

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

RAUL PIROLI DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE
DESCARBONETAÇÃO DA ROSCA DO GRAMPO DE MOLA DO AÇO 4140M**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

RAUL PIROLI DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE
DESCARBONETAÇÃO DA ROSCA DO GRAMPO DE MOLA DO AÇO 4140M**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial de obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof^o Dr. Amadeu Lombardi Neto

Co-Orientador: Engenheiro Fabio Bearzi

LONDRINA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

RAUL PIROLI DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE DESCARBONETAÇÃO DA ROSCA DO GRAMPO DE MOLA DO AÇO 4140M

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 12 de junho de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr^a. Sílvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica)
Orientador

Prof^a. Dr^a. Sílvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família por ter confiado em mim para realização do curso de Engenharia de Materiais.

Agradeço ao professor Amadeu Lombardi Neto por aceitar o pedido de orientação para o trabalho de conclusão do curso e por auxiliar no decorrer do projeto.

Agradeço ao engenheiro Fabio Bearzi por conceder espaço na empresa AESA Automolas e equipamentos para realizar os estudos e ceder o material para análise.

Agradeço ao engenheiro Douglas da Silva por me auxiliar no período em que estive na empresa e me auxiliou na pesquisa.

Agradeço a equipe da AESA Automolas, pelas experiências trocadas e pelo incentivo dado para realização do estudo.

Agradeço aos meus amigos da faculdade por estarem juntos no período de estudos.

RESUMO

SILVA, R. P. da; **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE DESCARBONETAÇÃO DA ROSCA DO GRAMPO DE MOLA DO AÇO 4140M**. 2019, 65 f. Trabalho de conclusão do curso (Bacharelado) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

O presente trabalho visa analisar a descarbonetação e a microestrutura obtida na rosca do grampo de mola em formato U variando o tempo de encharque no tratamento térmico, que por ser um item de segurança deve apresentar propriedades adequadas a sua aplicação. Para o estudo foi realizado o tratamento térmico de 5 lotes com 3 barras cada do material 4140M (similar ao SAE 4140) em um forno *walking beam* com zona de trabalho na região final do forno e sem atmosfera controlada. Cada lote foi austenitizado a 880°C e mantido por um período dentro do forno e resfriado em uma solução polimérica com 48,84% de concentração, e revenida a 490°C por 54 minutos. Após o tratamento e realizado as análises apontou-se o lote 2 que foi austenitizado com 2 min. de tempo de encharque como melhor método de produção, pois apresentou dureza entre 33 e 38 HRC tanto na superfície como no núcleo, resistência a tração de 1257 a 1307 MPa, alongamento entre 13 e 16% e redução de área entre 48,6 e 55,5 %, descarbonetação obtida na rosca foi de 0,103 mm ambos valores dentro do especificado pela ISO 898-1/2013. E a microestrutura obtida consiste em ferrita, perlita, martensita e bainita.

Palavra – chaves: Grampo de mola. Tratamento térmico. Microestrutura. Descarbonetação.

ABSTRACT

SILVA, R. P. da **MICRO-STRUCTURAL CHARACTERIZATION AND ANALYSIS DECARBURIZATION OF 4140M STEEL SPRING CLIP THREAD**. 2019, 65 p. Monograph (Bachelor degree)– Department Academic of Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná, 2019.

The present work aims analyze the decarburization and the microstructure obtained in thread of the clamps for leaf spring suspension. The clamp is considered a safety item and as such needs special procedures to guarantee the design mechanical properties. Since it must be heat treated in a continuous production furnace with out controlled atmosphere the temperatures for quench and temper and the austenitization time must optimized to achieve the allowed amount of decarburization and the proper mechanical properties in accordance with the ISO 898-1 2013 standard. This research used 5 sets composed of three clamps each of 4140M steel (similar to SAE 4140). Each set was austenitized at 880°C for different times and quenched in a water-polymer solution with 48.84% of polymer. The tempering treatment afterwards was carried out at 490°C for 54 minutes. The best result were for the set that was austenitized for 2min and produced a hardness of 33 to 38 HRC for measurements made at the surface and the center of the cross section of the part. The tensile strength was between 1257 and 1307, the elongation and area reduction were between 13–16% and 48,6–55,5% respectively. The decarburization depth at the thread was 0.103 mm. All values were within the allowed range as specified in the ISO 898-1/2013 standard. The microstructure was composed of ferrite, pearlite, martensite and bainite.

Keywords: Spring clip. Heat treatment. Microstructure. Decarburization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Feixe de mola.....	11
Figura 2 - Microestrutura do aço 4140 recozido, ampliação 900X.....	18
Figura 3 - Processos de Conformação Plástica.....	19
Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma prensa de estampagem.....	22
Figura 5 - Etapas da dobra.....	22
Figura 6 - Exemplo de Laminadores de Rosca (a) placas paralelas (b) rolos I (c) misto.	24
Figura 7 - Feixe de molas e grampo de mola aplicada.....	24
Figura 8 - Diagrama TTT do aço AISI/SAE 4140.....	26
Figura 9 - Relação tempo/temperatura e o tamanho de grão da austenita.....	27
Figura 10 - Temperabilidade de aços.....	28
Figura 11 - Esquema representativo do resfriamento em óleo, polímero e água.....	29
Figura 12 - Processos de resfriamento: (A) em água (B) em solução polimérica.....	30
Figura 13 - Relação do parâmetro de rede C com a.....	31
Figura 14 - Deformação de Bain.....	32
Figura 15 - Formação de martensita variando a porcentagem de carbono.....	33
Figura 16 - Comparação do processo de tempera convencional e martêmpera.....	34
Figura 17 - Comparação da têmpera convencional com austêmpera.....	35
Figura 18 - Curva TTT característica de material utilizado em martêmpera e austêmpera.....	36
Figura 19 - Formação da Bainita superior e inferior.....	37
Figura 20 - Propriedades mecânicas da bainita: energia absorvida sharpy (eixo y) e temperatura de transformação da bainita (eixo x).....	38
Figura 21 - Comparação das propriedades dos aços austêmperados com outras ligas.	39
Figura 22 – Curva típica do processo de revenimento.....	40
Figura 23 - Porcentagem de austenita retida com a variação do carbono.....	41
Figura 24 - Esquema de decarbonetação de rosca.....	43
Figura 25 - Fluxograma das etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho.....	44
Figura 26 - Corpo de prova utilizado para ensaio de tração.....	46
Figura 27 - Pontos para ensaio de dureza Vickers.....	47

Figura 28 - Micrografia obtida da micrografia do lote 1, com ampliação 500 X.....	50
Figura 29 - Micrografia obtida da amostra do lote 2 e 3, com ampliação 500 X.....	51
Figura 30 - Micrografia obtida da amostra do lote 4 e 5, com ampliação 500 X.....	52
Figura 31 - Filete da rosca do Lote 1 e do Lote 2, ampliação 100X.	54
Figura 32 - Filete da rosca do lote 3 e lote 4, ampliação 100X.....	55
Figura 33 - Filete da rosca do grupo 5, Ampliação 100X.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das normas AISI,SAE, ABNT	16
Tabela 2 - Composição Química do aço AISI/SAE 4140.....	17
Tabela 3 - Tratamento termicos das amostras	45
Tabela 4 - Composição química obtida do material.....	48
Tabela 5 - Composição química especificada pela TB1122.....	48
Tabela 6 - Durezas dos produtos tratados	49
Tabela 7 – Valores de descarbonetação das amostras	56
Tabela 8 - Valores de dureza Vickers (HV0,3) no filete da rosca.....	57
Tabela 9 - Dados do ensaio de tração do material	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivo Específico	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 referencial teórico	15
4.1 Aço AISI/SAE 4140	15
4.2 Processamento de materiais metálicos	18
4.2.1 Trefilação.....	20
4.2.2 Estampagem.....	20
4.2.3 Laminação.....	23
4.3 Grampo de mola	24
4.4 Tratamento térmico	25
4.4.1 Têmpera	27
4.4.1.1 Martensita	30
4.4.2 Martêmpera.....	33
4.4.3 Austêmpera.....	35
4.4.3.1 Controle de temperatura	36
4.4.3.2 Propriedades da Bainita	37
4.4.4 Revenimento.....	39
4.5 Descarbonetação	42
5 Materiais e Métodos	44
5.1 Materiais	44
5.2 Metodologia	44
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48

6.1 Composição química	48
6.2 Dureza	49
6.3 Metalografia	50
6.4 Descarbonetação	53
6.4.1 Metodo metalográfico.....	54
6.4.2 Método dureza Vickers	57
6.5 Tração	58
CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	61

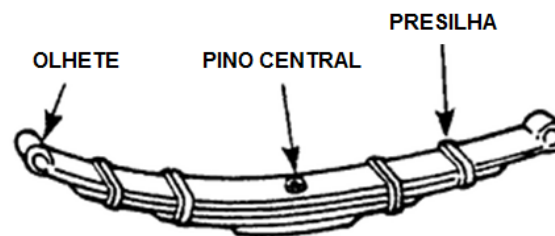
1 INTRODUÇÃO

A utilização de veículos automotores tem-se expandido com o passar do tempo devido ao conforto oferecido no deslocamento por grandes distâncias, principalmente no caso de motoristas profissionais, que passam a maior parte dos dias dirigindo. Assim, justifica-se o desenvolvimento contínuo de componentes para melhorar o desempenho desses veículos, melhorando características como segurança e o conforto, diminuindo assim a fadiga do motorista (DUQUE, 2012).

Para melhorar essas características nos veículos existe a suspensão, que tem como objetivo diminuir os impactos das imperfeições da pista nos passageiros e no veículo, preservando-os e proporcionando a estabilidade necessária à dirigibilidade. A suspensão do veículo é composta por molas e amortecedores que permitem filtrar as irregularidades da pista. Seu projeto depende do tamanho e peso do veículo, podendo possuir componentes de vários formatos e propriedades mecânicas (DUQUE, 2012).

Os feixes de molas são tipicamente utilizados em veículos mais pesados e rústicos, sendo compostas por laminas de aços sobrepostas, de espessuras diferentes e unidas por uma espiga na parte central, conforme mostrado na Figura 1. Nas extremidades do feixe de molas existem 2 olhetes que o fixam no chassi do veículo, enquanto no centro da mola utiliza-se os grampos de molas para fixar o eixo do veículo, sempre próximo das rodas.

Figura 1 - Feixe de mola.



FONTE: adaptado (EBSCHOST, 2017)

Os grampos de molas podem ser fabricados de diversas formas, materiais, formatos, e propriedades, conforme a exigência do veículo. Assim é possível ter uma quantidade elevada de tipos de grampos. Dentre os métodos de fabricação pode-se utilizar a conformação a quente ou a frio de barras redondas trefiladas que devem ser posteriormente tratadas termicamente por têmpera e revenimento (CHIAVERINI, 1986; DIETER 1961).

As etapas de fabricação devem ser controladas pois os grampos são itens de segurança, sendo a única ligação entre o veículo e seu eixo. Seu desempenho em campo vai depender das propriedades obtidas durante seu processo de fabricação. (VALE, 2011; CALLISTER, 2013).

No tratamento térmico os grampos são submetidos a condições de tempo e temperatura, para obterem certas microestruturas. Assim, no processo de tempera o material obtém uma estrutura muito tensionada denominada martensita e o revenimento visa aliviar as tensões do material temperado e fornecer uma estrutura denominada martensita revenida (VALE, 2011; CALLISTER, 2013).

Mas, no tratamento térmico, se as condições do banho de resfriamento e do forno não forem ideais é possível o aparecimento de microestruturas frágeis, bem como de trincas dependendo da geometria e do tipo de material utilizado na peça. Pode ocorrer também a perda de elementos químicos na superfície da peça, gerando uma camada com uma menor concentração destes elementos (RASMA, 2015; CANALE, TOTTEN, CANALE, 2009).

Essa perda de elementos pode ser associada com a descarbonetação do material, que ocorre de duas formas, total e parcial. A descarbonetação total é a perda completa de carbono que ocorre na superfície e a parcial a perda em regiões interna da peça, esse efeito é ampliado nas roscas dos grampos pois são regiões geometricamente desfavoráveis (SILVA, 1999; ISO, 1999).

Em vista disso, este trabalho visa o estudo da descarbonetação e a variação microestrutural presente na rosca do grampo de feixe de mola quando tratado em tempos de encharques diferenciados.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em objetivo geral e objetivo específico.

2.1 Objetivo Geral

Fazer a caracterização microestrutural e a análise da descarbonetação da seção da rosca do grampo da mola do aço 4140M.

2.2 Objetivo Específico

O objetivo específico do trabalho é:

- Determinar a dureza e a resistência a tração obtida no material após tratamento térmico de têmpera e revenimento variando tempo de encharque e que atenda os valores especificados pela ISO 898-1/2013.

3 JUSTIFICATIVA

Grampos por serem itens de segurança devem ter suas propriedades bem definidas e controladas. Desta forma um mal processamento ou a utilização errada do grampo pode levar à fratura repentina do componente e podendo causar sérios danos ao usuário e ao seu veículo.

Assim ajustar um melhor controle do processo reduzirá custos ao fabricante e também será levado ao mercado grampos com propriedades mais adequadas.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Aço AISI/SAE 4140

As ligas metálicas são divididas em dois grupos: 1) ligas ferrosas que têm como elemento base o ferro cujas principais ligas são aço e o ferro fundido, 2) ligas que não possuem o ferro como elemento base e são denominados não ferrosos, exemplos são as ligas de alumínio e titânio (CALLISTER, 2013).

As ligas ferrosas são amplamente utilizadas nos dias atuais, pois possuem uma alta versatilidade que está atrelada ao seu baixo custo de produção, abundância de matéria prima, e às variações de propriedades mecânicas e químicas (CEFET-SP, 2011).

Essa versatilidade é devido à quantidade de elementos de liga que o material pode conter. Considerando somente quantidade de carbono, o aço pode ser baixo carbono, médio carbono ou alto carbono mas ao relacionar a quantidade de elementos de liga que o aço pode possuir, a classificação adotada é baixa liga e alta liga ou aço ligado (CEFET-SP, 2011).

Logo exigiu-se agrupar e classificar os diferentes tipos de aços. Várias normas foram elaboradas para aços, mas as principais classificações utilizadas são da *American Iron and Steel Institute – AISI*, *Society of Automotive Engineers – SAE*, onde a classificação adotada tanto pela AISI como pela SAE são coincidentes. Sendo essas duas normas utilizadas como base para o desenvolvimento de outras classificações como é feito pela Associação Brasileira de normas Técnicas ABNT (CEFET-SP, 2011; SILVA, 2012).

Deste modo, a classificação adotada por elas agrupa os aços que possuem certas características em comum, como a usinabilidade ou quantidade de elementos de liga aproximados. Na Tabela 1 é mostrada a classificação adotada pela ABNT, AISI, SAE (BRUNATO, 2016).

Tabela 1 - Classificação das normas AISI, SAE, ABNT

Classificação			Tipos de aços
ABNT	AISI	SAE	
C10XX	10XX	10XX	Aços-carbono comuns.
C11XX	11XX	11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S.
13XX	13XX	13XX	Aços -manganês com 1,75% de Mn.
23XX	23XX	23XX	Aços-níquel com 3,5% de Ni.
25XX	25XX	25XX	Aços-níquel com 5% de Ni.
31XX	31XX	31XX	Aços-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65%de Cr.
E33XX	E33XX	33XX	Aços-níquel-cromo com 3,5% de Ni e 1,55% de Cr.
40XX	40XX	40XX	Aço molibdênio com 0,25 de Mo.
41XX	41XX	41XX	Aços-cromo-molibdênio com 0,40% a 1,10% de Cr e 0,08% a 0,35% de Mo.
43XX	43XX	43XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,65% a 2% de Ni, 0,40% a 0,90% de Cr e 0,20 a 0,30 de Mo
46XX	46XX	46XX	Aços-níquel-molibdênio com 1,40% a 2,00% Ni e 0,15% a 0,30% de Mo
47XX	47XX	47XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	48XX	Aços níquel-molibdênio com 3,5% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	50XX	Aços-cromo com 0,28% a 0,65% de Cr
51XX	51XX	51XX	Aços-cromo com 0,80 a 1,05% de Cr
61XX	61XX	61XX	Aços-cromo vanádio com 0,80 ou 0,95% de Cr e 0,10 ou 0,15% de V
86XX	86XX	86XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni,Cr e Mo
87XX	87XX	87XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni,Cr e Mo
92XX	92XX	92XX	Aços-silício-manganês com 0,85% Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	93XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,5% de Ni, 1,2% de Cr e 0,12% de Mo
98XX	98XX	98XX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com 1,05 de Ni, 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
50BXX	50BXX	50BXX	Aços-cromo-boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
94BXX	94BXX	94BXX	Aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr, Mo e, no mínimo, 0,0005% de B

FONTE: adaptado (BRUNNATO, 2016)

Nos itens classificados pode-se destacar os aços que são descritos da forma 41XX, que representa a família dos aços cromo-molibdênio, os quais apresentam grande resistência quando passado por processo especiais (têmpera e revenimento). Propriedades características desta família são o limite de resistência a tração que pode chegar até 1650 MPa e o escoamento que pode ser variado entre 500 e 1000 MPa (SILVA, 2012).

Os aços mais comuns utilizados desta família são 4130 e o 4140 que possuem aplicações mecânicas, sendo utilizados em diversas áreas que englobam aplicações de baixo até as de máxima importância onde suas propriedades necessitam estar bem definidas (SILVA, 2012).

O aço AISI/SAE 4140 é um aço médio carbono cuja composição química está mostrada na Tabela 2, com os limites máximo e mínimo de cada elemento (REBECHI, 2011).

Tabela 2 - Composição Química do aço AISI/SAE 4140

Elementos	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Mo (%)	Cr (%)
Faixa	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	máx. 0,03	máx. 0,04	0,15 - 0,35	0,15 - 0,25	0,80 - 1,10

FONTE: ROBECHI, 2011

O material quando é recebido do fornecedor vem normalmente recozido para que apresente a menor quantidade de tensão interna e a menor dureza possível facilitando assim a conformação, este fato pode ser alterado de acordo com o pedido do cliente. A Figura 2 mostra a microestrutura de uma aço AISI/SAE 4140 recozido que apresenta ferrita e carboneto grosseiro (ROCHA et al, 2004).

Figura 2 - Microestrutura do aço 4140 recozido, ampliação 900X.



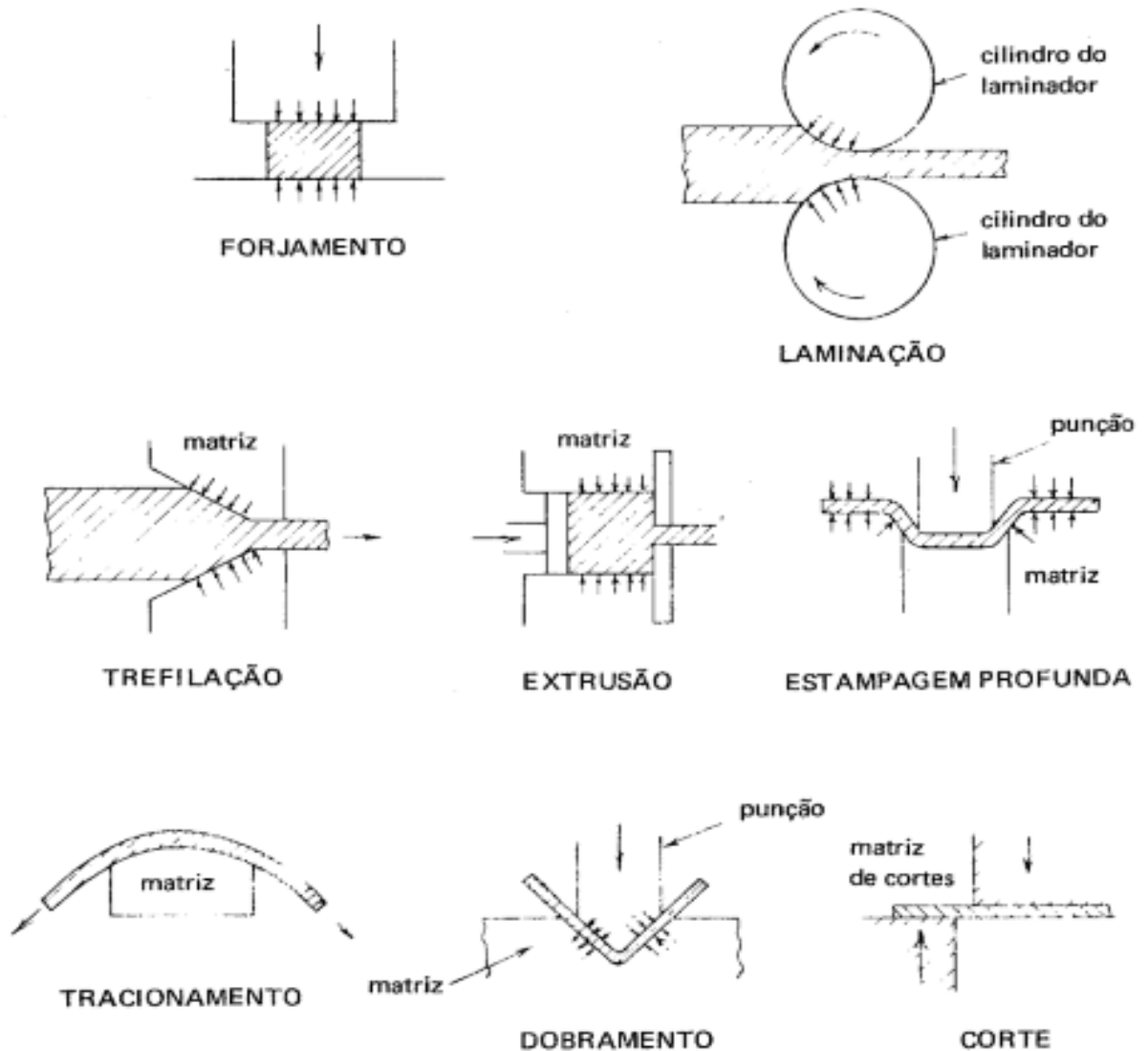
FONTE: ROCHA et al, 2014

4.2 Processamento de materiais metálicos

Os processamentos dos materiais metálicos podem ser divididos em três grupos: no primeiro grupo encontra os processamentos relacionados a conformação plástica onde a massa e o volume do material são constantes. O segundo grupo contém os processamentos baseado na usinagem dos corpos primários onde a massa e o volume sofrem variações. O terceiro grupo consiste na união da matéria, que também não mantém a massa e o volume dos componentes primários (DIETER, 1961).

Os processos alocados no primeiro grupo são os processos de forjamento, extrusão, laminação, dobra, trefilação, forjamento, entre outros. Os esquemas representativos deste processo pode ser visto na Figura 3. No segundo grupo estão os processos relacionados à usinagem do material, e, no terceiro grupo, estão os processos relacionados a união dos componentes, que podem ser soldagem e metalurgia do pó (CHIAVERINI, 1986; DIETER, 1961).

Figura 3 - Processos de Conformação Plástica.



Fonte: CHIAVERINI, 1986.

Os processos de conformação mecânica podem ser realizados tanto a quente quanto a frio, termos que estão ligados a temperatura homologa do material que é definido como a razão entre temperatura de trabalho e a sua temperatura de fusão. Com isso o trabalho a frio é realizado em temperaturas inferiores a 0,3 na temperatura homóloga, e nesse processo ocorre o encruamento, já no trabalho a quente os

processos são realizados acima de 0,7 na temperatura homóloga e não ocorre encruamento (CHIAVERINI, 1986; DIETER, 1961).

4.2.1 Trefilação

O processo de trefilação consiste na passagem de uma barra em uma matriz com um diâmetro inferior ao da barra. Nesta etapa a ponta da barra está fixada e é tracionada para que a barra passe pela matriz, assim gerando esforços no material sendo o esforço compressivo o de maior relevância conforme mostrado na Figura 3 (SILVA. et al, 2011).

Antes da barra passar no processo de trefilação ela tem que passar por um tratamento mecânico ou químico que são denominados decapagem e rebarbação respectivamente, que consiste na retirada da camada de óxidos formados na superfície da barra para que na hora do processo de trefilamento esses elementos não venham a prejudicar a superfície da barra ou danificar a matriz (SILVA, 2011)

A trefilação é usualmente trabalhado a frio e para não ocorrer problemas superficiais tanto na barra quanto na matriz são utilizados lubrificantes para reduzir o atrito no processo. Dependendo do lubrificante utilizado pode ocorrer sua adesão na superfície da barra o que irá dificultar o seu processamento posterior (SILVA, 2011; SILVA, 2011).

A região onde a barra entra em contato com a matriz é onde acontecerá a deformação plástica da barra, os grãos do material serão alongados no sentido do processo, e o material será encruado. Suas propriedades mecânicas serão alteradas, dureza e tensão de escoamento aumentarão com queda de tenacidade (SILVA, 2011).

4.2.2 Estampagem

A estampagem, segundo Chiaverini (1986), é um processo de conformação mecânica geralmente trabalhado a frio, que inclui o conjunto de operações necessária

para que possa dar formas ao material sendo essas formas vazadas ou dobradas e para aplicação em barras pode ser utilizada para fazer a redução do seu comprimento pelo corte por cisalhamento ou dobramento da mesma.

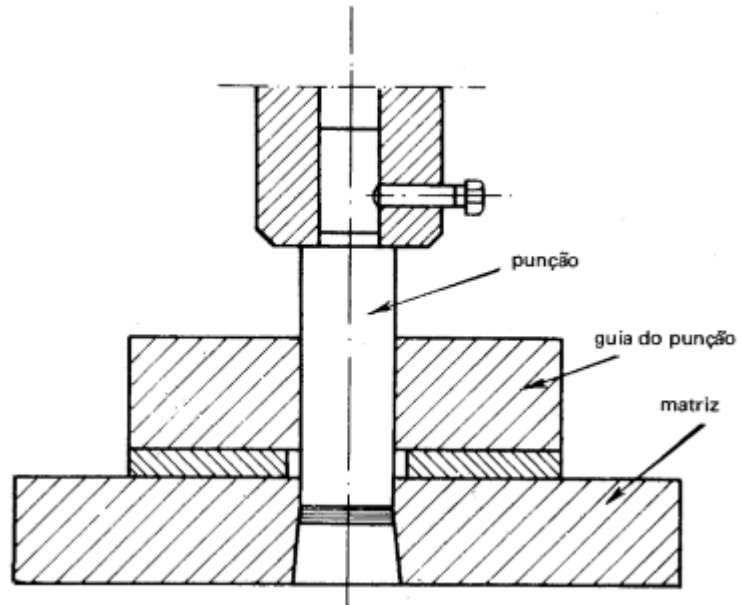
No processo de estampagem existe basicamente três processos, sendo eles: corte, dobramento ou encurvamento e estampagem profunda. No processo de corte ocorre a separação das partes da matéria, no dobramento ou encurvamento a peça é deformada para que seja gerado um ângulo entre suas seções, e na estampagem profunda apresenta uma grande deformação plástica do material criando superfícies concavas (CHIAVERINI, 1986; DIETER 1961).

Para realização do processamento de estampagem por corte a ferramenta necessária consiste numa matriz, um punção, de um guia como e mostrado na Figura 4, onde é apresentada uma chapa sendo furada (CHIAVERINI, 1986; DIETER 1961).

Este processo normalmente é trabalhado a frio, desta forma a carga aplicada deve ser concentrada para que o material seja cisalhado minimizando a deformação na seção e o tempo utilizado deve ser eficaz para diminuir custo da produção. Assim o material utilizado no punção tem que ser mais duro e resistente que o material que está sendo estampado (CHIAVERINI, 1986; DIETER 1961).

Já o processo de dobra que pode ser a quente ou a frio tem como objetivo fazer com que a matéria prima seja encurvada afim de obter forma final do produto, podendo esse processo pode ser feito de forma manual ou automatizada (CHIAVERINE, 1986 ; ESSEL, 2017).

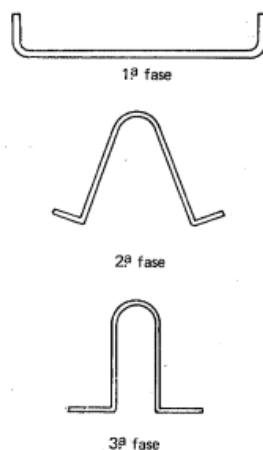
Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma prensa de estampagem.



FONTE: CHIAVERINI, 1986.

Ao realizar o processo de dobra a quente uma seção do material e submetido a aquecimento, seja ele indutivo ou por chamas, para que ele tenha suas propriedades mecânicas reduzidas e torne mais fácil sua conformação, já no processo de dobra a frio, o material não é submetido a aquecimento e segue direto para o processamento, sendo assim, o material é encruado na sessão onde sofre deformação(CHIAVERINI, 1986 ; ESSEL, 2017).

Figura 5 - Etapas da dobra.



FONTE: CHIAVERINI, 1986.

Na Figura 3 é mostrada esquematicamente uma matriz utilizada no dobramento, e a Figura 5 apresenta as fases que o material passa ao ser processado na dobra em matriz única embora o processo de dobra pode ocorrer em mais de uma etapa (CHIAVERINI, 1986).

Na dobra do material deve ser verificado alguns fatores como raio de curvatura compatível com a ductilidade do material e a espessura da chapa, uma vez que ao trabalhar com ângulos agudos a deformação plástica necessária aumenta, e desta forma o material poderá apresentar trincas (CHIAVERINI, 1986).

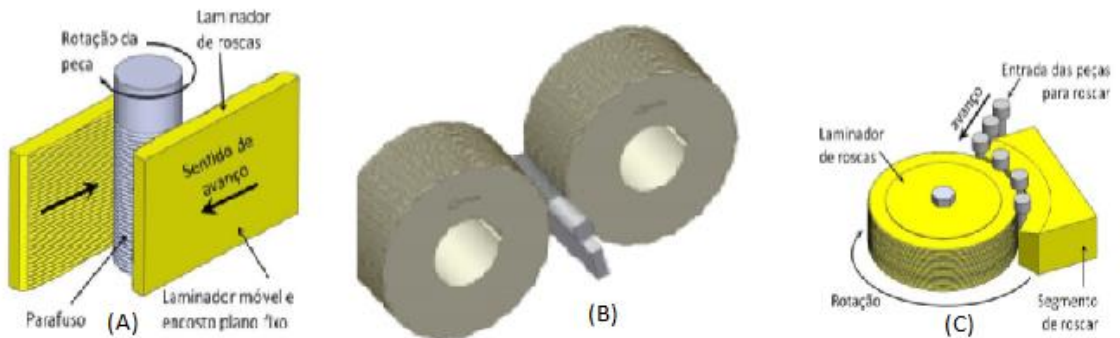
4.2.3 Laminação

O processo de laminação consiste em passar a barra entre rolos que estão posicionados de forma que a distância entre suas superfícies seja inferior ao dimensional da barra. Ao passar pelo módulo de laminação o material será submetido a deformações plásticas devido aos esforços compressivos conforme pode ser verificado na Figura 3 na parte de laminação (DIETER 1961; CHIAVERINI 1986).

Neste processo o material pode ser conformado uma única vez ou várias vezes para que atinja o resultado final. Isso está relacionado ao equipamento utilizado, imposições dos clientes, capacidade do material de suportar deformações ou formato exigido da laminação (CHIAVERINI, 1986).

Os processos de laminação podem possuir formatos diferenciados e conformar geometrias de seção da peça não paralelas conforme pode ser visto no processo de fabricação de roscas através da laminação onde o material é passado por um laminador com ranhuras helicoidais e no decorrer do passe vai sendo formada a rosca. A roscas podem ser obtidas através de laminação de placas planas, cilindros paralelos ou cilindro e superfície curva, conforme Figura 6 (EMUGE, 2010; MACIEL, 2013).

Figura 6 - Exemplo de Laminadores de Rosca (a) placas paralelas (b) rolos I (c) misto.



Fonte: Adaptado (MACIEL, 2013).

4.3 Grampo de mola

Os grampos de molas são considerados itens de segurança visto ser o único elemento que mantém o eixo ligado ao veículo, conforme mostrado na Figura 7. Caso o grampo de mola venha a falhar ou parar de exercer essa função, danos, graves podem ocorrer ao veículo e ao seu usuário.

Figura 7 - Feixe de molas e grampo de mola aplicada.



FONTE: Adaptado (FOURWHEELER, 2017).

Os grampos de molas podem ser produzidos utilizando-se diversos materiais, formatos e propriedades, conforme normas vigentes, como, por exemplo a norma ISO 898-1/2013, ou das próprias montadoras como TB1122. Desta forma os grampos são divididos em classes de propriedades mecânicas, onde cada classe define a faixa de composição química, suas propriedades mecânicas, bem como sua microestrutura.

Um dos processos de fabricação consiste corte da barra no comprimento adequado, apontamento e laminação nas extremidades para formação das roscas. Seguido do dobramento da barra (dobramento a frio ou a quente conforme a classe especificada na norma utilizada), e por último o tratamento térmico é efetuado quando a conformação for efetuada a quente. O passo seguinte é inspeção e a posterior pintura e embalagem.

Erros nessas etapas irá prejudicar o desempenho da peça. A etapa de trefilação pode ocasionar diâmetros irregulares e defeitos superficial que podem funcionar como concentradores de tensão. O corte efetuado a frio deve fornecer o comprimento desejado com a fratura localizada por cisalhamento sem deformação excessivo do material. A correta regulação do laminador de rosca é fundamental para fornecer uma rosca regular sem achatamentos e sem trincas. A dobra dos grampos deve ser controlada para suprimir a ocorrência de trincas.

4.4 Tratamento térmico

Os processos de tratamentos térmicos são comumente utilizados nos metais para melhorar as propriedades mecânicas conforme aplicação, com exceção do módulo de elasticidade, que permanece constante. Já a tensão de escoamento, de resistência, dureza, alongamento, tenacidade, ductilidade e estrição podem ser alteradas (RASMA, 2015).

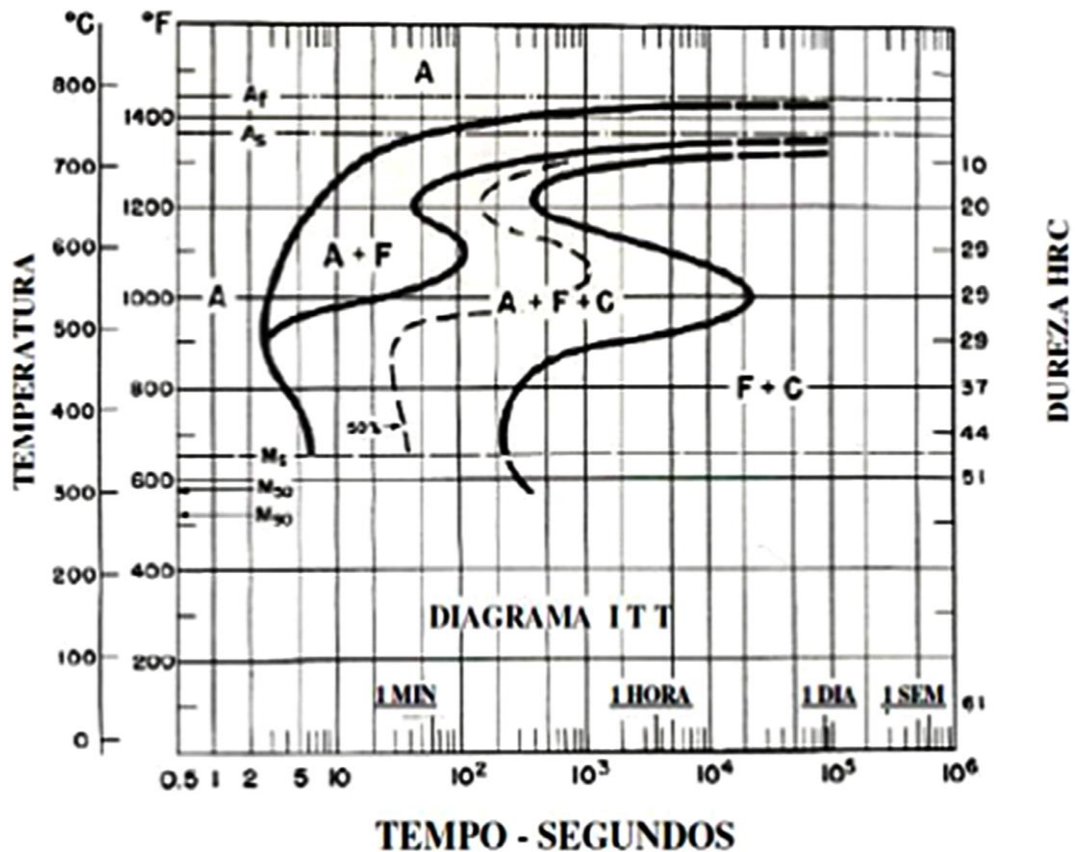
Nesse processo é feito o aquecimento e resfriamento do material, mantendo certos parâmetros controlados, como temperatura de austenitização, taxa de aquecimento, a taxa de resfriamento e a atmosfera do forno utilizado (RASMA, 2015).

Um exemplo são os materiais recozidos utilizados na fabricação por apresentarem alta ductilidade e baixa dureza, sendo apropriados para conformação a frio (dobramento e usinagem). Para serem utilizados em campo devem apresentar

alta tensão de escoamento e tenacidade adequada, fornecida por tratamento térmico de tempera e revenimento.

As baixas taxas de resfriamento permitem a difusão produzindo material recozido com fases em equilíbrio termodinâmico e de baixa dureza (ferrita + perlita), enquanto altas taxas de resfriamento transformam o material sem difusão produzindo alta dureza com fases fora do equilíbrio (martensita). Resfriamentos intermediários permitem difusão limitada produzindo a bainita, microestrutura que não são desejadas no recozimento e na têmpera. A Figura 8 mostra as fases que ocorrem no material de acordo com a taxa de resfriamento para o aço AISI/SAE 4140 (RASMA, 2015).

Figura 8 - Diagrama TTT do aço AISI/SAE 4140.



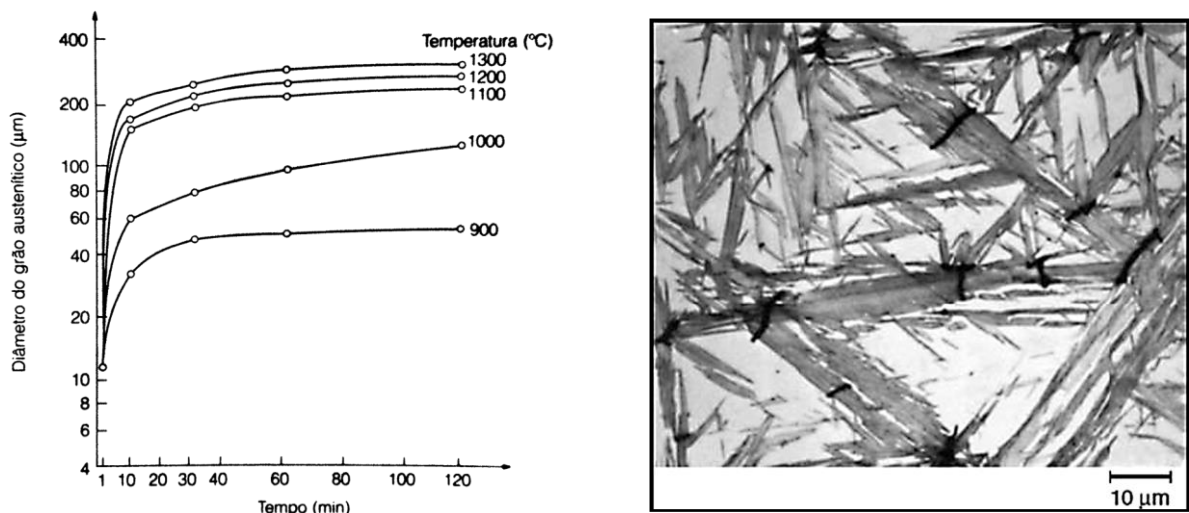
FONTE: RASMA, 2015.

4.4.1 Têmpera

A têmpera consiste em aquecimento do aço até sua completa austenitização, seguida por um resfriamento rápido para que não ocorra a difusão. O tempo de aquecimento necessário para a austenitização é chamado de tempo de encharque e deve ser o suficiente para permitir a transformação da ferrita e cementita em austenita através da difusão (VALE, 2011; CALLISTER, 2013).

O controle do tempo e da temperatura de austenitização é importante devido a sua influência no tamanho de grão resultante da peça. Alta temperatura e tempo consideravelmente alto irá gerar um aumento no tamanho de grão conforme a Figura 9, podendo gerar trincas na martensita resultante (KRAUSS, 2005).

Figura 9 - Relação tempo/temperatura e o tamanho de grão da austenita.

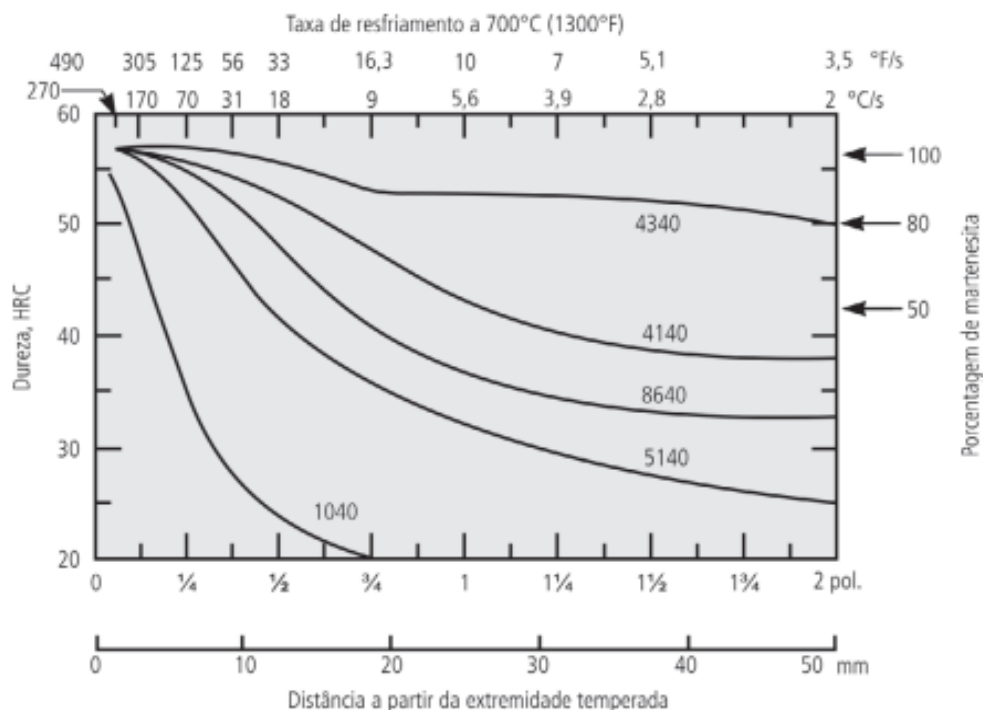


FONTE: Adaptado (KRAUSS, 2005).

Após o tempo de encharque o material é submetido a um resfriamento brusco até temperatura específica que deverá transformar toda estrutura austenítica em martensita. Entretanto alguns fatores devem ser analisados como: espessura do material (dificuldade de resfriamento do centro da peça) e sua composição química (estabilidade das fases) que poderá ocasionar uma estrutura mista com martensita, austenita retida e bainita que apresenta uma fragilidade excessiva (VALE, 2011).

A espessura do material influencia diretamente o processo, pois a taxa de resfriamento será menor na parte central da peça, sendo necessário verificar a capacidade do metal de ser temperado em uma certa profundidade. Assim torna-se importante estudar a temperabilidade do material, conforme Figura 10, que mostra algumas ligas de aços e suas respectivas temperabilidades com a quantidade martensita formada (CALLISTER, 2013).

Figura 10 - Temperabilidade de aços.



FONTE: CALLISTER, 2013.

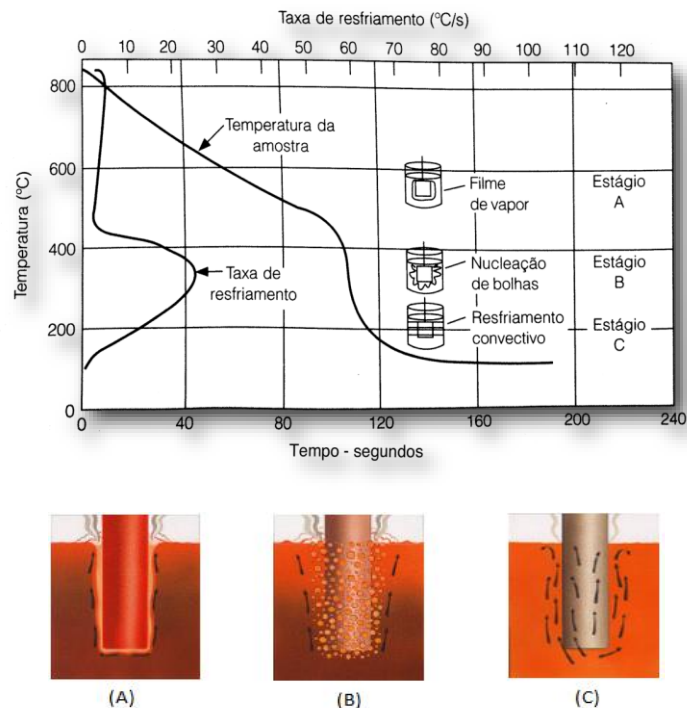
O meio de resfriamento utilizado no processo de têmpera controla a taxa de resfriamento do material e também influencia até que profundidade uma dada liga consegue ser temperada. Os meios utilizados no resfriamento incluem água, óleos, salmouras, soluções poliméricas e gases, possibilitando diferentes severidade de resfriamento que ainda podem ser alteradas dependendo o tipo de agitação do banho. Com aumento da severidade o material estará propício a ter microestrutura mais frágil que poderá resultar em trincas (VALE, 2011; CALLISTER, 2013).

Na indústria é comum a utilização de soluções poliméricas e de óleos minerais específicos como meio de resfriamento. Soluções poliméricas são basicamente a

mistura entre polímero líquido e água, permitindo variar sua severidade conforme a concentração de polímero. Essa variação contínua de severidade não é possível com óleos minerais e água que apresentam uma severidade fixa. Isto torna a aplicação do polímero interessante pois é possível ajustar continuamente sua severidade para cada material e para cada geometria das peças (CANALE, TOTTEN, CANALE; 2009).

Tanto o polímero, quanto a água e o óleo fazem o resfriamento de forma similar, ocorrendo em 3 etapas: A) formação de um filme de vapor ao redor da peça que fornece uma troca de calor reduzida; B) conforme a peça esfria ocorre paulatinamente o desaparecimento do filme de vapor que irá proporcionar um aumento na transferência de calor e borbulhamento localizado; C) após a extinção do borbulhamento a troca de calor se dá por convecção com taxa de resfriamento menor que no estágio B, isso pode ser visto na Figura 11 (CARVALHO et al, 2004).

Figura 11 - Esquema representativo do resfriamento em óleo, polímero e água.

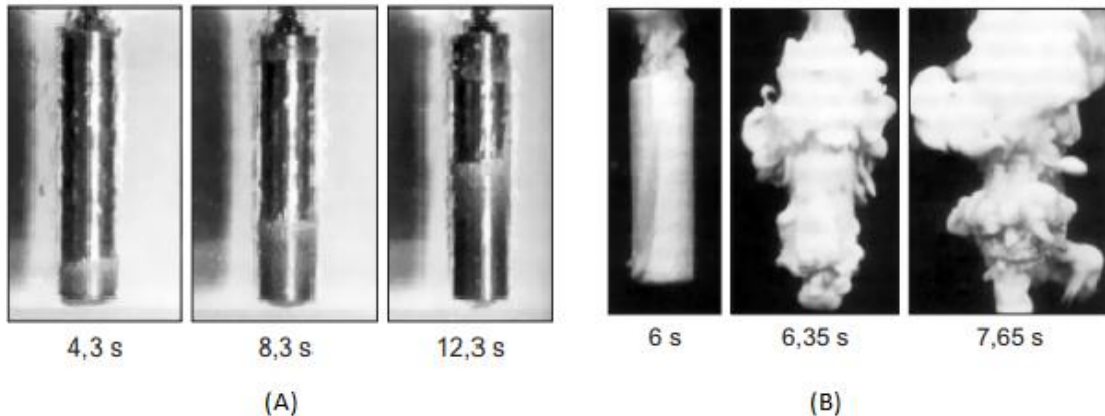


FONTE: Adaptado (CARVALHO et al,2004).

A soluções poliméricas proporcionam um menor tempo para atingir o estágio B) de resfriamento (colapso do filme de vapor) que a óleo mineral ou a água como

meio de resfriamento, conforme mostrado na Figura 12 (CANALE, TOTTEN, CANALE; 2009).

Figura 12 - Processos de resfriamento: (A) em água (B) em solução polimérica.



FONTE: (CANALE, TOTTEN, CANALE; 2009).

Outros parâmetros que influenciam no processo de têmpera são: a temperatura do banho, que irá influenciar a velocidade da troca de calor do material com o meio, e a agitação do fluido no tanque, cujo movimento proporciona uma troca de calor mais eficiente e sempre será utilizado nas indústrias (CANALE, TOTTEN, CANALE; 2009).

No caso específico do polímero existe outro parâmetro que tem que ser controlados que é: a espessura do filme formado na peça que e função do tamanho da cadeia polimérica da solução e pela concentração de polímero utilizada no banho (CANALE, TOTTEN, CANALE; 2009).

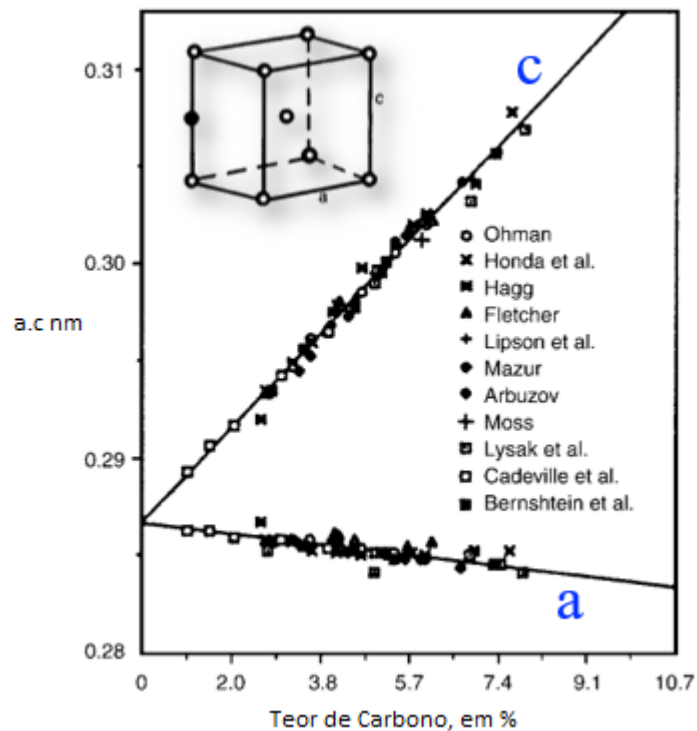
4.4.1.1 Martensita

A mudança de fase cristalina de austenita para martensita nos aços sem a ocorrência de difusão pode ser explicada através de vários mecanismos sendo o mecanismo deformação de Bain o mais simples. Assim é necessário que a deformação gerada seja menor que um parâmetro de rede, ou seja, os átomos da liga

deslocam-se por distâncias menores que um parâmetro de rede austenítica (ALVES, 2014; ASM, 1991).

O mecanismo de Bain considera a deformação homogênea que existe entre a fase e a matriz. Em um dos eixos terá a compressão e nos outros eixos terá a expansão relativa, como é mostrado na Figura 13, que demonstra a relação de expansão e compressão na estrutura estudada por vários pesquisadores (ALVES, 2014; ASM, 1991; KRAUSS, 2015).

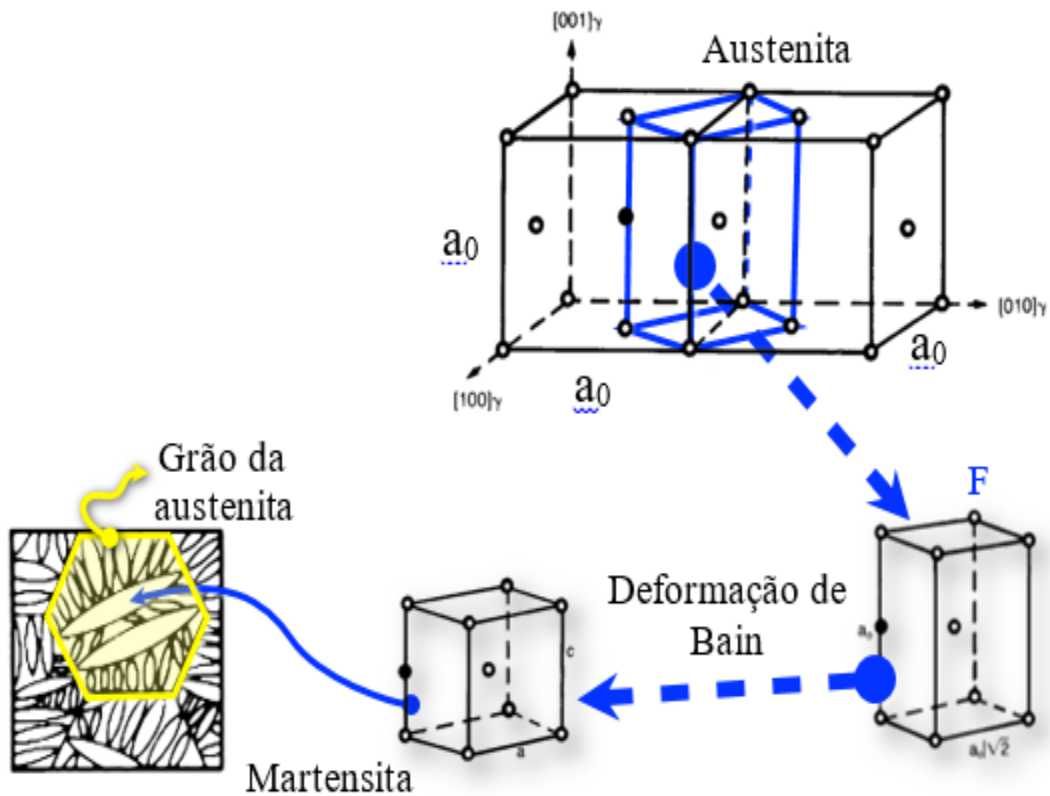
Figura 13 - Relação do parâmetro de rede C com a.



FONTE: Adaptado (KRAUSS, 2015).

A estrutura CFC da austenita pode ser vista de uma forma tetragonal e não da forma cúbica, onde um dos vértices é menor que o parâmetro de rede adotado, como é observado na Figura 14. Deste modo ao deformar essa estrutura terá a forma da estrutura tetragonal da austenita porém com $c < a_0$, desenvolvendo assim a estrutura da martensita (ALVES, 2014; ASM, 1991; KRAUSS, 2015).

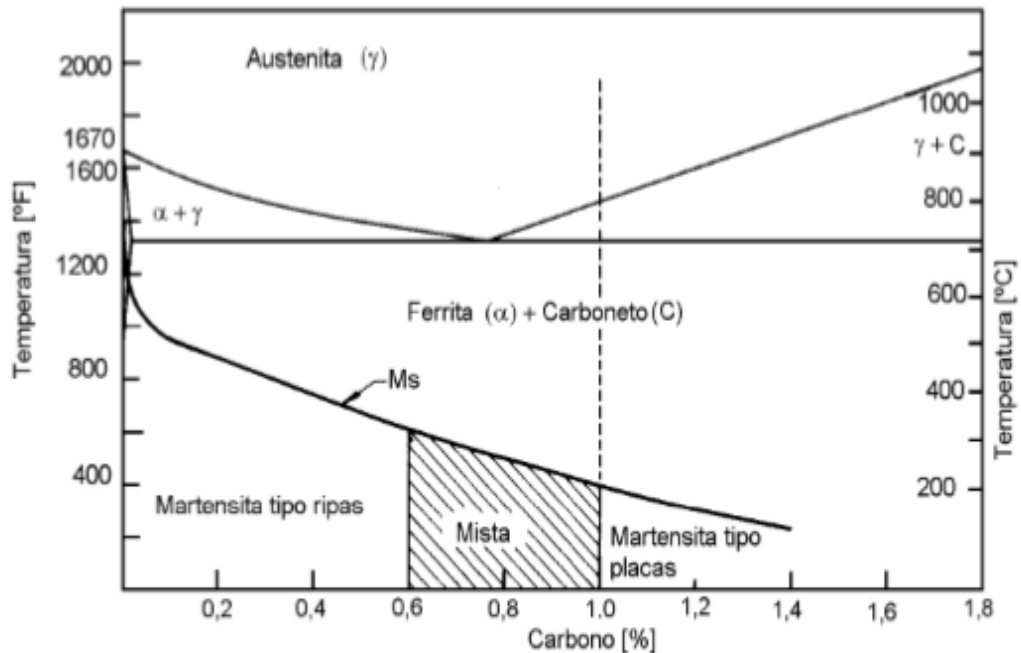
Figura 14 - Deformação de Bain.



FONTE: JUNIOR, 2011.

Existem dois tipos de martensita, que estão relacionados a quantidade de carbono que o aço possui, essas estruturas podem ser apresentadas na forma de ripas, placas ou uma mistura de ambos os tipos, na Figura 15 mostra um digrama Fe-C demonstrando o tipo de martensita obtida conforme a concentração de carbono que o metal possui (RASMA, 2015).

Figura 15 - Formação de martensita variando a porcentagem de carbono.



FONTE: RASMA, 2015.

Na martensita tipo placa a deformação ocorre por maclagem do material que é típico dos aços ferramentas ou aços com alto teor de carbono, sempre onde sua aplicação não visa fins estruturais. Verifica-se que um tamanho grande de grão austenítico causa microtrincas nas maclas conforme Figura 9 (ASM, 1991; RASMA, 2015).

Já a martensita tipo ripa tem a sua formação pelo processo de deformação por discordâncias. Este tipo de martensita é amplamente utilizado em aços estruturais pois apresenta maior tenacidade em relação a martensita tipo placa (ASM, 1991; RASMA, 2015).

4.4.2 Martêmpera

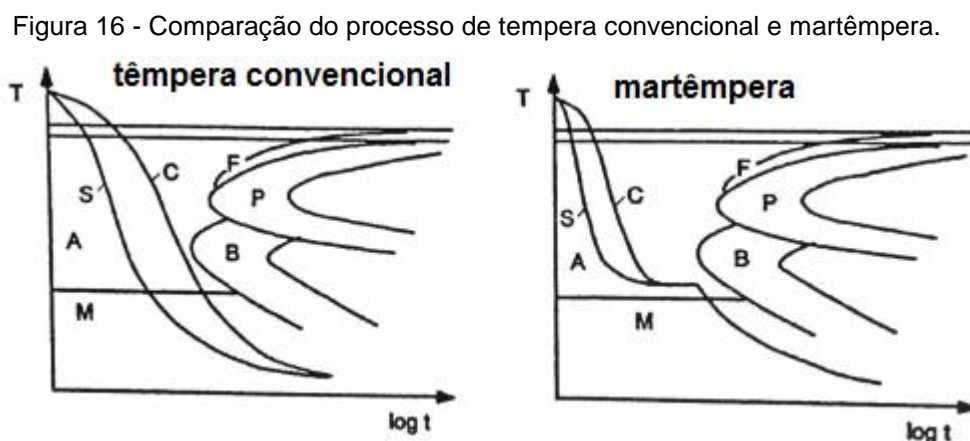
Ao passar pelo processo de têmpera o material pode sair muito tensionado ocasionando problemas como trincas e elevada fragilidade. Tal fato ocorre devido a transformação de fase que ocorre durante o resfriamento e está associada a mudança de volume. Tal fato pode ser minimizado quando a diferença de temperatura na

superfície e no centro da peça fica próxima de zero durante a transformação de fase (CHAIR, WAGONE, 2002; ASM, 1991).

Assim foi desenvolvido um tratamento térmico onde o material é resfriado bruscamente até uma determinada temperatura antes da zona de formação da martensita (acima de M_s) e mantido nesta temperatura por um determinado tempo até que a temperatura seja igualada em todo material e em seguida é continuado o resfriamento para formação da martensita (CHAIR, WAGONE, 2002; ASM, 1991).

Este processo descrito anteriormente é denominado martêmpera, e tem como objetivo obter uma estrutura martensítica menos tensionada, pois irá reduzir as tensões geradas no processo de resfriamento, permitindo também um melhor controle dimensional da peça, e fazendo com que o problema relacionado a trincas seja reduzido e, assim, diminuindo a perda de peças (CHAIR, WAGONE, 2002; ASM, 1991).

Na Figura 16 mostra um diagrama TTT para exemplificar como ocorre o processo de martêmpera em comparação com o processo de tempera convencional. Como ambos os tratamentos fornecem martensita o processo de revenimento deve ser aplicado normalmente após a martêmpera. Ao comparar os processos, a martensita obtida pelo processo de martêmpera possui propriedades mecânicas melhores que as obtidas através da têmpera (CHAIR, WAGONE, 2002; ASM, 1991).

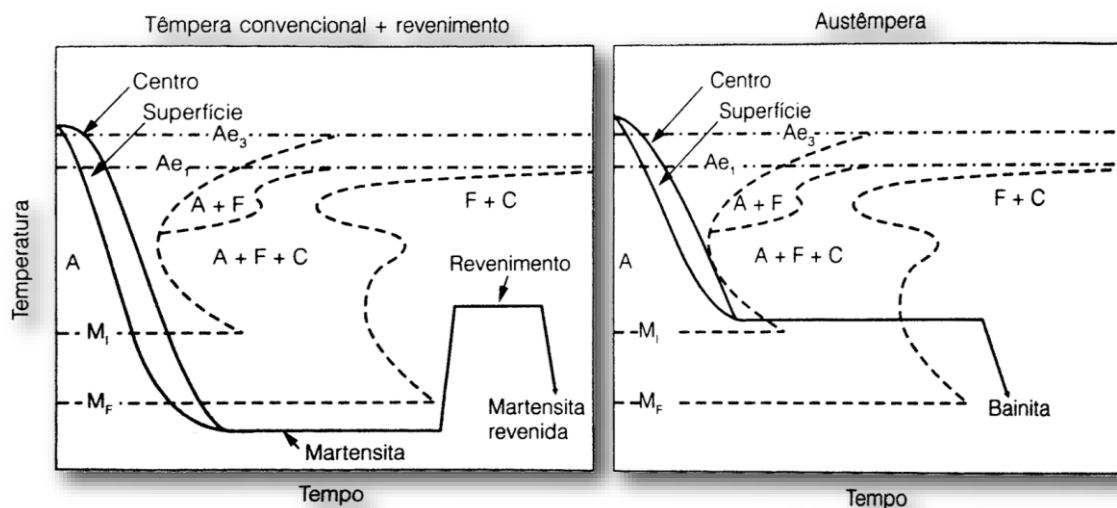


FONTE: adaptado (TOTTEN, 2006).

4.4.3 Austêmpera

O processo de austêmpera visa promover a estrutura bainítica inferior que possui boas propriedades mecânicas aliadas a baixas tensões internas. Diferente do processo de martêmpera, o material passa por um tratamento isotérmico que mantém na temperatura ideal para a formação da bainita inferior (iatravés da difusão) durante todo o processo de mudança de fase sem o resfriamento característico da têmpera, conforme mostrado na Figura 17 (BHADESHIA, 1997; JUNIOR, 2011).

Figura 17 - Comparação da têmpera convencional com austêmpera.



FONTE: adaptado (ASM, 1991).

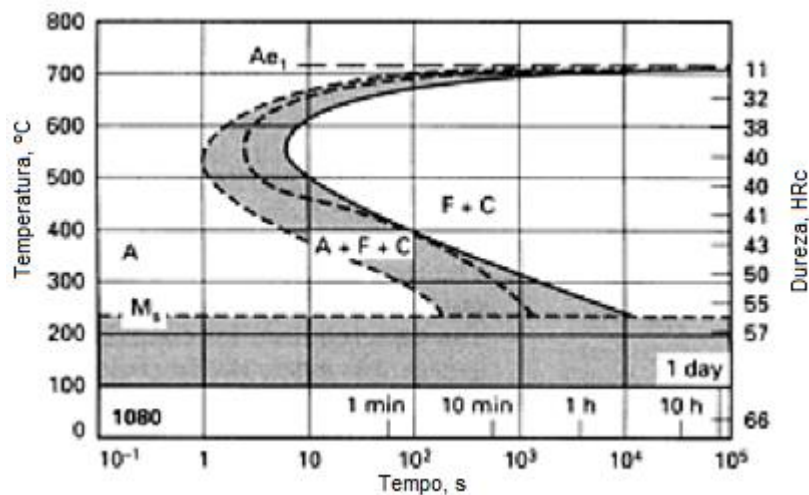
O processo de austêmpera fornece algumas vantagens sobre a têmpera convencional: redução de tempo para alcançar uma dureza especificada se essa dureza estiver na faixa entre 35 e 55 HRC, menor distorções na rede cristalina e melhores propriedades mecânicas, como resistência ao impacto e ductilidade (VALE, 2011; JUNIOR, 2011; BHADESHIA, 1997).

4.4.3.1 Controle de temperatura

Para fazer o controle da temperatura isotérmica nos processos de martêmpera e austêmpera são utilizadas várias soluções que mantêm o material na faixa de temperatura ideal conforme o tratamento solicitado. A solução mais comumente utilizada é o banho de sais fundidos por possuírem uma alta taxa de troca de calor, viscosidade adequada, proteção contra descarbonetação e por eliminar a barreira de vapor que pode ser formada na peça, dentre outros (BHADESHIA, 1997; JUNIOR, 2011).

Os aços que passam por esse processo necessitam apresentar certas características, que conforme mostrado na Figura 18, deve possuir a curva alongada para que possa ser feito o processo isotérmico, o que leva ao desenvolvimento materiais apropriados, como o ADI - *Austempering Ductile Iron* que possui teores de elementos modificados para ser mais facilmente tratados (BHADESHIA, 1997).

Figura 18 - Curva TTT característica de material utilizado em martêmpera e austêmpera.



FONTE: Adaptado (ASM, 1991).

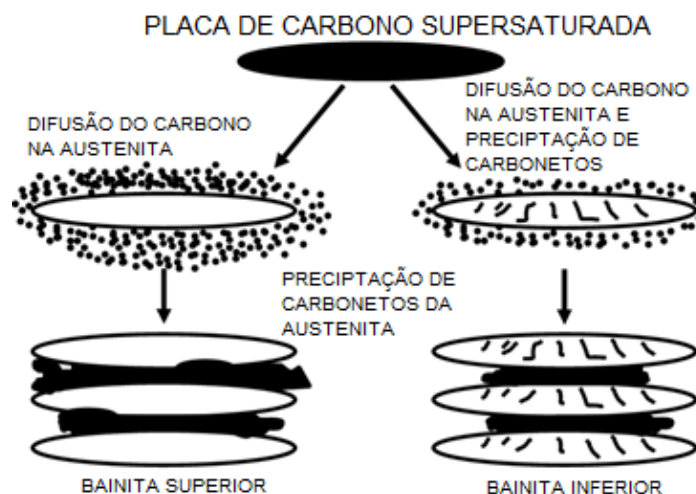
4.4.3.2 Propriedades da Bainita

A temperatura da etapa isotérmica utilizada na transformação bainítica é fundamental na obtenção da bainita inferior que apresenta as propriedades mecânicas desejadas. Tal bainita é obtida pelo tratamento isotérmico a baixas temperaturas, próxima da temperatura M_s (*martensita start*), oposta à bainita superior que se forma a temperaturas mais elevadas (BHADESHIA, 1997; JUNIOR, 2011).

Embora ambas as fases resultantes sejam bainitas, a inferior possui propriedades mecânicas muito superiores as da bainita superior devido a diferenças microestruturais. A bainita inferior apresenta estruturas muito refinadas quando comparada à bainita superior, o que resulta em propriedades mecânicas de maior desempenho (BHADESHIA, 1997; ASM, 1991).

Uma diferença importante é os filmes “grosseiros” de cementita que se formam entre as agulhas de ferrita na bainita superior, devido a maior temperatura e a conseqüente maior difusão. Tais filmes de carbeto formam um caminho preferencial para a propagação de trincas, dando origem a um material de baixa resistência mecânica e baixa tenacidade. A Figura 19 mostra o mecanismo de formação da bainita inferior e superior (BHADESHIA, 1997; ASM, 1991).

Figura 19 - Formação da Bainita superior e inferior.

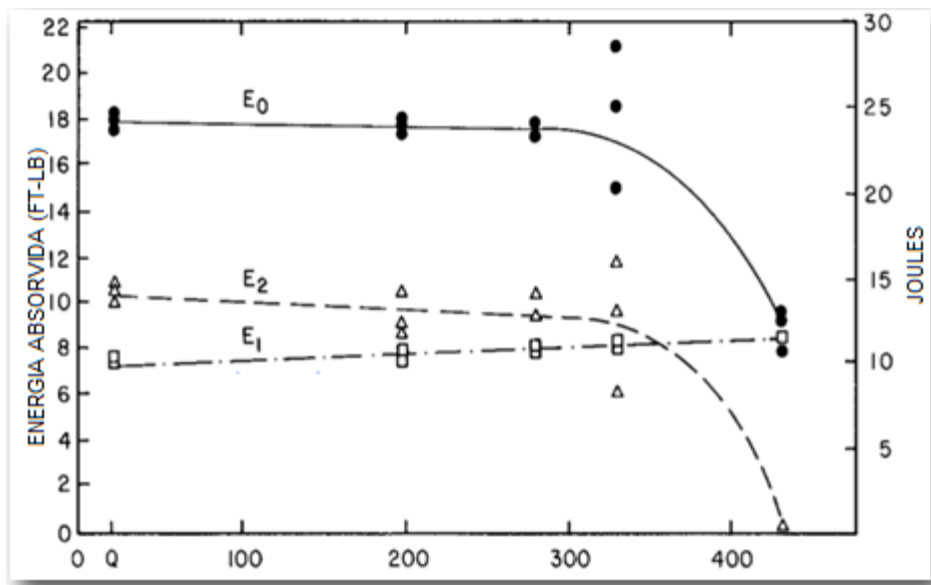


FONTE: adaptado (JUNIOR, 2011).

A bainita inferior possui uma alta resistência mecânica e uma dureza considerável, alguns valores que podem ser estimados são 1400 MPa e 50 HRC, e essas propriedades podem ser variadas de acordo com a temperatura quanto mais baixo for a temperatura mais fina será a estrutura e desta forma as propriedades obtidas na bainita podem ser comparadas com a da martensita revenida (BHADESHIA, 1997; JUNIOR, 2011).

A Figura 20 compara os dois tipos de bainita com respeito a tenacidade à fratura, no Eixo Y temos energia e no Eixo X a temperatura de transformação. O parâmetro $E_0 = E_1 + E_2$ representa a energia total para nuclear e propagar a trinca, E_1 e E_2 são respectivamente a energia para nuclear e para propagar a trinca. Nota-se que para materiais transformados a partir de aproximadamente 330°C a energia para propagar a trinca diminui rapidamente, chegando a zero para materiais transformados a 430°C. Essa é a faixa de temperatura para a formação da bainita superior que apresenta tenacidade a fratura muito baixa (BHADESHIA, 1997; JUNIOR, 2011).

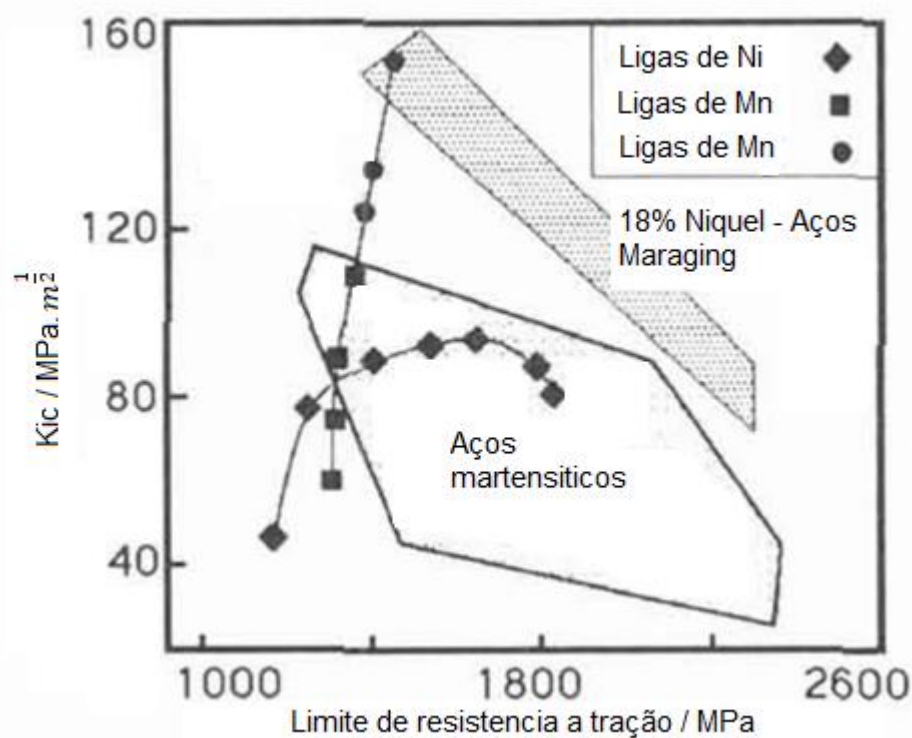
Figura 20 - Propriedades mecânicas da bainita: energia absorvida sharpy (eixo y) e temperatura de transformação da bainita (eixo x).



FONTE: Adaptado (ASM, 1991).

Utilizando aços com composição modificada com aprox. 4,0 p% Ni e maior teor de Si (que apresenta baixa solubilidade na cementita portanto retardando sua precipitação), obtém-se aços bainíticos com baixa quantidade de austenita retida (em vez de cementita) entre as agulhas de ferrita, fornecendo material de alta tenacidade, semelhante aos aços Maraging, mas a um custo menor. A Figura 21 apresenta tal fenômeno comparando aços bainíticos de última geração, martensíticos e aços maraging quanto a tenacidade a fratura e tensão de resistência (BHADESHIA, 1997).

Figura 21 - Comparação das propriedades dos aços austêmperados com outras ligas.



FONTE: Adaptado (BHADESHIA, 1997).

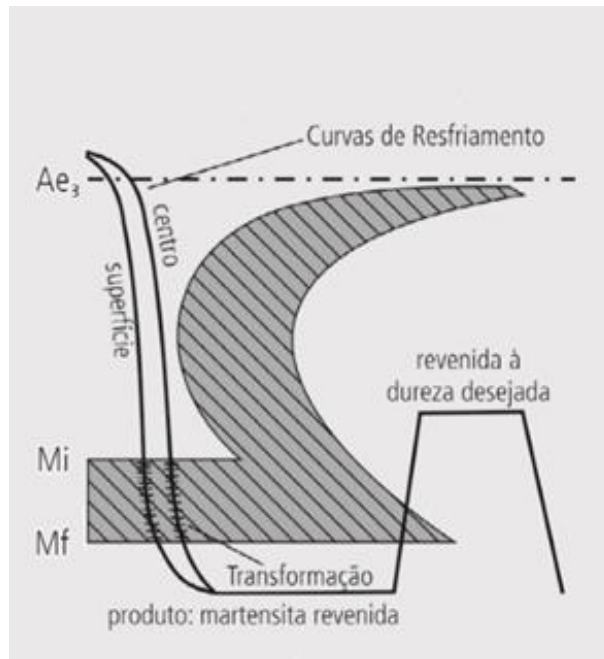
4.4.4 Revenimento

O processo de têmpera faz com que o material se torne muito tensionado internamente, limitando sua aplicação devido a elevada fragilidade do componente. Para reduzir a fragilidade e necessário fazer um alívio das tensões internas de modo

a melhorar a tenacidade do material, adequar suas propriedades e aumentar sua vida útil em trabalho. Em aços ferramenta ocorre o pico de dureza secundário aumentando a dureza do material durante o revenido, efeito desejado em aços ferramentas (VALE, 2011).

O revenimento é um processo de aquecimento realizado após a têmpera do material, onde a temperatura utilizada é inferior a linha crítica do material conforme a Figura 22, e está atrelada ao aço utilizado e a dureza desejada. Quanto mais elevada a temperatura menor será a dureza do material, e em certos caso podendo desfazer todo o tratamento de têmpera (VALE, 2011; CALLISTER, 2013).

Figura 22 – Curva típica do processo de revenimento.



FONTE: Adaptado (VALE, 2011).

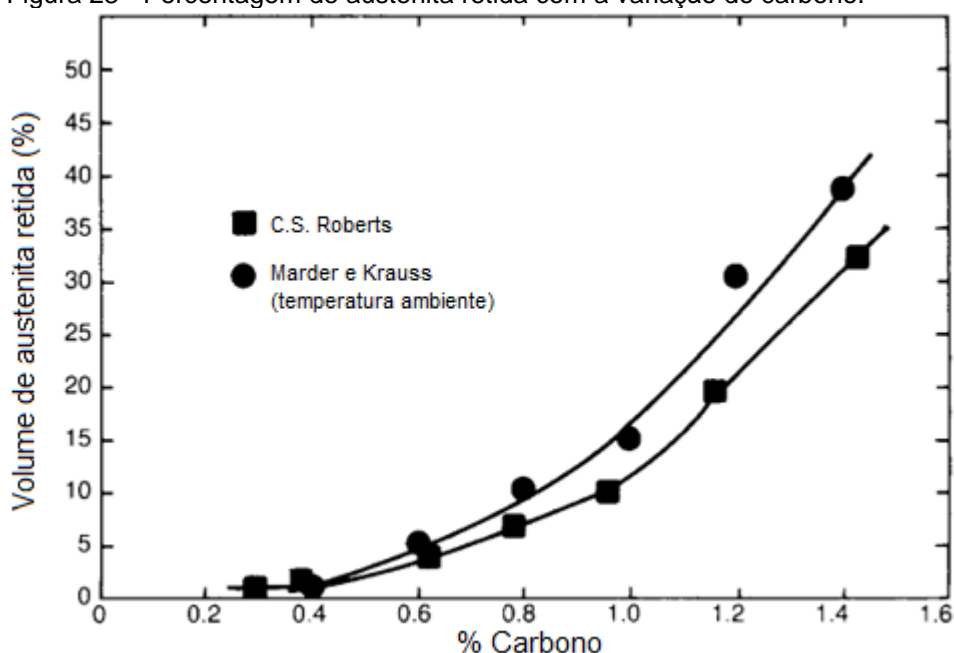
As temperaturas adotadas no processo podem ser agrupadas em faixas de temperaturas, assim ao trabalhar com processo de revenimento entre 150 e 230°C inicia a precipitação de carbonetos na estrutura e tem a obtenção de martensita revenida com uma dureza de aproximadamente 60HRc. Para o revenimento entre 230 e 400°C, ainda com precipitação de carbonetos, a estrutura obtida é a troostita com dureza em torno dos 50HRc (VALE, 2011; CALLISTER, 2013).

Entre 400 e 500°C os carbonetos que foram precipitados começam a crescer e se tornam visíveis no microscópio, a estrutura obtida para essa faixa de temperatura é a sorbita, que apresenta dureza entre 20 e 45HRc. Os materiais revenidos na faixa de temperatura de 650 a 738°C apresentam carbonetos esferoidizados que podem ser observados em microscópios óticos, recebendo o nome de esferoidita com durezas menores que 20HRc (VALE, 2011; CALLISTER, 2013).

Mas ao realizar o revenimento é possível que em certas ligas ocorra a sua fragilização ao invés de ter um aumento na sua tenacidade, os dois tipos mais comuns de fragilização são a fragilização azul e fragilização Krupp. A fragilização azul ocorre entre 270 a 370°C, devido a presença de uma rede de carbonetos formado em troncos da martensita, e a Krupp ocorre entre 375 a 550°C pela precipitação de impurezas no material (VALE, 2011).

O revenimento também pode ser utilizado para a transformação da austenita retida em aços carbono acima de 0,6 p% C e aços ferramentas (ver Figura 23). Neste caso é comum a utilização de até 3 revenimentos (4 em casos extremos). O tratamento subzero é uma alternativa ao revenimento múltiplo para eliminar a austenita retida, quando o material é resfriado a temperaturas de -100°C (KRAUSS, 2005).

Figura 23 - Porcentagem de austenita retida com a variação do carbono.



FONTE: Adaptado (Krauss, 2005).

4.5 Descarbonetação

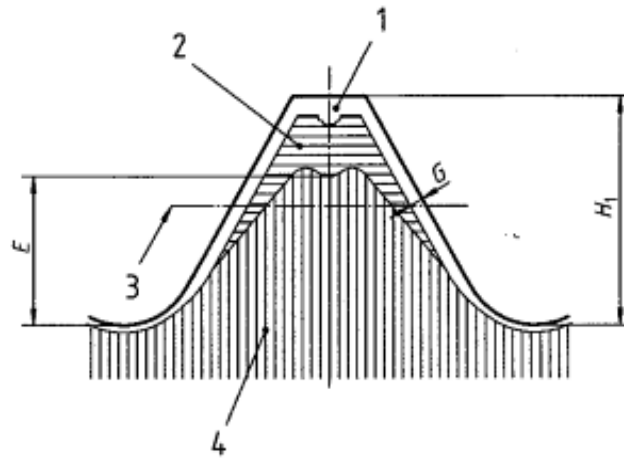
Um problema que pode ser encontrado nos tratamentos térmicos é a redução da concentração de carbono na superfície do material. Esse fenômeno é denominado descarbonetação e ocorre devido a interação do meio com o material em altas temperaturas (SILVA, 1999).

Assim qualquer etapa do processo que tenha utilização de temperaturas elevadas em atmosfera não controlada (73% de N_2 e 27% de O_2) ocorrerá a reação do O_2 com a o material, e desta forma haverá descarbonetação, esse fator pode ser influenciado pela complexidade da geometria, como exemplo disso são os filetes da rosca do grampo de mola, que apresentam uma maior área superficial por volume do que a seção cilíndrica e desta forma terá descarbonetação mais acentuada (SILVA, 1999; ISO, 1999).

O fenômeno de descarbonetação está associado a difusão do carbono na matéria, assim a combinação de temperatura, geometria e atmosfera, poderá favorecer a reação do carbono superficial com o oxigênio da atmosfera formando CO e CO_2 , e desta forma diminuindo a concentração de carbono no material (SILVA, 1999).

Pela ISO 898-1/2013 existem dois tipos de descarbonetação que podem estar presentes no material, a descarbonetação total e a descarbonetação parcial. Na descarbonetação total o material apresenta em uma faixa de perda completa do carbono na região superficial seguido pela descarbonetação parcial que ocorre numa região logo abaixo da descarbonetação total como pode ser notado na Figura 24 (ISO, 1999).

Figura 24 - Esquema de descarbonetação de rosca.



FONTE: Adaptado (ISO, 1999).

A região 1 apresenta descarbonetação total, a região 2 apresenta descarbonetação parcial, a região 3 apresenta o passo da rosca, a região 4 não apresenta descarbonetação e a cota G apresenta a espessura da camada descarbonetada, a cota H_1 é a altura da rosca antes do tratamento, e a cota E é a altura da região sem descarbonetação (ISO, 1999).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

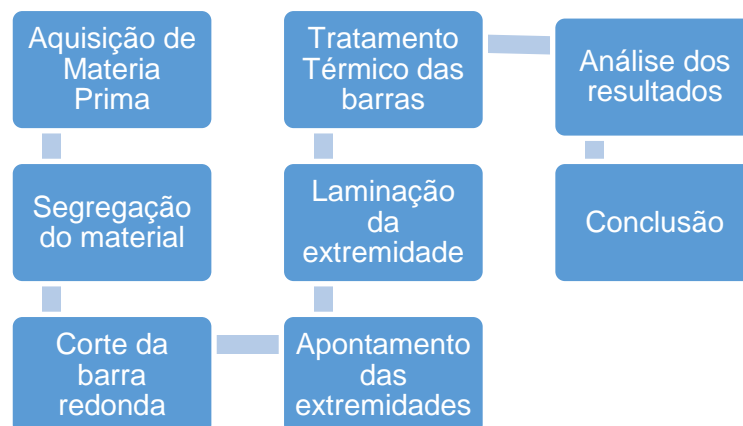
5.1 Materiais

Os materiais utilizados para a produção dos resultados deste trabalho são barras conformadas nas extremidades do material 4140M.

5.2 Metodologia

Para o experimento foram cortadas 15 barras de 450 mm do material 4140M com diâmetro de 22,13 mm, na prensa hidráulica Sold de 60 ton.. Em seguida as 15 barras foram apontadas na apontadeira de fabricação interna da empresa. Após esta etapa as barras foram conformadas na laminadora de rosca da Industria mecânica Cavour utilizando-se um modulo de rosca LR-144 passo 3 em um único lado da barra, gerando assim uma rosca M24.As etapas do processo estão descritos na Figura 25.

Figura 25 - Fluxograma das etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Após a laminação das roscas nas barras estas foram austenitizados em lotes de 3 peças, no forno de austenitização TNI do tipo *walking beam* sem atmosfera controlada fabricado pela empresa Engefor Eng. Indus. LTDA. As peças foram austenitizadas na temperatura de 880°C com tempo de encharque entre 0 e 8 minutos, após o aquecimento as peças são retiradas do forno e colocado no banho de resfriamento que utiliza uma solução polimérica *Aqua Quench 365B* com concentração de 48,84%.

As peças permaneceram no banho por 6 minutos e em seguida foram colocadas no forno de revenimento de alta convecção da Engefor Eng. Indus. LTDA, com velocidade de esteira de 160mm/minuto, a temperatura de 490°C, totalizando 54 minutos de revenimento. As sequências utilizadas para o tratamento de cada lote de produto pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Tratamento térmicos das amostras

Lote	Quantidade de amostras	Tratamento	Tempo de encharque
1	3	Têmpera e revenimento	0 minutos
2	3	Têmpera e revenimento	2 minutos
3	3	Têmpera e revenimento	4 minutos
4	3	Têmpera e revenimento	6 minutos
5	3	Têmpera e revenimento	8 minutos

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

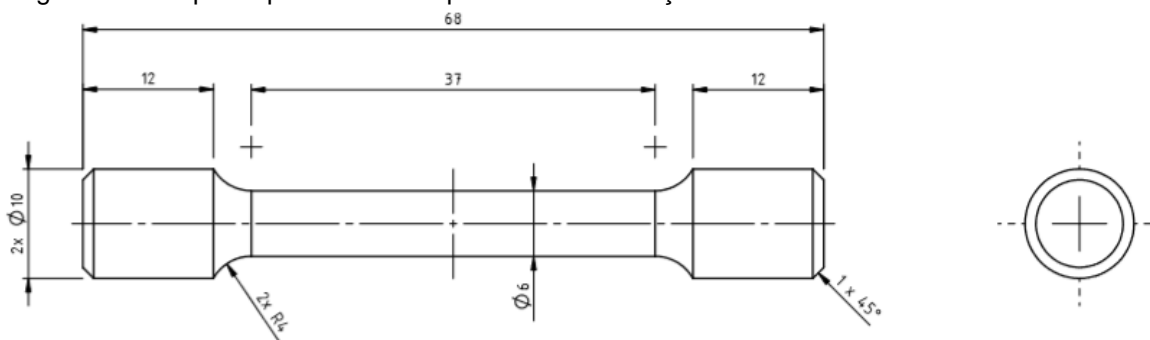
Após o tratamento térmico das peças, foram realizadas análises de durezas superficiais e núcleo das barras, o ensaio foi realizado no durômetro Rockwell da *Fine Engineering* modelo NR serie 79/607, em seguida foi separado segmentos das barras na cortadora metalográfica da Teclago para serem usinados para ensaio de tração, também foram separados segmentos das barras na seção transversal e segmentos da rosca na seção longitudinal para análise metalográfica.

As amostras separadas para metalografia foram utilizadas para quantificar a descarbonetação. As amostras foram embutidas a frio em resina acrílica, e o lixamento e polimento foram executados em uma politriz lixadeira, utilizando-se no processo lixas 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200. Para o polimento foi utilizada solução de alumina com granulometrias de $1\mu\text{m}$, $0,3\mu\text{m}$ e $0,05\mu\text{m}$. Utilizou-se software *Image J* para determinar a descarbonetação no filete da rosca.

Para o ensaio de tração foram separados corpos de prova de cada barra tratada conforme Figura 26. E o ensaio foi realizado na máquina de tração do laboratório B006 da UTFPR – Londrina.

Para análise da composição química foi retirada uma amostra junto as barras e feito análise via espectrometria por emissão ótica, em laboratório externo.

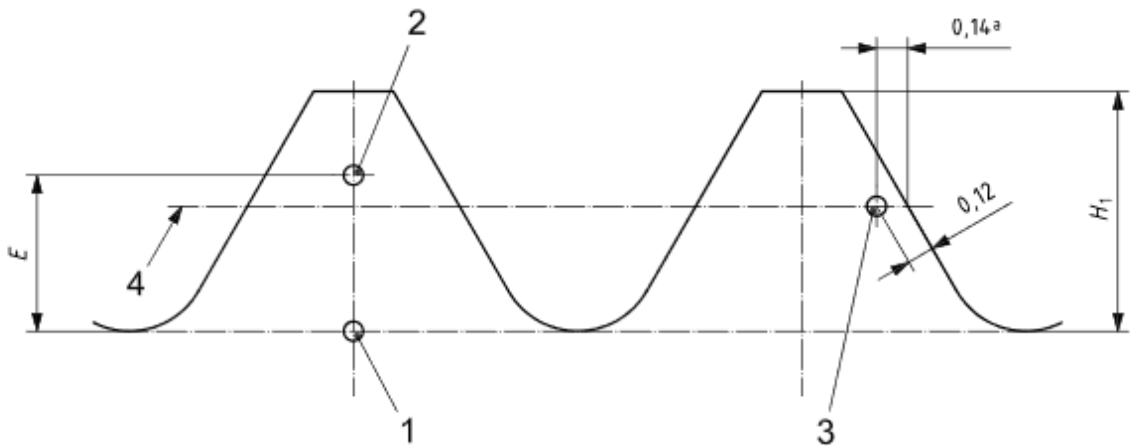
Figura 26 - Corpo de prova utilizado para ensaio de tração



FONTE: adaptado (AESA,2017)

As análises de microdureza Vickers (HV0,3) foram preparadas conforme ISO 898-1/2013 e realizadas em 3 pontos conforme a Figura 27, onde os pontos 1,2 e 3 demarcam onde vai ser realizado a microdureza Vickers que serão denotados HV(1), HV(2) e HV(3).

Figura 27 - Pontos para ensaio de dureza Vickers



FONTE: adaptado (ISO 898-1/2013)

Na Figura 27 a cota H_1 apresenta a altura do filete da rosca, a cota E mostra a distância do ponto 2 ao ponto 1, e seu comprimento representa a parte não descarbonetada do filete da rosca, as cotas 0,14 e 0,12 são a distância em milímetros da onde será feito o ponto 3, e o item 4 é a referência para definir o passo da rosca.

A realização do ensaio de tração foi segundo a norma ISO 898-1/2013, e a Metalografia segundo a ISO 898-1/2013. Os ensaios de micro dureza para análise de Descarbonetação utilizaram a norma ISO 898-1/2013 para verificar o grau de descarbonetação por metalografia.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Composição química

Para a análise química foi utilizado uma barra sem tratamento térmico, essa barra foi segregada junto as amostras e enviada para um laboratório externo onde feita análise química via espectrometria por emissão ótica cujo resultado encontra-se descrito na Tabela 4 em porcentagem de peso na amostra.

Tabela 4 - Composição química obtida do material

	Carbono	Manganês	Silício	Fosforo	Enxofre	Cromo	Molibdênio
Composição(%p)	0,400	0,820	0,250	0,028	0,032	0,970	0,180

FONTE: AESA, 2018

A composição química do aço deve satisfazer os elementos que estão descritos na norma TB 1122. Desta forma, na Tabela 5 estão descritos os valores especificados para cada elemento tanto da TB como da SAE.

Tabela 5 - Composição química especificada pela TB1122

	Carbono	Manganês	Silício	Fosforo	Enxofre	Cromo	Molibdênio
TB1122	0,38~0,45	0,60~0,90	Máx 0,40	Máx 0,035	0,020 ~ 0,040	0,90 ~ 1,20	0,15 ~ 0,30
SAE 4140	0,38~0,43	0,75~1,00	0,15~0,35	Máx. 0,035	Máx. 0,040	0,80 ~1,10	0,15~0,25

FONTE: adaptado (TB1122, 2016;ROBECHI,2011)

Ao realizar a comparação dos valores obtidos com os valores que estão especificados, verificou-se que a amostra de aço 4140M satisfaz a composição

química tanto fornecida pela TB1122 como pela composição química especificada para SAE.

6.2 Dureza

Os resultados das análises de durezas que foram realizadas nos corpos de prova estão descritos na Tabela 6, onde consta os valores da dureza superficial e a dureza do núcleo de cada amostra.

Tabela 6 - Durezas dos produtos tratados

Lote	Amostras	Dureza Superficial (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)
1	1	26,23,24	26,26,25,23,23
	2	24,25,25	24,25,24,24,25
	3	25,26,25	27,26,26,28,26
2	4	35,33,34	34,35,33,34,33
	5	36,36,36	37,37,36,37,38
	6	37,38,36	36,38,38,36,37
3	7	39,38,39	42,41,42,42,41
	8	39,39,38	44,43,43,43,43
	9	37,37,39	42,42,44,42,43
4	10	38,37,39	41,41,41,40,42
	11	38,39,39	42,41,43,43,43
	12	38,37,39	41,42,42,43,42
5	13	39,38,37	44,44,43,43,43
	14	39,38,39	44,42,43,44,43
	15	38,39,39	42,42,43,44,44

FONTE: AUTORIA PROPRIA.

Com a variação do tempo de encharque observou-se que a dureza superficial e núcleo foram aumentado, pois com aumento de tempo de encharque o material foi

sendo mais austenitizado e quando resfriado rapidamente teve uma maior formação de martensita e bainita, fazendo com que a dureza do material aumentasse.

Para a classe 10.9 é esperado que a dureza do material fique entre 32 e 39 HRC tanto na superfície como no núcleo, após análise das durezas verificou que os corpos de prova 1, 2 e 3 não atingiram o valor especificado ficando com dureza inferior a 32 HRC, já os corpos de prova 4, 5 e 6 obtiveram valores dentro do especificado tanto na superfície como no núcleo, enquanto os corpos de prova de 7 á 15 apresentaram valores dentro do especificado para superfície mas apresentaram valores maiores que 39HRC para o núcleo da amostra.

6.3 Metalografia

As metalografias obtidas das peças tratadas estão dispostas da Figura 28 até 30. São apresentadas a seção transversal das amostras conforme a sequência em que passaram pelo tratamento térmico do lote 1 até o lote 5.

Figura 28 - Micrografia obtida da micrografia do lote 1, com ampliação 500 X



FONTE: AESA, 2019

Figura 29 - Micrografia obtida da amostra do lote 2 e 3, com ampliação 500 X.



FONTE: AESA, 2019

Figura 30 - Micrografia obtida da amostra do lote 4 e 5, com ampliação 500 X



FONTE: AESA, 2019

Na Figura 28 está a micrografia do lote de amostras que não foi utilizado tempo de encharque, e sua microestrutura possivelmente é constituída de ferrita, perlita, martensita e bainita.

Já a Figura 29 apresenta a micrografia dos lotes 2 e 3, na micrografia do lote 2 que foi austenitizado com 2 minutos de tempo de encharque já demonstra uma microestrutura com menos ferrita perlita e mais martensita e bainita do que a amostra sem tempo de encharque.

Na micrografia do lote 3 que foi austenitizado com 4 minutos fica ainda menos evidente a presença de ferrita e mais evidente uma fase que possivelmente é martensita revenida com bainita.

A Figura 30 estão as micrografias dos lotes 4 e 5, onde foram austenitizadas com 6 e 8 minutos de tempo de encharque respectivamente. A microestrutura não apresenta ferrita como as outras apresentaram indicando que ambos os grupos tiveram uma melhor austenitização do núcleo da peça que os grupos passados. E a microestrutura do núcleo da peça é constituída de martensita revenida e bainita.

Verificando as micrografias é visto que aumentando o tempo de encharque ficou mais evidente a austenitização no núcleo da peça, que parte de uma microestrutura com ferrita, perlita martensita e bainita para uma microestrutura composta por martensita e bainita.

Um fator que pode ter dificultado a austenitização do núcleo da peça, e a espessura do material utilizado. Visto que quanto mais espesso for o material maior será o tempo de encharque que o material irá precisar para ser completamente austenitizado, e maior será o tempo para ser resfriado e com isso o material estará propenso a formação de fases equilíbrio na sua microestrutura.

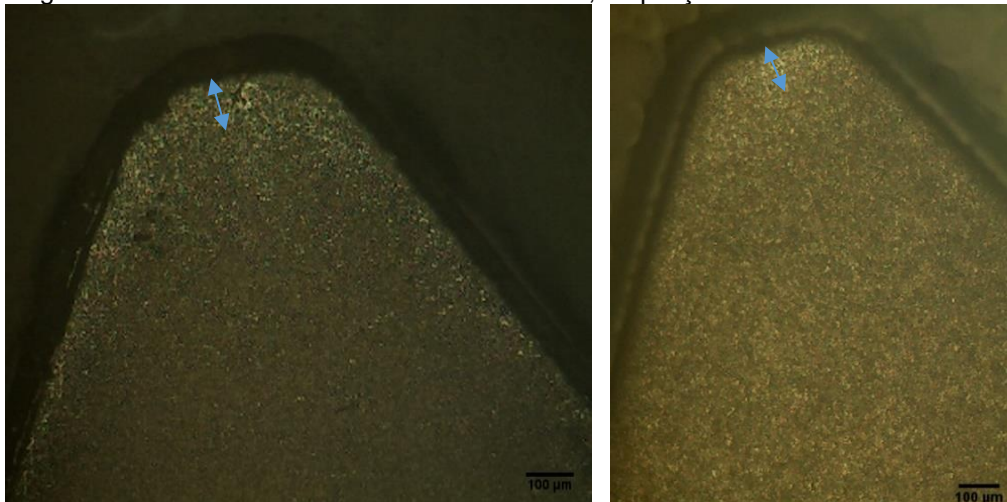
6.4 Descarbonetação

Para análise de descarbonetação foram utilizados o método metalográfico (que é uma prática descrita pela ISO 898-1/2013) e o método de análise por micro dureza em 3 pontos da rosca como já mostrado na Figura 27.

6.4.1 Metodo metalográfico

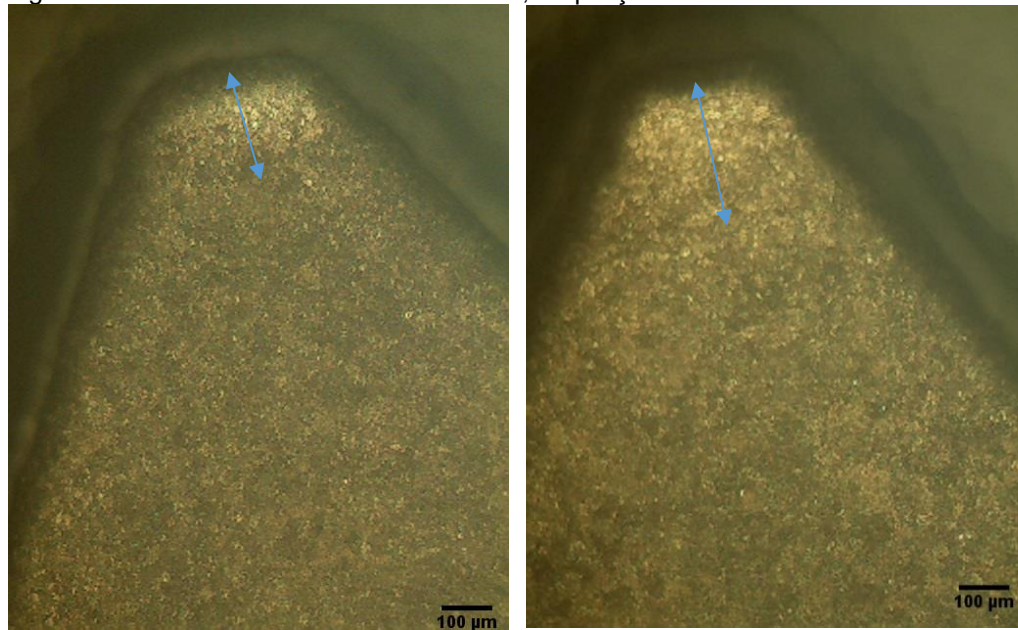
Neste método é realizado a análise metalográfica na seção longitudinal da rosca, de forma a ficar evidente a seção do filete da rosca na micrografia. Na Figura 31 são apresentados os filetes de rosca das amostras sem tempo de encharque e com 2 minutos de tempo de encharque. Na análise não foi detectado descarbonetação completa nas amostras, que seria a completa perda de carbono na superfície do dente da rosca evidenciando uma metalografia distinta entre núcleo da peça e dente da rosca, mas foi detectada descarbonetação parcial com valor de 0,096 mm e 0,103 mm de profundidade respectivamente nas amostras sem tempo de encharque e com 2 minutos de tempo de encharque

Figura 31 - Filete da rosca do Lote 1 e do Lote 2, ampliação 100X.



FONTE: AUTORIA PROPRIA.

Figura 32 - Filete da rosca do lote 3 e lote 4, ampliação 100X



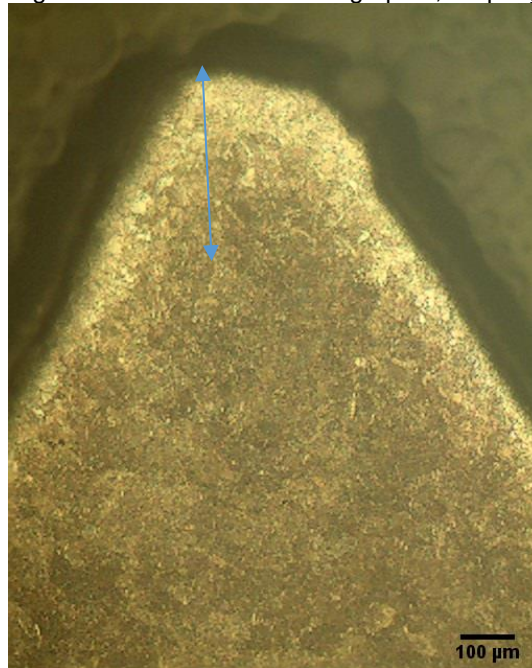
FONTE: AUTORIA PROPRIA.

Na Figura 32 são apresentados os filetes de rosca das amostras do lote 3 e 4 que foram austenitizadas respectivamente com 4 minutos e 6 minutos de tempo de encharque, A amostra do lote 3 apresentou uma descarbonetação mais acentuada que os grupos anteriores e com uma profundidade de 0,168 mm de descarbonetação parcial.

Na amostra do lote 4 houve uma descarbonetação mais acentuada, mas sem evidências de descarbonetação completa e a profundidade de descarbonetação foi de 0,237 mm.

A Figura 33, apresenta o filete da rosca das amostras do lote 5 que foram austenitizadas com 8 minutos de tempo de encharque, nesta amostra fica evidente a presença de descarbonetação mais acentuado no topo do filete que nas bordas e apresentou descarbonetação parcial de 0,321 mm.

Figura 33 - Filete da rosca do grupo 5, Ampliação 100X



FONTE: AUTORIA PROPRIA.

Os valores obtidos de profundidade de descarbonetação parcial e descarbonetação completa nas análises metalográficas estão disposto na Tabela 6 para melhor visualização dos dados, sendo esses valores os mais altos encontrados nas peças, devido a se tratar de um componente de segurança não podendo trabalhar com valores menores.

Tabela 7 – Valores de descarbonetação das amostras

Amostras	Descarbonetação parcial (mm)	Descarbonetação completa (mm)	Descarbonetação total (mm)
Sem tempo de encharque	0,096	Não evidenciado	0,096
2 minutos de tempo de encharque	0,103	Não evidenciado	0,103
4 minutos de tempo de encharque	0,168	Não evidenciado	0,168
6 minutos de tempo de encharque	0,237	Não evidenciado	0,237
8 minutos de tempo de encharque	0,321	Não evidenciado	0,321

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Fica evidenciado um aumento progressivo da descarbonetação da peça com o aumento do tempo de encharque como indica a Tabela 7 que foi de 0,096mm na amostra sem tempo de encharque para 0,321 mm na amostra que foi austenitizada em 8 minutos de tempo de encharque.

A especificação imposta pela ISO 898-1/2013 para que o tratamento seja validado é que a descarbonetação parcial não ultrapasse $1/3 \cdot H1$, e a descarbonetação completa seja inferior a 0,015mm. Para o experimento foi utilizado rosca M24, isso indica que a altura do dente da rosca é de 1,20 mm, deste modo a descarbonetação parcial não pode ser superior 0,4 mm.

Verificando os resultados obtidos tem-se que os 5 lotes não apresentaram descarbonetação parcial superior ao especificado.

6.4.2 Método dureza Vickers

Este método permite utilizar o mesmo corpo de prova que foi utilizado para realizar a metalografia ou pode-se preparar um outro corpo de prova, mas neste caso utilizou-se os mesmos corpos de prova. Os resultados obtidos na análise de dureza Vickers (HV0,3) estão dispostos na Tabela 8, junto com os valores especificados e se estão conforme ISO 898-1/2013.

Tabela 8 - Valores de dureza Vickers (HV0,3) no filete da rosca

Amostras	HV(1)	HV(2)	Especificado $\geq HV(1)-30$	Status	HV(3)	Especificado $\leq HV(1)+30$	Status
Sem tempo de encharque	285	275	≥ 255	Conforme	296	≤ 315	Conforme
2 minutos de tempo de encharque	387	381	≥ 357	Conforme	381	≤ 417	Conforme
4 minutos de tempo de encharque	389	398	≥ 359	Conforme	399	≤ 419	Conforme
6 minutos de tempo de encharque	421	400	≥ 391	Conforme	408	≤ 451	Conforme

FONTE: AESA, 2019

A dureza HV(1) é utilizada como referência para análise dos outros pontos, assim o valor da especificação para o ponto 2 é $HV(2) \geq HV(1) - 30$, e para o ponto 3 é $HV(3) \leq HV(1) + 30$ ressaltando que os pontos 2 e 3 estão descritos na figura 27.

Como identificado pela dureza Vickers no ponto 2 (HV(2)) as amostras não apresentaram valores abaixo do especificado para esta seção, e para o ponto 3 (HV(3)) não apresentaram valores superiores ao especificado para este ensaio, assim, as amostras estão conforme em relação a ISSO 898-1/2013.

6.5 Tração

Os ensaios de tração foram realizados para obter as propriedades mecânicas do produto, os resultados são apresentados na Tabela 9 juntamente com os valores especificados pela ISSO 898-1/2013 para a classe mecânica 10.9.

Tabela 9 - Dados do ensaio de tração do material

Corpo de prova	Redução de Área (%)	Especificado Redução de área (min. 48%)	Alongamento (%)	Especificado Alongamento (Min. 9%)	Limite de resistência a tração (MPa)	Especificado LRT (Min. 1040MPa)
1	54,04	Conforme	16,21	Conforme	1218,74	Conforme
2	53,31	Conforme	18,81	Conforme	744,49	Fora
3	49,83	Conforme	13,63	Conforme	1097,11	Conforme
4	55,56	Conforme	16,13	Conforme	1262,98	Conforme
5	48,64	Conforme	13,29	Conforme	1257,33	Conforme
6	53,31	Conforme	16,7	Conforme	1307,55	Conforme
7	54,44	Conforme	15,81	Conforme	1321,7	Conforme
8	53,31	Conforme	15,65	Conforme	1316,39	Conforme
9	49,83	Conforme	14,86	Conforme	1294,11	Conforme
10	53,31	Conforme	15,46	Conforme	1308,96	Conforme
11	53,31	Conforme	15,08	Conforme	1319,93	Conforme
12	47,44	Fora	13,65	Conforme	1310,73	Conforme
13	51	Conforme	12,95	Conforme	1318,16	Conforme
14	41,22	Fora	13,14	Conforme	1325,23	Conforme
15	36	Fora	12,68	Conforme	1342,56	Conforme

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Das amostras ensaiadas verificou-se que 3 amostras apresentaram redução de área menor que o especificado pela ISSO 898-1/2013, sendo essas a amostra 1 que foi austenitizadas com 6 minutos e 2 que foi austenitizadas com 8 minutos de tempo de encharque.

Para análise de limite de resistência a tração apenas uma amostra apresentou valor fora do especificado, sendo essa amostra pertencente ao grupo que não possuiu tempo de encharque. Já as outras amostras do lote apresentaram valores dentro do especificado. Com respeito ao alongamento nenhuma amostra apresentou valores fora do especificado.

Os lotes que apresentaram 100% de valores dentro do especificado foram os lotes que foram austenitizados com 2 minutos de tempo de encharque e 4 minutos de tempo de encharque.

CONCLUSÃO

Com a variação do tempo de encharque observou-se que a quantidade de ferrita presente na microestrutura da amostra ia sendo reduzida com o aumento do tempo de encharque nas amostras, já a quantidade de martensita e bainita aumentaram com o passar do tempo. Ficou evidente que com o aumento de tempo de encharque a descarbonetação da rosca foi sendo intensificada a cada lote tratado.

Verificou-se que variando o tempo de encharque a dureza do material pode ser alterada, isto está relacionada a microestrutura obtida em seu tratamento, já a resistência a tração apresentou uma pequena elevação com o aumento de dureza. Com esses resultados obtidos verificou que as amostras austenitizadas com 2 minutos de tempo de encharque apresentou os melhores resultados devido á dureza estar entre 33 e 38 HRC que satisfaz a condição de 32 a 39 HRC imposta pela ISO 898-1/2013 e o limite de resistência a tração estar entre 1257 e 1306 MPa que é superior a 1040 MPa do especificado.

REFERÊNCIAS

ALVES, Juciane M.. **ANÁLISE DA TRANSFORMAÇÃO MARTENSITICA E TENSÃO RESIDUAL EM UM AÇO INOXIDÁVEL 304L**. Dissertação. 2014. Rio de Janeiro. 2014.

AESA, **Grampos** disponível em <http://www.aesa.com.br/grampos> acessado em 15 de setembro de 2017.

AESA, Automolas e Equipamentos LTDA, Cambé – Paraná.

ASM International The Materials Information Company, **Heat Treating**, Volume 4, 1991

BHADESHIA, H. **Martensite and Bainite in Steels: Transformation Mechanism & Mechanism Properties**, Journal de Physique IV Colloquy, 1997.

BRUNATTO, Silvio F. **Introdução aos Estudos dos Aços**, UFPR, Curitiba, 2016.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro. LTC. 2013.

CANALE, Laurice de C. F., TOTTEN, George E., CANALE, Antonio C.. **Polimeros de tempera a base de PAG**. Minerva. São Carlos. 2009.

CARVALHO, Antonio R. T. et al. **Estudos da Influencia da Agitação e da Severidade da Têmpera do Meio de Resfriamento na Determinação de Velocidade Criticas de Têmpera**. In: 10th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering. Rio de Janeiro. ABCM. 2004.

CEFET, Centro Federal de Educação e Tecnologia de São Paulo, **INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE AÇOS**. Pg 01-16. 2001

CHAIR, Smith. WAGONE, Robert H.. **Physical Metallurgy of Steel**, Ohio, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: ESTRUTURA E PROPRIEDADES DAS LIGAS METÁLICAS**. 2 ed. São Paulo. McGRAW HILL. 1986.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: PROCESSO DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO**. 2 ed. São Paulo. McGRAW HILL. 1986.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA**. 2 ed. São Paulo. McGRAW HILL. 1986.

COSTA, E. M. **Aços**. PUC/RS, 2003. Disponível em: www.em.pucrs.br/eleani/Protegidos/classificacaoacos.ppt3 acessado em 07 de novembro de 2017.

DIETER, George E.. **Mechanical Metalurgy**, Philadelphia. McGRAW HILL, 1961.

DUQUE, Sergio. **Feixe de molas**. Revista Mercado Automotivo. ED. 217. 2012 disponível em <http://www.revistamercadoautomotivo.com.br/Feixe-de-Molas/20/r/> acessado em 15 de outubro de 2017.

EBSCHOOT, **FEIXE DE MOLA** disponível em http://arrc.ebscohost.com/ebsco_static/repair-tips/8852CH23_LEAF_SPRING.htm acessado em 08 de novembro de 2017.

EMUGE, **Tecnologia de Roscagem: Machos de Laminação InnoForm Modo econômico de produção de roscas internas**. Catálogo. 2017.

ESSEL, **Dobramento e Curvamento**, Aula 75 de processo de fabricação, disponível em <http://essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/75proc.pdf> acessado em 01 de outubro de 2017.

FOURWHEELER, **FORD BRONCO REDUX PART 2 REAR LEAF SPRINGS – PHOTO 9** disponível em <http://www.fourwheeler.com/features/1203-4wd-1972-ford-bronco-restoration/photo-09.html> acessado em 09 de novembro de 2017.

ISO, International Organization of Standardization. **898-1: Mechanical properties of fasteners made carbon steel and alloy steel**. 1999.

JUNIOR, José A. de C.. **Desenvolvimento do Aço alto C-Si e Cr com matriz nanoestruturada de martensita e bainita**. Dissertação. 2011. UFMG. Belo Horizonte. 2011.

KRAUSS, George, **STEELS Processing, Structure, and Performance**. 1 ed. USA. ASM International The Materials Information Company, 2005.

MACIEL, Diogo T.. **Estudos dos processos de roscamento por laminação e usinagem na liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2013. Dissertação. Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei. 2013.

RASMA, Eline T. **Caracterização estrutural e mecânica do aço AISI/AE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos**. Tese. 2015. UENF. Campos dos Goytacazes. 2015.

REBECHI, João G. **Correlação numérica entre taxas de resfriamento, microestrutura e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140**. Dissertação. 2011. UFRGS. Porto Alegre. 2011.

ROCHA, Marcos A. de C. et al. **Estudos das propriedades mecânicas de um aço SAE 4140 com estrutura bifásica**. Niteroi. UFF. 2004.

SILVA, Heloíse R.T.. **Estudos sobre descarbonetação de aços submetidos a tratamentos superficiais por plasma**. Dissertação. 1999. UFSC. Florianópolis. 1999.

SILVA, Henrique F. da, SILVA, Rodrigo M. da. **SAE 4140**. Relatório. UCS. Caxias do Sul. 2012.

SILVA, Iris B. da et al. **Conformação plásticas dos metais**. 1 ed. São Paulo. EPUSP. 2011.

SILVA, Silvio E.T.P. da. **Análises das propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico**. Dissertação. 2012 UENF. Campos dos Goytacazes. 2012.

SILVA, Thiago F.. **Efeitos dos parâmetros de trefilação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1015 trefilado**. Monografia. 2011. UFC. Fortaleza. 2011.

SORELMETAL, **Ductile Iron Data for Design Engineers**. 1990. Montreal. Rio TINTO Iron & TITANIUM INC.

TOTTEN, George E. **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2 ed. CRC Press Taylor & Francis Group. 2006.

VALE, Alan R.M. da. **Tratamento térmico**. Belém. IFPA. 2011.