PONTIFICIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Ernane Vinicius Silva

# ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO ASTM 6082 NO PROCESSO DE EXTRUSÃO A QUENTE

Belo Horizonte 2019 Ernane Vinicius Silva

# ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO ASTM 6082 NO PROCESSO DE EXTRUSÃO A QUENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva

Belo Horizonte 2019

FICHA CATALOGRÁFICA Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Silva, Ernane Vinicius
Silva, Ernane Vinicius
Análise experimental do comportamento da liga de alumínio ASTM 6082 no processo de extrusão a quente / Ernane Vinicius Silva. Belo Horizonte, 2019.
I38 f. : il.
Orientador: Gilmar Cordeiro da Silva Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
1. Ligas de alumínio. 2. Ligas de alumínio - Propriedades mecânicas. 3. Microestrutura. 4. Metais – Extrusão – Métodos de simulação. 5. Atrito. 6. Método dos elementos finitos. I. Silva, Gilmar Cordeiro da. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Marques de Souza e Silva - CRB 6/2086

CDU: 621.7.04

Ernane Vinicius Silva

# ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO ASTM 6082 NO PROCESSO DE EXTRUSÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. José Rubens Carneiro – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Pedro Américo A. Magalhães Junior-PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa – CEFET (Avaliador Externo)

Belo Horizonte, 08 de Novembro de 2019

Aos meus pais, pela luta. À minha esposa, pelo incentivo. Aos meus, filhos pela inspiração. E aos meus sogros, pelo apoio.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade única e de grande valia em minha vida;

À minha esposa, Tatiane Reis, pela força em tudo que somente nós passamos e sabemos;

Ao meu amigo e orientador, Gilmar Cordeiro, pelo apoio, orientação e paciência;

Aos amigos do Laboratório, Marceliny Nardy, Erberte Marcio, Vitor Medeiros, Norberto Martins e Fabiane Lucia, por todo apoio e suporte;

A todos os professores que, de alguma forma, me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho;

Aos amigos da Faculdade Pitágoras e da PUC Minas, onde trabalho;

Aos colegas que participaram com incentivo e alegria;

Aos meus irmãos, Diórgines Barsabd e Vitor Marcos, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Maria Odeci e Antônio Roberto, e aos meus sogros, Terezinha e João, que ajudam na criação de meus filhos e sempre me incentivaram e apoiaram.

Aos meus pequenos Nicolas e Samuel, que são a minha vida e a razão por este trabalho.

Algo que piora o homem é o julgamento prévio, sem que haja realmente o conhecimento dos fatos.

#### RESUMO

A extrusão é um processo de produção contínua, com grande importância na área da conformação e da indústria. A demanda de produtos extrudados em alumínio como barras, tubos e perfis especiais vem se elevando na indústria civil, aérea e marítima. Além disso, a extrusão, tanto no processo em temperatura ambiente como no processo realizado a quente, tem se apresentado de forma crescente, uma vez que o produto do alumínio extrudado agrega resistência e leveza devido às propriedades mecânicas da liga e do processo de fabricação.

Neste trabalho foi avaliado o comportamento da liga de alumínio ASTM 6082, durante o processo de extrusão direta. Uma ferramenta foi projetada e construída para obtenção de perfil de alumínio com seção quadrilátera axissimétrico pelo processo de extrusão direta. O coeficiente de atrito entre o par tribológico, container e liga de alumínio, foi determinado pelo teste do anel. Valores médios de 0,36 para trabalho a frio e de 0,76 para trabalho a quente na temperatura de 400 °C foram obtidos. As curvas tensão versus deformação referente ao comportamento do material, quando solicitado a deformação, foram obtidas nas temperaturas ambiente e a 400 °C. A força necessária para a extrusão foi simulada no programa ABAQUS por intermédio de método de elementos finitos. O desvio foi de 9,2% em relação a parte experimental que foi executada com o objetivo de comparação dos resultados. Foram avaliados a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga antes e após o processo de extrusão.

Palavras-chave: Liga de Alumínio 6082.Extrusão a quente. Atrito. Simulação numérica.

### ABSTRACT

Extrusion is a continuous production process, of great importance in the field of forming and industry. Demand for aluminum extruded products such as bars, tubes and special profiles has been rising in the civil, air and maritime industries. Moreover, the extrusion, both in the room temperature process and in the hot process, has been increasingly presented, since the extruded aluminum product adds strength and lightness due to the mechanical properties of the alloy and the manufacturing process.

In this work, the behavior of 6082 aluminum alloy during the direct extrusion process was evaluated. A tool was designed and built for obtaining an aluminum profile with quadrilateral axisymmetric section by the direct extrusion process. The coefficient of friction between the tribological pair, container and aluminum alloy, was determined by the ring test. Average values of 0.36 for cold work and 0.76 for hot work at 400 ° C were obtained. The stress versus deformation curves referent the material behavior, when deformation was requested, were obtained at room temperatures and at 400 °C. The required extrusion force was simulated in the ABAQUS program by finite element method. There was a deviation of 9.2% in relation to the experimental part that was performed with the purpose of comparing the results. The microstructure and mechanical properties of the alloy were evaluated before and after the extrusion process.

Keywords: 6082 Aluminum Alloy. Hot Extrusion. Friction. Numerical simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo Bayer40
Figura 2 – A transformação da alumina calcinada em alumínio metálico40
Figura 3 – Principio da extrusão44
Figura 4 – Extrusão indireta47
Figura 5 – Fluxo do material dentro do recipiente de uma prensa de extrusão
indireta48
Figura 6 – Extrusão direta48
Figura 7 – Variação de carga ou pressão com deslocamento do pistão para o
processo de extrusão direta e indireta49
Figura 8 – Desenho esquemático da geometria da ferramenta de extrusão à
frente, a ré e radial e malha axissimétrica 2D deformada na AEF51
Figura 9 – Fluxo tradicional do metal dentro do recipiente de uma prensa de
extrusão direta54
Figura 10 – Fluxo observado de material dentro do recipiente de uma prensa de
extrusão direta54
Figura 11 – Esquema dos quatro tipos diferentes de fluxo na extrusão55
Figura 12 – Relação entre taxa de extrusão e ângulo da zona de metal morto .55
Figura 13 – Constante de Extrusão para metais em várias temperaturas58
Figura 14 – Valores efetivos de deformação para as extrusões de alumínio
através de face plana (acima) e matriz escalonada (abaixo) no eixo médio do
extrudado61
Figura 15 – Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão
do anel62
Figura 16 – Curvas de calibração para a determinação de atrito em termos de µ.
63
Figura 17 – Curvas teóricas de calibração pelo fator m64
Figura 18 – Características de escoamento em relação ao atrito65
Figura 19 – Curvas levantadas por simulação computacional pelo fator ${\rm m}$ 66
Figura 20 – Exemplo esquemático de um módulo de programação68
Figura 21 – Fluxograma do procedimento prático71
Figura 22 – Centro de usinagem (CNC) Travis M-80072
Figura 23 – Torno (CNC) Travis TR-172

Figura 24 – Equipamento de raios-X	.73
Figura 25 – Corpos de prova de tração	.74
Figura 26 – Modelo de corpo de prova	.74
Figura 27 – Maquina de tração	.75
Figura 28 – Sistema de aquecimento a base de resistências elétricas	.75
Figura 29 – Corpos de prova para teste de atrito	.76
Figura 30 – Medidas do corpo de prova para teste de atrito	.76
Figura 31 – Tridimensional	.77
Figura 32 – Matriz de extrusão, vista frontal	.78
Figura 33 – Matriz de extrusão, vista traseira	.78
Figura 34 – Matriz de extrusão, vista frontal superior	.78
Figura 35 – Resistência e Container da matriz	.79
Figura 36 – Corpo de prova de extrusão na simulação	.80
Figura 37 – 1/4 do corpo de prova de extrusão na simulação	.80
Figura 38 – Matriz de extrusão na simulação	.81
Figura 39 – 1/4 do corpo de prova e da matriz de extrusão na simulação	.81
Figura 40 – Formato Hexaedrico da malha	.82
Figura 41 – Container e resistência revestido com manta termica	.83
Figura 42 – Cortadora Metalográfica	.84
Figura 43 – Embutidora	.84
Figura 44 – Microdurômetro	.87
Figura 45 – Perfil de corte das amostras para realização das medidas de dure	eza
	.87
Figura 46 – Corpo de prova não conformado e conformado, na temperatura	
ambiente	.94
Figura 47 – Corpo de prova recozido conformado e não conformado, em	
temperatura de 400°C	.95
Figura 48 – Corpo de prova como recebido conformado e não conformado, e	m
temperatura de 400°C	.95
Figura 49 – Inicio da simulação do corpo de prova	.96
Figura 50 – 1/4 da simulação do corpo de prova	.96
Figura 51 – 3/4 da simulação do corpo de prova	.97
Figura 52 – Final da simulação do corpo de prova	.97
Figura 53 – Corpo de prova extrudado ainda preso ao container e matriz	.99

Figura 54 – Corpo de prova extrudado envolto pela matriz completa	100
Figura 55 – Corpo de prova extrudado e a matriz aberta	101
Figura 56 – Corpo de prova extrudado	101
Figura 57 – Corpo de prova como recebido	103
Figura 58 – Corpo de prova Recozido	104
Figura 59 – Corpo de prova extrudado cortado na seção perpendicular ao	
sentido de extrusão	105
Figura 60 – Corpo de prova extrudado cortado no sentido de extrusão	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – O sistema de designação de ligas da AA – Ligas Forjadas	42
Tabela 2 – O sistema de designação de ligas da Associação de Alumínio	-
Ligas Fundidas	42
Tabela 3 – Parâmetros de processo usados em experimentos e simulaçõ	es de
EF	51
Tabela 4 – Ordem de lixamento	85
Tabela 5 – Relação de ataques utilizados	86
Tabela 6 –  Composição química AA 6082 realizada	89
Tabela 7 –  Composição química AA 6082 normatizada	89
Tabela 8 – Valores de atrito	94
Tabela 9 – Valores de carga maxima obitidos nas simulações	98
Tabela 10 – Valores de dureza Vickers	102

## LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1 – Tensão x deformação real e de engenharia do material como	
recebido à temperatura ambiente9	)0
Gráfico 2 – Tensão x deformação real e de engenharia do material recozido à	
temperatura ambiente9	)1
Gráfico 3 – Tensão x deformação real e de engenharia do material como	
recebido à temperatura de 400°C9	)2
Gráfico 4 – Tensão x deformação real e de engenharia do material recozido à	
temperatura de 400°C9	)2
Gráfico 5 – Deformações Reais9	)3
Gráfico 6 – Simulações de Carga x Tempo9	8

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT AEF Analise de Elementos Finitos ALE Algoritmo de Euler-Lagrange American Society for Testing and Materials ASTM ATD Analyze Taguchi Design CAE **Computer Aided Engineering** CFC Cúbico de Face Centrada CNC Comando Numérico Computadorizado

**Aluminum Association** 

EF Elementos Finitos

AA

- FEA Finite Element Analysis
- FEM Finite Element Method
- FSE Friction Stir Extrusion
- MEF Método de Elementos Finitos
- MMC Metal Matrix Composite

# LISTA DE SÍMBOLOS LATINOS

- T Altura após ensaio (mm)
- $A_p$  Área do pistão (m<sup>2</sup>)
- $A_f$  Área final (m<sup>2</sup>)
- $A_0$  Área inicial (m<sup>2</sup>)
- *m*<sub>1</sub> Coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação
- *k* Constante de extrusão
- C Constante dependente da temperatura
- *m* Fator de atrito entre o tarugo e a interface do recipiente
- *F* Força de extrusão (N)
- *P<sub>e</sub>* Pressão de extrusão (N/m<sup>2</sup>)
- R<sub>0</sub> Raio Externo após ensaio (mm)
- *R<sub>i</sub>* Raio interno após ensaio (mm)
- $R_n$  Raio neutro (mm)
- R Razão de extrusão
- *ER* Taxa de extrusão
- *T<sub>f</sub>* Temperatura de Fusão (graus)

# LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

- *α* Ângulo (graus)
- $\mu$  Coeficiente de atrito
- ε Deformação
- Ø Diâmetro (mm)
- $\Delta R_0$  Diferença entre raio externo antes e após o ensaio (mm)
- $\Delta R_i$  Diferença entre raio interno antes e após o ensaio (mm)
- έ Taxa de deformação
- *σ* Tensão (Pa)

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO
1.1 Justificativa
1.2 Objetivo geral
1.2.3 Objetivos específicos
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA39
2.1 O Alumínio
2.2 Ligas de alumínio41
2.3 Definição de extrusão44
2.4 Processo de extrusão indireta46
2.5 Processo de extrusão direta convencional48
2.6 Outros modelos de extrusão50
2.7 Deformação plástica e fluxo de metal53
2.8 Fatores de influência na extrusão56
2.9 Teste de atrito61
2.10 Modelagem Computacional66
3 METODOLOGIA71
3.1 Preparação
3.2 Análise Química
3.3 Ensaio de tração73
3.4 Teste de atrito
3.5 Preparação da matriz de extrusão77
3.6 Simulação
3.7 Extrusão
3.8 Metalografia83
3.9 Ensaio de dureza Vickers86
~
4 RESULTADOS E DISCUSSOES89
4.1 Análise Química
4.2 Ensaio de tração90
4.3 Teste de atrito93
4.4 Simulação95
4.5 Extrusão
4.5 Dureza Vickes
4.6 Metalografia e análise microestrutural102
5 CONCLUSÃO
SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

REFERÊNCIAS	111
APÊNDICES	119
APÊNDICE A – Primeiras Matrizes que romperam	
APÊNDICE B – Desenhos da matriz, container e punção	
APÊNDICE C – Valores obtidos pelo teste do anel e determinação	o do coeficiente
de atrito	131
APÊNDICE D – Valores dos Ensaios de Durezas	133
ANEXOS	137
ANEXO A – Análise guímica	
ANEXO B - Análise química do fornecedor	138

#### 1 INTRODUÇÃO

Um dos processos de deformação plástica, importante na área da conformação mecânica dos metais, é a extrusão. Nesse processo de fabricação, a seção transversal do material é reduzida e seu comprimento é aumentado, por meio de solicitação externa de compressão, quando o material passa através de uma ferramenta denominada matriz, adquirindo assim o formato da geometria transversal interna da ferramenta de trabalho (ZHANG *et al.,* 2017; BRESCIANI *et al.,* 2011). Esse processo é usado desde o século XIX, com fins comerciais, mas, para atender à demanda de perfis extrudados, utilizados na indústria aeronáutica, atingiu o ápice em meados de 1939 e 1945 (CARVALHO, 2013).

O processo tem sido realizado nas temperaturas de trabalho a frio e a quente. A tecnologia de extrusão a frio apresenta vantagens como boas propriedades mecânicas, economia de energia e baixo custo. Assim, o processo tem sido amplamente utilizado nos setores automotivo, energético, aeroespacial e militar, dentre outras indústrias. Um ponto negativo do processo de extrusão a frio é a necessidade de elevadas pressões de extrusão durante o processamento (ZHI-HENG *et al.,* 2017).

A tecnologia de processamento a quente tem sido um dos métodos mais populares no desenvolvimento de perfis longos com seções transversais fixas. É realizada com a elevação da temperatura e, em geral, extrusões a quente são conduzidas usando prensas hidráulicas horizontais com capacidade na faixa de 1000 a 8.000 toneladas. A pressão específica fica em torno de 352 a 1089 MPa (51000 a 158000 psi) (SAHA, 2000). O processamento expõe as superfícies de trabalhos da matriz de extrusão a substanciais tensões mecânicas e térmicas, abrasão e aderência, bem como ataque químico, logo, são necessários requisitos à matriz como boa resistência ao desgaste, fadiga termomecânica e oxidação, bem como estabilidade química em relação ao alumínio quente. Portanto, a lubrificação é necessária (BIROL; YUKSEL, 2012).

A lubrificação pode ser feita com pó de vidro, no caso de extrusões de temperatura elevadas, e grafite ou óleo, para as extrusões com temperatura baixa. Embora os materiais extrudados a quente sejam altamente preferidos, devido à carga de trabalho, o processo ainda possui algumas desvantagens como o custo e manutenção das máquinas.

O processo a quente é amplamente utilizado para fabricar produtos em alumínio e ligas de cobre. Entre as principais geometrias extrudadas estão os perfis sólidos, tubulares e semi-tubulares.

A produção de tubos metálicos não ferrosos, a partir da extrusão, tem sido muito utilizada, especialmente de alumínio. Este tem aplicações em diversos setores da indústria e a sua frequente presença no dia a dia tem mostrado a sua importância econômica no mundo atual. Tubos de alumínio são utilizados em trocadores de calor, em estruturas espaciais, em tubulações para irrigação, entre outros. São ideais para os setores onde se necessita de leveza, rigidez e economia. É praticamente ilimitada a variedade de perfis que podem ser extrudados em alumínio.

#### 1.1 Justificativa

A implementação de ligas de alumínio para fabricação de peças automotivas, peças para aviação e peças indústria naval tornou-se parte integrante do desenvolvimento da indústria em função da obtenção do aprimoramento da produtividade, da redução de custos de produção e da melhoria de qualidade do produto final, garantindo maior eficiência nos produtos destas industrias.

Para a realização dos testes de deformação destas ligas, tornou-se fundamental a utilização de modelos matemáticos para prever a resposta da absorção do impacto destes materiais e o uso de softwares de simulação numérica, que tem sido amplamente usados para a melhoria de desempenho destas ligas.

#### 1.2 Objetivo geral

Estudar o processo de extrusão a quente da liga de alumínio 6082 em temperatura de 400°C e avaliar a resposta do material em relação ao modelo desenvolvido em *software* comparando-a com a de elementos finitos.

#### 1.2.3 Objetivos específicos

 a) Analisar a força de extrusão por meio de método analítico, simulado e prático.

- b) Avaliar a microestrutura e propriedades mecânicas da liga de alumínio 6082 após o processo de extrusão.
- c) Projetar e construir ferramenta para obtenção de perfil axissimetrico de seção quadrilátera em temperatura de 400 °C pelo processo de extrusão direta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi descrito o material utilizado nesta pesquisa, de maneira sucinta. Além disso, são apresentadas as características do processo de extrusão, a determinação dos parâmetros necessários para sua realização e as variáveis resultantes desse processo de deformação plástica.

#### 2.1 O Alumínio

Segundo Landim (2016), o alumínio é um material leve, com boa ductilidade e resistente à corrosão. Possui uma estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada), número de coordenação igual a 12 e fator de empacotamento atômico igual a 0,74 (CALLISTER, 2016). O alumínio não é encontrado em estado metálico na natureza, mas é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo obtido a partir da bauxita submetida às etapas de refino e de redução (LANDIM *et al.,* 2016). Para que a mineração da bauxita seja viável, deve-se apresentar um mínimo de 30% aproveitável de alumina ou óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A bauxita é trabalhada para a obtenção da alumina, por meio do processo Bayer, e posteriormente a alumina é trabalhada para a obtenção do alumínio, por intermédio do processo Hall-Héroult (ABAL, 2019).

De acordo com Hydro Aluminiun (2012), no processo Bayer - exemplificado na Figura 1, os minerais aluminosos da bauxita são dissolvidos em uma solução quente de soda cáustica (hidróxido de sódio) e cal (óxido de cálcio). Os materiais insolúveis são então separados da solução de aluminato de sódio em espessantes e filtros. Os resíduos de bauxita são então lavados, combinados e, em seguida, armazenados em um aterro. A água de lavagem, contendo soda cáustica, é reciclada para o processo. O hidróxido de alumínio é precipitado pelo resfriamento do líquido e adicionando na geração de cristais. O precipitado é filtrado e lavado para que se remova e recupere a solução cáustica arrastada. O hidróxido de alumínio é calcinado em fornos, a temperaturas superiores a 960°C. A água livre e a água que é quimicamente combinada são removidas, deixando a alumina comercialmente pura.



#### Figura 1 – Processo Bayer

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (2019).

Landim *et al.* (2016) explica o processo Hall-Héroult, que consiste em dissolver a alumina ( $Al_2O_3$ ) em um banho eletrolítico de sais fundidos (criolita e fluoreto de alumínio), o qual é atravessado por corrente elétrica. Nesse processo químico, exemplificado na Figura 2, a corrente elétrica encontra íons de alumínio em condições favoráveis, para serem reduzidos e o alumínio metálico (líquido) se deposita no fundo da cuba por densidade (CBA, 2017). O Brasil está entre as maiores reservas de bauxita do mundo, sendo o 6° maior produtor mundial e o 9° maior consumidor mundial.



Figura 2 – A transformação da alumina calcinada em alumínio metálico

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (2019).

#### 2.2 Ligas de alumínio

Segundo Lumley (2011), o potencial das ligas de alumínio a ser utilizado na engenharia foi reconhecido bem antes de sua produção industrial. Em meados de 1886, foi declarado que as ligas de alumínio seriam muito bem aproveitadas e que algumas delas possuiriam características valiosas e com inúmeras aplicações.

Marques (2010) diz que o alumínio puro tem afinidade química com quase todos os metais e apenas alguns são utilizados para produzir ligas industrialmente comerciais. As ligas de alumínio são versáteis na fundição e têm um baixo ponto de fusão na faixa de 650°C a 760°C.

Lumley (2011) ainda diz que a Alemanha descobriu o procedimento básico envolvendo o endurecimento por precipitação (envelhecimento), pelo qual algumas ligas de alumínio podiam ser tratadas termicamente, e ainda são usadas atualmente para o fortalecimento de uma ampla gama de componentes automotivos e aeroespaciais. A liga Al 3,5Cu 0,5Mg 0,5Mn, que ficou conhecida como Duralumínio, foi fundamental para o desenvolvimento das indústrias de dirigíveis e de aeronaves e as ligas de Al-Cu-Mg, relacionadas, são produzidos até hoje.

De acordo com Kohar (2019), as indústrias automobilísticas estão sendo cada vez mais restringidas quanto à emissão de poluentes e a aspectos de segurança em seus veículos, o que as obriga a torná-los mais leves, resistentes mecanicamente e eficientes. As ligas de alumínio, principalmente as das séries 6XXX e 7XXX ganham cada vez mais destaque. Segundo Li *et al.* (2015), há muitas vantagens ao se utilizar esse material na carroceria automotiva, como baixa densidade, alta resistência específica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade (em extrusão) e facilidade de reciclagem.

Liu *et al.* (2018), relata que as ligas de alumínio são materiais leves, ideais para aplicações automotivas, de transporte ferroviário, de comunicações e de aeroespaciais, devido à sua baixa densidade, alta resistência específica, boa resistência à corrosão e boa capacidade de reciclagem.

A classificação das ligas de alumínio mais utilizada é a AA (Aluminum Association) e ASTM (*American Association for Testing and Materials*). Nas normas brasileiras, as ligas são classificadas segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e segundo a norma NBR ISO 209:2010.

Segundo Callister (2016), pode-se classificar as ligas de alumínio como fundidas ou forjadas, conforme Tabelas 1 e 2. Suas composições estão de acordo com a AA e, para ambos os casos, são especificadas por um número com quatro dígitos. Esses dígitos indicam a impureza presente na liga e, em alguns casos, a pureza da liga. No caso das ligas fundidas, há um ponto decimal antes do último numeral.

Liga	Principais Elementos de Liga	Tratamento térmico
1XXX	Al≥99%	Ν
2XXX	Al-Cu-(Mg)	S
3XXX	Al-Mn	Ν
4XXX	Al-Si	Ν
5XXX	Al-Mg	Ν
6XXX	Al-Mg-Si	S
7XXX	Al-Zn-(Mg)-(Cu)	S
8XXX	Al-(Outros materiais)	N/S
9XXX	Serie não utilizada	

Tabela 1 – O sistema de designação de ligas da AA – Ligas Forjadas

Fonte: Adaptado de Lumley (2011).

Fabela 2 – O sistema d	e designação d	e ligas da	Associação	de Alumínio –
	•	0	3	

#### **Ligas Fundidas**

Liga	Principais Elementos de Liga	Tratamento termico
1XX.X	Al≥99%	N
2XX.X	Al-Cu	S
3XX.X	Al-Si(+Cu ou Mg)	S
4XX.X	Al-Si	Ν
5XX.X	Al-Mg	Ν
6XX.X	Serie não utilizada	
7XX.X	Al-Zn-(Mg)-(Cu)	S
8XX.X	Al-Sn	Ν
9XX.X	AI-(Outros materiais)	
Fonte: Adaptado de Lumley (2011).		

A especificação do tratamento térmico vem após um hífen colocado logo depois de um número especifico da liga e pode ser verificada no Quadro 1.

Revenidos Básicos         F       Como fabricado — por fundição ou trabalho a frio         O       Recozido — revenido de mais baixa resistência (apenas produtos forjados)         H       Encruado (apenas produtos forjados)         W       Encruado termicamente por solução — usado somente em produtos que endurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo de períodos de meses ou anos.         T       Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.         Revenidos de Encruamento         H1       Apenas encruado         H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada, marces de conformação em temperatura elevada	Especificação	Descrição		
F       Como fabricado — por fundição ou trabalho a frio         O       Recozido — revenido de mais baixa resistência (apenas produtos forjados)         H       Encruado (apenas produtos forjados)         Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos que endurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo de períodos de meses ou anos.         T       Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.         T       Revenidos de Encruamento         H1       Apenas encruado         H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,		Revenidos Básicos		
O       Recozido — revenido de mais baixa resistência (apenas produtos forjados)         H       Encruado (apenas produtos forjados)         Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos que endurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo de períodos de meses ou anos.         T       Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.         H1       Apenas encruado         H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e então estabilizado         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	F	Como fabricado — por fundição ou trabalho a frio		
H       Encruado (apenas produtos forjados)         W       Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos que endurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo de períodos de meses ou anos.         T       Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.         H1       Apenas encruado         H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e então estabilizado         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	0	Recozido — revenido de mais baixa resistência (apenas produtos forjados)		
W       Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos que endurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo de períodos de meses ou anos.         T       Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.         H1       Apenas encruado         H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e então estabilizado         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	Н	Encruado (apenas produtos forjados)		
Wendurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo de períodos de meses ou anos.TTratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.TRevenidos de EncruamentoH1Apenas encruadoH2Encruado e então parcialmente recozidoH3Encruado e então estabilizadoRevenidos de Tratamento TérmicoT1Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.T2Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,		Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos que		
de períodos de meses ou anos.TTratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.TRevenidos de EncruamentoH1Apenas encruadoH2Encruado e então parcialmente recozidoH3Encruado e então estabilizadoT1Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.T2Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	W	endurecem por precipitação naturalmente à temperatura ambiente ao longo		
TTratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.Revenidos de EncruamentoH1Apenas encruadoH2Encruado e então parcialmente recozidoH3Encruado e então estabilizadoRevenidos de Tratamento TérmicoT1Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.T2		de períodos de meses ou anos.		
Tresistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais dígitos.Revenidos de EncruamentoH1Apenas encruadoH2Encruado e então parcialmente recozidoH3Encruado e então estabilizadoRevenidos de Tratamento TérmicoT1Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.T2Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,		Tratado termicamente por solução — usado somente em produtos cuja		
dígitos.         Revenidos de Encruamento         H1       Apenas encruado         H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e então estabilizado         Revenidos de Tratamento Térmico         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	Т	resistência estabiliza dentro de algumas semanas – seguido por um ou mais		
Revenidos de Encruamento         H1       Apenas encruado         H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e então estabilizado         Revenidos de Tratamento Térmico         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,		dígitos.		
H1Apenas encruadoH2Encruado e então parcialmente recozidoH3Encruado e então estabilizadoRevenidos de Tratamento TérmicoT1Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.T2Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	Revenidos de Encruamento			
H2       Encruado e então parcialmente recozido         H3       Encruado e então estabilizado         Revenidos de Tratamento Térmico         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	H1	Apenas encruado		
H3       Encruado e então estabilizado         Revenidos de Tratamento Térmico         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	H2	Encruado e então parcialmente recozido		
Revenidos de Tratamento Térmico         T1       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.         T2       Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	H3	Encruado e então estabilizado		
T1Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido naturalmente.T2Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,	Revenidos de Tratamento Térmico			
envelhecido naturalmente.Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,T2	Τ1	Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e		
T2 Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,		envelhecido naturalmente.		
12	Т2	Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada,		
trabalhado a frio e envelhecido naturalmente.	12	trabalhado a frio e envelhecido naturalmente.		
Tratado termicamente por solução, trabalhado a frio e envelhecido	ТЗ	Tratado termicamente por solução, trabalhado a frio e envelhecido		
naturalmente.	10	naturalmente.		
T4Tratado termicamente por solução e envelhecido naturalmente.	Τ4	Tratado termicamente por solução e envelhecido naturalmente.		
T5 Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e	Τ5	Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e		
envelhecido artificialmente.	10	envelhecido artificialmente.		
T6 Tratado termicamente por solução e envelhecido artificialmente.	Т6	Tratado termicamente por solução e envelhecido artificialmente.		
T7 Tratado termicamente por solução e super envelhecido ou estabilizado.	Τ7	Tratado termicamente por solução e super envelhecido ou estabilizado.		
Tratado termicamente por solução, trabalhado a frio e envelhecido	ТЯ	Tratado termicamente por solução, trabalhado a frio e envelhecido		
artificialmente.	10	artificialmente.		
Tratado termicamente por solução, envelhecido artificialmente e trabalhado	То	Tratado termicamente por solução, envelhecido artificialmente e trabalhado		
a frio.	10	a frio.		
Resfriado a partir de um processo de conformação em temperatura elevada,	T10	Resfriado a partir de um processo de conformação em temperatura elevada,		
trabalhado a frio e envelhecido artificialmente.	110	trabalhado a frio e envelhecido artificialmente.		

# Quadro 1 – Esquema de Especificação de Tratamento para Ligas de Alumínio

#### Fonte: Callister (2016).

Algumas das aplicações mais comuns das ligas de alumínio incluem peças estruturais de aeronaves, latas de bebidas, carrocerias de ônibus e peças automotivas (blocos de motores, pistões e distribuidores) (CALLISTER, 2016).

Tokutomi *et al.* (2015), propôs um método de fabricação de um compósito com matriz de metal (MMC - *Metal Matrix Composite*). O objetivo final dos autores era a obtenção de nanotubos com boas propriedades mecânicas e alta condutividade elétrica feitos de carbono e alumínio puro. O método consistiu na extrusão a quente de um tarugo obtido através da compactação a frio de uma mistura de alumínio e carbono em pó. Os resultados mostraram que a resistência a tração do nanotubo extrudado, através de uma força compressiva de 561MPa, foi maior que as do alumínio puro e a condutividade elétrica foi 64% maior que a do alumínio. Os autores concluíram que o método proposto poderia ser usado para controlar as propriedades mecânicas e elétricas de compósitos baseados em alumínio puro de forma atender as exigências de mercado.

#### 2.3 Definição de extrusão

Extrusão é um processo de conformação mecânica na qual o material sofre uma deformação plástica, sendo submetido a uma força de compressão e forçado a fluir através de um perfil interno de uma matriz, conforme Figura 3. Esse processo atribui ao material o efeito da alta pressão e de temperatura.



Figura 3 – Principio da extrusão

Fonte: Adaptado de Saha (2000).

Conforme Bingöl (2015), a extrusão é um processo de formação de metal viável, que pode fornecer as formas desejadas de produtos que têm altas taxas de resistência ao peso e boa precisão dimensional.

Segundo Associação Brasileira do Alumínio (2019), a variedade de perfis que podem ser extrudados em alumínio é praticamente ilimitada. O processo reduz custos, pois elimina operações posteriores de usinagem ou junção e possibilita a obtenção de seções mais resistentes pela adequada eliminação de juntas frágeis e uma melhor distribuição de metal. Entre os principais tipos de produtos extrudados estão perfis sólidos, tubulares e semitubulares. Suas aplicações são ideais para os setores de construção civil, para bens de consumo, para indústria elétrica e para transportes.

Segundo Lee *et al.* (2015), os produtos extrudados por matrizes são ativamente aplicados a automóveis, a estruturas de produtos eletrônicos, a cilindros industriais e a radiadores. Entre os materiais não ferrosos, o alumínio e o magnésio são materiais muito importantes para reduzir o peso do automóvel.

Zhang (2008) diz que o processo de conformação contínua por extrusão tem sido amplamente utilizado na produção contínua eficiente de ligas de alumínio macio, de tubos, de seções e de produtos tubulares, bem como de fios de cobre, de seções retangulares e de uma ampla gama de perfis de cobre, desde a introdução dessa metodologia.

Dieter (1961) expõe a extrusão como um processo de compressão indireta em que forças compressivas indiretas são geradas com a reação do tarugo, contra o container e a matriz de extrusão, podendo alcançar valores de forças elevados e consequentemente tensões de compressão elevadas, as quais são efetivas na redução do trincamento do material durante a redução primária do tarugo.

Apesar da versatilidade da extrusão e de sua larga aplicação em ligas de alumínio, os extrudados podem conter muitos tipos de defeitos, como o defeito de *back-end*. Há dois tipos principais de defeitos de *back-end* que podem ocorrer. O primeiro tipo é de funil; o segundo, o anel interno de óxido, que é gerado pelo refluxo da camada superficial de óxido. O elevado atrito entre o tarugo e o contêiner causa um fluxo de material heterogêneo no tarugo durante a extrusão, fenômeno responsável pelo *back-end* (LIU; YANG; LIN, 2016).

Esses defeitos podem gerar diminuição do rendimento do processo, elevação dos índices de refugo e até desgaste prematuro do ferramental. Esses defeitos podem ser minimizados por meio de um *design* adequado de projeto. O ângulo ideal do molde pode ser determinado usando o *software* ABAQUS, sendo que muitos pesquisadores estudaram ferramentas combinadas tanto de técnica de modelagem física e de simulações de elementos finitos (MAGID *et al.*, 2015).

Geralmente, o projeto de matrizes de extrusão e a otimização dos parâmetros do processo devem se basear na compreensão abrangente dos comportamentos do fluxo de materiais durante o processo de extrusão. No entanto, esse fluxo é muitas vezes complexo porque os mecanismos de endurecimento e recristalização são afetados pelas condições de conformação e podem ser competitivos entre si (CHEN *et al.,* 2015a).

A extrusão apresenta algumas desvantagens em relação à laminação, tais como custo maior de aquisição de equipamento, limitação de comprimento do perfil, menor velocidade de trabalho e maior desuniformidade de deformação, ao final do processo (BRESCIANI, 2011).

Os dois tipos básicos de extrusão são: extrusão direta e extrusão indireta (também chamada extrusão invertida ou reversa) (DIETER, 1961).

#### 2.4 Processo de extrusão indireta

De acordo com Bresciani *et al.* (2011), a extrusão inversa exige um menor esforço de deformação e permite a obtenção de um produto mais homogêneo (não provocando também o aparecimento do defeito típico de final do processo, como pode ocorrer na extrusão direta).

Segundo Dieter (1961), na extrusão indireta, o êmbolo é mantido parado, e o recipiente com o tarugo faz o movimento. Dessa forma, não há um movimento relativo entre as paredes do recipiente e o tarugo e, com isso, as forças de atrito são menores e a potência necessária para esse tipo de extrusão é menor do que para a extrusão direta.

A Figura 4 ilustra o processo de extrusão indireta.



Fonte: Bresciani et al. (2011).

Saha (2000), descreve o processo em três regiões distintas:

- a) O tarugo está achatado e a pressão aumenta rapidamente até o seu valor máximo.
- b) A pressão diminui e o que se denomina extrusão de "estado estacionário" prossegue.
- c) A pressão atinge seu valor mínimo, seguido de um aumento acentuado, à medida que o "descarte" é compactado.

Dieter (1961) diz existir limitações práticas para a extrusão indireta, devido à necessidade de se usar um êmbolo vazado, limitando a carga que pode ser aplicada. Bresciani *et al.* (2011), reforça que é em função da resistência limitada a flambagem para grandes componentes.

Carvalho (2013) comenta que, como o êmbolo é vazado, as cargas necessárias para a extrusão são limitadas e não é possível obter perfis com formatos complexos.

Campana (2008) levanta que a qualidade superficial do perfil extrudado por este método é inferior, devido à possibilidade de impurezas presentes na superfície do tarugo passarem para o perfil extrudado, como pode ser visto na Figura 5.



## Figura 5 – Fluxo do material dentro do recipiente de uma prensa de extrusão

Fonte: Baumann (1996); Campana (2008).

Holguín *et al.* (2019), determina que a força de extrusão está diretamente ligada ao coeficiente de atrito através do estudo do comportamento de uma barra de seção transversal circular submetida à extrusão indireta com punção de seção transversal quadrada variando o raio da ponta do punção e o coeficiente de atrito.

## 2.5 Processo de extrusão direta convencional

Segundo Dieter (1961), na extrusão direta o tarugo de metal é colocado num recipiente e pressionado através de uma matriz por um pistão, conforme demostrado na Figura 6.





Fonte: Bresciani et al. (2011).

Tecnologias como pressão angular de canal igual (ECAP – Equal Channel Angular Pressure), torção de alta pressão (HPT – High Pressure Torsion), extrusão recíproca, forjamento multidirecional e extrusão de torção estão gradualmente se tornando um tópico importante de pesquisa neste campo (MUELLER; SANABRIA, 2018). O processo de conformação por extrusão direta é o mais aplicado para se obter perfis estruturais (LI; WU; ZENG, 2015).

Conforme Saha (2000), a extrusão direta encontra aplicação na fabricação de barras, tubos e perfis de seções ocas e sólidas, de acordo com o design e a forma. A direção do fluxo de metal estará na mesma que a do pistão.

Bresciani *et al.* (2011) expõe que, na extrusão direta, é provocado uma intensa ação de atrito entre o tarugo e o recipiente de extrusão. A redução do atrito no recipiente, quando do uso de extrusão direta, pode ser obtida com a aplicação de lubrificantes resistentes à temperatura elevada.

Zhang (2017) cita que a extrusão direta, a quente, é eficiente e conveniente para produzir perfis longos com seção transversal constante.

Esse processo tem uma utilização mais ampla, em face da maior simplicidade do equipamento, pois não exige um pistão oco e, conforme Campanha (2008), devido à possibilidade de trabalhar com perfis de grandes diâmetros circunscritos.

A variação de carga ou pressão com deslocamento do pistão, em ambos os processos de extrusão, direta e indireta, é mostrada na Figura 7.





Hosseini *et al.* (2016), estuda o processo de extrusão direta por ser um bom método analítico para grandes deformações plásticas. O método é bastante eficaz na modelagem de superfícies de contato através de simulações numéricas e apresenta um bom tempo de análise. Os parâmetros de projeto estudado incluíram a redução da área, o coeficiente de atrito e o ângulo da matriz.

Lou, et at. (2016), afirma que em extrusões contínuas de perfis de alumínio, a espessura do tarugo e o comprimento do extrudado descartado, que contém a solda transversal, desempenha um papel fundamental na redução da perda de material e na melhoria da qualidade do produto. Em uma extrusão contínua prática, mesmo se a superfície periférica do tarugo é retirada por torneamento, muitas impurezas da superfície do tarugo, como óxidos, ainda existem. Estas impurezas se acumulam no tarugo ou são distribuídas ao longo da solda transversal.

#### 2.6 Outros modelos de extrusão

Farhoumand (2009) analisou os processos de extrusão a frente, a ré e radial. A Figura 8 apresenta o desenho esquemático da ferramenta utilizada (a) e do modelo axissimétrico 2D (b). Foram utilizados métodos experimentais e numéricos cujos resultados foram confrontados. A relação tensão *versus* deformação foi determinada usando um ensaio de compressão e a Equação de Holloman. Para a simulação numérica foi utilizado o *software* ABAQUS e um modelamento axissimétrico 2D onde foram variados alguns parâmetros, dispostos na Tabela 3. O fator de atrito utilizado foi de 0,13.





# Tabela 3 – Parâmetros de processo usados em experimentos e simulações de

	<b>E</b> 1	
Parâmetros	Experimentos	Simulações
Diâmetro inicial do tarugo (mm)	24	24
Altura inicial do tarugo (mm)	20	20
Curso de perfuração (mm)	15	15
Altura da folga (mm)	2, 4	0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5,4
Raio do canto da matriz (r, mm)	1	1, 3, 5
Fator de atrito (m)	0,13	0,13, 0,2, 0,4, 0,5, 0,8
Espessura da parede (mm)	2	2

Fonte: Adaptado de Farhoumand (2009).

Chen *et al.* (2015b), investigou a extrusão da matriz pirâmide para um perfil de alumínio oco. No trabalho, tanto a matriz pirâmide quanto matrizes de vigia convencionais foram projetadas. O processo foi estudado de forma abrangente através da realização de diferentes tipos de simulação de elementos finitos, tais como: análise do estado estacionário e do estado transitório, e rastreamento do tarugo.
Os efeitos dos ângulos que dão forma à matriz pirâmide em relação aos parâmetros de avaliação da extrusão como: carga de extrusão, fluxo de material, temperatura de saída, comprimento da solda transversal, qualidade da solda longitudinal, defeito na extremidade traseira e tensão da matriz foram analisados e comparados com os parâmetros para a matriz de vigia convencional.

Chen *et al.* (2015b), concluiu que a carga de extrusão diminuiu gradualmente com o aumento do ângulo da pirâmide. A modificação na entrada da fieira trouxe um efeito ligeiramente negativo na uniformidade do fluxo de material. Por outro lado, a distribuição da temperatura de saída é semelhante para os moldes convencionais e pirâmidal. A pressão média de soldagem foi maior para a matriz pirâmidal, independentemente de sua menor carga de extrusão. Durante a extrusão da matriz pirâmidal, o material no centro do tarugo fluiu mais rápido, o que acelerou a extensão do tarugo.

A tensão da matriz, durante a extrusão, foi verificada e todas as matrizes projetadas em Chen *et al.* (2015b), poderiam satisfazer a exigência de tensão. Além disso, a tensão máxima nos dados superiores e inferiores é menor para a pirâmide do que para a matriz convencional.

De acordo com Chen *et al.* (2015b), com base na avaliação global dos moldes pirâmidais, eles podem reduzir a carga de extrusão e o comprimento de solda transversal, melhorando a qualidade longitudinal da solda e a vida útil da matriz. No entanto, este trabalho ainda é um estudo preliminar sobre esse dado inovador.

Baffari *et al.* (2017), estudou a influência dos parâmetros de processo conhecido como *Friction Stir Extrusion* (FSE) na produção e nas propriedades mecânicas de fios de aluminio. Este processo é uma tecnologia recente e consiste na extrusão de fios utilizando cavacos ou tarugo de metal através de uma matriz rotativa. A ação da rotação da matriz provoca o aquecimento do metal que ao mesmo tempo é comprimido, desta forma, o produto extrudado flui pela haste de extrusão. Foi variada a rotação da matriz (100rpm, 200rpm e 300rpm) e a força de extrusão (26,7kN, 35,6kN, 44,5k e 53,4kN). Cada experimento foi finalizado quando o fio extrudado atingiu o comprimento de 300mm ou o limite de torque foi alcançado. O metal estudado foi o alumínio AA2050 com e sem tratamento térmico. Os resultados mostraram que altos valores de força e rotação do equipamento provocaram formações de rachaduras nos fios extrudados e que em alguns casos a extrusão ocorreu a frio. Os resultados também mostraram uma melhoria na resistência

mecânica dos fios em comparação ao metal de base utilizado. Este comportamento foi justificado devido a formação de precipitado no material recristalizado que atou como obstáculo ao escoamento. Em conclusão é acordado que o FSE é viável para extrudar a liga de alumínio AA2050 com ou sem tratamento térmico, que os parâmetros do processo influenciam diretamente na qualidade do produto final e que mais investigações devem ser feitas com objetivo de se obter fios com diâmetros menores que 4mm.

#### 2.7 Deformação plástica e fluxo de metal

Em seu estudo Chen *et al.* (2015a), diz que a extrusão se tornou a principal técnica de conformação do alumínio e suas ligas devido à alta produtividade, baixo consumo de material e excelente qualidade do produto (alta precisão dimensional e boas propriedades mecânicas).

Conforme Dieter (1961), a pressão necessária para produzir uma extrusão é dependente da maneira em que o metal escoa pelo recipiente e pela matriz e isso é grandemente influenciado pelas condições de lubrificação. Certos defeitos que podem ocorrer na extrusão estão diretamente relacionados com o modo pelo qual o metal se deforma durante a extrusão.

Saha (2000) diz que mecânica da deformação plástica fornece os meios para determinar como o metal flui - em diferentes operações de formação; os meios para obter a geometria desejada, por meio de deformação plástica; e os meios para determinar as propriedades mecânicas e físicas esperadas do metal produzido.

Campana (2008) traz a forma de se ilustrar o fluxo de metal dentro do recipiente, a formação da zona morta, próxima à ferramenta e a superfície do tarugo, sendo conduzida à parte traseira e, assim, formando o resto de prensagem, ilustrando com as Figuras 9 e 10.

# Figura 9 – Fluxo tradicional do metal dentro do recipiente de uma prensa de extrusão direta





# Figura 10 – Fluxo observado de material dentro do recipiente de uma prensa de extrusão direta



Fonte: Campana (2005); Campana (2008).

Dieter (1961) e Saha (2000) citam os tipos característicos de deformação na extrusão, conforme ilustrado na Figura 11. O tipo S é o caso típico de atrito baixo nas interfaces do recipiente e da matriz. As propriedades de extrusão devem ser uniformes em ambas as direções, longitudinal e transversal. O tipo A representa um caso de aumento do atrito nas paredes do container, conforme indicado pela distorção acentuada na interface da matriz, não na interface recipiente-tarugo. No tipo B, o atrito é alto na interface do container-tarugo, o escoamento é concentrado no centro e se desenvolve um plano de cisalhamento interno e uma zona alargada de metal morto é formada. O tipo C é obtido com tarugos os quais possuem propriedades de materiais

não homogêneos ou com uma distribuição de temperatura não uniforme no tarugo. Os materiais sofrem deformação de cisalhamento mais severa na parede do recipiente e também formam uma zona de metal morto mais estendida.





Fonte: Adaptado de Saha (2000).

Yu (2016) afirma que, no processo de extrusão, variáveis físicas relevantes como pressão, tensões efetivas e velocidade de fluxo do metal são importantes para a avaliação da qualidade de soldagem do material, após passagem na matriz.

Saha (2000) diz que, na mesma condição de atrito na interface de tarugo/recipiente para a mesma liga do tarugo, o semiângulo da zona de metal morto varia com a razão de extrusão, como mostrado na Figura 12. À medida que a taxa de extrusão aumenta, o ângulo  $\alpha$  aumenta e, à medida que o ângulo  $\alpha$  aumenta, o comprimento da linha de cisalhamento diminui.





Fonte: Adaptado de Saha (2000).

#### 2.8 Fatores de influência na extrusão

Segundo Xue *et al.* (2018), a extrusão é um processo dominado pelo fluxo de metal, sob múltiplas restrições, incluindo a velocidade da extrusão, o campo de temperatura, as condições de atrito e as propriedades do material.

Berndt (2018) comenta que baixas tensões de escoamento em temperaturas elevadas permitem altas taxas de extrusão (razão entre a área da seção transversal do tarugo versus o extrudado) o que aumenta a velocidade do processo.

Bresciani *et al.* (2011), relata que há um número grande de fatores os quais exercem influência no processo de extrusão. E a análise dessa influência é complexa em face dos efeitos de interação entre eles.

Dieter (1961) traz as variáveis que mais influenciam a força necessária para fazer a extrusão:

- a) O tipo de extrusão (direta ou indireta).
- b) A razão de extrusão.
- c) A temperatura de trabalho.
- d) A velocidade de deformação.
- e) As condições de atrito na matriz e nas paredes do container.

Dieter (1961), conforme Equação 1, coloca a razão de extrusão como a razão da área inicial da seção transversal do tarugo, com a área final à seção transversal, depois da extrusão:

$$R = \frac{A_0}{A_f} \tag{1}$$

Onde *R* é a razão de extrusão,  $A_0$  a área inicial da seção transversal do tarugo (m<sup>2</sup>) e  $A_f$  a área final da seção depois da extrusão (m<sup>2</sup>)

Ele ainda levanta que, para a extrusão a quente do aço, as razões de deformação atingem cerca de 40:1 e podem ser de 400:1 para o alumínio.

Ivaniski (2017) e Helman (2015) expõe que, por influir no comportamento de escoamento do material, a temperatura pode ser um modo de classificação na

conformação. Essa divisão seria em: a frio, que ocorre abaixo de  $0,3T_f$  (temperatura de fusão); a morno, entre  $0,3T_f$  e  $0,5T_f$ ; e a quente, acima de  $0,5T_f$ .

Zhang *et al.* (2012), relata que a velocidade da haste de extrusão é um parâmetro muito crítico, durante a extrusão do perfil de alumínio, que desempenha um papel importante no controle do efeito do calor, da uniformidade do fluxo de metal, do comportamento mecânico e da qualidade superficial dos perfis. Com uma velocidade de haste muito alta, ocorre uma grande não uniformidade do fluxo de metal no processo de extrusão, o que frequentemente leva a defeitos como deformação por torção, rachadura ou queima da superfície dos extrudados. Normalmente, a velocidade da haste de extrusão é determinada, dependendo da experiência, da intuição ou da analogia dos trabalhadores e muitas vezes os erros e trilhas devem ser submetidos.

Toko (2015) diz que é interessante a utilização de um método de elementos finitos para avaliar a influência da velocidade e da temperatura na extrusão.

Em seus estudos Shamsudin *et al.* (2016), verifica a influência da temperatura e do tempo de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas de uma barra de aluminio extrudada a quente. Os tarugos utilizados foram provenientes de cavacos de alumínio AA6061 compactados a frio. As temperaturas de pré-aquecimento utilizadas foram de 400, 500 e 550°C com variações de 1 a 6 horas. Após a extrusão das barras de alumínio, foram comparadas as propriedades mecânicas e físicas dos produtos extrudados através de ensaios experimentais e simulações numéricas. Os resultados mostraram que a barra aquecida a 500°C durante 2 horas apresentou a melhor ductilidade e a melhor resistência mecânica. Os autores concluíram que a temperatura do tarugo e o tempo de pré-aquecimento influenciaram diretamente nas propriedades mecânicas das barras extrudadas. Eles também afirmaram que este tipo de extrusão utilizando tarugos feitos de cavaco de alumínio junto a uma simulação numérica pode ajudar diretamente no processo de reciclagem de alumínio.

Segundo Ferreira (2010), os esforços de extrusão devem ser determinados analítica ou numericamente, de modo a preceder ou reproduzir os resultados obtidos experimentalmente.

Segundo Dieter (1961), a pressão de extrusão está diretamente relacionada ao logaritmo natural da sua razão de extrusão, e Ferreira (2010) coloca que, conhecendo

a área do perfil a ser extrudado, consegue-se a força de extrusão. E pode ser expressa pela Equação 2:

$$F = A_0 k Ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right)$$
<sup>(2)</sup>

Onde *F* é a força de extrusão (N),  $A_0$  a área inicial da seção transversal do tarugo (m<sup>2</sup>),  $A_f$  a área final da seção depois da extrusão (m<sup>2</sup>) e *k* a constante de extrusão, que é um fator que engloba a tensão de escoamento, atrito e deformação heterogênea. Na Figura 13 pode-se visualizar o ábaco que interpõe a constante de extrusão em várias temperaturas, para vários tipos de materiais



Figura 13 – Constante de Extrusão para metais em várias temperaturas

Fonte: Adaptado de Centro de Informação Metal Mecânica (2019).

Segundo Helman (2015), pela Equação 3, se a pressão de extrusão é  $P_e$  (N/m<sup>2</sup>) e a área do pistão  $A_p$  (m<sup>2</sup>), a força F (N) aplicada externamente é:

$$F = P_e A_p \tag{3}$$

Conforme Saha (2000), a força necessária para a extrusão depende da tensão de fluxo do material do tarugo, da relação de extrusão, da condição de atrito na interface tarugo/container, da condição de atrito na interface do material/matriz e das outras variáveis do processo como temperatura inicial do tarugo e velocidade de extrusão.

Dieter (1968) declara que a relação mais geral entre a tensão de escoamento e a taxa de deformação, à temperatura e deformação constantes, é disposta na Equaçãp 4:

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^{m_1} \tag{4}$$

Onde  $m_1$  é conhecido como coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação,  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação e C (MPa)é uma constante dependente da temperatura. O expoente m pode ser obtido da inclinação do gráfico de log  $\sigma$  versus log  $\dot{\varepsilon}$ .

Choi *et al.* (2018), compara as propriedades mecânicas de um tubo de alumínio com diâmetro externo de Ø50mm e diâmetro interno de Ø40mm extrudado com guias de soldagem desalinhadas em relação aos fabricados com guias alinhadas. Todos os tubos foram tratados termicamente com condições T6. Foi utilizado uma simulação numérica através do *software* DEFOR 3D baseada em elementos finitos para estimar o fluxo do material durante o processo de extrusão. Os parâmetros de extrusão foram: bloco de alumínio AL6063 a 480°C; força de extrusão de 1800 toneladas e velocidade de 8mm/s. Para avaliar as propriedades mecânicas do tubo extrudado, os autores realizaram um teste de tração, um teste de impacto e um teste de flexão em U. Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram que a energia de impacto e a energia absorvida pela dobra em U foram aumentas quando comparadas aos dados obtidos de um tubo extrudado pelo processo convencional. Os autores concluíram que as propriedades mecânicas de tubo de alumínio extrudado com guias de soldagem desalinhadas são melhores que as de um tubo com guias alinhadas.

Sharififar e Mousavi (2015) usaram o método Taguchi e um algoritmo genético para otimizar a geometria da matriz, a fim de obter a magnitude mínima da força de extrusão, para produzir tubos retangulares ocos com seção transversal de 72,1mm x 34,03mm e espessura de 2,0mm. Os resultados foram simulados pelo método dos elementos finitos (MEF). Usando a análise de variância (ANOVA), os parâmetros efetivos e suas interações foram determinados. Além disso, as condições ótimas foram previstas por meio de método de algoritmo (GA), que foi verificado por procedimento. O comprimento ideal da ferramenta de extrusão e o diâmetro do furo foram obtidos em L = 20 e D = 3 cm, respectivamente, para a temperatura inicial do tarugo de 450 ° C.

Wang *et al.* (2012), em seu trabalho, menciona o recente desenvolvimento de técnicas de teste de atrito para processos de extrusão de alumínio e comparações detalhadas. As técnicas de detecção de atrito existentes testam os métodos com a combinação de extrusão.

Em seu estudo Yuan *et al.* (2019), mostra os efeitos das condições de homogeneização da microestrutura e propriedade mecânicas do perfil de Al-Si-Mg sendo um extrudado e outro fundido. Foi utilizado uma liga AA6005 realizando sua homogeneização e posterior extrusão e pôde-se concluir que o tamanho do grão não foi afetado pela homogeneização, temperatura ou tempo de espera, porém, as condições de homogeneização afetaram fortemente a estrutura dos grãos das placas extrudadas, tornando-os mais grosseiros e com uma distribuição mais uniforme enquanto o ângulo médio de desorientação diminuiu. A quantidade de partículas intermetálicas nas placas extrudadas de tarugos homogeneizados apresentou-se menor do que nas placas do extrudado de tarugo fundido. Os tarugos homogeneizados também possuíam maior dureza e melhores condutividades elétricas.

Güley *et al.* (2013), estudou o efeito da matriz na qualidade da soldagem, durante a reciclagem de cavacos da liga AA6060, em estado sólido, por extrusão a quente. Foram utilizadas duas ferramentas, uma com face plana de 5 mm, convencionalmente utilizada na indústria; e outra com a mesma seção final do produto, porém escalonada com lâminas. Os cavacos foram compactados em um tubo de aço, formando tarugos de 60mm de diâmetro e l05mm de comprimento. Os tarugos foram aquecidos em forno, à temperatura de extrusão de 500º C, e mantidos a essa temperatura por duas horas. Depois foram extrudados em perfis sólidos, com secção transversal de 20 mm a 5 mm. O efeito positivo da matriz escalonada com lâmina de extrusão revelou aumento da ductilidade dos perfis fabricados com cavacos de usinagem. Uma deformação na fratura de 26% correspondeu a mais de 80% de ductilidade em comparação com os perfis de alumínio extrudados através da matriz de face plana. Os resultados das simulações FEM (*Finite Elements Method*) podem ser vistos na Figura 14, na qual as distribuições de deformação eficazes, durante a extrusão, por meio dos modelos de face plana e escalonada com laminas são mostradas no plano médio do extrudado.

# Figura 14 – Valores efetivos de deformação para as extrusões de alumínio através de face plana (acima) e matriz escalonada (abaixo) no eixo médio do extrudado.



Fonte: Güley et al. (2013).

#### 2.9 Teste de atrito

Segundo Silva *et al.* (2017a), entre os métodos para medir o coeficiente de atrito, o teste de compressão do anel ganhou ampla aceitação nas últimas duas décadas. Foi originado por Kunogi (1959) e posteriormente aprimorado e apresentado por Male e Cockcroft (1965). Essa técnica utiliza as alterações dimensionais de uma amostra de teste para quantificar o coeficiente de atrito. Quando um anel liso é comprimido entre duas placas planas, um alto atrito resulta em um fluxo interno do material; já um baixo atrito resulta em escoamento do material, como esquematicamente mostrado na Figura 15. A sequência do ensaio de compressão do anel é composta por sucessivas deformações na altura dos anéis, para obter as curvas de calibração do referente atrito, visto que a geometria do anel deve obedecer às

proporcionalidades de 6:3:2, que se referem, respectivamente, ao diâmetro externo, diâmetro interno e altura.

# Figura 15 – Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão



Baixo atrito (boa lubrificação)

Alto atrito (pouca lubrificação)

Fonte: Silva et al. (2017b); Sofuoglu (1999).

Silva *et al.* (2017b), coloca o teste de compressão do anel como o método experimental mais usado para determinar o coeficiente de atrito entre ferramenta e material, em processos de conformação com ou sem lubrificante, conforme Petersen (1998).

Silva *et al.* (2017b), aborda Kunogi, que em 1965, desenvolveu a primeira versão do teste do anel: anéis de mesmo material e geometria eram submetidos a diferentes condições de atrito, tinham sua altura reduzida em 50%, por meio de compressão e, posteriormente, eram medidos seus respectivos diâmetros internos. Sabendo que quanto maior o atrito, menor ficaria o diâmetro interno, então era possível determinar as condições que proporcionavam menor atrito, conforme Hu *et al.* (2015).

Silva *et al.* (2017a), coloca que para um determinado percentual de redução da altura do anel, durante o teste de compressão, haverá uma variação do diâmetro interno da amostra; por meio dessa medição, é possível, indiretamente, conhecer o fator de atrito na interface peça/matriz. Se a amostra tem a dimensão do diâmetro aumentada, durante a deformação, o atrito é baixo; se o diâmetro interno da amostra diminui, durante a deformação, o atrito é alto. Usando essa relação, os coeficientes de atrito podem ser plotados em curvas específicas, conforme Sofuoglu (1999). As

curvas de calibração de atrito foram geradas por Male e Cockcroft (1965) e foram plotadas com o percentual de redução do diâmetro interno do corpo de prova em função do percentual de redução em altura, para diferentes graus de coeficiente de atrito em uma mesma temperatura, como mostrado na Figura 16.



Figura 16 – Curvas de calibração para a determinação de atrito em termos de µ.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017a); Male e Cockcroft (1965).

Após passar pelo processo de compressão, é mensurada a variação da altura e dos diâmetros e essas medidas são aplicadas nas Equações 5, 6 e 7, conforme Lopes *et al.* (2016), e De Pierre (1972):

$$R_n = R_0 \sqrt{\frac{\frac{R_i}{R_0} + \frac{\Delta R_i}{\Delta R_0}}{\frac{R_0}{R_i} + \frac{\Delta R_i}{\Delta R_0}}}$$
(5)

$$m = -\frac{1}{2\frac{R_0}{T} * \left(1 + \frac{R_i}{R_0} - 2\frac{R_n}{R_0}\right)} \ln \left[ \left(\frac{R_i}{R_0}\right)^2 \frac{\left(\frac{R_n}{R_0}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_n}{R_0}\right)^4}}{\left(\frac{R_n}{R_0}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_n}{R_0}\right)^4 + \left(\frac{R_n}{R_0}\right)^2}} \right]$$
(6)

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \tag{7}$$

Onde  $R_n$  é o raio neutro (mm),  $R_0$  é o raio externo após ensaio (mm),  $R_i$  é o raio interno após ensaio (mm),  $\Delta R_i$  é a diferença entre raio interno antes e após o ensaio (mm),  $\Delta R_0$  é a diferença entre raio externo antes e após o ensaio (mm), m é o fator de atrito entre o tarugo e a interface do recipiente, T é a altura após ensaio (mm) e  $\mu$  é o oeficiente de atrito.

Os resultados obtidos são confrontados nos gráfico de curvas, conforme Figura 17, para serem validados.

Figura 17 – Curvas teóricas de calibração pelo fator m



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017a); De Pierre (1972).

No teste do anel, o fator de atrito é obtido de forma indireta e é necessário haver deformações plásticas no material. O escoamento do material - Figura 18 - é caracterizado pelo resultado do atrito baixo, como mostrado (b), ou alto (c).

Figura 18 – Características de escoamento em relação ao atrito.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017a).

Silva et al. (2017a), aborda também que, por outro lado, a simulação matemática pode ser usada para avaliar a deformação do material, a tensão, a distribuição de tensões, a taxa de deformação, a exigência de força e a probabilidade de qualquer defeito no material; segundo Kobayashi (1989). Assim, o uso combinado dos modelos físicos experimentais e simulações numéricas permitem um simples e eficaz meio para estudar o mecanismo de fricção em condições de grande deformação plástica, conforme Robinson (2004). Um exemplo pode ser visto na Figura 19, com o levantamento de curvas do fator de atrito do material UNS C11000, por Camacho *et al.* (2013).



Figura 19 – Curvas levantadas por simulação computacional pelo fator *m* 

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017a); Camacho et al. (2013).

## 2.10 Modelagem Computacional

De acordo com Devloo (2005), a maioria dos fenômenos físicos respeita uma ou mais leis de conservação. Na engenharia estrutural, a conservação de movimento

linear é fundamental, já para a mecânica dos fluidos, acrescenta-se a conservação de massa e energia e, em outras áreas de engenharia, outras quantidades são conservadas. Quase todos os modelos envolvem uma simplificação do objeto físico. O modelo adequado é aquele que pode ser aproximado por técnica numérica em tempo hábil e que consegue capturar a essência do fenômeno em estudo.

Em seu trabalho Hosseini *et al.* (2016), utiliza a técnica de simulação por elementos finitos FEA (*Finite Element Analysis*) nos *softwares* Abaqus Explicit e Simulia e classifica, pelo método de Taguchi, *Analyze Taguchi Design* (ATD), através do *software* Minitab para realizar uma investigação numérica sobre a formação de cavidades centrais no alumínio durante o processo de extrusão direta.

Lou, et.at. (2016) analisa o comportamento do fluxo do material do tarugo, bem como a formação e evolução do tarugo e da solda transversal através de simulações numéricas e experimentos. Em uma extrusão contínua, o material periférico da extrusão acumula-se para trás e forma um tarugo. O material na superfície de contato de dois tarugos sucessivos forma uma solda transversal. O comprimento do tarugo e a evolução da solda transversal pode ser prevista com precisão usando a função de rastreamento do *software* ALE (no algoritmo de Euler-Lagrange). Com base na simulação e nos resultados experimentais, uma rota do processo para a extrusão contínua foi determinada, que pode fornecer uma referência para remover a ponta do tarugo e o extrudado contendo a solda transversal.

Holguín *et al.* (2019), realiza em seu trabalho uma simulação tridimensional da extrusão a frio indireta do alumínio. Ela utiliza o módulo estrutural estático do programa ANSYS com um modelo de elementos finitos da peça sendo uma malha de elementos do tipo tetraédrico e demonstra que a carga indireta de extrusão é maior à medida que o punção realiza a compressão, e além disso, o comportamento do esforço equivalente de Von Mies no tarugo de trabalho permanece constante em torno da cabeça do punção ao penetrar no tarugo.

Hölker e Tekkaya (2016) estudaram a viabilidade do arrefecimento de um mandril durante o processo de extrusão a quente da liga de alumínio AW6060, com o objetivo de evitar o sobreaquecimento e aumentar a produção. Após a fabricação do mandril compararam das forças de extrusão de um tubo quadrado (18x18x1mm) de alumínio com ou sem arrefecimento através de simulações de elementos finitos utilizando o *software* DEFORM 3D e ensaios experimentais. Os parâmetros de extrusão definidos pelos autores foram: temperatura do bloco de alumínio mantida a

450°C; razão de extrusão de 50%; velocidade de extrusão de 18m/min e temperatura do liquido de arrefecimento de 18°C. Os resultados da simulação numérica mostraram que quanto maior o arrefecimento do mandril maior era a força necessária para realizar a extrusão do perfil quadrado de alumínio. Já os ensaios experimentais comprovaram os resultados das simulações e apresentaram um aumento de 10% na força de extrusão com arrefecimento comparado ao processo normal. Os autores concluíram que do ponto de vista econômico o desenvolvimento de um mandril com possibilidade de arrefecimento só é viável para geometrias complexas devido ao alto custo de fabricação.

Na maioria dos estudos, sejam focados no ferramental em si ou nos fenômenos metalúrgicos do processo, as simulações numéricas são aplicadas, via de regra, trabalha-se com o *software* de elementos finitos DEFORM para analisar de forma abrangente o efeito do coeficiente de atrito, encruamento e tensão equivalente (MAGID *et al.*, 2015).

Segundo Silva *et al.* (2017a), o *software* ABAQUS é de caráter bastante geral e de grande versatilidade para aplicações em muitas áreas da engenharia. Ele se constitui de vários módulos, entre os quais os módulos gráficos, CAE (*Computer Aided Engineering*) (pré-processador), *Viewer* (pós-processador) e os módulos principais, *Standard* e *Explicit*. Um exemplo esquemático de um módulo de programação pode ser visualizado na Figura 20.



Figura 20 – Exemplo esquemático de um módulo de programação

Fonte: Silva et al. (2017a).

O pré-processador ABAQUS/CAE consiste de uma interface gráfica que permite ao usuário uma rápida e eficiente definição da geometria do problema, uma melhor atribuição das propriedades dos diferentes materiais, agiliza a aplicação dos carregamentos e das condições de contorno do problema, facilita a seleção do número de etapas pretendidas na análise e, finalmente, melhora a geração da malha de elementos finitos, correspondente ao corpo analisado. Um monitoramento da consistência e adequação do modelo assim gerado pode ser feita com ferramentas especiais do ABAQUS/CAE, as quais permitem verificar vários aspectos relacionados às partições definidas para a geometria do modelo (módulo PART), permite verificar as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (módulo PROPERTY), podem fazer o agrupamento dessas partições (módulo ASSEMBLY) ou fazer a imposição da sequência de passos de análise (módulo STEP) e de sua natureza (linear ou não linear), pode fazer a definição das condições de contorno dos carregamentos (módulo LOAD) ou da geração da malha de elementos finitos (módulo MESH) e, finalmente, permite a obtenção do arquivo de entrada (módulo JOB) (SILVA *et al.*, 2017a).

As diversas potencialidades do ABAQUS permitem que problemas de engenharia complexos, envolvendo geometrias complicadas, relações constitutivas não lineares, ocorrência de grandes deformações, carregamentos transientes e interações entre materiais, possam ser modelados numericamente, ainda que o processo de construção de um modelo adequado não seja tarefa simples para o usuário iniciante, justamente por envolver uma quantidade muito grande de parâmetros e de opções, decorrentes da própria elevada gama de possíveis problemas que podem ser modelados com o ABAQUS (SILVA *et al.*, 2017a).

Conforme apontado por Abd El Aal (2017), as simulações por elementos finitos (FEM – *Finite Elements Method*) são capazes de predizer, de forma eficiente, o comportamento das curvas de tensão x deformação efetivas, mesmo em situações de deformação plástica severa como as que podem ocorrer em processos de extrusão direta combinada a torsão por exemplo.

Magid *et al.* (2015), defende que as simulações tridimensionais, apesar de possuírem execução mais lenta e complexa, são boas ferramentas para averiguar a microestrutura resultante do processo de extrusão e a distribuição de tensões e deformações ao longo do produto extrudado/peça de trabalho.

#### **3 METODOLOGIA**

No presente capítulo, tem-se a avaliação e quantificação do comportamento de variáveis (atrito, força de extrusão, microestrutura e rugosidade) no processo de extrusão da liga de Alumínio ASTM 6082 onde foram estabelecidas as etapas de extrusão.

O material utilizado na confecção dos corpos de provas foi a liga de Alumínio ASTM 6082, conforme norma ASTM B221-14 (2014), obtida na forma de barras trefiladas com diâmetro de 15,87 mm e comprimento de 50mm.

No estabelecimento das etapas de extrusão dos corpos de prova, conjugou-se experimentos de modo a otimizar o processo. Essas atividades e suas interações são descritas a seguir e podem ser visualizadas no fluxograma da Figura 21.





Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.1 Preparação

A preparação dos materiais dos corpos de prova para o ensaio de tração, etapa experimental de extrusão, e para a determinação do coeficiente de atrito, foi realizada no laboratório de fabricação da PUC Minas, no campus Contagem, pelo próprio autor.

Foi realizada a usinagem dos corpos de prova, utilizando os equipamentos Centro de usinagem Travis M-800, mostrado na Figura 22, e Torno Comando Numérico Computacional Travis TR-1, mostrado na Figura 23. Esses equipamentos, por sua capacidade e precisão, garantiram – por meio da usinagem - uma melhor padronização dimensional dos corpos de prova, bem como uma padronização do acabamento superficial destes.



Figura 22 – Centro de usinagem (CNC) Travis M-800

Fonte: Próprio autor.



Figura 23 – Torno (CNC) Travis TR-1

Fonte: Próprio autor.

# 3.2 Análise Química

Foi realizada uma análise química do material por meio de uma análise de espectrometria de fluorescência de raio-X através do espectrômetro Scrapper X-250, que pode ser visto na Figura 24. Esse equipamento de raios-X, através da dispersão de comprimento de ondas, analisa o percentual relativo de cada componente relevante presente na liga. Por ser portátil e de fácil manipulação, otimiza o ensaio

visto que foi projetado especificamente para testar, de maneira ideal, componentes como o Mg e o Si e, portanto, as ligas de alumínio. A amostra é posicionada na parte frontal do aparelho e é iniciada a análise do material. Após o término, o equipamento gera um relatório com a análise química realizada. Esse relatório pode ser visualizado no Anexo A.



Figura 24 – Equipamento de raios-X

Fonte: SCIAPPS (2019b).

# 3.3 Ensaio de tração

Com o intuito de obtenção do levantamento das curvas características do material e analisar o comportamento do material foram usinados, para o ensaio de tração, corpos de prova, mostrados na Figura 25, segundo a norma ASTM E8 / E8M-16a (2016), cujas dimensões podem ser visualizadas na Figura 26. As marcações A3 e C2 na Figura 25 são identificações de corpo de prova utilizadas pelo autor.

#### Figura 25 – Corpos de prova de tração



Fonte: Próprio autor.

#### Figura 26 – Modelo de corpo de prova



Fonte: Próprio autor.

Primeiramente, os corpos de prova foram pré-usinados no Torno CNC e, posteriormente, para uma melhor amostragem no trabalho, separaram-se os corpos de prova em duas classes: recebido e recozido.

Os corpos de prova separados para o recozimento foram levados a um forno elétrico tipo MUFLA MOD 200 F DM FORNOS MAGNUS, com capacidade máxima de 1200°C de temperatura para o tratamento de recozimento, este seguindo metodologia de Oliveira (2001) e Silva (2015) e utilizando a norma ASTM B918/ B918M 17a (2017) para recozimento total que consistiu na permanência de trinta minutos dos corpos de prova a uma temperatura de 404°C seguido de resfriamento lento com uma taxa de resfriamento de 28 °C / h até atingir a temperatura de 260°C, para posteriormente serem retirados e resfriados ao ar livre.

A usinagem de acabamento dos corpos de prova para o ensaio de tração foi realizada no Torno CNC, onde foram colocadas as dimensões finais nos corpos de prova.

O ensaio de tração foi realizado no laboratório de materiais de construção mecânica, no campus Contagem, em uma máquina de tração/compressão com capacidade 10 toneladas, conforme Figura 27.



Figura 27 – Maquina de tração

Fonte: Próprio autor.

Esta máquina de tração/compressão é uma adaptação de uma máquina EMIC 10 T antiga com instalação de um sensor indutivo na polia do motor para captação do deslocamento linear da máquina. Durante o ensaio, via *software* do equipamento, há o registro de dados da carga dinâmica e de deslocamento do corpo de prova. O teste foi realizado utilizando corpos de prova recozidos e como recebidos em duas etapas, sendo a primeira em temperatura ambiente e a segunda em temperatura de 400°C, que é a temperatura escolhida para realização da extrusão a partir dos trabalhos de Carvalho (2013) e Peres *et al.* (2010). A velocidade para a realização do ensaio foi de 0,2 mm/seg que é o limite mínimo do equipamento. O sistema de aquecimento a base de resistências elétricas, Figura 28, utilizado para garantir a temperatura no ensaio envolvendo o corpo de prova fixado na máquina de tração, foi adquirido para atender a demanda de temperatura escolhida.



#### Figura 28 – Sistema de aquecimento a base de resistências elétricas

Fonte: Próprio autor.

#### 3.4 Teste de atrito

Para a determinação do atrito, foram usinados corpos de prova, Figura 29, segundo o modelo do teste do anel descrito por Silva et al. (2017a). Os corpos de prova foram dimensionados, na forma de anéis, com dimensões na proporção mais frequente na literatura: 6-3-2, respectivamente, diâmetro externo, diâmetro interno e altura. Essas dimensões utilizadas podem ser visualizadas na Figura 30. As faces que entram em contato com a ferramenta foram lixadas com lixa mesh 400. A usinagem ocorreu em um Torno CNC.

Figura 29 – Corpos de prova para teste de atrito



Fonte: Próprio autor.



Figura 30 – Medidas do corpo de prova para teste de atrito

Fonte: Próprio autor.

Seguindo o critério de uma melhor amostragem no trabalho, separaram-se os corpos de prova de atrito também em duas classes: recebido e recozido.

Os corpos de prova separados para o recozimento foram levados também ao forno elétrico MUFLA MOD 200 F DM para o tratamento de recozimento idêntico ao dos corpos de prova de tração.

O teste de atrito foi realizado no laboratório de materiais de construção mecânica, no campus Contagem, na máquina de tração/compressão de 10 T. O teste foi realizado utilizando a mesma metodologia de variação dos corpos de prova do ensaio de tração, ensaiando em duas temperaturas, ambiente e de 400°C, em corpos de prova recozidos e como recebidos. Após o ensaio, os corpos de prova foram levados a uma máquina de medição tridimensional QM – Messure 353 da Mitutoyo, Figura 31, para realização das medições. Esse equipamento está disposto no laboratório de metrologia, no campus Contagem e, realizadas as medições na ordem de milésimos de milímetros, por se tratar de um equipamento bastante sensível e aprimorado.





Fonte: Próprio autor.

#### 3.5 Preparação da matriz de extrusão

A matriz de extrusão, Figuras 32, 33 e 34, foi preparada após a alteração de geometria de extrusão, devido à quebra de duas matrizes antecessoras e à inclusão da simulação do carregamento, que seria exposta durante a extrusão. As imagens das matrizes anteriores podem ser observadas no Apêndice A.

Sua fabricação contou com a utilização de um aço H13 - que é muito utilizado em ferramentas sujeitas a trabalho a quente; com a usinagem sendo realizada em um

Centro de Usinagem e em um Torno CNC. O perfil da matriz foi executado no modelo bipartido, no qual foi possibilitada a usinagem interna e posteriormente a usinagem externa. Posteriormente, foi realizada a tempera e o revenimento em forno elétrico, tipo MUFLA MOD 200 F DM, obedecendo aos parâmetros do fornecedor do material.



Figura 32 – Matriz de extrusão, vista frontal

Fonte: Próprio autor.

# Figura 33 – Matriz de extrusão, vista traseira



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Matriz de extrusão, vista frontal superior



Fonte: Próprio autor.

Foi usinado um container para o travamento da matriz e encapsulamento do corpo de prova, em material SAE 4140 utilizando o Torno CNC. O desenho da matriz e do container pode ser observado no Apêndice B.

Ademais, foi adquirida também uma resistência elétrica, revestida com cerâmica, para o aquecimento do conjunto que realiza a extrusão a quente. Para sua escolha, o fabricante solicitou a máxima temperatura de trabalho e a tensão de rede. A resistência adquirida tem a capacidade de 500°C de temperatura, com uma potência de 1147 Watts e uma resistência de 42,2 Ohmns. Ela fica externa ao container, conforme Figura 35, permitindo o controle de temperatura do ensaio, por meio de um controlador de temperatura digital, ligado ao circuito elétrico de alimentação.



Figura 35 – Resistência e Container da matriz

Fonte: Próprio autor.

#### 3.6 Simulação

A simulação foi realizada através do *software* ABAQUS CAE, instalado no Laboratório de Informática de Engenharia da PUC Minas, no Campus de Contagem, em 1/4 do volume real, devido à simetria e ao formato do corpo de prova proporcionarem uma simulação mais rápida e menos complexa para o *software*.

Na Figura 36 está a projeção do corpo de prova e, na Figura 37, sua projeção em 1/4 do volume para a simulação.



Figura 36 – Corpo de prova de extrusão na simulação

Fonte: Próprio autor.

Figura 37 – 1/4 do corpo de prova de extrusão na simulação



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 38 é possível ver o perfil da matriz e na Figura 39 a mesma matriz, mas agora, com um corte de 1/4 do volume total juntamente com o corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.



Figura 39 – 1/4 do corpo de prova e da matriz de extrusão na simulação

Fonte: Próprio autor.

Na simulação, a matriz utilizada no processo de extrusão foi considerada um corpo rígido, uma vez que não foi classificada como objeto de estudo no processo, e o material do corpo de prova foi parametrizado como uma malha de formato hexaédrico, conforme Figura 40.



Figura 40 – Formato Hexaedrico da malha



A quantidade de nós na simulação caracteriza a malha utilizada e, devido ao critério de convergência e à licença do *software*, no laboratório de informática da PUC Contagem, foi restringida a um total de 4225 nós, valor que já apresentava uma convergência de resultados satisfatória para a análise. Em uma licença empresarial, por exemplo, essa quantidade de nós poderia ultrapassar os 40000.

A atuação da velocidade na simulação foi considerada próximo de nula, em função de ser uma análise quase estática, devido ao processo real ser lento e não trabalhar em alta velocidade.

O software foi alimentado com dados obtidos através dos ensaios de tração e de coeficiente de atrito, permitindo uma análise com valores reais do material do corpo de prova nas suas duas variações de estado do material, recozido e como recebido e também nas duas temperaturas utilizadas nos ensaios, ambiente e há 400 °C.

#### 3.7 Extrusão

Para o processo de extrusão, foram usinados corpos de provas com diâmetros de Ø 15 x 50mm de comprimento no torno CNC. Eles foram levados também ao forno elétrico tipo MUFLA MOD 200 F DM para o mesmo tratamento de recozimento dos corpos de prova de tração e teste do anel.

Após o processo de recozimento, foi colocado o corpo de prova dentro do container de extrusão, colocado uma manda térmica em torno do sistema conforme

Figura 41 e ligado a resistência de aquecimento na máquina de tração/compressão do laboratório de materiais da PUC Minas Contagem.



Figura 41 – Container e resistência revestido com manta termica

Fonte: Próprio autor.

#### 3.8 Metalografia

O processo iniciou-se através da obtenção da seção transversal e da seção perpendicular a transversal das amostras, realizada em uma cortadora metalográfica TECLAGO CM 80, visualizada na Figura 42, capaz de garantir que a microestrutura do Alumínio não sofresse interferências causadas pela variação brusca de temperatura no momento do corte e de um arco de serra para a finalização do corte para o embutimento.



Figura 42 – Cortadora Metalográfica

Fonte: Próprio autor.

O embutimento foi realizado em uma embutidora AROTEC PRE 40 visualizada na Figura 43, utilizando aglomerante do tipo baquelite;



Figura 43 – Embutidora

Fonte: Próprio autor.

Em seguida, iniciou-se o processo de lixamento que ocorreu de forma sequencial, iniciado com as lixas de granulometrias maiores para granulometrias menores e polimento, garantindo ao final, superfícies com acabamento espelhado. As lixas utilizadas nesse processo obedeceram a ordem de granulometria da Tabela 4 a seguir:

	Ordem de granulometria							
#	180	220	400	600	800	1200	2000	
Fonte: Próprio autor.								

Após a sequência de lixamento foi realizado a operação de polimento com Alumina com granulometria de 1  $\mu m$ .

Para a revelação da microestrutura, foram testados alguns processos que estão dispostos na Tabela 5, dentre os quais, vale citar inclusive as tentativas que não obtiveram êxito quando se pretendia, através de um ataque químico controlado, evidenciar os contornos de grãos bem como o sentido orientação dos grãos para as amostras que foram submetidas a esforços de extrusão.

Reagente	Composição	Ataque / tempo	Resultado
HF 0,5%	0,5 ml de Ácido Fluorídrico + 95 ml de Água destilada	Imersão e esfregamento: 5 - 30 segundos, seguido de limpeza com água morna.	Ruim
Osmond	10 ml de ácido Clorídrico concentrado + 10 ml de ácido Nítrico concentrado + 10 ml de ácido Fluorídrico + 25 ml de água destilada.	Imersão / esfregamento: 5 - 30 segundos, seguido de limpeza com água morna.	Ruim
Flick	10ml de ácido Fluorídrico concentrado + 15 ml de ácido clorídrico concentrado + 10 ml de água destilada.	Imersão / esfregamento / eletrólise: 10-20 segundos	Regular
Poulton's	12 ml de ácido Clorídrico concentrado + 6 ml de ácido Nítrico concentrado + 1 ml de ácido Fluorídrico 48% + 1 ml de água destilada.	Esfregamento	Bom
Tuckers	15 ml de ácido Fluorídrico concentrado + 45 ml de ácido Clorídrico + 15 ml de ácido Nítrico concentrado + 25 ml de água destilada.	Imersão / esfregamento: 5 - 30 segundos	Regular
NaOH	10g de Hidróxido de Sódio + 90 ml de água destilada.	Esfregamento / eletrólise / Imersão a quente (50°C): 10 - 20 segundos, seguido de enxaguamento em água fria.	Péssimo
Keller	2,5 ml de ácido Nítrico + 1,5 ml de ácido Clorídrico + 1,0 ml de ácido Fluorídrico + 95 ml de agua destilada	Imersão / esfregamento: 10- 60 segundos	Regular

### Tabela 5 – Relação de ataques utilizados

Fonte: Próprio autor.

## 3.9 Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers foi realizado com auxílio de um computador para registro das medidas obtidas por meio de um Microdurômetro SHIMADZU HMV 2T E, este pode ser observado na Figura 44.





Fonte: Próprio autor.

Para os corpos de prova antes do processo de extrusão, foram realizados 16 ensaios de dureza em cada corpo de prova, já para os corpos de prova após o processo de extrusão foram realizados 10 ensaios de dureza em cada direção. A carga utilizada nos ensaios foi de 245,2 mN e o tempo de 20 segundo em cada ensaio. O perfil de corte utilizado em cada tipo de amostra para realização das medidas de dureza pode ser visualizado na figura 45



#### Figura 45 – Perfil de corte das amostras para realização das medidas de dureza

Fonte: Próprio autor.
#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é destinado a análise de resultados obtidos durante o processo da extrusão e discussões pertinentes sobre os dados apresentados.

#### 4.1 Análise Química

Nesta etapa do trabalho foi avaliada a composição química do material obtido pelo ensaio de fluorescência por dispersão de comprimentos de ondas apresentado na Tabela 6. Segundo Miranda (2018) e Nagata et al. (2001), o método de fluorescência é seguramente um dos métodos mais estáveis de todos. O relatório completo desta composição está contido no Anexo A.

Tabela 6 – Composição química AA 6082 realizada

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Outros Elementos		Alumínio
										Cada	Total	7 ((0))
6082	0,93	0,19	0,07	0,36	0,52							97,94

Fonte: Proprio autor.

Para a classificação da liga, foi avaliado o percentual dos principais elementos químicos obtidos, sendo o alumínio com quase 98%, o silício na faixa de 0,93% e o magnésio com 0,52%. Estes e demais valores percentuais obtidos durante a análise química do material foram confrontados com a composição química de referência da norma ASTM B221-14 (2014) mostrada na Tabela 7 e que, a partir da variação destes valores dentro das faixas estabelecidas, confirmou que a liga em estudo é a liga de alumínio Al 6082.

Tabela 7 – Composição química AA 6082 normatizada

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Outros Elementos		Alumínio
										Cada	Total	,
6082	0,7–1,3	0,50	0,10	0,40–1,0	0,6–1,2	0,25	0,20	0,10		0,05	0,15	Restante

Fonte: Adaptado de ASTM B221-14 (2014).

#### 4.2 Ensaio de tração

Foi realizado o ensaio de tração em corpos de prova como recebido à temperatura ambiente e os valores médios encontrados foram de 265,85 MPa para o limite de resistência e de 330,71 MPa para tensão real equivalente a máxima convencional. Pode-se visualizar o comportamento médio obtido para ambas as curvas de Tensão x Deformação de Engenharia e Verdadeira no Gráfico 1.





Em temperatura ambiente, o resultado médio dos ensaios dos corpos de prova recozidos foram de 103,96 MPa para o limite de resistência e de 129,74 MPa para tensão real equivalente a máxima convencional. O comportamento das curvas de Engenharia e Verdadeira está no Gráfico 2.



Gráfico 2 – Tensão x deformação real e de engenharia do material recozido à temperatura ambiente



A razão do valor de tensão limite de resistência obtido para o material no estado recozido ser consideravelmente menor do que o resultado de tensão limite de resistência do material como recebido é caracterizado pelas propriedades devolvidas no processo de recozimento, que tem como objetivo de remover efeitos de processamentos mecânicos e ou térmicos realizados anteriormente devolvendo suas características estruturais originais.

O ensaio de tração também foi realizado na temperatura de trabalho de 400°C. O resultado médio dos ensaios dos corpos de prova como recebidos, em temperatura de 400°C, foram de 117,17 MPa para o limite de resistência e de 137,33 MPa para tensão real equivalente a máxima convencional. No Gráfico 3 pode ser visualizado o comportamento das curvas de Engenharia e Verdadeira.

Gráfico 3 – Tensão x deformação real e de engenharia do material como recebido à temperatura de 400°C



Fonte: Próprio autor.

Na temperatura de 400°C para os corpos de prova recozidos, o resultado médio dos ensaios foram de 33,13 MPa para o limite de resistência e de 37,5 MPa para tensão real equivalente a máxima convencional. O comportamento das curvas de Engenharia e Verdadeira é apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Tensão x deformação real e de engenharia do material recozido à temperatura de 400°C





De acordo com Dieter (1961) e Batalha (2015), que utiliza uma variação da equação de Hollomon, no trabalho a quente, o fator de sensibilidade à taxa de deformação indica sua mudança de comportamento e caracteriza o aumento de da capacidade de deformação plástica do material ao ser trabalhado em temperaturas

mais elevadas e a sua diminuição de tensão. Vale ressaltar que neste trabalho a taxa de deformação, não sofreu variação.

Os resultados retirados das curva de Tensão x Deformação Real para os corpos de prova foram utilizados na simulação de extrusão do material, nas configurações de cada curva, através do software de elementos finitos.

No Gráfico 5, estão representadas todas as curvas de tensão real equivalente a máxima convencional dos corpos de prova realizados.



Gráfico 5 – Deformações Reais

Após o processo de extrusão foi realizado um ensaio de tração com corpo de prova do material extrudado e ele apresentou, em temperatura ambiente, uma tensão máxima semelhante a do material como recebido ensaiado a uma temperatura de 400°C.

#### 4.3 Teste de atrito

O teste do anel, para determinação do atrito do material em relação à matriz, obteve resultados de deformação e resultados dos cálculos utilizando as equações 5, 6 e 7 que estão dispostos no Apêndice C. Os resultados médios de coeficiente de atrito são apresentados na Tabela 8.

	Amostras tem	p. ambiente	Amostras temp. 400°C			
	Como Recebido	Recozido	Como Recebido	Recozido		
μ	0,37	0,38	0,76	0,72		
Fonte: Próprio autor.						

Tabela 8 – Valores de atrito

Os resultados médios obtidos de coeficiente de atrito foram utilizados na simulação de extrusão do material através do software de elementos finitos e fazendo uma analogia com a metodologia utilizada por Silva *et al.* (2017a) e Bueno (2010).

Devido ao fator temperatura, os valores do coeficiente de atrito tem faixas diferentes de atuação no material. Em temperatura ambiente ele se comportou com uma pequena variação em relação aos dois corpos de prova ensaiados, e já em uma temperatura de 400°C obteve-se valores bem mais elevados porem aproximados. Com a utilização de corpos de prova com o material no estado como recebido e com material recozido, demonstra-se claramente que a relação do atrito está mais envolvida com o material do par tribologico do que com sua organização microestrutural devido a processos de conformação realizados anteriormente.

A obtenção de valores de coeficiente de atrito mais altos em temperaturas mais altas é explicado pela maior fluidez dos materiais em temperaturas mais altas, com o aumento de fluidez, o material tem a tendência de se aderir mais a superfície do outro material caracterizando o aumento do coeficiente de atrito.

Os resultados totais obtidos foram satisfatórios e Bueno *et al.*(2010), discursa sobre a utilização dos dados obtidos pelo teste do anel e sua confiabilidade no uso de softwares de simulação numérica.

A Figura 46 mostra o material não deformado e, após deformação em temperatura ambiente, como recebido.

### Figura 46 – Corpo de prova não conformado e conformado, na temperatura ambiente



Fonte: Próprio autor.

A Figura 47 mostra o corpo de prova recozido, após deformação e sem deformação, em temperatura de 400°C.

Figura 47 – Corpo de prova recozido conformado e não conformado, em temperatura de 400°C



Fonte: Próprio autor.

A Figura 48 mostra o corpo de prova como recebido, após deformação e sem deformação com uma visualização superior, em temperatura de 400°C.

# Figura 48 – Corpo de prova como recebido conformado e não conformado, em temperatura de 400°C



Fonte: Próprio autor.

# 4.4 Simulação

Na simulação, foram inseridos os dados de curva tensão/deformação real obtida no ensaio de tração do material e do coeficiente de atrito obtido pelo teste do anel, para o levantamento da melhor opção de extrusão com o material estudado.

Foram feitas quatro simulações para o levantamento de dados de força e configuração de escoamento do material, sendo utilizado o material como recebido e o material recozido, na temperatura ambiente e na temperatura de 400°C.

Na Figura 49, pode-se visualizar o início da simulação do corpo de prova antes de sofrer alterações de tensões devido ao carregamento da extrusão.



Figura 49 – Inicio da simulação do corpo de prova

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 50, pode-se visualizar o aumento de carga variando as tensões internas no material, principalmente as apresentadas na cor vermelha na região de inclinação da ferramenta e com 1/4 da simulação em andamento. Este ponto ainda não caracteriza o carregamento total da extrusão do corpo de prova na simulação.



Figura 50 – 1/4 da simulação do corpo de prova

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 51, a carga já está estabilizada e com 3/4 da simulação do corpo de prova em andamento. Uma análise visual do comportamento proveniente das tensões demostradas com tonalidades de colorações diferentes, permite caracterizar a extinção de novas tensões significativas após passagem pela região da fieira, o que contribui para a manutenção do carregamento de extrusão continuar estável na simulação.



Figura 51 – 3/4 da simulação do corpo de prova

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 52, pode-se visualizar o final da simulação do corpo de prova demostrando zonas de tensões finais atuantes no processo durante a simulação.



Figura 52 – Final da simulação do corpo de prova

Fonte: Próprio autor.

As regiões das figuras com a coloração de tons avermelhados demonstram as áreas mais afetadas pelas tensões provenientes do processo de extrusão direta que tem uma influência ampliada pelo coeficiente de atrito do material e sua temperatura. Durante o desenvolvimento da matriz, foi feito uma análise do ângulo ótimo de extrusão, mas devido às dimensões do material disponível para os experimentos, ele não pode ser aplicado.

O resultado de força obtido pela simulação dos corpos de provas recozido e como recebidos, em temperatura ambiente e em temperatura de 400 °C são mostrados no Gráfico 6 e os valores máximos de carga na simulação estão dispostos na Tabela 9.



Gráfico 6 – Simulações de Carga x Tempo

Fonte: Próprio autor.

	N / N N						~
I abola 0	Voloroc do	AARAA	mavima	Abitidae	nnc	cimila	~~~~
	values ue	Laiua	шахшпа	ODILIUOS	1105	SIIIUIA	LUES
						••••••	ý U U U

Corpo de prova	Carga (kgf)
Recozido temperatura ambiente	15667,1
Recozido temperatura 400 °C	5578,6
Como recebido temperatura ambiente	15647,3
Como recebido temperatura 400 °C	9796,2

Fonte: Próprio autor.

Como esperado, devido ao baixo limite de resistência encontrado, o material recozido a ser extrudado a uma temperatura de 400°C, foi o que apresentou melhores resultados de carga em função do tempo na simulação sendo o escolhido para os testes de extrusão junto a fieira desenvolvida para o trabalho.

#### 4.5 Extrusão

O processo de extrusão foi realizado após o aquecimento do corpo de prova recozido a uma temperatura de 400°C e com seu carregamento médio durante o processo de extrusão de 6092 Kgf medido pela célula de carga do equipamento. A resistência utilizada para garantir a atmosfera de temperatura no processo, foi envolvida por um material isolante de fibra cerâmica da marca Fiberfrax garantindo uma menor troca de calor com o ambiente. A Figura 53 mostra o corpo de prova extrudado ainda preso ao conjunto de extrusão que contem a matriz.

Figura 53 – Corpo de prova extrudado ainda preso ao container e matriz



Fonte: Próprio autor.

Conforme a geometria que pode ser conferida no desenho do Apêndice B e sua usinagem na matriz, o processo de extrusão concedeu ao corpo de prova extrudado a geometria mostrada na Figura 54, onde o corpo de prova está junto a matriz sem a separação do bi-partido ao seu entorno.



Figura 54 – Corpo de prova extrudado envolto pela matriz completa

Fonte: Próprio autor.

O acabamento superficial do corpo de prova após a extrusão está diretamente ligado ao acabamento da superfície da matriz usinada, sendo que, o detalhe da linha de união entre o bi-partido da matriz ficou exposto ao longo do corpo de prova como mostrado na figura 54.

É possível verificar na Figura 55 o corpo de prova extrudado já com a matriz aberta para a retirada do corpo de prova.



Figura 55 – Corpo de prova extrudado e a matriz aberta

Fonte: Próprio autor.

Uma diferença de acabamento do corpo de prova do material também pode ser observada enquanto está na zona de deformação, esta, presente na parte com inclinação da matriz, e após sua passagem por esta região. Na simulação numérica foi exemplificado na Figura 51, através da análise visual do comportamento proveniente das tensões demostradas com tonalidades de colorações diferentes, a extinção de novas tensões significativas após esta região.

A Figura 56 mostra somente o corpo de prova, este que pode ser dividido em 4 partes: a parte do material extrudado (a), a parte de extrusão deformada no ângulo da matriz (b), a parte em que houve um escoamento de material (c) e a parte com o material que foi comprimido e não extrudado (d).





Fonte: Próprio autor.

Na figura 56 podemos ver na região de escoamento (c), anterior a região de extrusão (b), um retorno de material proveniente das forças geradas pelas tensões de extrusão, que fizeram o material escoar para uma região de vazio entre a matriz e o container. Este comportamento também foi visualizado e verificado na simulação numérica quando demonstrado esta região de vazio.

#### 4.5 Dureza Vickes

Os gráficos de valores de durezas Vickers obtidos pela análise no microdurômetro estão dispostos no Apêndice D. As medias, desvio padrão, variância e coeficiente de variação encontradas podem ser visualizadas na Tabela 10

	Antes da extrusão	Após a extrusão					
	Recozido	Perpendicular	Frontal vertical	Frontal Horizontal			
Media	54,446	55,199	55,349	55,472			
Variância	11,401	23,464	4,628	6,556			
Desvio Padrão	3,377	4,844	2,151	2,560			
Coef. de Var.	6,20%	8,78%	3,89%	4,62%			

Tabela 10 – Valores de dureza Vickers

Fonte: Próprio autor.

A análise de dureza revelou um decréscimo considerável de aproximadamente 42,7% entre o material como recebido e após o processo de recozimento o que é possível justificar com um aumento no tamanho de grão que caracterizaria a diminuição de dureza do material. Já após a extrusão, não houve mudança significativa em relação a dureza do material extrudado com o material recozido, o que se justifica através da análise de temperatura de extrusão do material que está acima da temperatura de recristalização do alumínio. Esse fator contribui para a diminuição da quantidade de discordâncias e garante uma dureza comum às duas situações.

#### 4.6 Metalografia e análise microestrutural

De posse das amostras polidas, procedeu-se com os ataques químicos onde a revelação metalográfica da liga de Alumínio Al 6082 revelou ser um fator de grande dificuldade devido ao surgimento de oxido de alumínio na superfície após o processo

de lixamento e polimento dos corpos de prova, este óxido protege o material de oxidações mais profundas dificultando o ataque químico em quase todas as situações testadas.

Devido ao fator tempo e aos insumos disponíveis para a preparação das soluções mencionadas na Tabela 5, foram analisadas somente as imagens com resultados considerados bons em relação aos demais reagentes utilizados.

Os corpos de prova como recebido foram analisados conforme imagens na Figura 57 de ampliações 100x (a e b) e 50x (c).



Figura 57 – Corpo de prova como recebido

Fonte: Próprio autor.

As imagens dos corpos de prova recozidos estão dispostas nas Figura 58 em ampliações de 100x (a e b) e 50x (c).

#### Figura 58 – Corpo de prova Recozido



#### Fonte: Próprio autor.

Conforme a comparação entre as Figuras 57 da microestrutura do material como recebido para a Figura 58 de microestrutura do material recozido, o fato do material como recebido poder estar encruado e com um a densidade menor de discordâncias e o material recozido apresentar um aumento no tamanho de grão e também destas discordâncias, caracteriza a diminuição de dureza após o processo de recozimento e também o resultado da curva de tensão x deformação para o estado recozido obter valores de tensão bem abaixo do que os valores encontrados no material como recebido.

Foram analisados corpos de prova após a extrusão em duas situações, a primeira com o corte na seção transversal do corpo de prova conforme Figura 59 nas ampliações de 100x (a) e 50x (b).

# Figura 59 – Corpo de prova extrudado cortado na seção perpendicular ao sentido de extrusão



Fonte: Próprio autor.

A segunda com o corte da seção longitudinal no sentido de extrusão do corpo de prova conforme Figura 60 nas ampliações de 100x (a e b) e 50x (c).



Figura 60 – Corpo de prova extrudado cortado no sentido de extrusão

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 59 observa-se uma diminuição do tamanho do grão em relação ao material recozido, gerado pelo encruamento do material durante o processo de extrusão. Mesmo com a qualidade da imagem, não seria difícil observar um avanço

adicional dessa estrutura de deformação. Já em comparação ao material como recebido, evidencia-se que o encruamento inicial ainda é muito superior ao atingido.

Após o processo de extrusão, houve uma melhora na resistencia mecânica, em relação ao material recozido evidenciada no ensaio de tração. Já os valores de dureza não diferem muito do material recozido e garantem uma melhor ductilidade em relação ao material como recebido.

A nucleação e crescimento de novos grãos livres de deformação, a partir da estrutura de subgrãos de maneira estática (após deformação) e dinâmica (durante a deformação) promoveu a redução da densidade de discordâncias e aliada ao aquecimento presente ainda após a extrusão (estagio após passagem pela matriz até retirada do corpo de prova) promoveu um pequeno aumento do tamanho de grão.

Na Figura 60 pode-se observar um alongamento dos grãos devido ao processo de extrusão e temperatura de recristalização, onde na presença de alguns elementos de liga como o manganês, podem fazer com que os grãos recristalizados tenham a obstrução do crescimento e assim formem grãos alongados típicos de ligas de maior resistência mecânica

Nenhum outro efeito substancial foi observado, mas, os limites dos grãos parecem um pouco mais descontinuos. A estrutura de grãos também parece um pouco mais fragmentada, como vários pequenos "pedaços de grãos" podendo ser vistos.

#### **5 CONCLUSÃO**

Baseado em toda a metodologia aplicada no desenvolvimento e execução do presente trabalho, da literatura disponível e utilizada para o referencial teórico, da construção dos dispositivos necessários para a execução da extrusão através do Laboratório da PUC Minas Contagem, foram listadas algumas conclusões.

A construção da matriz de extrusão não é um processo simplório para fabricação e necessita de uma grande compreensão da área de processos de fabricação em usinagem e tratamento térmico para sua obtenção e garantia de sucesso.

A análise numérica via um software de elementos finitos adequado auxilia e diminui drasticamente o tempo de análise para a obtenção do processo ideal de extrusão devido ao seu grande potencial de cálculo e versatilidade em modificação de geometrias sem a necessidade de protótipos físicos anteriores.

A força de extrusão calculada analiticamente foi muito próxima da força de extrusão gerada pelo software de elementos finitos e também foi muito próxima do valor real obtido. Isso demonstra que os processos abordados apresentam uma boa representatividade em função da força de extrusão.

O método do teste do anel mostrou-se eficaz para a obtenção dos valores do fator de atrito e do coeficiente de atrito do par tribológico estudado e foram utilizados para alimentação do *software* e cálculos envolvidos.

A tensão de tração obtida no corpo de prova do material extrudado, após o ensaio de tração em temperatura ambiente, se equiparou com a tensão do material aquecido a 400°C, o que representa um aumento de resistência em função do material recozido.

A dureza do material após a extrusão indica um aumento de ductilidade do material em relação ao material como recebido e juntamente com aumento de resistência devido ao aumento de tensão, viabiliza utilização em determinadas ocasiões.

A microestrutura do material pode ser avaliada, mas as imagens adquiridas não tem uma boa qualidade devido à dificuldade de acertar a solução ideal para a liga do material.

# SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1. Realizar o processo de extrusão com outras ligas de alumínio e comparar e realizar um comparativo.
- 2. Variar os parâmetros de temperatura de extrusão na liga de alumínio utilizada no presente trabalho.
- Variar as taxas de deformação e verificar o fator de sensibilidade a taxa de deformação.
- 4. Realizar o processo de extrusão incluindo lubrificantes para avaliar comportamento na extrusão.

# REFERÊNCIAS

ABD EL AAL, M. I. 3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 27(6), 1338–1352, 2017. doi:10.1016/s1003-6326(17)60155-9

Associação Brasileira do Alumínio – ABAL. **Alumínio.** Cadeia primaria. Disponível em: http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/. Acesso em: 23 fev. 2019.

ABNT, NBR ISO 209:2010 Alumínio e suas ligas – Composição química -Associação Brasileira de Normas Técnica, 2010

ASTM E8 / E8M-16a, **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org. DOI: 10.1520/E0008\_E0008M-16A

ASTM B221-14, **Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org. DOI: 10.1520/B0221-14

ASTM B918 / B918M - 17a, **Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org. DOI: 10.1520/B0918\_B0918M-17A.

BAFFARI, D., REYNOLDS, A. P., LI, X., & FRATINI, L. Influence of processing parameters and initial temper on Friction Stir Extrusion of 2050 aluminum alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, 28, 319–325, 2017. doi:10.1016/j.jmapro.2017.06.013

BATALHA, M. H. F., **Estudo da Estampabilidade aQuente de Aço ao Boro em Conformação com Redução de Espessura Controlada.** 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual De Campinas Faculdade De Engenharia Mecânica

BAUMANNN, S. F., SANDERS JR, R. E. Metallurgy of Wrought Aluminium Products: Principles and Aplications. "**Seminário de metalurgia**", Itapissuma, Alcoa Aluminio, dez. 1996.

BERNDT, N., FRINT, P., WAGNER, M. F. –X. Influence of Extrusion Temperature on the Aging Behavior and Mechanical Properties of an AA6060 Aluminum Alloy **Metals** 2018, 8(1), 51; doi:10.3390/met8010051

BIROL, Y., YUKSEL, B. Performance of gas nitrided and AITiN coated AISI H13 hot work tool steel in aluminium. **Surface & Coatings Technology**, v.207, p.461-466, 2012.

BINGÖL, S., BOZACI, A. Experimental and Numerical Study on the Strength of Aluminum Extrusion Welding **Materials** 2015, 8, 4389-4399; doi:10.3390/ma8074389

BRESCIANI, E. F., DA SILVA, I. B., BATALHA, G. F., BUTTON, S. T. **Conformação Plástica Dos Metais**, 6<sup>a</sup> ed. ed. dig. -- São Paulo: EPUSP, 2011.

BUENO, A. F., **Determinação do Coeficiente de Atrito para as Ligas de Alumínio AA6351e de Titânio Ti6Al4V pelos Métodos do Anel e Tubo Cônico.** 2010. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS.

BUENO, A. F., MARTINS, V., RODRIGUES, W. C., PETTER, A. W., PFINGSTAG, M. E., SCHAEFFER, L. Ensaio do anel para avaliação do comportamento do coeficiente de atrito da liga de alumínio AA6351. **Estudos Tecnológicos** - Vol. 6, n° 1:11-21 (jan/abr. 2010). doi: 10.4013/ete.2010.61.02

CALLISTER JR., W. D., RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais**, e-book 9<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, LTC, 2016.

CAMACHO, A.M.; TORRALVO, A.I.; BERNAL, C.; SEVILLA, L. Investigations on Friction Factors in Metal Forming of Industrial Alloys. **Procedia Engineering** 564–572 (2013) 63

CAMPANA, R. C. **Parâmetros de Processo, Microestrutura e Textura das Ligas de Alumínio AA6063 e AA6082 Extrudadas**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CAMPANA, R. C., PINTO, L. A. Caracterização de interfaces do processo de extrusão formadas pelo fluxo de metal. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO ALUMINIO, 2, 2005, São Paulo. Anais. São Paulo: ABAL, 2005. 1 CD-ROM.

CARVALHO, F. S. G. de. Extrusão a Quente de Tubos: Análise Experimental da Distribuição de Tensões Residuais na Parede do Tubo. 2013. 85 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João Del-Rei.

CBA. **Relatório anual de sustentabilidade 2017**. Companhia Brasileira de Alumínio. Disponível em:<http://www.cba.com.br/relatorio-de-sustentabilidade-2017/pdf/CBA-RelatorioAnual-2017.pdf> Acesso em: 26 fev. 2019

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – CIMM. **Parâmetros Físicos.** Força de extrusão. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material\_didatico/6504-parametros-daextrusao#.XPEjjtJKg11 . Acesso em: 03 mar. 2019

CHEN, L., ZHAO, G., YU, J., ZHANG, W. Constitutive analysis of homogenized 7005 aluminum alloy at evaluated temperature for extrusion process. **Materials & Design** (1980-2015), 66, 129–136, 2015a. doi:10.1016/j.matdes.2014.10.045

CHEN, L., ZHAO, G., YU, J., ZHANG, W. Evaluation of a pyramid die extrusion for a hollow aluminum profile using FE simulation. **Journal of Mechanical Science and Technology.** 29(5), 2195–2203, 2015b. doi:10.1007/s12206-015-0440-3

CHOI, M. K., PARK, C.-G., CHOI, Y., WON, T.-Y. Aluminum tube extrusion with the porthole die for deconcentrated welding lines. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 32(5), 2245–2251, 2018. doi:10.1007/s12206-018-0435-y

DE PIERRE, V., GURNEY, F., MALE, A.T., **Mathematical calibration of the ring test with bulge formation**: Technical Report AFML-TR-72-37, Air Force Materials Laboratory, USA (Ohio), 1972.

DEVLOO, P. "Simulação numérica". **A Linguagem da Ciência** # 4, maio de 2005 MultiCiência. Disponivel em:

https://www.multiciencia.unicamp.br/artigos\_04/a\_06\_.pdf Acesso em: 01 mar. 2019.

DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, Inc., 1961

FARHOUMAND, A., EBRAHIMI, R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. **Materials & Design**. Volume 30, Issue 6, June 2009, Pages 2152-2157 https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025

FERREIRA, R. A. S. **Conformação plástica**: fundamentos metalúrgicos e mecânicos. 2ª ed. Recife, Editora UFPE 2010

GÜLEY, V.; GÜZEL, A.; JÄGER, A.;BEN KHALIFA, N.; TEKKAYA, A. E.; MISIOLEK, W. Z. Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of A6060 chips by hot extrusion. **Materials Science & Engineering** A, 1, v.574, p.163-175, 2013.

HELMAN, H., CETLIN, P. R. Fundamentos Da Conformação Mecânica Dos Metais. Ed. Artliber, 2015.

HOLGUÍN, A. F. Z., MONTOYA, C. A. M., GARCÍA, L. C. F. Estudio de la extrusión indirecta con punzón de sección transversal cuadrada del aluminio 6061 usando el método de elementos finitos. **Revista EIA** 16 (32) (2019): 219-228. https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1271

HÖLKER, R.; TEKKAYA, A. E. Advancements in the manufacturing of dies for hot aluminum extrusion with conformal cooling channels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** (2016), v. 5, n. 83, p. 1209-1220. doi:10.1007/s00170-015-7647-4

HOSSEINI, S. H., M. SEDIGHI, J. MOSAYEBNEZHAD. Numerical and experimental investigation of central cavity formation in aluminum during forward extrusion process. **Journal of Mechanical Science and Technology** 30 (5) (2016): 1951-1956. doi:10.1007/s12206-015-1216-5

HU, C., OU, H., ZHAO, Z. An alternative evaluation method for friction condition in cold forging by ring with boss compression test. **J. Mater. Process. Technol**., 18-25 (2015) 224

HYDRO ALUMINIUN. ENVIRONMENT AND SOCIETY. **SOBRE O ALUMINIO:** Ciclo de vida do alumínio. Norway 2012. Disponivel em:< https://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/sobre-o-aluminio/ciclo-de-vida-do-aluminio/refino-da-alumina/>. Acesso em: 24 fev. 2019

IVANISKI, T. M., Caracterização De Chapas De Alta Resistência Em Aço Dp600 E Hardox450® Visando A Aplicação Como Máscarasutilizadas Em Matrizesde Forjamento A Quente. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Rio Grande Do Sul.

KOBAYASHI, S., OH, S.I., ALTAN, T. (1989). Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press.

KOHAR, C. P., BRAHME, A., HEKMAT, F., MISHRA, R. K., INAL, K. A computational mechanics engineering framework for predicting the axial crush response of Aluminum extrusions. **Thin-Walled Structures**, 140, 516–532, 2019. doi:10.1016/j.tws.2019.02.007

KUNOGI, M., 1956. A New Method of Cold Extrusion. Journal of the Scientific Research Institute 50, 215–246.

LANDIM, A. P. M; BERNADO, C. B., MARTINS, I. B. A.; FRANCISCO, M. R., SANTOS, N.B.; MELO, N.R.de. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, v. 26, n. spe, p. 82–92, 2016. doi: 10.1590/0104-1428.1897

LEE IK, LEE SY, LEE SK, JEONG MS, KIM DH, LEE JW, CHO YJ (2015) Porthole extrusion process design for magnesium alloy bumper back beam. **Int J Precis Eng Man** 16:1423–1428. doi: 10.1007/s12541-015-0187-x

LI, F., WU, H. B., ZENG, X. Investigation of 7A09 aluminum alloy prepared by continuous variable cross-section direct extrusion (CVCDE). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 82(5-8), 1447–1453, 2015. doi:10.1007/s00170-015-7841-4

LI, X., TANG, W., REYNOLDS, A. P., TAYON, W. A., BRICE, C. A. Strain and texture in friction extrusion of aluminum wire. **Journal of Materials Processing Technology**, 229, 191–198, 2016. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.09.012

LIU, C.-H., YANG, J.-B., & LIN, H.-C. Design of a novel dummy block by finite element simulation to eliminate back end defects in direct extrusion. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, 69(9), 1699–1710, 2016. doi:10.1007/s12666-016-0830-y

LIU, Z., LI, L.\*, LI, S., YI, J., WANG, G. Simulation Analysis of Porthole Die Extrusion Process and Die Structure Modifications for an Aluminum Profile with High Length– Width Ratio and Small Cavity. **Materials** 2018, 11, 1517; doi:10.3390/ma11091517 LOPES, A. F.; ROSA, S. M. S; DE VERNEY, J. C. K.; CÉZAR, J. L.; SANTOS, L. H. **Avaliação de atrito por meio de teste do anel em aço médio carbono.** XXII Salão de iniciação cientifica e tecnológica. EXPOULBRA 2016

LOU, S., WANG, Y., LIU, C., LU, S., LIU, S., & SU, C. Analysis and Prediction of the Billet Butt and Transverse Weld in the Continuous Extrusion Process of a Hollow Aluminum Profile. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 26 (8) (2017), 4121–4130. doi:10.1007/s11665-017-2771-y

LUMLEY, R. Fundamentals of Aluminum Metallurgy: Production, Processing and Applications. **Abington Hall**: Woodhead Published Limited, 2011. UK, 2011. 843 p.

MAGID, H. M., SULAIMAN, S., ARIFFIN, M. K. A., BAHARUDIN, B. T. H. T. Enhancement and improvement of the mechanical properties of aluminum extruded products by mathematical analysis and simulation process. **AIP Conference Proceedings** 1660, 070113 (2015); doi: 10.1063/1.4915830

MALE, A.T., COCKCROFT, M.G., 1965. A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Condition of Bulk Plastic Deformation. **Journal of the Institute of Metals** 93, 38–46.

MARQUES, F.D.F. **Desenvolvimento do processo de vazamento em coquilhas rotativas.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2010

MUELLER, S., SANABRIA, V. Influence of choked angle of bearing channel on profile grain structure during multi-hole extrusion of aluminum alloy. **Procedia Manufacturing**, v. 15, p.201-208, 2018. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.195

MIRANDA, B. R., **Desenvolvimento de uma metodologia para análise do teor de ouro em joias utilizando o método de fluorescência de raios-x.** 2018. 40 f. Monografia (Geologia) Universidade Federal Do Rio De Janeiro

NAGATA, N., BUENO, M. I. M. S., PERALTA-ZAMORA, P. G., Métodos matemáticos para correção de interferências espectrais e efeitos inter elementos na análise quantitativa por fluorescência de raios-x. **Quim. Nova**, Vol. 24, No. 4, 531-539, 2001.

NELMETAIS TECNOLOGIA E COMERCIO DE METAIS LTDA. **Certificado de Qualidade.** 04/09/2017.

OLIVEIRA, R. A. **O Forjamento de Ligas de Alumínio – Um Estudo para a Liga ABNT 6061**. 2001. 127 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PETERSEN, S. B.; MARTINS P. A. F.; BAYAN N. Alternative ring-test geometry for the evaluation of friction under low normal pressure. **J. Mater. Process. Technol**., 14-24 (1998)

PERES, M. M.; FOGAGNOLO, J. B.; BOLFARINI, C.; KIMINAMI, C. S.; BOTTA, W. J.; JORJE, A. M. Extrusão a quente de Ligas de alumínio nanoestruturadas em pó:

Efeito da Precipitação no Controle Microestrutural. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 7, n. 1-2, p. 6-11, jul.-dez. 2010; doi: 10.4322/tmm.00701002

ROBINSON, T.; OU, H.; ARMSTRONG, C.G., (2004). Study on ring compression test using physical modelling and FE simulation. **Journal of Materials Processing Technology** 153–154, 54–59

SAHA, P. K. Aluminum Extrusion Technology, **ASM International Materials Park**, **Ohio** 44073-0002, 2000

SCIAPPS, Relatório de Teste de Material. SciAps. 17/04/ 2019a.

SCIAPPS, **Scrapper X-250.** SciAps, Inc. disponivel em: https://www.sciaps.com/xrf-handheld-x-ray-analyzers/x-250/ acesso em: 01 de maio de 2019b.

SHAMSUDIN, S., ZHONG, Z. W., RAHIM, S. N. A., LAJIS, M. A. The influence of temperature and preheating time in extrudatequality of solid-state recycled aluminum **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 90(9-12), 2631–2643, 2016. doi:10.1007/s00170-016-9521-4

SILVA, E. V., CRUZ, L. W. M., MARTINS, N., VIEIRA, A. L., MAGALHÃES J., P. A. A., SILVA, G. C. Correlação de Coeficientes de Atrito Pelo Teste do Anel e Gerados Através do Software Abaqus, XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, November 5-8, 2017a.

SILVA, G. C., OLIVEIRA, C. J., NETO, A. D., SILVA, E. V., CRUZ, L. W. M. **Determinação do coeficiente de atrito pelo teste do anel para conformação de contatos intercambiáveis utilizados no processo de soldagem por resistência.** 37 ° SENAFOR – 21 ° Conferência Internacional de Forjamento - Brasil, realizado em Porto Alegre, RS, 4-6 de outubro de 2017b.

SILVA, J., C., P. da **Avaliação Do Comportamento Das Ligas De Alumínio 6005**, **6063, 6351 Submetidas A Diferentes Tratamentos Térmicos.** Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia De Goiás 2015

SHARIFIFAR, M. & AKBARI MOUSAVI, S.A.A. Simulation and optimization of hot extrusion process to produce rectangular waveguides. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, p. 1961–1973, 2015.

SOFUOGLU, H.; RASTY, J., 1999. On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. **Tribology International** 32, 327–335

TOKO T, DANUTA S, KIYOTAKA M (2015) Sensitivity analysis for thickness uniformity of AI coating layer in extrusion of Mg/AI clad bar. Int **J Adv Manuf Technol** 80:507–513

TOKUTOMI, J., UEMURA, T., SUGIYAMA, S., SHIOMI, J., YANAGIMOTO, J. Hot extrusion to manufacture the metal matrix composite of carbon nanotube and aluminum with excellent electrical conductivities and mechanical properties. **CIRP** 

**Annals – Manufacturing Technology** 64(1), 2015, Pages 257-260 https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.083

WANG, L.,ZHOU, J.,DUSZCZYK, J., KATGERMAN, L. Friction aluminium extrusion Part 1: A review friction testing techniques for aluminium extrusion. **Tribology International**, v. 56, p.89-98, 2012.

XUE, X., VINCZE, G., PEREIRA, A. B., PAN, J., LIAO, J. Assessment of Metal Flow Balance in Multi-Output Porthole Hot Extrusion of AA6060 Thin-Walled Profile. **Metals** 2018, 8, 462; doi:10.3390/met8060462

YU, J. Q., ZHAO, G., CHEN, L. Analysis of longitudinal weld seam defects and investigation of solid-state bonding criteria in porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles. **J Mater Process Technol** 237:31–47, 2016. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.05.024

ZHANG, C.,ZHAO, G.,CHEN, Z., CHEN, H., KOU, F. Effect of extrusion stem speed on extrusion process for a hollow aluminum profile. **Materials Science & Engineering B**, v.177(19), p.1691-1697, 2012. doi:10.1016/j.mseb.2011.09.041

ZHANG, J., CHEN, L., ZHAO, G., ZHABG, C., ZHOU, J. Study on solid bonding behavior of AZ31 Mg alloy during porthole die extrusion process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,** v. 93, p. 2791–2799, 2017. doi 10.1007/s00170-017-0722-2

ZHANG H, YAN QQ, LI LX (2008) Microstructures and tensile properties of AZ31 magnesium alloy by continuous extrusion forming process. **Mater Sci Eng A** 486:295–299. doi:10.1016/j.msea.2007.09.001

ZHI-HENG, W., WEI-TAO, Z., XIAO-XIAO, H., GUAN-JUN, B., QING-HUA, Y. Characteristics of metal flow in cold extrusion under electric-hydraulic chattering. **Journal of Iron and Steel Research, International,** v. 24, p. 138-146, 2017.

# APÊNDICES

# APÊNDICE A – Primeiras Matrizes que romperam

Primeira matriz:

Abaixo seguem fotos da primeira matriz construida para seção em formato "U".









Essa matriz não obtve sucesso devido a falta de sustentação na parte inferior da mesma, ocasionando em uma fratura.

# Segunda matriz:

Na segunda matriz, já foi possível visualizar o inicio da extrusão do material. Porém, a matriz também falhou como mostrado na sequencia abaixo.





Foi colocado um reforço para aumentar a sustentação da matriz mas não foi suficiente e ate mesmo o reforço deformou.



Uma terceira matriz foi fabricada por eletroerosão com a inclusão de um ângulo para a extrusão, mas a força da maquina não foi suficiente para a extrusão e o punção ficou travado no container.





Ferramenta utilizada para delimitar o perfil na eletroerosão.



APÊNDICE B – Desenhos da matriz, container e punção






Amostras em temperatura. ambiente									
Com	o Recebid	0	F	Recozido					
D	h	d	D h d						
18,323	3,135	6,112	18,324	3,092	6,079				
R0	Т	Ri	R0	Т	Ri				
9,165	3,135	3,056	9,162	3,092	3,039				
dR0	dRi		dR0	dRi					
1,665	0,694		1,662	0,711					
Ri/R0	R0/Ri		Ri/R0	R0/Ri					
0,333	2,999		0,332	3,014					
dRi/dRo	dR0/dRi		dRi/dRo	dR0/dRi					
0,417	2,398		0,427 2,339						
Rn			Rn						
3,417			3,450						
Rn/R0	R0/T		Rn/R0	R0/T					
0,373	2,923		0,377	2,963					
m	μ		m	μ					
0,645	0,373		0,650 0,375						
Deformação	Deforma	ação na	Deformação	Deforma	ação na				
em D	altu	ura	em D	altu	ura				
22,2%	37,	3%	22,2%	38,	2%				

# APÊNDICE C – Valores obtidos pelo teste do anel e determinação do coeficiente de atrito

	Amostras em temperaturas de 400°C									
Com	o Recebid	lo	R	lecozido						
D	h	d	D	D h						
18,368	3,131	4,820	18,385	3,071	4,875					
R0	Т	Ri	R	Т0	Ri					
9,184	3,131	2,410	9,193	3,071	2,438					
		•								
dR0	dRi		dR0	dRi						
1,684	1,340		1,693	1,312						
Ri/R0	R0/Ri		Ri/R0	R0/Ri						
0,262	3,811		0,265	3,771						
dRi/dRo	dR0/dRi		dRi/dRo	dR0/dRi						
0,796	1,257		0,775	1,290						
Rn			Rn							
4,197			4,168							
Rn/R0	R0/T		Rn/R0	R0/T						
0,457	2,934		0,453428	2,992935						
m	μ		m	μ						
1,323	0,764		1,251	0,722						
Deformação	Deforma	ação na	Deformação	Deforma	ação na					
em D	altı	Jra	em D	altu	ura					
22.5%	37.	4%	22.6%	38.	6%					

#### APÊNDICE D – Valores dos Ensaios de Durezas



Media	57,850
Variância	13,368
Desv. Pad.	3,656
Coef. de Var.	6,32%

Dureza corpo de prova recozido 1

Dureza corpo de prova recozido 2



Media	54,446
Variância	11,401
Desv. Pad.	3,377
Coef. de Var.	6,20%





Media	129,356
Variância	84,881
Desv. Pad.	9,213
Coef. de Var.	7.12%



Dureza corpo de prova como recebido 2



perpendicular 1



Media	54,090		
Variância	22,771		
Desv. Pad.	4,772		
Coef. de Var.	8,82%		







Media	55,199
Variância	23,464
Desv. Pad.	4,844
Coef. de Var.	8,78%



perpendicular 3



Media	55,068
Variância	4,724
Desv. Pad.	2,173
Coef. de Var.	3,95%



longitudinal vertical



Media	55 <i>,</i> 349
Variância	4,628
Desv. Pad.	2,151
Coef. de Var.	3,89%





Media	55,472
Variância	6,556
Desv. Pad.	2,560
Coef. de Var.	4,62%

### ANEXOS

## ANEXO A – Análise química



Material Test Report



Test #502 7:14AM, Apr 17



2nd Match: Al\_6070 MN: 98.0 3rd Match: Al\_6022 MN: 97.4

Magnesi	0.52%*****	0.60%	1.20%	Aluminum 97.94% ***0.24%
Silcon	0.93%***0.01%	0.70%	1.10%	Manganese 0.10% 0.45%
Fe	0.19%*******	0.000%	0.50%	Copper 0.07%******************



#### ANEXO B - Análise química do fornecedor

_					Analas Q	simiza S Pear	a historical Acada	10			
Hom	Alumina	Gabre	Gramo	Farm.	Magnesia	Nanganes	Outres	Sticle	Thanio	Zieco.	
_1		11.11.12		0.5500	0.4001	2012		1,0000	0.2000	3,2000	
			-	1,0000	0.91122	1,9000		1,0000	0.2:00	0.2000	
					\$.6005	1,0000		1.0020	11.2000	0.2000	
- 77				1175305	3,9050	alter.		0,0000	0.23000		
				0.9502	5,600	0,5010		1/2005	0.2000	2,000	
		3)(6		0.000	< 6600	6,6000		(.030)	2.2000		
		- 91510						1,10001	0.2010	0.2200	
	HURBON DE	1000	_		E 60(A			1.0000	152050	0.2000	
	01,2050	10.1201		1,2010	0.6200			1.0000	5.2UT0	0.2000	
	96,010,00	.11.1000		0.0000	0,6750	0.0000		1.02081	2,7000	1,2000	
	91,2050		_			9.0010		1.000	2,7900	0,2090	
	9m.H100	100		(LEGER)	-11,0050)	01010		1.0000	2,2000	0.2005	
	117,77,00	1,1010	0.0010	163500	0.6400	ATTE	1.2056	11,4007	0,000,0	0.1000	
	nesting.	1020	0.1000	0.2400	3.6400	9,1010	0.2000	0.4000	12,1004	0.1350	
			0.10.0T	0.0560	IL EBUI	0.10.0	0.2000	0.4000	0.1005	9,1050	
					0.680/	0.1010	11 200 000	0-400m	0.7000	5,1000	
	n	TI. TILCOL	n.unaj	II.WMAN	0.6320	0,1000	R 2000	0.9000	0.1.000	0.7000	
		1,7100		0.3850			0.2911		ICCODO.	0.3040	

Prounted addes / https://www.international.com/										
114m	Rearries Rearries	Lonk Extension	Calmanian II. Stationarian II. Station	Aurageneerin S.	Totean to da Scio 83714 (Destribut)	Ourses	Constations Colors S. MCS Present	Table Galless ASTM Grant fast	Dene intrasta apport Oberetar	and units of the
		22" 00 ////				300 (140)				
	236 101									-