

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CRISTIANO DE LIMA PINTO

**ESTUDO COMPARATIVO DE TRATAMENTO TÉRMICO EM UM AÇO
FERRAMENTA UTILIZADO NA EXTRUSÃO DE ALUMÍNIOS**

LONDRINA

2022

CRISTIANO DE LIMA PINTO

**ESTUDO COMPARATIVO DE TRATAMENTO TÉRMICO EM UM AÇO
FERRAMENTA UTILIZADO NA EXTRUSÃO DE ALUMÍNIOS**

**COMPARATIVE STUDY OF HEAT TREATMENT IN A TOOL STEEL USED IN
ALUMINUM EXTRUSION**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador (a): Haroldo Lhou Hasegawa.

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CRISTIANO DE LIMA PINTO

**ESTUDO COMPARATIVO DE TRATAMENTO TÉRMICO EM UM AÇO
FERRAMENTA UTILIZADO NA EXTRUSÃO DE ALUMÍNIOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15 de junho de 2022

Haroldo Lhou Hasegawa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Amadeu Lombardi Neto
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por não me deixar desistir diante dos desafios impostos durante a graduação, permitindo que eu chegasse até esse momento.

Agradeço especialmente a toda minha família, que não mediu esforços para me apoiar e me direcionar, estando sempre comigo nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu professor orientador pela disponibilidade e orientação durante meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço a todos os meus colegas de curso que estiveram presentes durante minhas dificuldades, me apoiando constantemente em minha trajetória acadêmica.

Da mesma forma, meus professores e colaboradores da UTFPR que contribuíram para meu desenvolvimento pessoal e profissional, para assim, conseguir obter sucesso nessa nova etapa da minha vida.

RESUMO

Na indústria metalmeccânica, a modernização de processos se faz necessária para ganhar mercado e gerar demanda de serviços e produtos. Neste sentido, o acompanhamento e desenvolvimento de técnicas já em uso nas organizações com qualidade e custo competitivo, necessita de aperfeiçoamento. O presente trabalho tem o objetivo de acompanhar um tratamento térmico de um bloco fictício, formado basicamente de liga de aço ferramenta, em uma empresa situada no norte do Paraná, do segmento de extrusão de alumínio, e comparar com dados conhecidos na literatura disponível. Dessa maneira, o trabalho apresenta um comparativo de tratamento térmico de uma têmpera seguido por três etapas de revenimento entre duas ferramentas críticas de conformação mecânica, avaliando suas respectivas durezas. Com a têmpera e três posteriores revenidos realizados, a ferramenta de forjamento se manteve com uma dureza de 53 Rockwell C devido ao pico de dureza secundário durante o revenido, enquanto o bloco fictício saiu de uma dureza de 54 para 49 Rockwell C decaindo conforme era esperado.

Palavras-chave: Tratamento térmico. Aço ferramenta. Bloco fictício. Extrusão de alumínio.

ABSTRACT

In the metalworking industry, processes modernization is necessary to gain market share and generate demand for services and products. Monitoring and developing techniques already in use in organizations with quality and competitive costs need improvement. The present work aims to monitor a heat treatment of a dummy block, formed basically of tool steel alloy in a company located in the north of Paraná, of the aluminum extrusion segment, and compare it with known data in the available literature. Thus, the work presents a comparison of heat treatment of a quenching, followed by three tempering steps between two critical mechanical forming tools, assessing their respective hardness. With quenching and three subsequent tempers carried out, the forging tool remained at hardness of 53 Rockwell C due to the secondary hardness peak during tempering, while the dummy block dropped from a hardness of 54 to 49 Rockwell C, decaying as expected.

Keywords: Heat treatment. Tool steel. Dummy Block. Aluminium extrusion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Transformação da alumina em alumínio metálico	17
Figura 2 - Fluxograma do processo de extrusão.....	18
Figura 3 - Prensa do processo de extrusão	19
Figura 4 - Vista isométrica do Bloco fictício	20
Figura 5 - Bloco fictício no eixo frontal da prensa	21
Figura 6 - Diagrama com as fases ferro-carbono	26
Figura 7- Curvas de resfriamento TTT genérico para diferentes tempos com aumento gradual de I (taxa menor para resfriar) até VI (taxa maior para resfriar) de um aço carbono	27
Figura 8- Gráfico de ciclo de tratamento térmico genérico para um liga metálica H13.....	28
Figura 9 - Fluxograma do trabalho	30
Figura 10 - Corpos de prova.....	32
Figura 11- Diagrama de representação da curva TTT genérico com martêmpera e posterior revenido simultaneamente para um aço carbono.....	33
Figura 12- Forno utilizado para a têmpera da carga	34
Figura 13 - Bloco fictício com dimensões.....	36
Figura 14 - Forno de revenimento (1) e têmpera (2)	36
Figura 15 - Curva de dureza Rockwell C por temperature Celsius de revenimento	38
Figura 16 - Forno de tempera e revenimento.....	39
Figura 17- Curva de tratamento térmico do estudo de caso 1 em preto e o estudo de caso 2 em vermelho	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de aços ferramentas e rápidos	23
Tabela 2 - Resumo dos ciclos de tratamento térmico do estudo 1 do trabalho	34
Tabela 3 - Dureza das amostras	35
Tabela 4 - Ciclos de tratamento térmico do estudo 2 para o aço ferramenta	37
Tabela 5 - Dureza das amostras obtidas pelo ensaio de Rockwell na escala C	38
Tabela 6 - Dureza das amostras obtidas pelo ensaio de Rockwell na escala C	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO.....	14
1.2	OBJETIVO GERAL.....	14
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4	JUSTIFICATIVA	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	ALUMÍNIO	16
2.2	EXTRUSÃO DE ALUMÍNIO	17
2.3	BLOCO FICTÍCIO.....	20
2.4	AÇOS FERRAMENTAS	22
2.5	TRATAMENTO TÉRMICO	25
3	METODOLOGIA	29
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS ESTUDOS DE CASO	32
4.1	APRESENTAÇÃO DO ESTUDO 1	32
4.2	APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 2 (<i>IN LOCO</i>).....	35
4.3	COMPARAÇÕES ENTRE ESTUDO DE CASO 1 E 2.....	39
5	CONCLUSÃO	42
6	ESTUDOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, os materiais metálicos tornaram-se fundamentais para o desenvolvimento tecnológico da sociedade humana. O alumínio foi introduzido em larga escala industrial a partir de 1886 nos Estados Unidos, e com a Primeira Guerra Mundial em 1914 assumiu posição estratégica, suprimindo a necessidade de metal leve e resistente (ABAL, 2021).

A produção de alumínio em quantidade considerável, se tornou possível por meio de processos conhecidos como Hall-Hérout e Bayer, desenvolvidos respectivamente pelos engenheiros Paul Hérout e Charles Martin Hall em 1886, e pelo químico austríaco Carl Joseph Bayer em 1889 (ARAÚJO *et al*, 2021). Esses processos de beneficiamento da liga de alumínio são utilizados até os dias atuais.

O alumínio possui várias aplicações, muito em função de suas características: alta performance de resistência à corrosão, baixa densidade, alta disponibilidade, boa relação entre dureza e ductilidade (que podem ser alteradas em função da composição das ligas), possibilidade de conformação por fundição e conformação mecânica, qualidade de acabamento da superfície, condutividade elétrica, se tornando um material versátil para diversas aplicações na engenharia (TORMEM; RÖDER, 2019).

Uma das características marcantes do alumínio é a facilidade de ser conformado, principalmente utilizando-se de processos termomecânicos, onde se destaca o processo de extrusão que permite a conformação de diferentes perfis de seção transversal constante e de comprimentos variáveis (ABAL, 2021).

A produção de alumínio extrudado se inicia basicamente em geração de demanda pelo comercial, extrusão de alumínio, esticagem, operação de corte, tratamento térmico e envio para expedição (TORMEM; RÖDER, 2019). Os principais tipos de extrusão são do tipo direta ou da indireta e acontece a quente ou a frio.

O processo de extrusão ocorre com o uso de equipamentos suplementares, destacando-se: prensa extrusora, fornos de aquecimento, máquina para tracionar perfil, esteiras e dispositivos para corte de perfil extrudado (GONZELA, 2017). Neste sentido a prensa extrusora tem a capacidade de forçar o escoamento do alumínio pré-aquecido em fornos utilizando-se de matrizes que determinam a geometria desejada, possibilitando a fabricação de peças com boa tolerância dimensional em grande

quantidade, entretanto os equipamentos e principalmente as matrizes ficam sujeitos a fadiga térmica em função da variação de temperatura que é inerente do processo.

De acordo com Pinedo (2021) o uso de aços ferramentas para realizar trabalho a quente na extrusão de ligas não ferrosas se faz necessário, principalmente para o trabalho a quente, como os aços da série H, que são mais resistentes à fadiga térmica.

Deste modo, o presente trabalho propõe analisar o procedimento de tratamento térmico em uma liga de aço ferramenta H13 sujeita a fadiga térmica de um bloco fictício utilizado em extrusão de alumínio em uma organização localizada no norte do Paraná, e comparar com a metodologia disponível na literatura, tal procedimento foi realizado para melhorar a resistência mecânica da ferramenta a fim de incrementar a produtividade.

1.1 OBJETIVO

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar um diagnóstico do procedimento de tratamento térmico em um bloco fictício ou também conhecido como disco de pressão de aço H13 e comparar com a literatura existente, afim de obter dados práticos para melhorar as suas características a fim de resistir melhor ao efeito da fadiga térmica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar o processo de extrusão de alumínio empregado na organização localizada no norte do Paraná;
- Mostrar o nível de importância do um bloco fictício na prensa de extrusão;
- Investigar como é realizado o tratamento térmico no aço H13 presente no bloco fictício e comparar com a literatura existente;
- Propor melhorias no processo de tratamento térmico da ferramenta de H13 a fim de melhorar a produtividade.

1.4 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho teve como seu foco a realização de um estudo comparativo, a fim de, verificar como é realizado o tratamento térmico em aço ferramenta H13 utilizado em blocos fictícios para extrusão de alumínio, em uma empresa situada no norte do Paraná, aumentando assim a confiabilidade no procedimento e com a perspectiva de o aço ferramenta obter uma performance melhor quando solicitado no processo de extrusão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ALUMÍNIO

Segundo a ABAL (2021) o alumínio é encontrado no processo de mineração do solo terrestre, com as etapas de extração de bauxita seguido de refinaria e redução, em regiões classificadas com clima tropical, subtropical ou mediterrâneo. A primeira descoberta da existência de bauxita foi em 1821, no sul da França por Berthier (MÁRTIRES, 2009).

O metal conhecido como alumínio não é encontrado na crosta terrestre em sua forma metálica natural, sua estrutura possui outros elementos, entre eles a alumina, com quantidade significativa de óxido e elevada dureza (MÁRTIRES, 2009). A liga de alumínio pode ser utilizada em diversos itens e atividades, desde no tratamento de água até em diversos segmentos industriais, ele é o elemento metálico mais abundante disponível na camada superficial da Terra (CARDOSO et al., 2011).

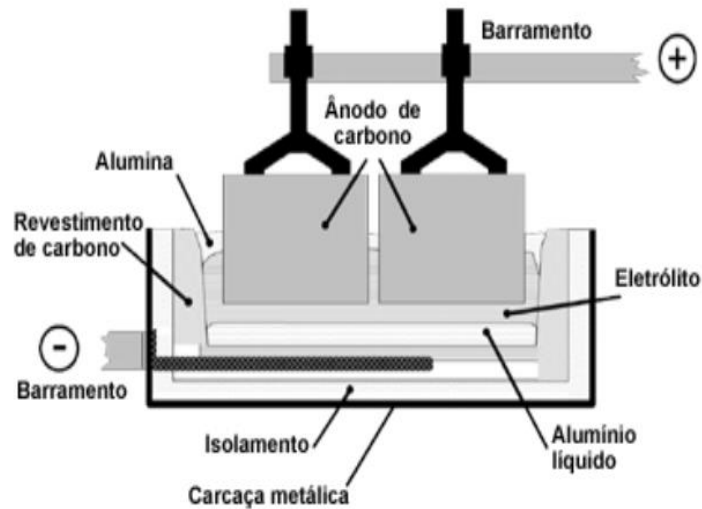
A etapa de mineração de bauxita consiste na retirada do minério do solo acerca de 8 a 13 metros abaixo da superfície, removendo uma camada em torno de 8 metros entre substrato e vegetação (CORREIA et al, 2019). Na sequência da extração da bauxita do solo, o minério é refinado para obter o óxido de alumínio.

O refinamento da bauxita em alumina resume-se em tritura do minério, mistura de cal e soda cáustica, aquecimento em recipiente fechado em alta pressão, dissolução do óxido de alumínio devido a soda cáustica, precipitação com posterior aquecimento para retirada de umidade e calcinação (HYDRO, 2021). A obtenção da alumina com refinamento químico da bauxita é conhecida como processo Bayer (MÁRTIRES, 2009).

O processo Bayer possui custo menor que técnicas usadas antes da sua existência, permitindo aumento da produção de alumina, porém, demanda uma quantidade de energia considerável e ocasiona emissão de poluentes (MASSARA, 2004). Posteriormente a etapa de refinamento, ocorre a fase de redução para obtenção do alumínio.

A fase de redução da alumina em alumínio é conhecida como Hall-Hérault, fazendo uso de duas toneladas de alumina para produção de 1 tonelada de alumínio (ABAL, 2021). Na Figura 1 observa-se como a etapa de redução acontece.

Figura 1 - Transformação da alumina em alumínio metálico



Fonte: ABAL (2021)

O processo Hall-Hérould de transformação de alumina em alumínio metálico, consiste em gerar uma diferença de potencial entre os barramentos de polos distintos com alumina banhada em criolita, separando assim, oxigênio do metal que posteriormente fica retido nos ânodos de carbono (MASSARA, 2004). Com o oxigênio retido nos ânodos, o alumínio se deposita em estado líquido no fundo da cuba eletrolítica, surgindo assim alumínio primário (ABAL, 2021).

Para atender diversas aplicações da indústria metalmeccânica, o alumínio primário pode ser adquirido em forma de lingotes, placas, barras e tarugos (CARDOSO et al., 2011). Com a disponibilidade do alumínio primário para aquisição, uma das principais aplicações que faz uso é o segmento da indústria de extrusão de alumínios (TORMEM; RÖDER, 2019).

2.2 EXTRUSÃO DE ALUMÍNIO

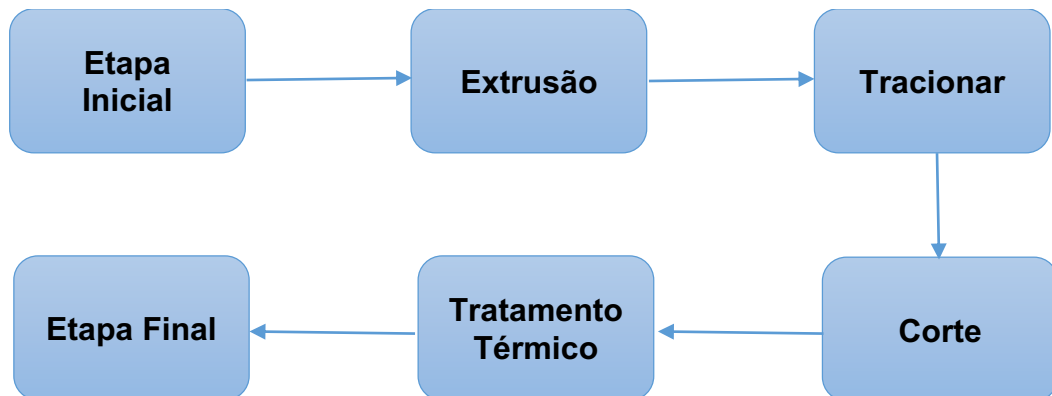
Para Weiss (2012), extrusão de alumínio pode ser definida de forma simplificada, como uma mudança na estrutura inicial da liga para outros tipos de geometria do tipo quadrática, retangular e arredondada. No processo de extrusão, o alumínio está sujeito a esforços do tipo compressivo, ocasionados por uma prensa hidráulica essencial no processo (SANTOS, 2017).

O alumínio possui propriedade mecânica com excelentes características em diversas aplicações na indústria metalmeccânica, e o processo de extrusão tem a capacidade de gerar produção seriada com qualidade. A extrusão de ligas de alumínio pode ocorrer de forma direta ou indireta e ainda com aquecimento ou a frio, esses parâmetros do processo vão depender da propriedade mecânica da liga a ser extrudada e o tipo de seção transversal desejada (CAMPANA, 2008).

O processo de extrusão pode ser caracterizado de duas formas, com a necessidade de aquecimento da matéria prima que apresenta baixa ductilidade ou a frio quando apresentar facilidade de escoamento do metal no processo (SANTOS, 2017). Neste sentido, a extrusão a quente consiste em pressionar de forma uniaxial tarugos pré-aquecidos com auxílio de prensas hidráulicas, através de orifício de ferramentas projetadas para mudar sua seção transversal, semelhante ao escoamento de creme dental saindo do tubo (ABAL, 2021).

De acordo com Dalla Torre e Oiko (2018) o processo de extrusão é dividido em algumas etapas, sendo elas, etapa inicial, extrusão do alumínio, tracionamento, corte, tratamento térmico e etapa final. Na Figura 2 é demonstrado o fluxograma do processo produtivo.

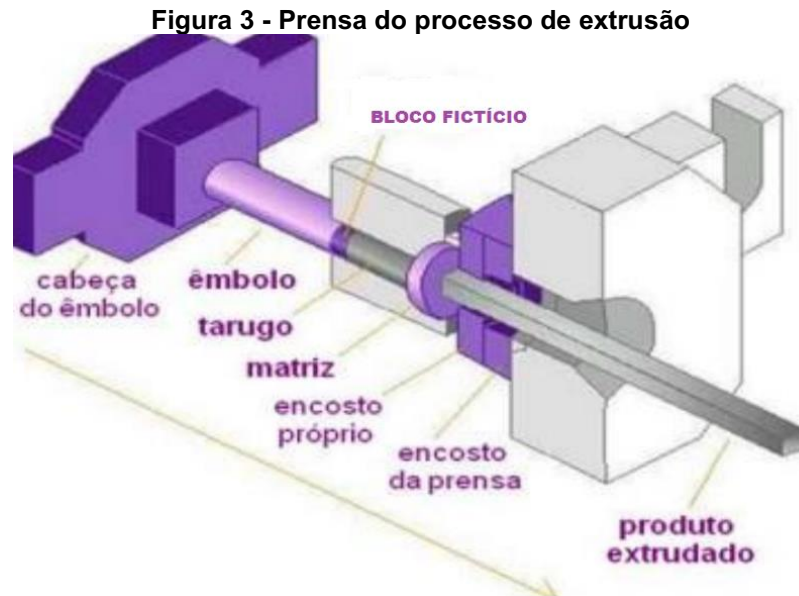
Figura 2 - Fluxograma do processo de extrusão



Fonte: Adaptado de Dalla Torre e Oiko (2018, p.19)

A etapa inicial é formada pelo PCP (planejamento e controle de produção), através do planejamento e controle das ordens de serviço junto a produção, e do comercial efetuando vendas para gerar demanda de produto, com seus respectivos critérios de fabricação alinhados com a necessidade do cliente.

A fase de extrusão se inicia com aquisição da matéria prima na forma de tarugos, o mesmo é alocado em fornos de pré-aquecimento, em seguida é alinhado com o eixo principal da prensa hidráulica, onde a mesma força o escoamento do alumínio através da matriz, gerando o produto extrudado. Na Figura 3 é possível visualizar os principais componentes que formam a prensa hidráulica.



Fonte: Adaptado de Lopes (2011, p.15)

Em seguida, na etapa de tracionar, o perfil é alinhado em uma mesa que possui garras de aprisionamento em suas extremidades, com o objetivo de prendê-los e tracioná-los até obter uma linearidade desejável. O acionamento é realizado pelo operador do equipamento, que tem grau de liberdade para tracionar a barra do perfil após as garras aprisionarem o mesmo.

Posteriormente ao tracionamento do perfil, ocorre o corte dos mesmos de acordo com o tamanho de acomodação de cestos de carregamento, com a presença de barras separando os produtos para facilitar a circulação do calor na etapa seguinte e ainda amenizar defeitos de contato, para assim ser deslocado até os fornos de aquecimento e iniciar a etapa de tratamento térmico.

O envelhecimento ou tratamento térmico controla o crescimento dos precipitados do perfil, iniciando-se na temperatura de solubilização do alumínio durante a etapa de extrusão, seguido por um resfriamento em água, ar forçado ou na temperatura ambiente. O sistema de resfriamento realiza um resfriamento controlado de modo a ter um sólido supersaturado posteriormente no forno de aquecimento, para

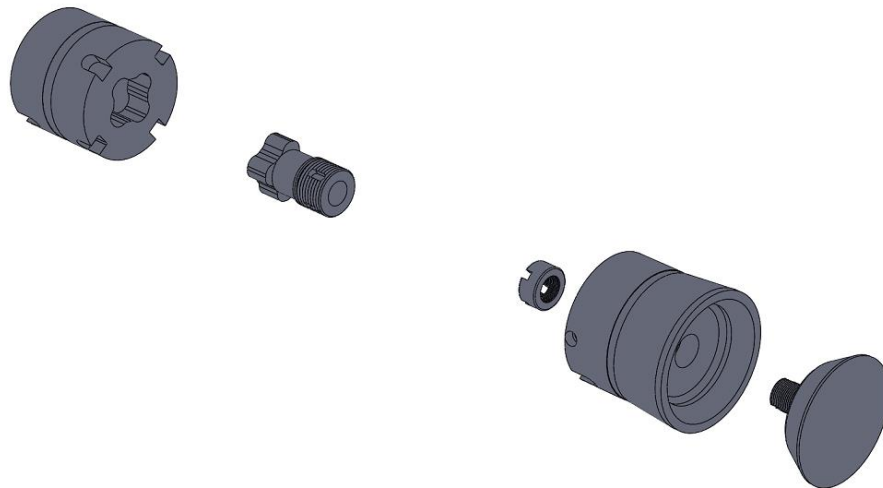
assim obter precipitados extremamente finos e distribuídos homogeneamente na liga, melhorando as propriedades mecânicas do produto.

A etapa final consiste em embalar o lote para não comprometer a qualidade ou gerar deformações, para que na sequência a expedição coloque a carga em caminhões para realizar o transporte ao cliente.

2.3 BLOCO FICTÍCIO

O bloco fictício é um elemento localizado na extremidade do eixo frontal da prensa de extrusão, sendo a geometria que fica em contato com o tarugo previamente aquecido durante todo o tempo dos ciclos de extrusão. Na Figura 4 é apresentada a geometria que forma o bloco fictício.

Figura 4 - Vista isométrica do Bloco fictício



Fonte: Autoria própria (2021)

Segundo Castool (2021), o bloco fictício é um componente alocado na parte frontal do eixo central da extrusora que influencia na qualidade e desempenho dos produtos gerados pelo processo, encarregado de forçar o escoamento da liga através da ferramenta. Neste sentido, o bloco fictício é um elemento que deve ser desenvolvido com uma atenção especial para não comprometer seu desempenho no processo de extrusão.

O bloco fictício necessita de cuidados, pois se trata de um item com alto nível de criticidade que interfere no processo, comprometendo o desempenho do mesmo. O processo de extrusão no seu todo é termomecânico e o controle de variáveis de temperatura, pressão e velocidade é significativo para garantir perfis de alta qualidade (DAMATOOL, 2021; CAPASSO, 2015).

Com a variação de parâmetros de pressão, temperatura e ainda ciclos de extrusão repetitivos, o material do bloco fictício está suscetível ao fenômeno conhecido como fadiga térmica. Para processos de trabalho a quente e resistência a fadiga térmica, o aço ferramenta usual é o H13 (PINEDO, 2021).

De acordo com Damatool (2021), para que o esforço gerado pelo sistema hidráulico da prensa seja transmitido axialmente para seção transversal do tarugo e o alumínio escoe pela ferramenta com eficiência elevada, é importante um recipiente com um sistema de aquecimento mais estável. Na Figura 5 é possível visualizar o bloco fictício alocado dentro do recipiente no eixo principal da prensa.

Figura 5 - Bloco fictício no eixo frontal da prensa



Fonte: Adaptado de Gonzela (2017, p.55)

Com o disco fixo alinhado, inicia-se o esforço compressivo na seção transversal da matéria prima, forçando o escoamento do alumínio através das ferramentas para dar forma ao produto desejado.

Por fim, a AttardEngineering (2021), afirma que um bom desempenho do bloco fictício depende de alguns fatores fundamentais, sendo eles: alinhamento físico e térmico da prensa hidráulica, lubrificação e manutenção em geral. Neste contexto, com todos os cuidados, quando o componente mecânico for solicitado no processo de extrusão, terá a capacidade de atender os ciclos repetitivos de trabalho durante sua vida útil.

2.4 AÇOS FERRAMENTAS

Os aços ferramentas possuem uma série de características interessantes para diversas aplicações na indústria metalmeccânica sendo desenvolvidos e utilizados desde a Revolução Industrial. Também conhecido como aço alta liga, o aço ferramenta possui qualidades do tipo trabalho a frio e quente, resistência ao desgaste, resistência a choque térmico e boa tenacidade (GABARDO, 2008). Sendo assim, aços ferramentas tem a capacidade de realizar trabalhos em condições críticas.

Na visão de Pinedo (2021), aços ferramentas e rápidos são conhecidos de acordo com as seguintes características: sua composição química, tratamento térmico e utilização na indústria metalmeccânica. Na tabela 1 é apresentada a classificação de alguns aços com os respectivos símbolos que os representam.

Tabela 1- Classificação de aços ferramentas e rápidos

Nome	Símbolo	Tipos de aço
Aços ferramentas temperáveis em água	W	W1
Aços ferramentas resistentes ao choque	S	S2, S7
Aços ferramentas para trabalho a frio temperáveis em óleo	O	O1
Aços ferramentas de trabalho a frio de média liga temperáveis ao ar	A	A2,A7
Aços ferramentas para trabalho a frio de alto carbono e cromo	D	D2, D3, D6
Aços para moldes de injeção de polímeros	P	P20, P420
Aços ferramentas de trabalho a quente, ligado ao cromo, molibdênio e vanádio	H	H10, H11, H13, H19
Aços rápido ao tungstênio	T	T1, T5, T15
Aços rápido ao molibdênio	M	M2, M3:2, M7, M42

Fonte: Adaptado de Pinedo (2021, p.71)

Ainda para Pinedo (2021), os elementos de liga são responsáveis por caracterizar as propriedades mecânicas, suas principais particularidades de acordo com seu símbolo, são:

- Aços (W): Apresenta alto teor de carbono e baixa quantidade de elemento de liga, necessitando assim de uma taxa de resfriamento alta para obter uma boa quantidade de martensita durante o processo de têmpera, e não apresenta endurecimento secundário no revenimento;
- Aços (T) e (M): Teor de carbono e elemento de liga é considerável, caracterizado por responder bem ao processo de têmpera e posteriormente ao revenimento, conseguindo assim, níveis de dureza maiores que os outros aços e também uma boa resistência a quente;
- Aços (S): Possui estrutura com quantidade média de carbono presente na martensita e elementos de ligas que favorecem a presença de carbonetos finos, adquirindo resistência a fratura significativa;
- Aços (D): Associação de alto nível de carbono e cromo, que lhe confere boa dureza com a realização de têmpera e resistência ao desgaste abrasivo. Esse

aço também pode ter em sua estrutura vanádio e molibdênio, melhorando seu desempenho no revenimento;

- Aços (O): Reconhecido pela sua resistência ao desgaste durante o trabalho a frio, possibilita resfriamento moderado após a têmpera para obter precipitados de martensita de elevada dureza, devido ao nível alto de carbono;
- Aços (A): Quantidade grande de elementos de liga e carbono, possibilitando realizar uma tempera com posterior controle da taxa de resfriamento ao ar, conferindo-lhe excelente estabilidade dimensional, tenacidade, respondendo bem ao desgaste durante trabalhos a frio;
- Aços (P): Usualmente utilizado na produção de molde com índice de carbono baixo entre a família dos aços, favorecendo a retirada de material em cavidades, possui características de excelente polibilidade e acabamento superficial nos mesmos;
- Aços (H): Caracterizado pela boa tenacidade, resistência à fadiga térmica e trabalho em temperaturas altas devido aos elementos de ligas presentes na sua estrutura.

Dentro deste contexto, Gabardo (2008), recomenda que o aço da família H, mais especificamente o H13, contendo em sua estrutura cromo, molibdênio, vanádio, silício e tungstênio é o mais indicado para se trabalhar em processos termomecânicos que envolvem temperaturas acima de 500 °C. Nesse contexto o cromo favorece a operação de tempera, o molibdênio atua para possibilitar que o resfriamento seja ao ar após a tempera, o vanádio melhora a resistência a fadiga e ainda com o tungstênio maximiza a resistência de trabalhos da liga em temperaturas acima de 540°C, enquanto o silício está associado ao desgaste à erosão (SOUZA, 1989).

A liga H13 se destaca por sua fácil aquisição e ainda possui propriedades homogêneas em toda sua estrutura após tratamento térmico, capacidade de absorção de energia de impacto elevada e resistência a trabalhos cíclicos com variação de temperatura (LEANDRO, 2005). Neste sentido, o aço H13 é utilizado em diversas aplicações que envolvem operações a quente e esforços simultaneamente, como por exemplo a extrusão de ligas de alumínio (GABARDO, 2008).

Em operações que ocorre variação de temperatura e esforços cíclicos, há uma tendência em ferramentas de iniciar uma nucleação de trinca em sua estrutura, que posteriormente aumenta em um sentido preferencial até que aconteça a falha, esse

processo é conhecido como fadiga térmica (SERIACOPI, 2013). Deste modo, o aço H13 apresenta excelentes características para responder a processos termomecânicos, devido aos seus elementos de liga atuarem para aumentar o desempenho e vida útil da ferramenta quando solicitada.

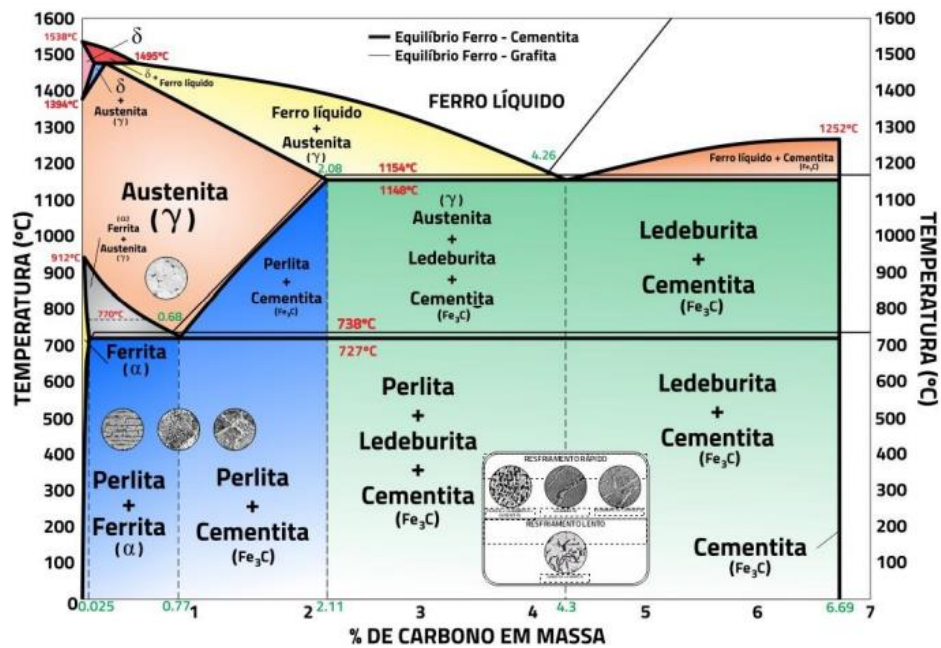
2.5 TRATAMENTO TÉRMICO

A descoberta da existência dos metais ocorreu em torno de 1000 a.C., o tratamento térmico foi reconhecido posteriormente pelos romanos, melhorando a propriedade mecânica de suas armas, aquecendo as mesmas com carvão vegetal e resfriando na sequência em salmoura (TEIXEIRA FILHO, 2019). A humanidade faz uso das aplicações dos metais há muitos anos, buscando assim desenvolver e aumentar a capacidade de trabalho das ferramentas feitas de ligas metálicas.

Aços com carbono em sua estrutura, tem a capacidade de melhorar a resistência de acordo com a variação percentual do mesmo, sendo que, para menores e maiores níveis de carbono, sua ductilidade e dureza se alteram de acordo com um aquecimento até o estado austenítico e posterior taxa de resfriamento (FERNANDES, 2019). Em ligas de aços ferramentas, o tratamento térmico consiste em aquecer e resfriar a peça para modificar sua microestrutura devido a característica conhecida como alotropia e, assim, obter ganho de propriedade mecânica em suas diversas aplicações (ITARAÍ, 2021).

Segundo Pinedo (2021), o controle da característica alotrópica do ferro associado ao carbono e a solubilidade de carbono na estrutura com variação de temperatura no tratamento térmico, determina as propriedades desejáveis para o seu desempenho quando solicitado. Na Figura 6 é demonstrado um diagrama ferro-carbono, onde é possível observar as diferentes transformações das ligas em função da temperatura.

Figura 6 - Diagrama com as fases ferro-carbono

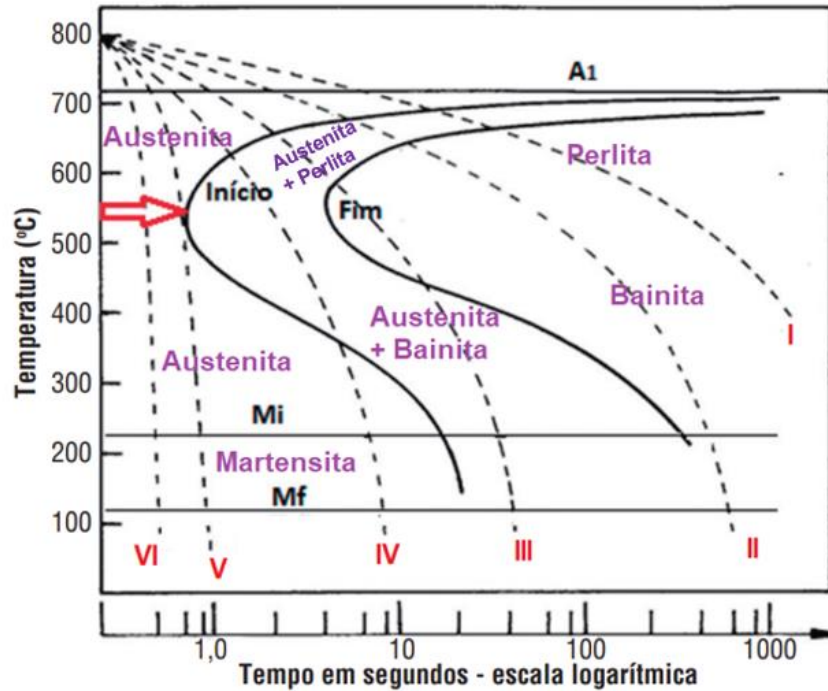


Fonte: Monteiro (2019, p.4)

Para uma dada situação de equilíbrio em que se tenha 0,77% de carbono em uma liga de ferro-carbono, e aquecimento com temperatura suficiente de austenitização acima de 727°C com posterior taxa de resfriamento baixa, a microestrutura seria perlítica (MONTEIRO, 2019). Peças com estruturas perlíticas são caracterizadas por ter uma parte de ferrita e cementita simultaneamente, com propriedades mecânicas particularizadas (CHIAVERINI, 1977).

Já em uma condição fora do equilíbrio em que o aquecimento de uma peça é realizado até a fase de austenita e a taxa de resfriamento é alta, a estrutura pode ter a precipitação de bainita ou martensita (CANDIDO, 2021). Para prever a microestrutura resultante na liga de aço carbono em diferentes taxas de resfriamento, são utilizadas curvas de Transformação-Temperatura-Tempo (TTT) no tratamento térmico (MONTEIRO, 2019). Na Figura 7 é possível visualizar várias curvas de resfriamento e as possibilidades de fases que podem aparecer na estrutura do material.

Figura 7- Curvas de resfriamento TTT genérico para diferentes tempos com aumento gradual de I (taxa menor para resfriar) até VI (taxa maior para resfriar) de um aço carbono

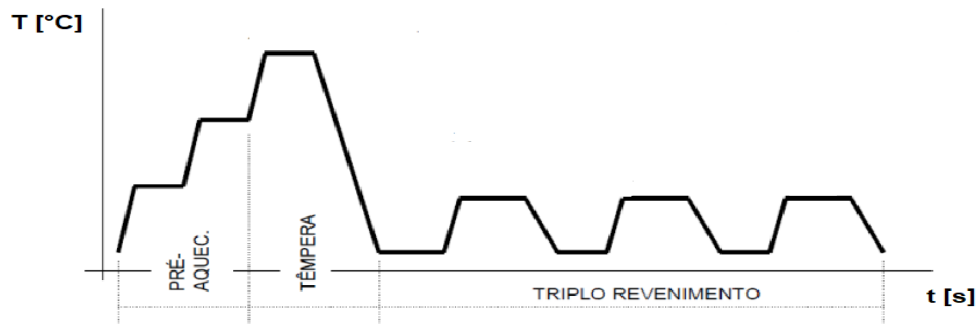


Fonte: Adaptado de Vendramim (2014, p.51)

Partindo do estado austenítico com posterior resfriamento controlado, as curvas I, II e III visualizadas na Figura 7, apresentam microestrutura formada de perlita grosseira em I, onde diminuirá de forma gradual de tamanho em II até III (CANDIDO, 2021). Um ponto muito importante é que a curva TTT demonstra a mínima taxa de resfriamento possível para adquirir uma liga martensítica que é amplamente utilizada em diversas aplicações, devido suas excelentes propriedades após o processo de têmpera e revenimento, sinalizado por uma seta vermelha (MONTEIRO, 2019).

A microestrutura martensítica possui excelentes características de alta dureza e tenacidade, quando realizado o processo de têmpera e posterior revenido adequado para tratar a fragilidade do material, ficando então conhecida nas ferramentas como martensita revenida (MONTEIRO, 2019). Na Figura 8 é mostrado o ciclo do tratamento térmico realizado na liga metálica do aço H13.

Figura 8- Gráfico de ciclo de tratamento térmico genérico para um liga metálica H13



Fonte: Adaptado de Itaraí (2021, p.13)

O ciclo do tratamento térmico de um aço ferramenta inicia-se com um pré-aquecimento para alívio de tensões, ocasionado pelos processos de usinagem responsável por dar forma na geometria da ferramenta com temperaturas uniformes até 815°C (FERNANDES, 2019). Em seguida, o aquecimento continua até a temperatura de austenitização em torno de 1030 °C para todos elementos de liga se dissolverem e, posteriormente ocorre um resfriamento rápido caracterizando a têmpera (ITARAÍ, 2021).

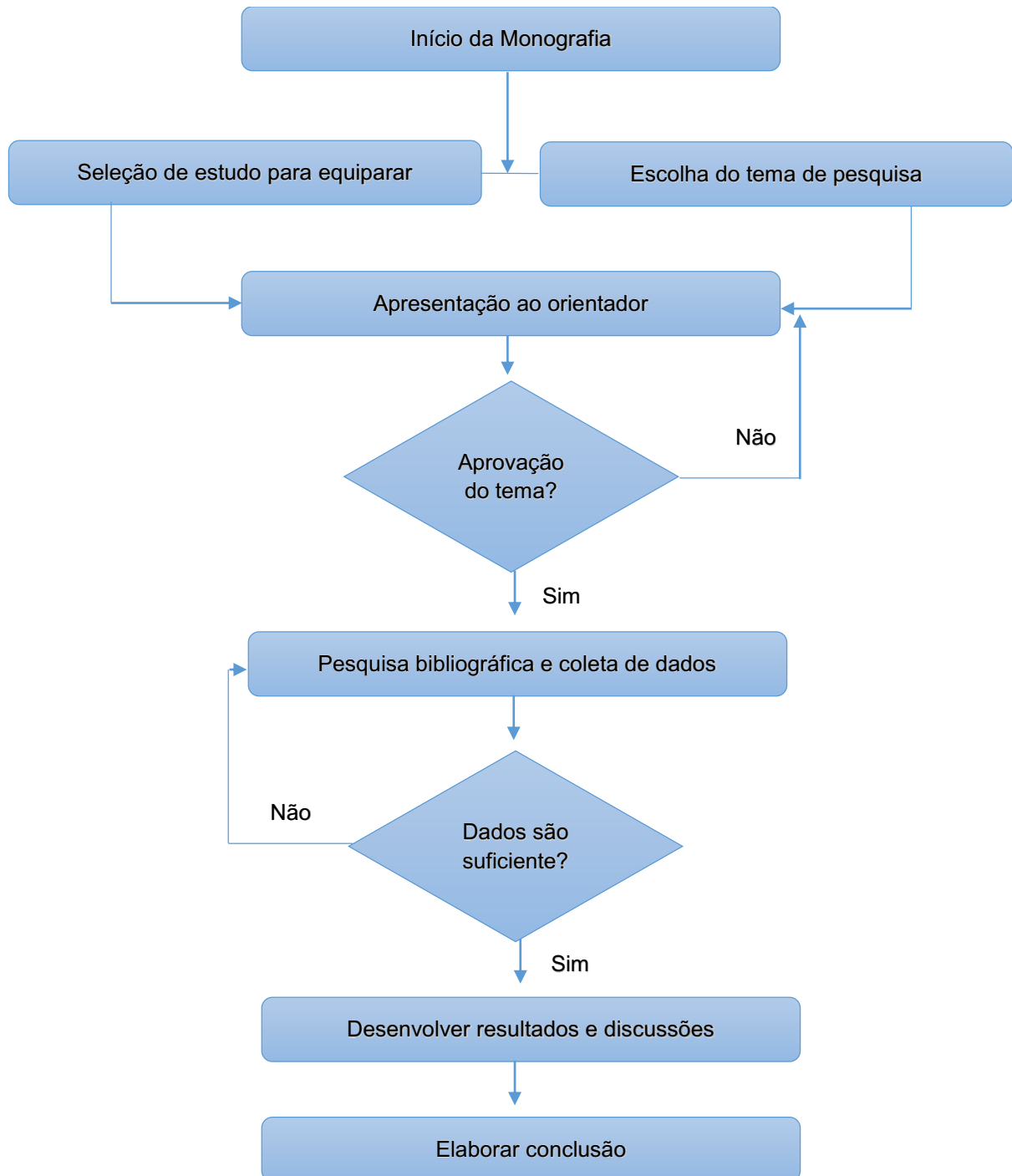
Com o processo de têmpera, a liga martensítica é caracterizada por ser extremamente dura com baixo nível de tenacidade e tensões internas, devido a tentativa dos átomos de carbono se posicionarem novamente na estrutura como ferrita durante o resfriamento (ITARAÍ, 2021). A etapa de revenimento consiste em reaquecer a peça em temperatura em torno de 540 °C por um período de 2 horas, para alívio das tensões internas reduzindo dureza, porém, ocorre aumento significativo da tenacidade (FERNANDES, 2019). O revenimento pode ser duplo ou triplo de acordo com o grau de dureza ou tenacidade solicitada durante o trabalho da ferramenta.

Segundo Totten et al. (1993), para definir o tempo em que o material deve ficar na temperatura de austenitização e obter uma estrutura martensítica, os parâmetros que influenciam no processo são posicionamento, peso e dimensões da carga no forno, além da eficiência do próprio forno e o tipo de liga metálica. O ciclo de tratamento térmico é um processo complexo que melhora o desempenho das ferramentas, onde o controle do mesmo por meio do acompanhamento da variação de temperatura em relação ao tempo é importante.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa é do tipo exploratória, que segundo (GIL, 2022) tem a finalidade de aproximar os interessados ao conteúdo estudado, fazendo uso de pesquisa no local, bibliográfica e análise de exemplos. Este trabalho foi realizado em parceria com uma empresa de extrusão de alumínios situada no norte do Paraná, onde o autor realizou estágio, com o propósito de acompanhar o procedimento de tratamento térmico em um elemento crítico utilizado no processo de extrusão, e equiparar com os dados do trabalho de diplomação de Monteiro (2019), com o título: Desenvolvimento de um padrão para tratamento térmico em matrizes de forjamento de aço ferramenta H13. Na Figura 9 se representa o fluxograma da proposta inicial das atividades a serem desenvolvidas.

Figura 9 - Fluxograma do trabalho



Fonte: Autoria própria (2021)

A escolha do trabalho de Monteiro (2019) para comparação de resultados e dados com o estudo de caso da empresa em questão não foi por acaso, e sim por se tratar de uma padronização de tratamento térmico da liga H13, que é a mesma do aço ferramenta utilizado como matéria prima na fabricação do bloco fictício. Neste

sentindo, deseja-se fazer um comparativo de ambos tratamentos térmicos com uma abordagem qualitativa, recolhendo dados do tipo, temperatura e tempo de aquecimento das peças nos fornos de tratamento térmico.

O estudo foi dividido em quatro partes:

- Explicar a proposta do TCC escolhido para comparar com o da empresa situada no norte do Paraná;
- Compreender e descrever como o procedimento de tratamento térmico é realizado na empresa situada no norte do Paraná;
- Comparar o procedimento de tratamento térmico da liga H13, entre o trabalho referenciado com o da empresa parceira;
- Propor melhoria para aumentar a vida útil do bloco fictício.

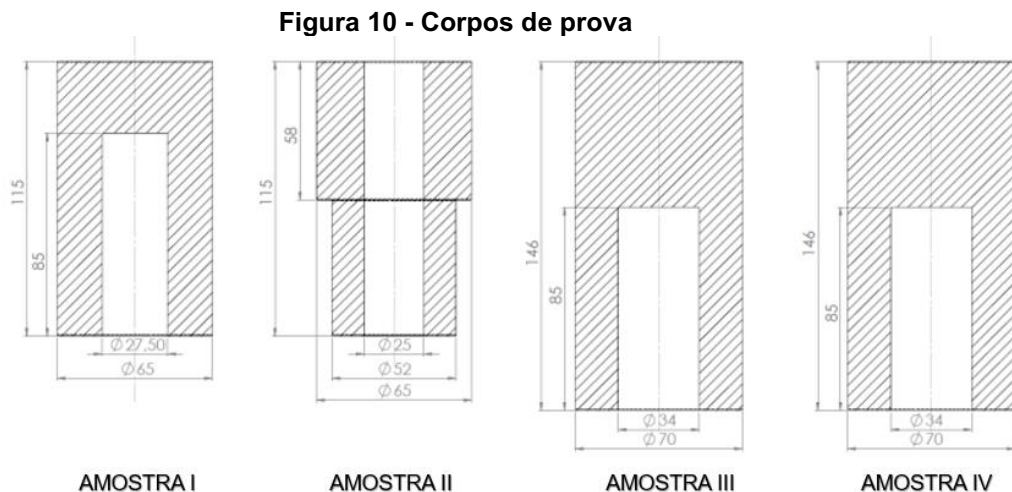
Para o desenvolvimento das atividades foram utilizados referenciais bibliográficos, com o propósito de entender prováveis falhas ou melhorias que possam ocorrer com o bloco fictício em todo processo de estudo que o envolve.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS ESTUDOS DE CASO

4.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO 1

O estudo 1 utilizado neste trabalho se trata de um trabalho de conclusão de curso do acadêmico Rodrigo Martini Monteiro, para obtenção do título de Bacharel no curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, no ano de 2019.

Esse trabalho propõe um padrão de tratamento térmico por têmpera e revenimento em matrizes de forjamento de aço ferramenta do tipo H13 em uma empresa do setor automotivo, com o intuito de reduzir imprevistos, custos e realizar o mesmo para não terceirizar esse serviço, obtendo-se assim, uma estrutura de propriedade mecânica favorável na sua aplicação. Inicialmente foram separados quatro corpos de prova caracterizados em ser de aço H13 com dimensões variadas de acordo com a figura 10.

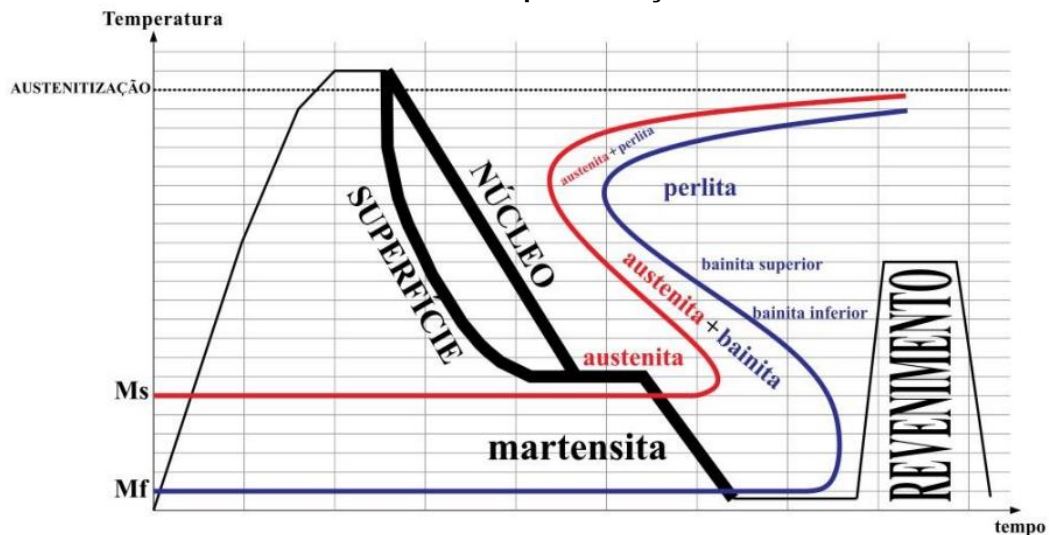


Fonte: Adaptado de Monteiro (2019, p.30)

Em seguida essas amostras foram alocadas dentro de uma carga padrão que vai ser tratada termicamente, com espaçamento entre as peças monitorado e organizado de forma amenizar os efeitos da diferença de aquecimento e resfriamento entre a superfície e núcleo do aço ferramenta, fazendo com que absorção e dissipação de calor da etapa seja mais homogêneo pela carga. Para o controle da taxa de

resfriamento e obtenção de uma estrutura com menos tensão interna pode ser utilizada água, ar, salmoura, óleo, sal, nitrogênio sobre pressão (ÍTARAI, 2021). A seguir é possível visualizar pela figura 11 a diferença no resfriamento entre núcleo e superfície em ligas de dimensões consideráveis.

Figura 11- Diagrama de representação da curva TTT genérico com martêmpera e posterior revenido simultaneamente para um aço carbono



Fonte: Monteiro (2019, p.19)

Com a carga e as amostras de aço H13 devidamente posicionada em uma caixa metálica, a mesma é introduzida no forno para que o tratamento comece. O forno utilizado é composto por material específico caracterizado em ter resistência a altas temperaturas, internamente formado de tijolos e refratários especiais com aquecimento sendo realizado por resistências elétricas, transferindo assim calor para carga por convecção (COMBUSTOL, 2022). Pela figura 12 é possível visualizar a entrada e saída do forno utilizado no tratamento térmico da carga.

Figura 12- Forno utilizado para a têmpera da carga



Entrada

Saída

Fonte: Monteiro (2019, p.31)

O processo de tratamento térmico é dividido em aquecimento para atingir o estado de austenitização completa em 3 etapas, seguido por resfriamento banhado em óleo até a carga atingir 120 °C com posterior resfriamento em ar até 70 °C e finalizando com outros 3 ciclos de aquecimento e resfriamento ao ar ambiente reconhecido como revenimento. Pela tabela 2 é possível visualizar um breve resumo de como ocorre o tratamento térmico.

Tabela 2 - Resumo dos ciclos de tratamento térmico do estudo 1 do trabalho

Estágio	Etapas	Tempo	Temperatura	Atmosfera	Resfriamento
Austenitização	1	30Min	600°C	Neutra	-
Austenitização	2	1Hs	900°C	Neutra	-
Austenitização	3	1Hs	1030°C	Neutra	-
Resfriamento	4	-	1030°C a 120°C	Ar	Banho em óleo
Resfriamento	5	-	120°C a 70°C	Ar	Ao ar até 70°C
1°Revenimento	6	4 a 5Hs	540°C	Ar	Ao ar até 25°C
2°Revenimento	7	4 a 5Hs	540°C	Ar	Ao ar até 25°C
3°Revenimento	8	4 a 5Hs	540°C	Ar	Ao ar até 25°C

Fonte: Adaptado de Monteiro (2019, p.34)

Durante o tratamento térmico uma amostra foi retirada após a etapa de resfriamento e as demais na sequência logo ao término de cada um dos três revenimentos, totalizando as quatro amostras. Posteriormente as análises metalográficas são realizadas para determinar suas respectivas durezas Rockwell C com uma carga de 150 quilos de força. O indentador é posicionado no núcleo da peça para abranger a maior área possível, evitando região que tenha apenas carboneto ou austenita retida para não comprometer os resultados. Pela tabela 3 tem se os valores de durezas adquiridos a partir de uma média de cinco medidas.

Tabela 3 - Dureza das amostras

Amostras	Dureza Média (HRc 150 kg)
TCC 1	53,0
TCC 2	53,0
TCC 3	53,5
TCC 4	53,5

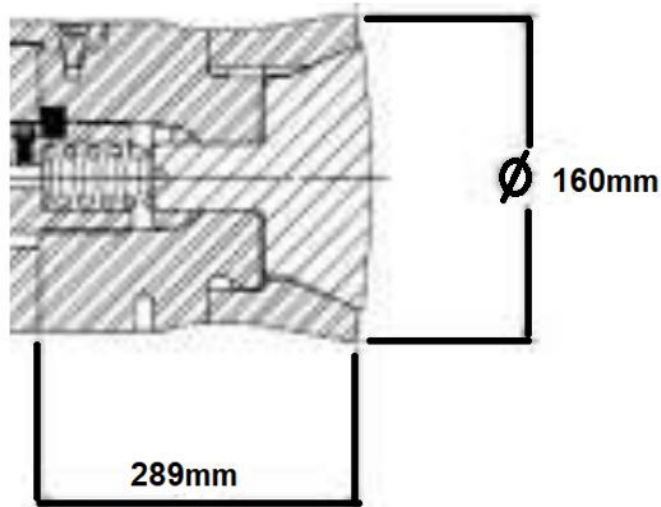
Fonte: Monteiro (2019, p.46)

4.2 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 2 (*IN LOCO*)

O estudo de caso 2 se trata de um acompanhamento, ou seja, *in loco* de um processo de tratamento térmico de um aço ferramenta do tipo H13 que é utilizado em um elemento crítico na extrusão de alumínio por uma empresa localizada na região noroeste do Paraná.

Inicialmente o conjunto de bloco fictício visto pela figura 4 é alocado com suas partes em pé com espaçamento controlado em um cesto, com intuito de tratar uma carga com no máximo 200 quilos e favorecer a troca de calor dentro do forno de tratamento térmico. Pela figura 16 é possível visualizar o conjunto de bloco fictício montado com suas respectivas dimensões de seção transversal e tamanho horizontal a ser tratado termicamente.

Figura 13 - Bloco fictício com dimensões



Fonte: Autoria própria (2022)

Com a carga devidamente posicionada no cesto, o mesmo é deslocado com auxílio de ponte rolante para dentro do forno 2 de têmpera e posteriormente forno 1 de revenimento para assim realizar o ciclo do tratamento do aço ferramenta H13. Os fornos em questão são do tipo poço de atmosfera controlada com troca de calor por convecção gerado por resistências elétricas com material refratário resistindo à altas temperaturas atendendo às principais normas brasileiras e segurança do trabalho (GREFORTEC, 2022). A seguir pela figura 14 é possível visualizar os respectivos fornos 1 e 2 com motores em seu topo que rotaciona hélice para melhorar a circulação de calor.

Figura 14 - Forno de revenimento (1) e têmpera (2)



FORNO 1

FORNO 2

Fonte: Autoria própria (2022)

O tratamento térmico se inicia no forno 2 com aquecimento até a temperatura de 1030 °C de austenitização em três etapas de modo a reduzir as tensões internas na liga, com posterior resfriamento de ar forçado até aproximadamente 60 °C para na sequência resfriar apenas em temperatura ambiente representado pela etapa cinco do ciclo, ficando assim uma liga dura com característica martensítica. A tabela 4 resume o ciclo de tratamento térmico realizado até etapa cinco e posterior revenimento.

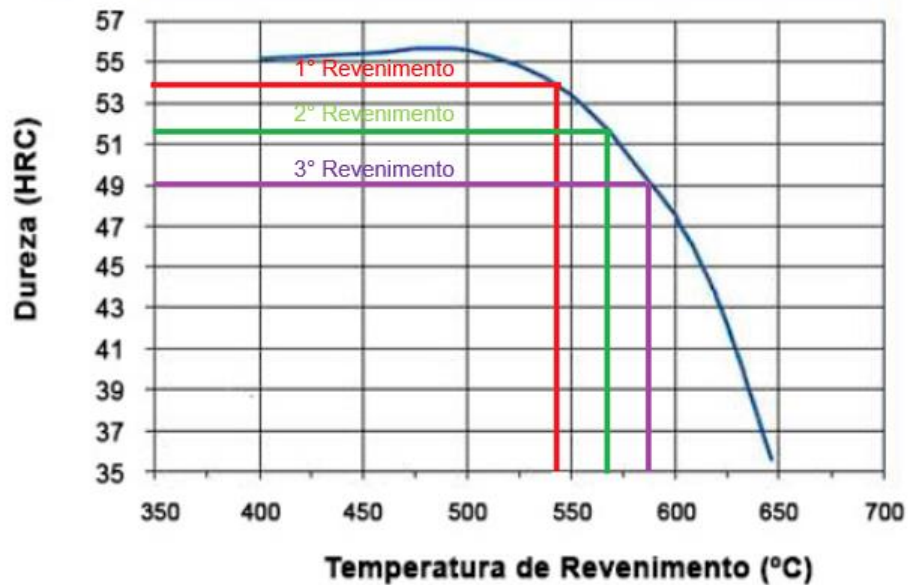
Tabela 4 - Ciclos de tratamento térmico do estudo 2 para o aço ferramenta

Estágio	Etapa	Tempo	Temperatura	Atmosfera	Resfriamento
Austenitização	I	30Min	600°C	Neutra	-
Austenitização	II	30Min	900°C	Neutra	-
Austenitização	III	1:30Hs	1030°C	Neutra	-
Resfriamento	IV	2Hs	1030°C a 60°C	Ar	Ar forçado
Resfriamento	V	-	Ambiente	Ar	Ambiente
1°Revenimento	VI	2Hs	540°C	Neutra	Ambiente
2°Revenimento	VII	2Hs	560°C	Neutra	Ambiente
3°Revenimento	VIII	2Hs	580°C	Neutra	Ambiente

Fonte: Autoria própria (2022)

Em um momento seguinte são realizadas três etapas de revenimento, aquecendo a liga inicialmente em aproximadamente 540 °C para reduzir as tensões internas e aumentar a tenacidade do material, com o resfriamento sendo realizado em ar ambiente até atingir temperaturas menores de 60 °C para fazer o próximo revenimento. O revenimento é realizado para alívio de tensões interna na liga ocasionadas pelo aquecimento e resfriamento rápido durante a têmpera, aumentando assim a capacidade do aço ferramenta absorver mais energia em impactos (FERNANDES, 2019). Após todo revenimento são retiradas 3 amostras da carga para determinar a dureza média com carga de 150 quilos de força e assim a temperatura mais adequada para o próximo revenido através da curva que relaciona dureza Rockwell C por temperatura de revenimento. A seguir figura 15 com a curva que representa essa relação para o aço H13.

Figura 15 - Curva de dureza Rockwell C por temperature Celsius de revenimento



Fonte: Adaptado de SerraMetal (2022)

Nas três etapas de revenimento é recomendado antes de iniciar, fazer o uso do pirômetro manual para verificar se a liga está em uma temperatura abaixo de 60°C para não comprometer as propriedades finais. O pirômetro se trata de um aparelho que tem a capacidade de reconhecer uma faixa mais ampla de comprimento de onda no espectro do infravermelho possibilitando mensurar a taxa de emissão de energia radiante e determinar a temperatura de objetos sem a necessidade de com tato físico.

Com o revenimento realizado foi possível determinar as respectivas durezas Rockwell C em cada etapa. A dureza Rockwell C é uma grandeza que representa a capacidade de o material resistir a deformação plástica pontual, sendo mensurada pela profundidade de que um penetrador específico com carga pré-determinada adentra na superfície da liga (YAMANAKA et al, 2015). A seguir pela tabela 5 é possível visualizar os resultados de dureza obtidos nas amostras em cada etapa de revenimento a partir de uma média de três medidas.

Tabela 5 - Dureza das amostras obtidas pelo ensaio de Rockwell na escala C

Amostras	Dureza Média (HRc 150 kg)
Pós têmpera	54,0
1º Revenimento	53,5
2º Revenimento	51,5
3º Revenimento	49

Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 COMPARAÇÕES ENTRE ESTUDO DE CASO 1 E 2

Inicialmente os fornos utilizados para tratar o aço ferramenta possui características distintas, no primeiro caso é apenas um forno dividido em duas câmaras e um poço no seu ponto inferior, onde a primeira câmara é para austenitização do material e a segunda é um resfriamento com atmosfera controlada, seguido pelo poço para resfriamento com fluido, enquanto no segundo caso são utilizados dois fornos do tipo poço em que o forno 1 é responsável pela etapa de revenimento e o 2 pela etapa de austenitização, com o resfriamento sendo realizado por ar forçado em outro ambiente e necessidade de ponte rolante para deslocar a carga tratada. Ambos fornos possuem em sua estrutura material refratário com troca de calor ocorrendo por convecção através de aquecimento por resistências elétricas em atmosfera controlada. A figura 16 é possível visualizar a entrada e saída do forno caso 1 e os demais fornos do caso 2.

Figura 16 - Forno de tempera e revenimento

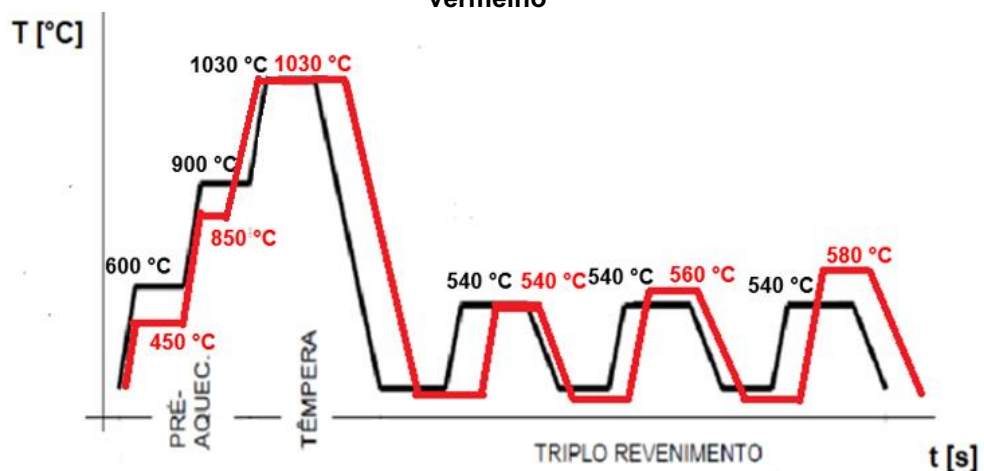


Fonte: Adaptado de Monteiro (2019, p.31)

Com o início dos ciclos de tratamento térmico em ambos estudos de caso, a primeira parte é austenitização com dois patamares antes de atingir o pico de temperatura, nesses dois patamares o tempo se diferencia no segundo patamar e as temperaturas são distinta, e finalmente no pico apenas o tempo se modifica. Com o pico de austenitização, o resfriamento ocorre diferente para ambos casos, pois o caso 1 é resfriado em óleo até atingir 120 °C com posterior resfriamento em ar ambiente até 70 °C, enquanto o caso 2 é retirado do forno e resfriado com ar forçado até alcançar temperatura em torno de 60 °C, para assim fazer as etapas de revenimento.

Na sequência o revenimento acontece em 3 etapas, se caracterizando com o caso 1 em temperatura e tempo constante nas respectivas 3 etapas de 540 °C e tempo médio de 4 a 5hs de aquecimento, enquanto o caso 2 a temperatura aumenta 20 °C para cada duas horas em cada uma das três fases do tratamento, para os dois casos o resfriamento ocorre em ar na temperatura ambiente. A seguir é possível visualizar com a figura 17 as curvas que representam o estudo de caso 1 e 2 com suas respectivas temperaturas.

Figura 17- Curva de tratamento térmico do estudo de caso 1 em preto e o estudo de caso 2 em vermelho



Fonte: Adaptado de Itarái (2021, p.13)

Para ambos casos 1 e 2, durante os ciclos de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento triplo é retirado uma amostra após o resfriamento da têmpera e ao final de cada etapa de revenimento, totalizando assim quatro amostras para realizar análise de dureza Rockwell C com carga de 150 quilos e indentador em contato com maior área possível no núcleo das amostras, para o caso 1 as medidas foi extraída com uma média de cinco leituras e o caso 2 uma média de três leituras. As durezas obtidas para o caso 1 foi um tanto inesperado, pois a dureza não decaiu, enquanto para o caso 2 a dureza decaiu conforme esperado pela esferoidização dos carbonetos. A tabela 6 a seguir é possível visualizar as durezas obtidas.

Tabela 6 - Dureza das amostras obtidas pelo ensaio de Rockwell na escala C

Tratamento	CASO 1	CASO 2
	Dureza Média (HRc 150kgf)	Dureza Média (HRc 150kgf)
Pós Têmpera	53,0	54,0
Pós 1° Revenido	53,0	53,5
Pós 2° Revenido	53,5	51,5
Pós 3° Revenido	53,5	49

Fonte: Autoria própria (2022)

No primeiro caso o autor Monteiro (2019), identificou a necessidade de padronizar o tratamento do aço ferramenta do tipo H13 utilizado em forjamento de aços na empresa em questão, com apoio de referências literárias e análise de dureza. O aço ferramenta destaca-se em ter propriedades como a tenacidade e resistência a quente, fundamental em processo de forjamento a quente de aços que compõem a estrutura de peças automobilísticas (MESQUITA; HADDAD, 2009). Nesse contexto com ausência de tenacidade, as matrizes de forjamento com estrutura de liga H13 sujeito a esforços repetitivos e variação de temperatura poderá ocorrer nucleações de trincas (SERIACOPI, 2013).

No segundo caso foi realizado o acompanhamento do procedimento de tratamento térmico no aço ferramenta H13 presente no disco fictício utilizado na frontal do eixo da prensa de extrusão a quente, verificando assim a confiabilidade fazendo uso de referências bibliográficas. Diante da utilização da liga H13 no processo de conformação a quente com temperatura e esforços variando, o bloco fictício está sujeito a fadiga térmica (Pinedo, 2021). A fadiga térmica é reconhecida quando o material é colocado em condições cíclicas, ocasionando tensões e deformações na estrutura podendo ocorrer nucleação de trincas (SILVA NETO, 2019).

Consegue-se assim uma relação entre os dois casos em que ambos estão sujeitos a nucleações de trinca, comprometendo assim a vida útil do aço ferramenta utilizado nos processos de extrusão e forjamento sujeito a esforços cíclicos e variações de temperatura. A presença de trinca em aços caracterizados como dúctil, pode fazer ocorrer falhas inesperadas, com nível de tensão nominal abaixo da tensão de escoamento do material (NORTON, 2013). Nesse sentido, uma proposta a ser analisada visando redução de custos, trocas desnecessárias de ferramentas, prevenção de falhas catastróficas é a implementação de ensaios por líquido penetrante.

5 CONCLUSÃO

Com o trabalho realizado foi possível concluir que, através de revisões bibliográficas e acompanhamento prático no local, o tratamento térmico é de fundamental importância na melhora das propriedades mecânicas do aço H13, aumentando a vida útil de aços ferramentas em suas diversas aplicações na indústria de conformação mecânica.

A liga tratada termicamente no estudo referenciado utilizado no processo de forjamento, apresentou uma dureza resistente devido ao material ter pico de dureza secundário durante o revenido, para assim atender a necessidade da sua aplicação que exige tenacidade a fratura.

Com o tratamento térmico se iniciando na têmpera e finalizado com três posteriores revenidos, o bloco fictício saiu de uma dureza de 54 para 49 Rockwell C, dentro do valor esperado. Desse modo o bloco fictício tem uma tensão interna menor e conseqüentemente uma tenacidade maior, fazendo com que a ferramenta tenha uma resistência aumentada em relação aos esforços cíclicos e assim conseqüentemente maior vida útil.

Em ambos casos pode-se constatar que a ferramenta está sujeita a nucleações de trincas, devido a variações de esforços e temperaturas, fazendo com que realmente seja necessário um acompanhamento por meio de ensaios por líquido penetrante, evitando assim falhas catastróficas.

6 ESTUDOS FUTUROS

Com os resultados obtidos no presente trabalho, como sugestão de continuidade, temos;

1. Realizar ensaio de impacto para avaliar aumento da tenacidade do bloco fictício;
2. Submeter a ferramenta em tensões cíclicas para avaliar possíveis nucleações de trincas;
3. Repetir tratamento térmico com diferentes taxas de resfriamento e aquecimento na etapa de revenimento e assim reavaliar dureza.

REFERÊNCIAS

- ABAL. **História da Indústria do Alumínio**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-da-industria-do-aluminio/>. Acesso em: 7 out. 2021.
- ABAL. **Processo de extrusão: Processos de produção**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/extrusao/>. Acesso em: 3 out. 2021.
- ABAL. **Alumínio: Cadeia Primária**. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em: 8 out. 2021.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por líquidos penetrantes**. ABENDE Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos. São Paulo, 2008. 68 p.
- ARAUJO, João Victor de Sousa et al. O processo de anodização do alumínio e suas ligas: Uma abordagem histórica e eletroquímica. **Quim. Nova**, São Paulo, Vol. 44, No. 8, 999-1011, 2021. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170748>. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/quimicanova.s bq.org.br/pdf/RV2020-0422.pdf>. Acesso em: 10 out. 2021.
- ATTARDENGINEERING. **Product Catalog**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.attardengineering.com.au/product-catalog/>. Acesso em: 15 out. 2021.
- CAMPANA, Rodrigo Camargo. **Parâmetros de processo, microestrutura e textura das ligas de alumínio AA6063 e AA6082 extrudadas**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CANDIDO, Matheus Gasparotto. **Estudo comparativo da temperabilidade entre os aços AISI: 1045, 4340, H13 e D6**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CAPASSO, Gisela Tioffi. **Otimização do processo de extrusão de perfis de alumínio através de análise de não conformidades**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CARDOSO, José Guilherme da Rocha et al. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 43-88, mar. 2011.
- CASTOOL. **DUMMY BLOCKS**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.castool.com/extrusion/dummy-blocks/>. Acesso em: 14 out. 2021.
- COMBUSTOL. **FORNOS**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://combustol.com.br/fornos-fornos-para-tratamento-termico-do-aco/>. Acesso em: 28 mar. 2022.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977.

CORREIA, Maria Elizabeth Fernandes et al. Fauna edáfica no processo de revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas, Pará. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 1048-1060, 2020.

DALLA TORRE, Matheus Henrique; OIKO, Olívia Toshie. ANÁLISE DE NÃO CONFORMIDADES EM UMA INDÚSTRIA DE EXTRUSÃO DE ALUMÍNIO. **Trabalhos de Conclusão de Curso do DEP**, 2018.

DAMATOOL. **Dummy Block**. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://www.damatool.com/en/urunler/9-dummy-block.html>. Acesso em: 15 out. 2021.

FERNANDES, André Felipe. **Influência do tratamento térmico do aço ferramenta AISI H13 no acabamento superficial após usinagem**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GABARDO, João Fredolim. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13**. 2008

GIL, Antonio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. Grupo GEN, 2022. 9786559771653. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559771653/>. Acesso em: 29 mai. 2022.

GONZELA, Douglas Eduardo. **Diagnóstico de uma prensa extrusora de alumínio**. 2017.

GREFORTEC. **FORNO POÇO**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.grefortec.com.br/equipamentos/fornos-atmosfera-controlada-tipo-poco/>. Acesso em: 15 abr. 2022.

HYDRO. **Como é feito o alumínio?** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/aluminium/sobre-aluminio/how-aluminium-is-made/>. Acesso em: 12 out. 2021.

INSTRUFIBER. **Pirômetro Infravermelho**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.instrufiber.com.br/pirometro-infravermelho>. Acesso em: 16 abr. 2022.

ITARAÍ. **Tratamentos térmicos de aços ferramentas** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.itarai.com.br/files/H.pdf>. Acesso em: 25 out. 2021.

LEANDRO, César Alves da Silva. **Efeito da implantação iônica por imersão em plasma no aço ferramenta tipo H13**. 2005.

LEITE, Vinícius Reis. **ENSAIO NÃO DESTRUTIVO APLICAÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE**. Revista Ciências Exatas, v. 19, n. 2, 2013.

LOPES, J. A. S. M. **Aplicação de Controle estatístico de processo em variáveis de extrusão de alumínio**. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

MAIA, André Miguel Pires et al. **Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101**. 2012.

MÁRTIRES, Raimundo Augusto Corrêa. 1. **ALUMÍNIO**. 2009.

MASSARA, Eng Doutoranda Vanessa Meloni. **PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO DO PONTO DE VISTA DO CONSUMO DE ENERGIA**. Instituto de Eletrotécnica e Energia Energia-Universidade de São Paulo, 2004.

MESQUITA, Rafael Agnelli; HADDAD, P. T. Propriedades fundamentais dos aços ferramenta para matrizes de forjamento. In: **29º SENAFOR e 13º CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO**. 2009. p. 55-66.

MESQUITA, Rafael A. **Tool steels: properties and performance**. CRC press, 2016.

MONTEIRO, Rodrigo Martini. **Desenvolvimento de um padrão para tratamento térmico em matrizes de forjamento de aço ferramenta H13**. 2019.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1062 p.

PEREIRA, Leonardo Valero. **Análise da utilização de pirômetro infravermelho na medida de temperatura no disco de freio durante testes de frenagens**. 2010.

PINEDO, Carlos. **E. Tratamentos térmicos superficiais de aços**. Editora Blucher, 2021. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555062212/>. Acesso em: 06 out. 2021.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR**. Ponta Grossa, 2011. (Apostila).

TORMEM, Guilherme Ribeiro da Silva; RÖDER, Celise. **Implantação de indicadores de desempenho para o setor de planejamento e controle da produção em uma indústria de extrusão de alumínio**. Trabalhos de Conclusão de Curso do DEP, 2019.

SANTOS, Marcelo Ramos dos. **Plano de manutenção de uma extrusora no processo de fabricação de perfis de alumínio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SERIACOPI, Vanessa. **Simulação numérica do campo de tensões na microestrutura do aço ferramenta AISI H13 durante o forjamento a quente**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SERRAMETAL. **Aço H13**. [S. l.], 2022. Disponível em:
<https://serrametal.com.br/aco-h13/>. Acesso em: 16 abr. 2022.

SILVA NETO, Francisco Rodrigues da. **Avaliações de equações aplicadas a análise de fadiga térmica de baixo ciclo para o aço AISI H13**. 2019.

SOUZA, Sergio Augusto. **D. Composição química dos aços**. Editora Blucher, 1989. 9788521216490. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521216490/>. Acesso em: 20 out. 2021.

TEIXEIRA FILHO, Francisco William Peres. **Análise da eficiência de um tratamento isotérmico a 565°C para aumento da dureza de um aço SAE 1020**. 2019.

VENDRAMIM, J.C. Aços e Processos para a Tecnologia de Vácuo Parte III. Revista **Industrial Heating**. Abr-Jun 2014. pp. 5153. Campinas – SP; Disponível em: <https://www.isoflame.com.br/assets/pdf/artigos/1468270152.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2019.

WEISS, Almiro. **Processos de Fabricação Mecânica**. Curitiba: Livro Técnico, 2012. 264 p.

YAMANAKA, Douglas Mamoru et al. **Ensaio de dureza: caracterização metrológica dimensional de penetrador Rockwell C**. 2015.