por mais ciclos de MAC. Uma possível justificativa é que a deformação imposta não foi suficiente para obter as características obtidas no material processado por mais ciclos; talvez se fosse adotada uma amplitude de deformação maior o primeiro ciclo teria mais efeito. Possivelmente com esta amplitude o primeiro ciclo não acarretou significativa evolução microestrutural;

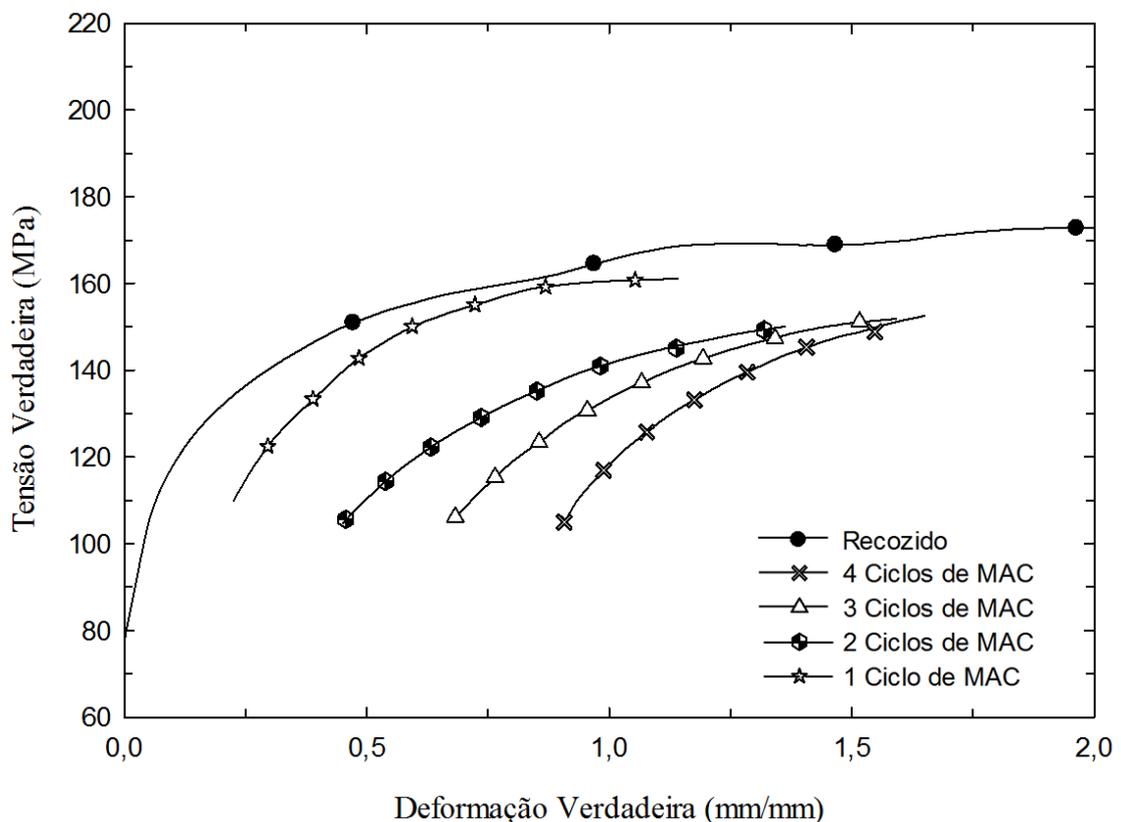


GRAFICO 5.14 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido e processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC.

Os GRA. 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam as curvas do processamento por MAC em 4, 3, 2 e 1 ciclos respectivamente do material REC+1ECAP e as curvas monotônicas das condições REC, REC+1ECAP e REC+1ECAP+MAC. As curvas referentes ao processamento por MAC e a curva monotônica do material processado por 1 passe de ECAP começam em 1,15 de deformação devido o processamento por 1 passe de ECAP que fornece esta quantidade de deformação (IWAHASHI *et al.*, 1996). Pode ser observado que após o processamento por ECAP assim como no carregamento monotônico o processamento por MAC tende a amaciar o material. Além disso, quando submetido a compressão monotônica após o MAC o material, aparentemente, apresenta maior coeficiente de encruamento se comparado com o material recozido e o material processado por 1 passe de ECAP com mesma quantidade de deformação. (ARMSTRONG *et al.*, 1982 e FARIA *et al.*, 2016).

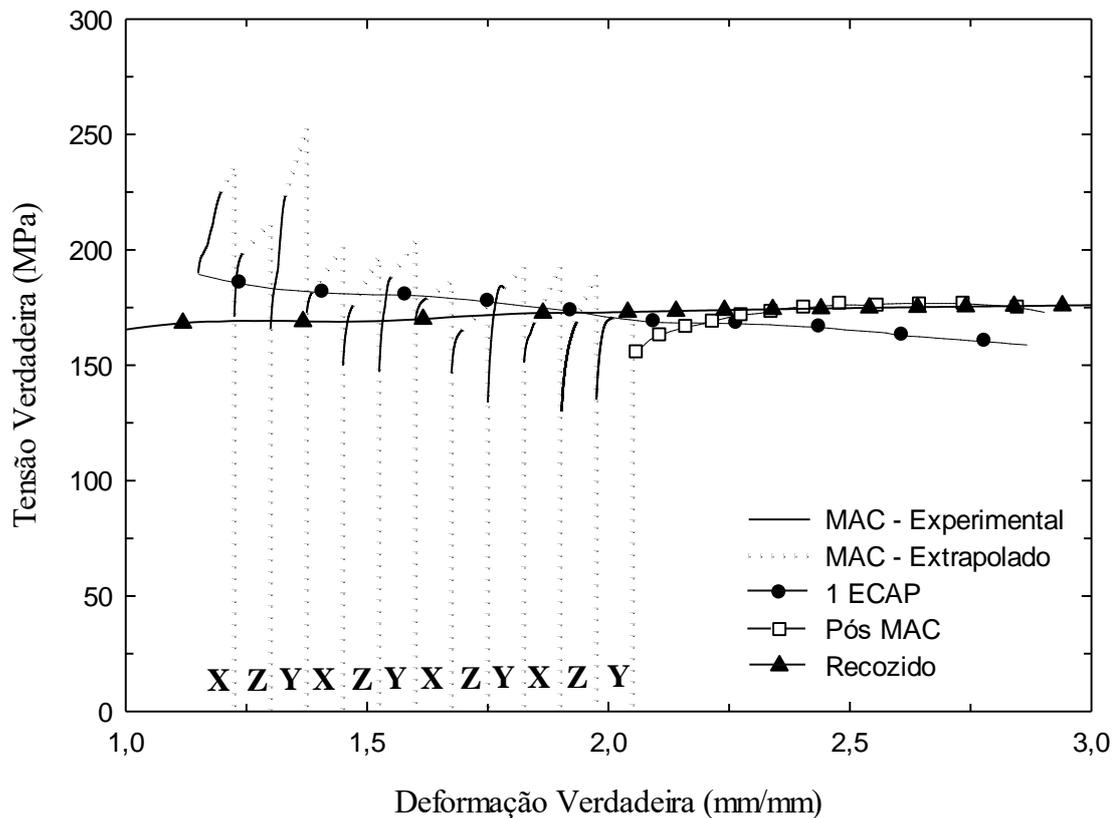


GRAFICO 5.15 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 4 ciclos de MAC

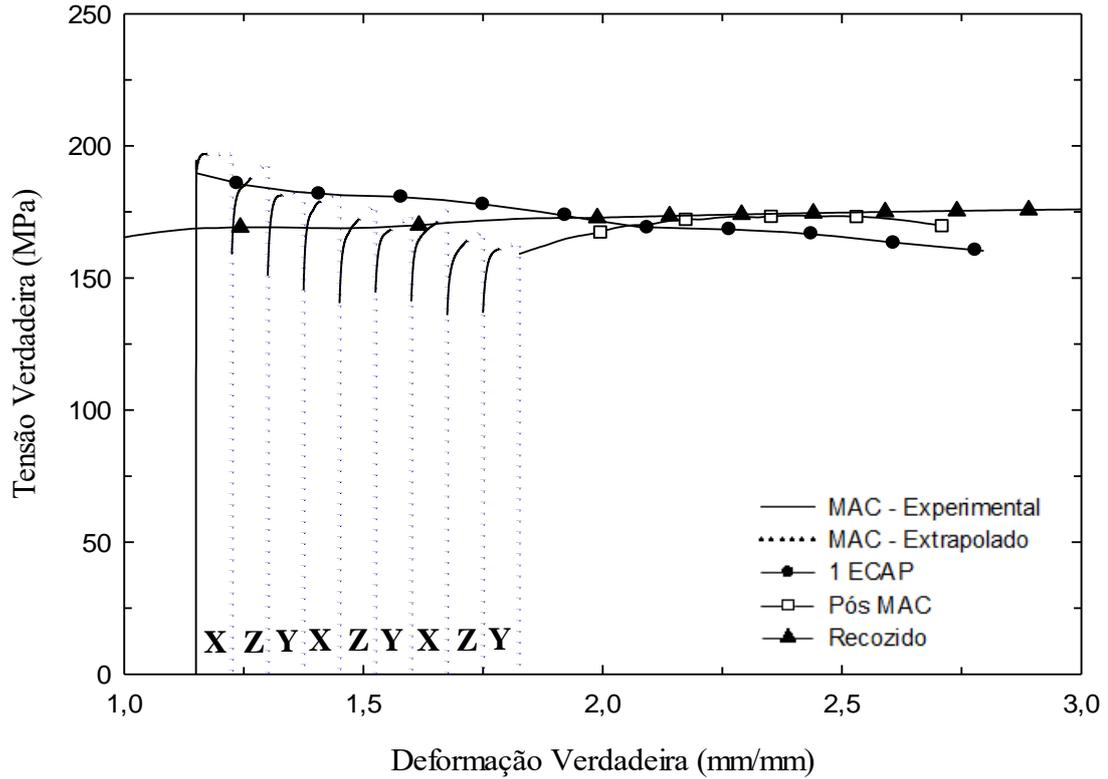


GRAFICO 5.16 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 3 ciclos de MAC.

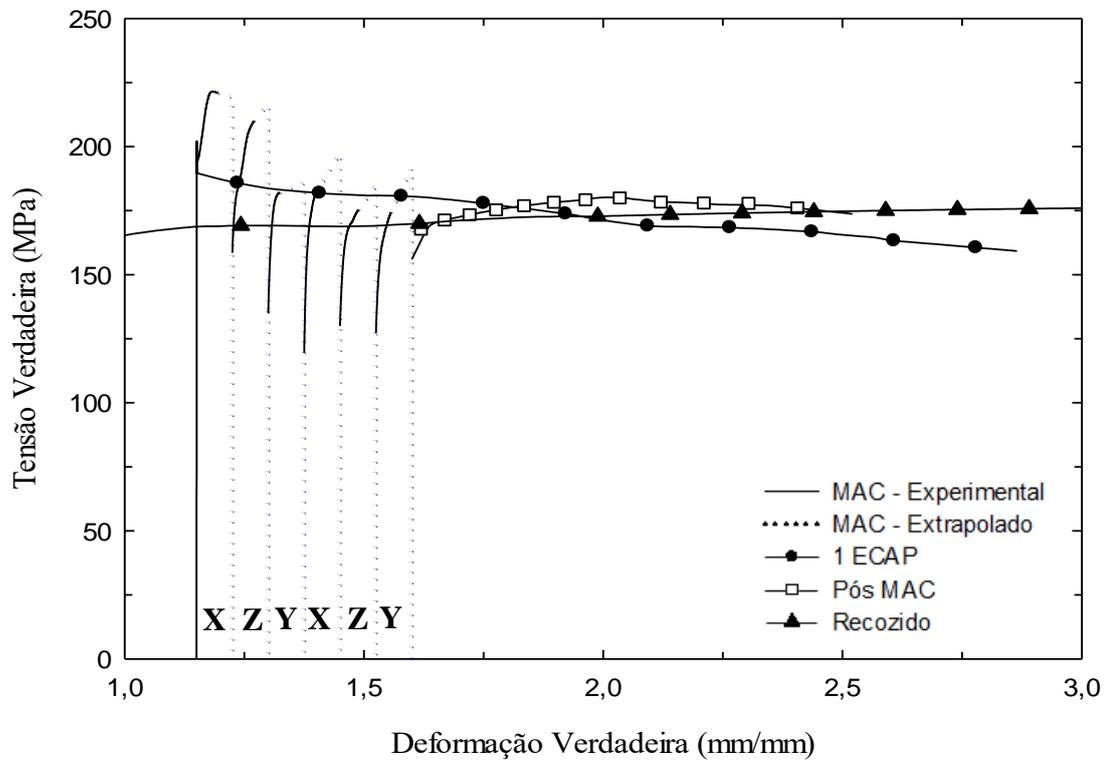


GRAFICO 5.17 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 2 ciclos de MAC.

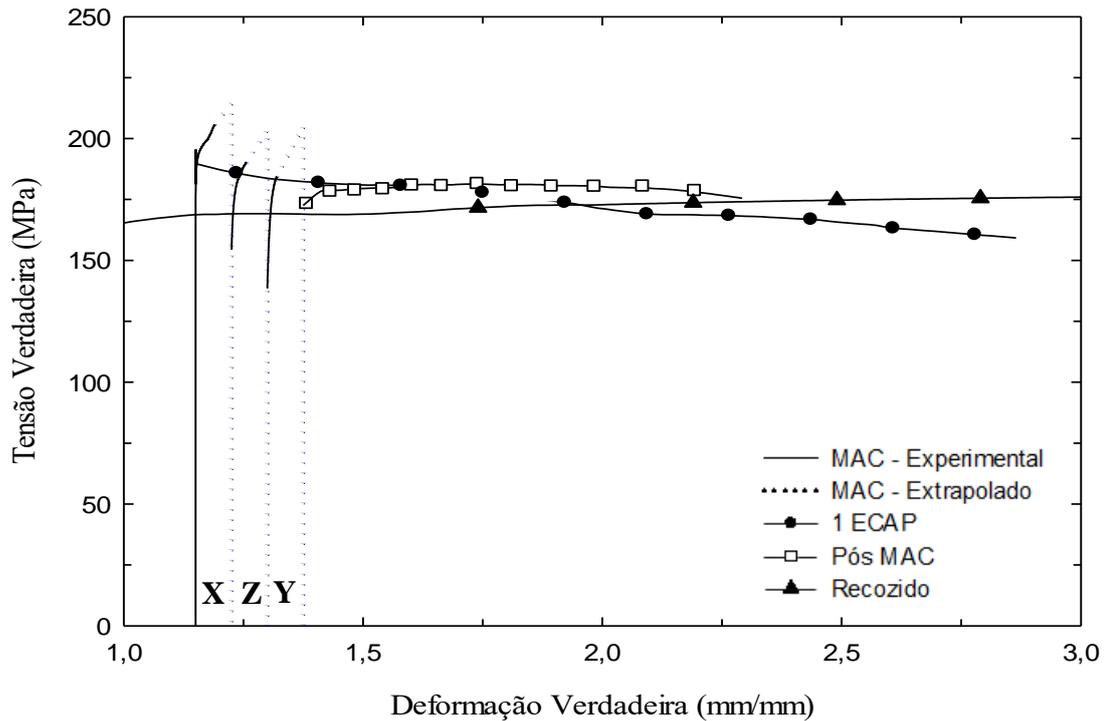


GRAFICO 5.18 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 1 passe de ECAP e 1 ciclo de MAC.

O GRA. 5.19 mostra as curvas das compressões uniaxiais após 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC do material processado por 1 passe de ECAP sem somar a deformação imposta pelos processamentos por ECAP e MAC. O material processado por 1, 2 e 3 ciclos de MAC apresenta diminuição de tensão para uma mesma deformação e aparente aumento na taxa de encruamento à medida que se aumenta o número de ciclos de MAC. O material processado por 4 ciclos de MAC mantém a tendência de aumentar a taxa de encruamento com o aumento de ciclos de MAC, apresenta taxa de encruamento maior que os demais e tensões intermediárias as obtidas no material processado por 2 e 3 ciclos para uma mesma quantidade de deformação.

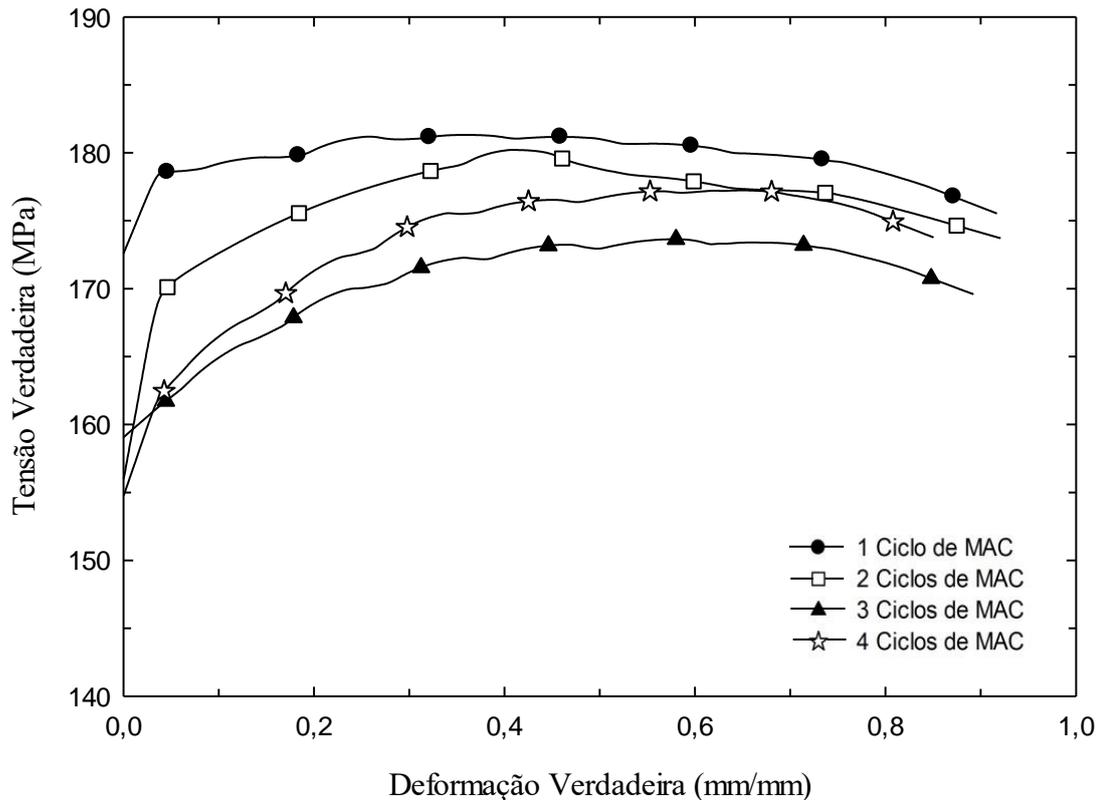


GRAFICO 5.19 – Comparação das compressões uniaxiais após MAC do material processado por 1 passe de ECAP.

A GRA. 5.20 mostra um gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira com as curvas monotônicas do material recozido e do material processado por um passe de ECAP e as curvas do processamento por MAC em 1, 2, 3 e 4 ciclos após 1 passe de ECAP considerando a deformação acumulada.

Comparando as Figuras 5.19 e 5.20 é possível ver que assim como no material recozido o material processado por 1 passe de ECAP e 1 ciclo de MAC sofre pouca alteração na taxa de encruamento e tem o comportamento mais próximo da curva gerada pelo carregamento uniaxial que do comportamento das curvas do processamento por mais ciclos de MAC. O material processado por 1 passe de ECAP apresentara limite de escoamento abaixo da curva do material recozido, para mesma quantidade de deformação, quando submetido a até 3 ciclos de MAC.

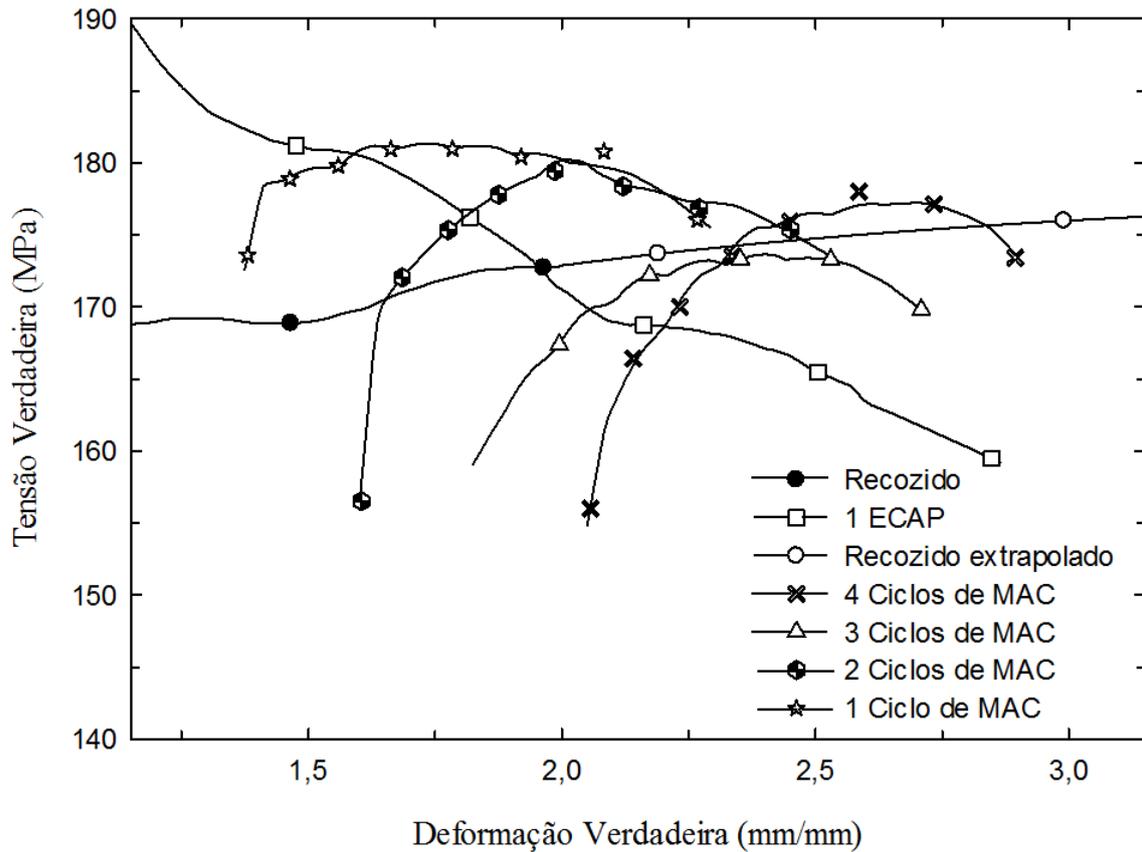


GRAFICO 5.20 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido, processado por 1 passe de ECAP e processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC após o ECAP.

Devido o material processado por ECAP apresentar uma curva com inclinação negativa desde o início da compressão, não foi registrada deformação uniforme para esta condição. Com o aumento do coeficiente de encruamento após o processamento por MAC do material processado por 1 passe de ECAP foram obtidos os seguintes valores de deformação uniforme: 0,009, 0,037, 0,021 e 0,034, para o material processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC.

Os GRA. 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 expõem curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do comportamento do material processado por 4, 3, 2 e 1 ciclos de MAC após 4 passes de ECAP e monotônicas do material REC+4ECAP, REC+4ECAP+MAC e a regressão da curva do material recozido. O processamento por MAC aparenta induzir um amaciamento menor que o induzido no material processado por apenas 1 passe de ECAP. Após o MAC o material apresenta um pequeno aumento na taxa de encruamento quando sujeito a compressão monotônica.

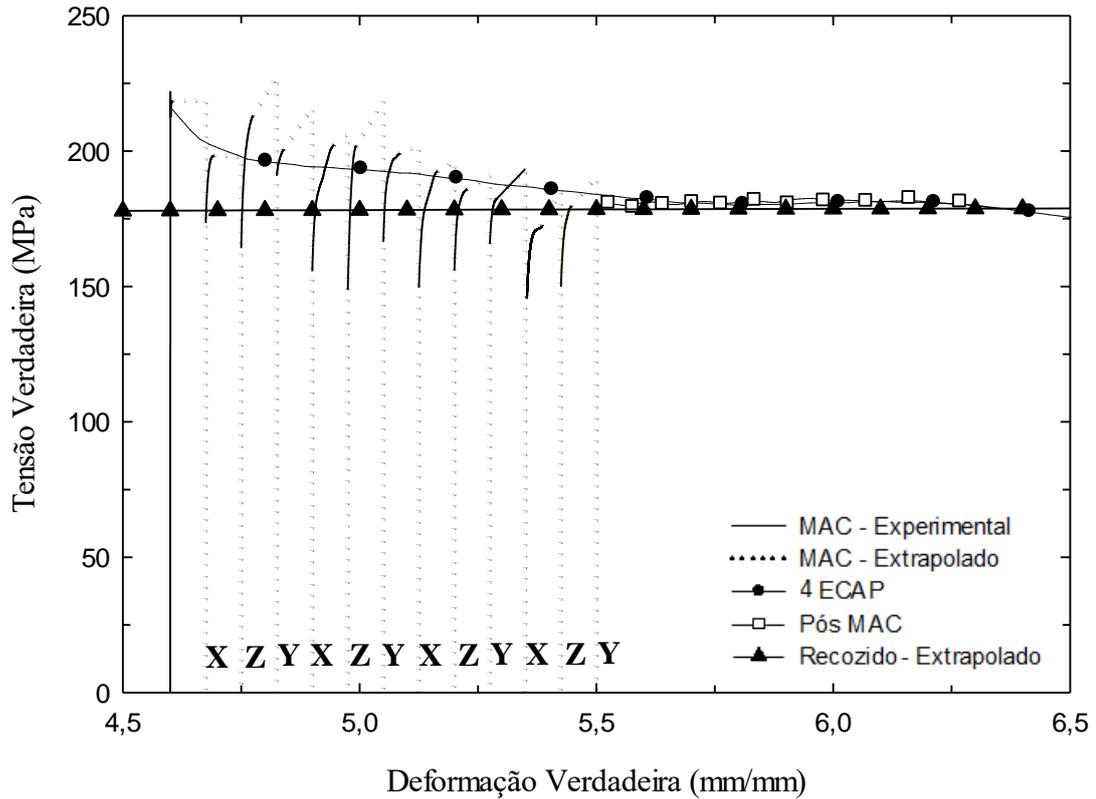


GRAFICO 5.21 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do material processado por 4 passe de ECAP e 4 ciclos de MAC

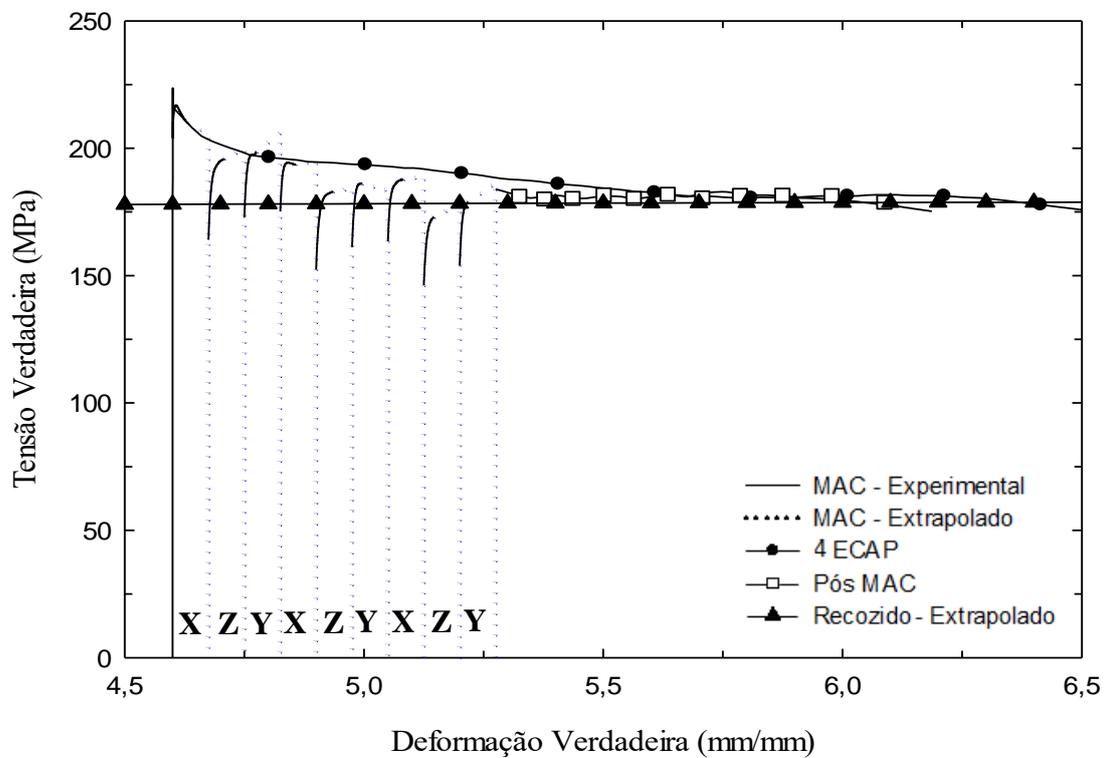


GRAFICO 5.22 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material processado por 4 passe de ECAP e 3 ciclos de MAC.

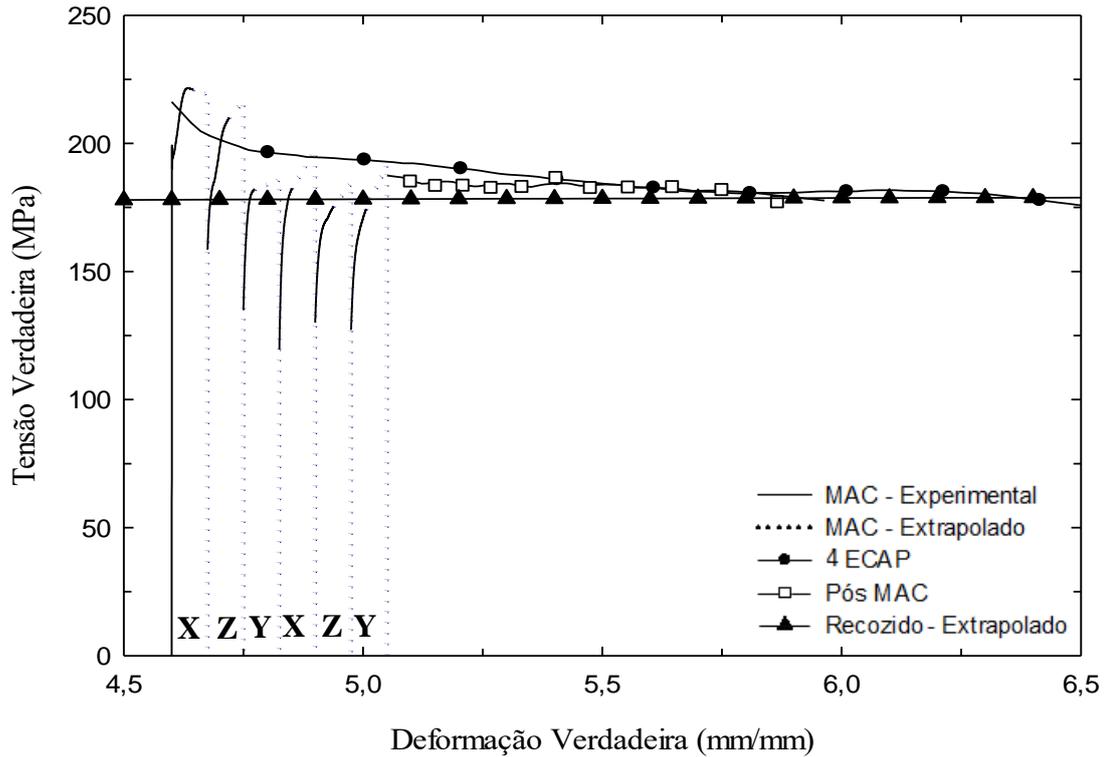


GRAFICO 5.23 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material processado por 4 passe de ECAP e 2 ciclos de MAC.

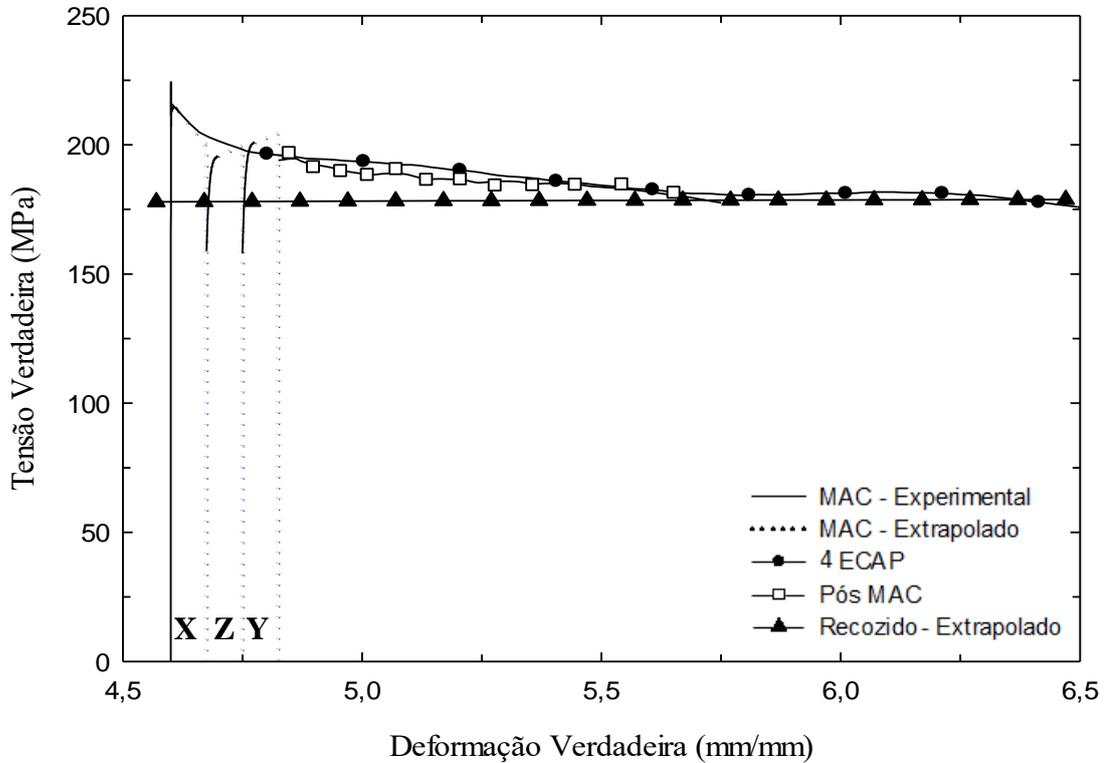


GRAFICO 5.24 – Curva tensão verdadeira x Deformação verdadeira do material processado por 4 passe de ECAP e 1 ciclo de MAC.

O GRAF. 5.25 apresenta curvas referentes às compressões uniaxiais após 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC no material processado por 4 passes de ECAP em um gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira sem somar a deformação imposta pelos processamentos por ECAP e MAC, a fim de se comparar o limite de escoamento e a taxa de deformação para cada um dos casos. O material processado por 1, 2 e 3 ciclos de MAC após 4 passes de ECAP tem comportamento similar ao observado para as mesmas condições no material processado por 1 passe de ECAP, ou seja, apresenta diminuição de tensão para uma mesma deformação e aparente aumento suave na taxa de encruamento a medida que se aumenta o número de ciclos de MAC. O material processado por 4 ciclos de MAC tem comportamento diferente do restante apresentando taxa de encruamento maior que os demais.

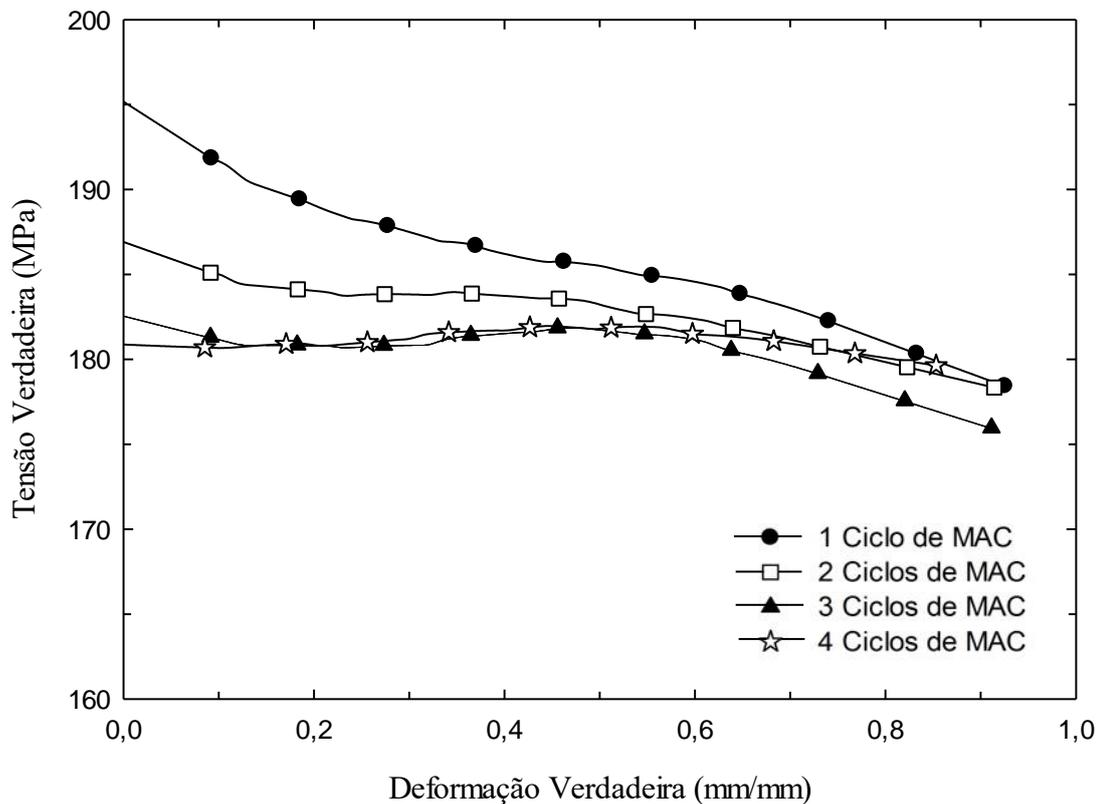


GRAFICO 5.25 – Comparação das compressões uniaxiais após MAC do material processado por 4 passe de ECAP.

O GRA. 5.26 mostra um gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira com as curvas monotônicas do material recozido e do material processado por 4 passes de ECAP e as curvas do processamento por MAC em 1, 2, 3 e 4 ciclos após 4 passes de ECAP.

Comparando os GRA. 5.25 e 5.26 é possível ver que assim como no material recozido o material processado por 4 passes de ECAP e 1 ciclo de MAC sofre pouca alteração na taxa de encruamento e tem o comportamento mais próximo da curva gerada pelo carregamento uniaxial que do comportamento das curvas do processamento por mais ciclos de MAC.

No geral o material não apresenta tensões abaixo das tensões registradas para o material recozido processado uniaxialmente para mesmas quantidades de deformação. O material processado por 4 passes de ECAP apresenta pouca alteração no comportamento mecânico quando submetido a MAC e apresenta comportamento semelhante para os diferente ciclos quando comparados com o material recozido e o material processado por 1 passe de ECAP, que apresentam maiores alterações.

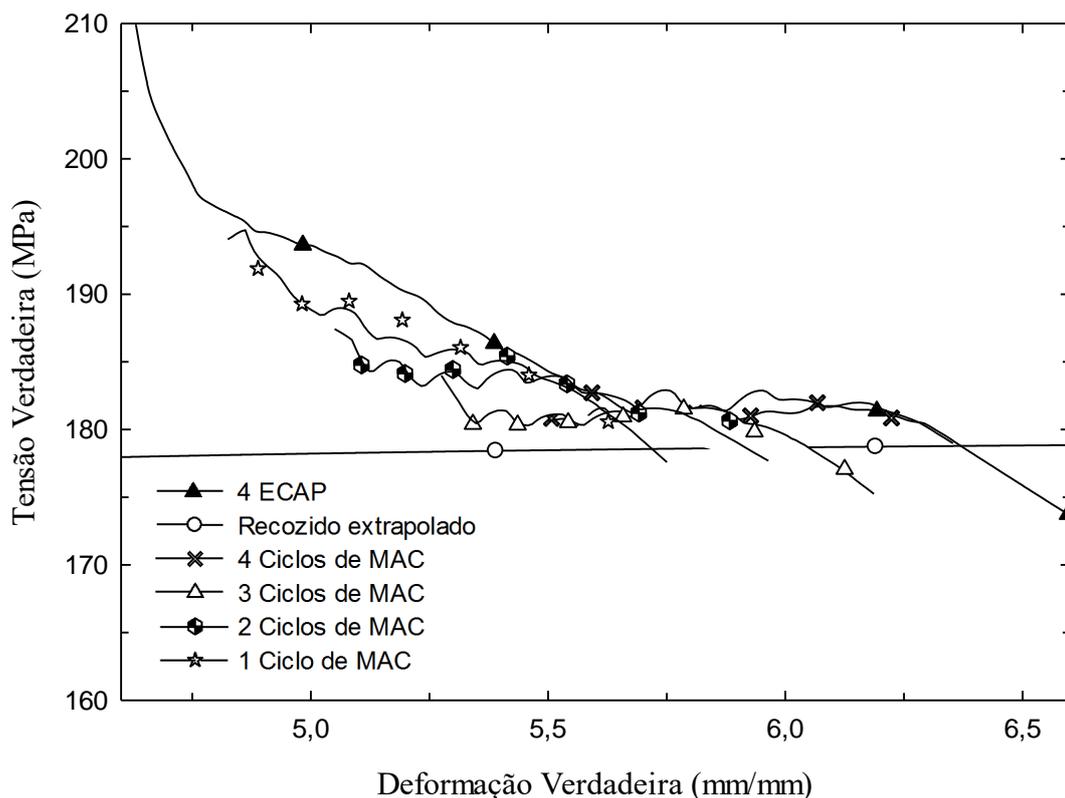


GRAFICO 5.26 – Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira do material nas condições recozido, processado por 4 passes de ECAP e processado por 1, 2, 3 e 4 ciclos de MAC após o ECAP.

O GRA. 5.27 apresenta os valores de limite de escoamento obtidos em cada uma das compressões uniaxiais realizadas. Constam dados referentes ao material recozido, processado

por 1 e 4 passes de ECAP, processado uniaxialmente após cada ciclo de MAC (Pós MAC). Como já dito o limite de escoamento aumenta com o processamento por ECAP e com o aumento do número de passes deste, o material processado por MAC mantém essa característica de tensões maiores para os materiais que foram processados por ECAP. O material recozido após submetido a MAC mesmo apresentando tensões abaixo das registradas para o carregamento uniaxial tem limites de escoamento maior que o material sem o processamento por MAC. O material processado por 1 e 4 passes de ECAP seguidos de MAC apresenta limites de escoamento menores que os registrados para o material somente processado por ECAP. O limite de escoamento, em geral, aumenta a medida que se aumenta o número de ciclos de MAC.

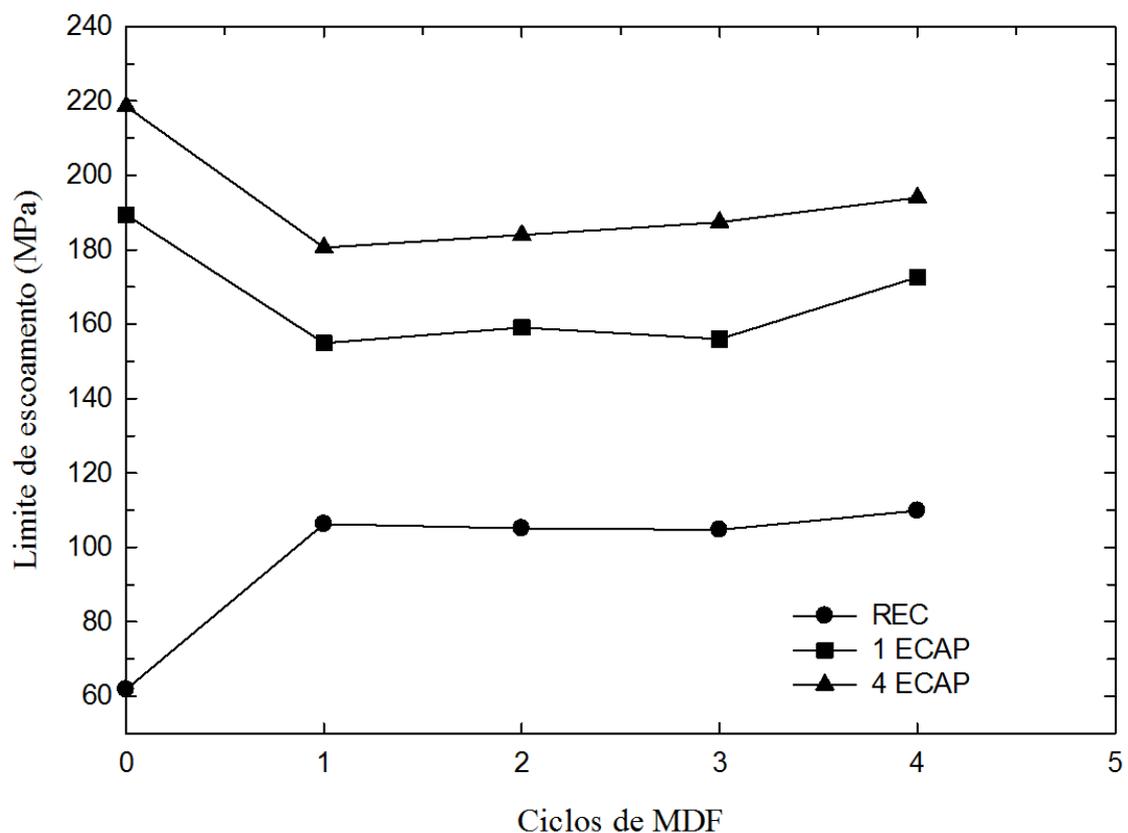


GRAFICO 5.27– Evolução do limite de escoamento para os 3 tipos de processamento em relação ao número de ciclos de MAC.

## 6 CONCLUSÕES

A matriz de ECAP projetada e construída se mostrou eficiente para o estudo da influência do processamento por ECAP no comportamento mecânico do material recozido, facilitou a etapa de montagem e preparação para o processamento, reduzindo tempo e trabalho. O sistema de fechamento da matriz eliminou o escoamento de material na interface das bases desta.

A matriz utilizada no processamento por MAC além de eliminar o abaulamento dos corpos de prova reduziu o tempo e trabalho de processamento e tratamento de dados. Eliminou a necessidade de alinhar a amostra, a fim de deixá-la perpendicular ao sentido da compressão, fator dificultador gerado pelo abaulamento. Manteve a altura da amostra e a distância percorrida durante a compressão constante, devido o padrão dimensional e geométrico após cada compressão. Garantiu que todas as compressões promovessem a mesma quantidade de deformação; a presença do abaulamento dificulta esta padronização.

Em todas as condições estudadas, o material adotado apresentou envelhecimento à temperatura ambiente. Este efeito se manifestou por meio de picos de tensão nas curvas tensão x deformação.

O processamento por MAC no material recozido registrou menores valores de tensões quando comparado com a compressão uniaxial para mesma quantidade de deformação. Quando submetido a compressão uniaxial após o processamento por MAC o material apresentou aumento na taxa de encruamento independente do número de ciclos de MAC.

O processamento por ECAP aumentou significativamente o limite de escoamento do material quando comparado com o material recozido, aproximadamente 3 vezes para 1 passe de ECAP e 3,5 vezes para 4 passes de ECAP (medido na direção do processamento), ou seja, o aumento no limite de escoamento não é proporcional ao número de passes de ECAP. O material processado por ECAP apresentou amaciamento quando submetido a compressão uniaxial.

O material processado por ECAP apresentou amaciamento quando submetido ao processamento por MAC. O material processado por ECAP + MAC apresentou maior taxa de

encruamento quando comparado ao material processado uniaxialmente após ECAP, para uma mesma quantidade de deformação. O aumento do número de ciclos de MAC tende a aumentar a taxa de encruamento e aumentar sutilmente o limite de escoamento do material.

O material processado por ECAP, por 1 ou 4 passes, aparentemente é afetado pelo MAC até 3 ciclos e o quarto ciclo apresenta comportamento similar ao obtido pelo terceiro. O material processado por 4 passes de ECAP não apresentou grandes alterações com o processamento por MAC. Aparentemente não é interessante aplicar mais de 3 ciclos de MAC no material processado por 1 passe de ECAP e os resultados deste trabalho não apresentam vantagens em processar por MAC o material processado por 4 passes de ECAP.

A associação de 1 passe de ECAP com o processamento por MAC se mostrou interessante, uma vez que o ECAP aumenta significativamente a resistência do material e apresenta amaciamento durante seu escoamento e o MAC aumenta a taxa de encruamento do material fazendo com que ele encrue de forma positiva novamente.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar os estudos utilizando outras ligas de Alumínio para analisar a influência dos elementos de liga no comportamento do material perante os processamentos adotados.

Realizar os estudos adotando outras rotas de processamento por ECAP e quantidades de passes intermediárias e superiores as adotadas.

Realizar estudos utilizando uma matriz de ECAP que forneça menor quantidade de deformação.

Realizar os estudos adotando diferentes amplitudes de deformação para o processamento por MAC.

Promover mais passes de MAC para analisar se a tendência do comportamento mecânico continua a mesma, principalmente no material processado por ECAP.

Realizar análises microestruturais em todas as condições estudadas, a fim de analisar a influência metalúrgica dos processamentos realizados e possivelmente justificar a alteração do comportamento mecânico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AGUILAR, M. T. P. **Endurecimento por precipitação no sistema Fe-Cr-Al-Mn**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1986. 115p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 2 ARMSTRONG, P. E.; HOCKETT, J. E.; SHERBY, O. D. Large strain multidirectional deformation of 1100 aluminum at 33K. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**. v. 30, n. 1/2, p. 37-58, April 1982.
- 3 ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook**. Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials. 10 ed. Ohio: American Society for Metals - ASM international, v. 2, 1990.
- 4 CARDOSO, K. R.; MUÑOZ-MORRIS, M. A.; LEÓN, K. V.; MORRIS, D. G. Room and high temperature ECAP processing of Al–10%Si alloy. **Materials Science & Engineering A**. v. 587, p. 387-396, 2013.
- 5 CHEN, Y. J.; CHAI, Y. C.; ROVEN, H. J.; GIREESH, S. S.; HJELEN, J. Microstructure and mechanical properties of Al–xMg alloys processed by room temperature ECAP. **Materials Science and Engineering A**. v. 545, p. 139-147, 2012.
- 6 CHUNG, K.; WAGONER, R. H. Effect of stress-strain-law transients on formability. **Metallurgical Transactions A**, v. 17, n. 6, p. 1001-1009, 1986.
- 7 COFFIN, L. F.; TAVERNELLI, J. F. The cyclic straining and fatigue of metals. **Trans Metall Soc AIME**, v. 215, p. 794-807, 1959.
- 8 CORRÊA, E. C. S.; AGUILAR, M. T.; CETLIN, P. R. The influence of cyclic straining on the work hardening behavior of AISI 304 stainless steel bars in multiple-pass drawing. **Materials Chemistry and Physics**, v. 106, p. 95-101, 2007.
- 9 CORRÊA, E. C. S.; AGUILAR, M. T.; SILVA, E. M. P.; CETLIN, P. R. The effect of sequential tensile and cyclic torsion straining on work hardening of steel and brass. **Journal of Material Processing Technology**, v. 142, p. 282-288, 2003.

- 10 CORRÊA, E. C. S.; FILHO, L. D. R. M.; AGUILAR, M. T.; MONTEIRO, W. A. CETLIN, P. R. The effect of cyclic straining on the drawing stress of low carbon steel bars. **Material Chemistry and Physics**. v. 94, p. 376-381, 2005.
- 11 COTTREL, A. H., Dislocations and plastic flow crystals, p. 140. **Oxford University Press**, Londres, 1953.
- 12 DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981. 693 p.
- 13 EL-DANAF, E. A.; SOLIMAN, M. S.; ALMAJID, A. A.; EL-RAYES, M. M. Enhancement of mechanical properties and grain size refinement of commercial purity aluminum 1050 processed by ECAP. **Materials Science and Engineering: A**, v. 458, n. 1, p. 226-234, 2007.
- 14 FARIA, C. G.; ALMEIDA, N. G. S.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Increasing the work hardening capacity of equal channel angular pressed (ECAPed) aluminum through multi-axial compression (MAC). **Materials Letters**. v. 174, p. 153-156, 2016.
- 15 FARIA, C. G. **Processamento multiaxial cíclico em alumínio comercialmente puro processado por ECAP**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2015. 85p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
- 16 FIGUEIREDO, R. B. **Processamento de uma liga PB-4%SB por Extrusão Angular em Canais iguais**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 118p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 17 GURAO, N. P.; KUMAR, P.; SARKAR, A.; BROKMEIER, H. G.; SUWAS, S. Simulation of Deformation Texture Evolution During Multi Axial Forging of Interstitial Free Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**. V. 22 (4), 2013.
- 18 HOCKETT, J. E. **Proc. ASTM**, v. 59, 1309 p, 1959.
- 19 HORITA, Z.; FUJINAMI, T.; NEMOTO, M.; LANGDON, T. G. Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing. **Materials Processing Technology**. v. 117, p. 288-292, 2001.

- 20 IWAHASHI, Y.; HORITA, Z.; NEMOTO, M.; LANGDON, T. G. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. **Scripta Materialia**, V. 35, n. 2, p. 143-146, 1996.
- 21 IWAHASHI, Y., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T. G., The Process of Grain Refinement in Equal-Channel Angular Pressing, **Acta Materialia**, v. 46, p. 3317-3331, 1998.
- 22 JIANG, J. H.; MA, A. B.; LU, F. M.; SAITO, N.; WATAZU, A.; SONG, D.; ZHANG, P.; NISHIDA, Y. Improving corrosion resistance of Al-11mass%Si alloy through a large number of ECAP passes. **Materials and Corrosion**. v. 63 No. 9, p. 848-852, 2011.
- 23 JIN, Y. G.; BAEK, H. M.; HWANG, S. K.; IM, Y. T.; JEON, B. C. Continuous high strength aluminum bolt manufacturing by the spring-loaded ECAP system. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 212, p. 848-855, 2012.
- 24 KAPOOR, R.; SARKAR, A.; YOGI, R.; SHEKHAWAT, S. K.; SAMAJDAR, I; CHAKRAVARTTY, J. K. Softening of Al during multi-axial forging in a channel die. **Materials Science & Engineering A**. v. 560, p. 404-412, 2013.
- 25 KAWASAKI, M. Different models of hardness evolution in ultrafine-grained materials processed by high-pressure torsion. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 1, p. 18-34, 2014.
- 26 LI, R. H.; ZHANG, Z. J.; ZHANG, P.; ZHANG; Z. F. Improved fatigue properties of ultrafine-grained copper under cyclic torsion loading. **Acta Materialia**. v. 61, p. 5857-5868.
- 27 LIU, G.; GU, J.; NI, S.; LIU, Y, SONG, M. Microstructural evolution of Cu–Al alloys subjected to multi-axial compression. **Materials Characterization**. v. 103, p. 107-119, 2015.
- 28 MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008, 505 p.

- 29 NAKASHIMA, K.; HORITA, Z.; NEMOTO, M.; LANGDON, T. G. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing. **Acta materialia**, v. 46, n. 5, p. 1589-1599, 1998.
- 30 NIKULIN, I.; KIPELOVA, A.; MALOPHEYEV, S.; KAIBYSHEV, R. Effect of second phase particles on grain refinement during equal-channel angular pressing of an Al–Mg–Mn alloy. **Acta Materialia**. v. 60, p. 487-497, 2012.
- 31 OROWAN. E.; in Symposium on International Stresses in Metals and Alloys, pa. 451, **Institute of Metals**, Londres, 1947.
- 32 PADAP, A. K.; CHAUDHARI, G. P.; NATH, S. K.; PANCHOLI, V. Ultrafine-grained steel fabricated using warm multiaxial forging: Microstructure and mechanical properties. **Materials Science and engineering A**. v. 527, p. 110-117, 2009.
- 33 POLAKOWSKI, N. H. Softening of metals during cold-working. **Journal of the Iron and Steel Institute**, v. 169, n. 4, p. 337-346, 1951.
- 34 REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982. 776 p.
- 35 SABIROV, I.; MURASHKIN, M. Y.; VALIEV, R. Z. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development. **Materials Science and Engineering: A**, v. 560, p. 1-24, 2013.
- 36 SAITO, Y.; TSUJI, N.; UTSUNOMIYA, H.; SAKAI, T.; HONG, R. G. Ultra fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. **Scripta Materialia** v. 39, n. 9, p. 1221-1227, 1998.
- 37 SAKAI, T.; BELYAKOV, A.; KAIBYSHEV, R.; MIURA, H.; JONAS, J. J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. **Progress in Materials Science**, v. 60, p. 130-207, 2014.
- 38 SEGAL, V. M., Materials Processing by Simple Shear. **Materials Science and Engineering**, v. A197, p. 157-164, 1995

- 39 SHAERI, M.H.; SHAERI, M.; SALEHI, M. T.; SEYYEDEIN, S. H.; ABUTALEBI, M. R. Effect of equal channel angular pressing on aging treatment of Al-7075 alloy. **Progress in Natural Science Materials International**. v. 25, p. 159-168, 2015.
- 40 SHAN, A.; MOON, I.; PARK, J. Estimation of friction during equal channel angular (ECA) pressing of aluminum alloys. **Materials Processing Tecnology**. v. 122, p 255-259, 2001.
- 41 SHOW, B. K.; MONDAL, D. K.; BISWAS, K.; MAITY, J. Development of a novel 6351 Al-(Al<sub>4</sub>SiC<sub>4</sub>+SiC) hybrid composite with enhanced mechanical properties. **Materials Science & Enginnering A**. v. 579, p. 136-149, 2013.
- 42 SONG, D.; MA, A. B.; JIANG, J. H.; LIN, P. H.; LU, F. M.; ZHANG, L. Y. Significantly changed intergranular corrosion and exfoliation corrosion behavior of the ultra-fine grained Al-5 mass% Cu alloy fabricated by ECAP. **Materials and Corrosion**. v. 64 No.11, p. 1015-1023, 2013.
- 43 SUH, J.; VICTORIA-HEMÁNDEZ, J.; LETZIG, D.; GOLLE, R.; VOLK, W. Enhanced mechanical behavior and reduced mechanical anisotropy of AZ31 Mg alloy sheet processed by ECAP. **Materials Science & Engineering A**. v. 650, p. 523-529, 2016.
- 44 TABATABAEI, N.; TAHERI, A. K.; VASEGHI, M. Dynamic strain aging of a commercial Al-Mg-Si-Cu alloy during equal channel angular extrusion process. **Journal of Alloys and Compounds**. v. 502, p 59-62, 2010.
- 45 VALIEV, R. Z.; ISLAMGALIEV R. K.; ALEXANDROV, I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. **Progress in Materials Science**. V. 45, p. 103-189, 2000.
- 46 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, p. 881-981, 2006.
- 47 VASEGHI, M.; TAHERI, A. K.; KIM, H. S. Upper Bound Analysis of Deformation and Dynamic Ageing Behavior in Elevated Temperature Equal Channel Angular Pressing of Al-Mg-Si Alloys. **Metals and Materials International**. v. 16 No. 3, p. 363-369, 2010.

- 48 XU, X.; ZHANG, Q.; HU, N.; HUANG, Y.; LANGDON, T. G. Using an Al–Cu binary alloy to compare processing by multi-axial compression and high-pressure torsion. **Material Science & Engineering A**. v. 588, p. 2013.
- 49 YANG, X.; WANG, D.; WU, Z.; YI, J.; NI, S.; DU, Y. A coupled EBSD/TEM study of the microstructural evolution of multi-axial compressed pure Al and Al–Mg alloy. **Materials Science & Engineering A**. v. 658, p 16-27, 2016.
- 50 ZHAO, S.; MENG, C.; MAO, F.; HU, W. Influence of severe plastic deformation on dynamic strain aging of ultrafine grained Al–Mg alloys. **Acta Materialia**. V. 76, p. 54 – 67, 2014.
- 51 ZHILYAEV, A. P.; LANGDON, T. G. Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications. **Progress in Materials Science**. v. 53, p. 893-979, 2008.
- 52 ZHU, R.; WU, Y. J.; JI, W. Q.; WANG, J. T. Cyclic softening of ultrafine-grained AZ31 magnesium alloy processed by equal-channel angular pressing. **Materials Letters**, v. 65, n. 23, p. 3593-3596, 2011.
- 53 ZHU, Y. T.; LOWE, T. C., Observations and Issues on Mechanisms of Grain Refinement During ECAP Process. **Materials Science and Engineering**, v. A291, p. 46-53, 2000.
- 54 ZHU, Q.; LI, L.; BAN, C.; ZHAO, Z.; ZUO, Y.; CUI, J., Structure uniformity and limits of grain refinement of high purity aluminum during multi-directional forging process at room temperature. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 24, p. 1301-1306, 2014.