

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
DE MICROESTRUTURA DO AÇO AAR M-201
GRAU E NA CONDIÇÃO DE NORMALIZADO,
TEMPERADO E REVENIDO X TEMPERADO E
REVENIDO.**

GUSTAVO ROSSI CASTILHO
MARCELO ROSA DA CONCEIÇÃO

**Pindamonhangaba - SP
2017**

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
DE MICROESTRUTURA DO AÇO AAR M-201
GRAU E NA CONDIÇÃO DE NORMALIZADO,
TEMPERADO E REVENIDO X TEMPERADO E
REVENIDO.**

**GUSTAVO ROSSI CASTILHO
MARCELO ROSA DA CONCEIÇÃO**

Projeto de Monografia apresentado à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, para graduação no Curso Superior de Tecnologia Processos Metalúrgicos.

Área de Concentração: Mecânica e Metalurgia
Orientador: Me. Amir Rivaroli Júnior

**Pindamonhangaba - SP
2017**

R000e Conceição, Marcelo Rosa; Castilho, Gustavo Rossi
Análise das propriedades mecânicas e de microestrutura do aço AAR M-201 GRAU E, na
condição de normalizado, temperado e revenido x temperado e revenido / Marcelo Rosa da
Conceição; Gustavo Rossi Castilho – São Paulo: Centro Paula Souza/ FATEC
Pindamonhangaba, 2017.
x,67f.: il.; 31 cm.

Orientador Prof. Amir Rivaroli Junior

Monografia Tecnologia em Processos Metalúrgicos - FATEC - Faculdade de Tecnologia de
Pindamonhangaba. 2017

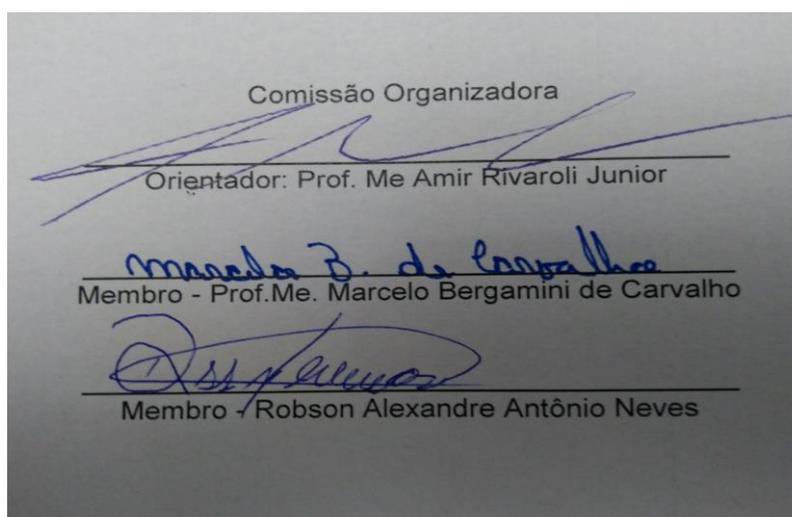
1. Estudo dos materiais. 2.Processos metalúrgicos. 3.Materiais no setor de transportes
ferroviários de carga. I.Rivaroli Junior, Amir. II.Faculdade de Tecnologia de
Pindamonhangaba. III. Análise das propriedades mecânicas e de microestrutura do aço AAR M-201
GRAU E, na condição de normalizado, temperado e revenido x temperado e revenido.

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
DE MICROESTRUTURA DO AÇO AAR M-201
GRAU E NA CONDIÇÃO DE NORMALIZADO,
TEMPERADO E REVENIDO X TEMPERADO E
REVENIDO.**

**GUSTAVO ROSSI CASTILHO
MARCELO ROSA DA CONCEIÇÃO**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.



Pindamonhangaba, 18 de dezembro de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia a Deus pois sem ele eu não teria forças para essa longa jornada, agradeço a meus professores e aos meus colegas que me ajudaram na conclusão da monografia.

AGRADECIMENTO

GUSTAVO ROSSI CASTILHO

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

MARCELO ROSA DA CONCEIÇÃO

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A teoria sempre acaba, mais cedo ou mais tarde, assassinada pela experiência.

Albert Einstein

CASTILHO, G. R.; ROSA, M. C. **Análise das propriedades mecânicas e de microestrutura do aço AAR M – GRAU E na condição de normalizado, temperado e revenido x temperado e revenido.** 2017. 67p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

RESUMO

Hoje em dia as empresas estão cada vez mais focadas na redução de custos no processo produtivo através de otimização de processos, reduzindo retrabalhos e eliminando processamentos desnecessários possibilitando assim se tornar cada vez mais competitiva no mercado. Exemplo disso é o aço fundido AAR M- 201 GRAU E, quando submetido a tratamento térmico de Normalização, Tempera e Revenido ou quando submetido somente a Tempera e Revenido sem a realização da Normalização, sendo que as duas formas são permitidas pela AAR (Associação Americana de Ferrovias). O objetivo deste projeto foi demonstrar através de experimentos se ocorria diferença ou não na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço AAR M – 201 GRAU E, quando submetido a tratamento térmico de normalização, tempera e revenido x tempera e revenido. Para isso foi realizado experimentos em vinte amostras sendo dez na condição de normalizado, temperado e revenido e dez na condição temperado e revenido, sendo que as amostras são de mesma corrida, ou seja, de mesma composição química variando somente o tratamento térmico de normalização. Depois de realizado todo ciclo de tratamento térmico foi realizada análise de microestrutura sendo tamanho de grão austenítico e de estrutura resultante em duas amostras sendo uma de cada condição, também realizamos ensaio mecânico de resistência a tração em cinco amostras de cada condição e ensaio de impacto charpy em quatro amostras de cada condição. Depois de analisado os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e na microestrutura podemos afirmar que para termos garantia de se ter as mesmas propriedades mecânicas no aço AAR M201 GRAU E, é necessário submeter esse material ao tratamento térmico de normalização para garantir a homogeneidade da austenita para que não ocorra a presença de impurezas não solúveis (inclusões), ou a presença de partículas de carbonetos não dissolvidas, ou mesmo de áreas de ferrita, como no caso dos aços hipoeutetóides temperados de dentro da zona crítica.

Palavras-chave: Aço, propriedades mecânicas, normalização.

CASTILHO, G. R.; ROSA, M. C. Analysis of the mechanical and microstructure properties of AAR M – 201 GRAU E steel in normalized condition, tempered and quenched x tempered and quenched. 2017, 67p, Term Paper (Metallurgical process course).

ABSTRACT

Nowadays companies are increasingly focused on reducing costs in the production process through process optimization, reducing rework and eliminating unnecessary processing and thus becoming more and more competitive in the market. An example of this is AAR M-201 GRAU E cast steel, when subjected to a normalization, tempering and quenched heat treatment or when subjected only to tempering and quenched without the normalization, both forms being permitted by AAR of Railways). The objective of this project was to demonstrate, through experiments, whether or not difference in the microstructure and mechanical properties of AAR M - 201 GRAU E steel occurred when subjected to normalization, tempering and quenched and tempering and quenched. For this, experiments were carried out on twenty samples, ten being normalized, tempered and quenched, and ten in the tempered and quenched condition, the samples being of the same race, that is, of the same chemical composition, varying only the thermal treatment of normalization. After the entire heat treatment cycle, a microstructure analysis was performed, with austenitic grain size and resulting structure in two samples being one of each condition, also performed mechanical tensile strength test in five samples of each condition and charpy impact test in four samples of each condition. After analyzing the results obtained in the mechanical tests and the microstructure, we can state that, in order to guarantee the same mechanical properties in AAR M201 GRAU E steel, it is necessary to subject this material to the normalization heat treatment to ensure the homogeneity of the austenite so that the presence of non-soluble impurities (inclusions), or the presence of undissolved carbide particles, or even of ferrite areas, as in the case of tempered hypoeutectoid steels from within the critical zone, does not occur.

Key words: Steel, mechanical properties, normalization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vagão GDT	18
Figura 2 - Vagão GDU	19
Figura 3 - Montagem do Engate Tipo E.....	20
Figura 4 - Montagem do Engate Tipo F.....	21
Figura 5 - Funcionamento do Sistema de Choque e Tração.....	22
Figura 6 - Braçadeira.....	23
Figura 7 - Engate Tipo E	23
Figura 8 - Engate Tipo F	24
Figura 9 - Mandíbula.....	24
Figura 10 - Haste de Ligação.....	24
Figura 11 - Keel Block.....	42
Figura 12 - Moldes Vazados.....	42
Figura 13 - Corpos de Prova Primários.....	43
Figura 14 - Espectrômetro Óptico de Queima.....	43
Figura 15 - Curva TTT Aço AAR M201 GRAU E (Normalização)	45
Figura 16 - Saída da Carga (Austenitização).....	48
Figura 17 - Carga imersa na água	48
Figura 18 - Retirada da carga do tanque de resfriamento	49
Figura 19 - Curva TTT Aço AAR M201 GRAU E (Tempera)	49
Figura 20 - Máquina de Ensaio de Tração	50
Figura 21 - Máquina de Ensaio de Tração (Corpo de Prova).....	50
Figura 22 - Corpo de prova usinados	51
Figura 23 - Corpos de prova charpy conforme ASTM E23	51
Figura 24 - Máquina de entalhe para corpo de prova charpy	52
Figura 25 - Máquina de ensaio de impacto charpy	52
Figura 26 - Recipiente de encharque corpo de prova charpy	52
Figura 27 - Termômetro de Contato	53
Figura 28 - Corpo de prova charpy após o ensaio	53
Figura 29 - Embutidora	54
Figura 30 - Amostra embutida.....	54
Figura 31 - Politriz	54
Figura 32 - Microscópio Optico	54
Figura 33 - Análise estatística (L.R.)	57
Figura 34 - Análise estatística (L.E.)	58
Figura 35 - Análise estatística (A.L.).....	59
Figura 36 - Análise estatística (R.A.).....	60
Figura 37 - Análise estatística (Charpy).....	62
Figura 38 - Ferrita acicular em matriz de martensita revenida.....	63
Figura 39 - Martensita Revenida	63
Figura 40 - Tamanho de grão austenítico 100x Média 16 μm	64
Figura 41 - Tamanho de grão austenítico 100x Média 28 μm	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do Aço E, AAR-M201	40
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas do Aço E, AAR-M201	40
Tabela 3 - Composição Química do Aço E AAR-M201	41
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Aço E AAR-M201	41
Tabela 5 - Composição Química Elementos	43
Tabela 6 - Normalização dos corpos de provas	45
Tabela 7 – Dados de Tempera	47
Tabela 8 - Dados Revenido	47
Tabela 9 - Resultados obtidos no ensaio de tração (Temperado e Revenido).....	55
Tabela 10 - Resultados no ensaio de tração (Normalizado Temperado e Revenido)	55
Tabela 11 - Resultados obtidos no ensaio de charpy (Temperado e Revenido).....	61
Tabela 12 - Resultados obtidos no ensaio de charpy (Normalizado, Temperado e Revenido)	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama Ferro Carbono Temperatura de austenitização	44
Gráfico 2 - Curva de revenido para o aço AAR M-201 Grau E.....	46
Gráfico 3 - Resultados dos ensaios de tração	56
Gráfico 4 - Limite de Resistencia	57
Gráfico 5 - Limite de Escoamento	58
Gráfico 6 - Alongamento.....	59
Gráfico 7 - Redução de área.....	60
Gráfico 8 - Resultados ensaio de impacto charpy	62

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 CARACTERÍSTICAS DOS VAGÕES	16
2.1.1 Operação e Montagem dos Engates Tipo F	21
2.1.2 Funcionamento dos Sistemas de Choque e Tração	22
2.2 MOLDES	25
2.2.1 Modelos metálicos	25
2.2.2 Preparação de modelos com resinas	25
2.3 Areias de Moldagem	25
2.3.1 Composição das areias de moldagem	26
2.3.2 Preparação das areias de moldagem	27
2.4 RESINAS SINTÉTICAS	27
2.5 A FUNDIÇÃO DO AÇO	27
2.6 CONCEITOS BÁSICOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS	28
2.6.1 Principais motivos dos tratamentos térmicos	28
2.6.2 Aquecimento	29
2.6.3 Tempo de permanência a temperatura de aquecimento	29
2.6.4 Resfriamento	29
2.6.5 Atmosfera do forno	29
2.7 NORMALIZAÇÃO	29
2.8 TÊMPERA	30
2.9 REVINIDO	32
2.9.1 Fragilidade de revenido	32
2.9.2 Transformação da austenita retida	32
2.10 DEFEITOS E DISTORÇÕES DURANTE O TRATAMENTO TÉRMICO	32
2.11 MUDANÇAS DIMENSIONAIS	32
2.12 FALHAS	33
2.13 PROPRIEDADES DE TRAÇÃO	33
2.13.1 Limite e resistência a tração	34
2.13.2 Ductilidade	34
2.13.3 Resiliência	34
2.14 DIAGRAMA DE FASES FERRO-CARBETO DE FERRO	34
2.15 SIGNIFICADO DE ENSAIO MECÂNICO	35
2.16 ENSAIO DE TRAÇÃO	35
2.17 ENSAIO DE IMPACTO	36
2.18 ENSAIO DE DUREZA	37
2.19 MICROGRAFIA	38
2.20 CLASSIFICAÇÃO DAS MICROESTRUTURAS	39
2.21 CARACTERÍSTICAS DO AÇO E, NORMA AAR-M201	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Materiais	41
3.1.1 Características do aço e, norma AAR– M201	41
3.2 MÉTODOS	41
3.2.1 Moldagem e vazamento dos corpos de prova	41
3.2.2 Análise Química do material fundido	43
3.2.3 Tratamento térmico de Normalização	44
3.2.4 Tratamento térmico de têmpera e revenido	46

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	55
4.1 ENSAIOS MECÂNICOS E METALOGRAFICOS.....	55
4.1.1 Ensaio de tração.....	55
4.1.2 Ensaio de impacto charpy.....	61
4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA DAS ESTRUTURAS RESULTANTES.....	63
4.2.1 Estrutura resultante	63
4.2.2 Tamanho de grão austenítico	64
5 CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	66

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia as empresas estão cada vez mais focadas na redução de custos no processo produtivo através de otimização de processos, reduzindo retrabalhos e eliminando processamentos desnecessários possibilitando assim se tornar cada vez mais competitiva no mercado.

Exemplo disso é o aço fundido AAR M- 201 GRAU E, quando submetido a tratamento térmico de Normalização, Tempera e Revenido ou quando submetido somente a Tempera e Revenido sem a realização da Normalização, sendo que as duas formas são permitidas pela AAR (Associação Americana de Ferrovias). Esse aço é utilizado no segmento ferroviário em peças fundidas que compõe o conjunto de choque tração utilizado em vagões e locomotivas no transporte de carga podendo alcançar composições de até 300 vagões sendo com capacidade de carga de 130 toneladas por vagão, esse material precisa ter uma alta resistência a tração e ao mesmo tempo uma boa tenacidade, pois será de extrema importância para a absorção de energia gerada pelo impacto durante o acoplamento da composição.

Esse trabalho tem a intenção de demonstrar através de experimentos realizados em laboratório a diferença de microestrutura e propriedades mecânicas desses tratamentos, serão realizados ensaios mecânicos de dureza Rockwell C, tração e impacto (Charpy) conforme norma ASTM A370. Também será realizada análise de composição química em espectrômetro óptico e a caracterização de microestrutura. Após obter os resultados dos ensaios será realizada análise estatísticas com o auxílio do software Minitab com o intuito de provar ou não se o processo é capaz.

O objetivo é verificar uma possível oportunidade de redução de custo no processo produtivo visando redução do consumo de gás natural no beneficiamento de tratamento térmico onde hoje é realizado o seguinte fluxo: normalizar, temperar e revenir. Passando a realizar o fluxo proposto: temperar e revenir, se reduz uma etapa de tratamento térmico que é a normalização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS VAGÕES

Os vagões são os veículos ferroviários destinados exclusivamente ao transporte de cargas dos mais diversos tipos, e podem ser definidos em função de alguns critérios básicos (ROSA, 2012):

- a) Tipo de carga e suas características físico-químicas, como densidade, umidade, granulometria, temperatura, abrasividade, etc.;
- b) Tipo de terminal onde eles serão carregados e descarregados, como por exemplo viradores, esteiras, tanques de armazenagem, etc.;
- c) Gabarito das ferrovias nas quais eles forem trafegar, para que não ocorram riscos de impactos com obstáculos fixos como estações, pontes, túneis, etc.;
- d) Desenvolvido de tal forma que o produto final possa circular em qualquer trem, estando ele vazio ou carregado;
- e) Deve possuir total intercambiabilidade com os demais veículos existentes na ferrovia em termos de seu material especializado de truque, engate e freio;
- f) Deve possuir o máximo de simetria dimensional, ou seja, manter um total equilíbrio de solução estrutural, para que sejam evitadas instabilidades.

Além das características funcionais, também existe a questão da normatização usada no projeto da estrutura e de seus componentes. São duas as normas usadas no mundo para o projeto de material rodante ferroviário:

- a) Europa e parte da África: *Union International des Chemins du Fer* – UIC;
- b) EUA e grande parte das Américas, incluindo Brasil: *Association of American Railroads*– AAR.

Tais normas foram criadas há décadas e tiveram correntes ferroviárias distintas, tomando por base conceitos de distribuição de esforços e limites operacionais próprios de cada região do planeta. Os conceitos e critérios implantados por cada uma delas têm se mantido ao longo dos anos, e suas adaptações são vagarosas, pois impactam diretamente em uma grande quantidade de ativos e respectivos equipamentos existentes. No Brasil, como nos demais países sul-americanos, o início do sistema ferroviário esteve diretamente ligado ao material rodante importado e já usado, gerado pela padronização em curso nos

países de origem. Isso justifica a existência de duas bitolas, 1,00m e 1,60m, quando o mundo já seguia para a padronização em 1,435m.

Os principais tipos de vagões existentes são definidos e normatizados pelos manuais técnicos de padrões e práticas recomendadas. No Brasil estes padrões não têm efeito de lei, mas podem ser considerados como tal em caso de ocorrência e investigação de acidentes.

Como definição, existem seis tipos básicos de vagões:

- a) Fechados
- b) *Hoppers*
- c) Gôndolas
- d) Tanques
- e) Plataformas
- f) Especiais

Os vagões gôndola transportam produtos que não necessitam de proteção contra o tempo, ao contrário dos tipos fechados. São hoje o tipo mais comum nas ferrovias brasileiras em função da grande quantidade de minérios transportados por nossas linhas. Os grandes trens de exportação são formados por gôndolas que descarregam em viradores nos portos.

Suas características principais são:

- a) Vagões de estrutura muito variada em função dos diferentes produtos;
- b) Possuem projeto mais simples se comparado a outros tipos;
- c) Podem operar em sistema de unidades duais em freio e engates;
- d) Podem operar com carga de grande peso ou comprimento;
- e) Podem ser providos de dispositivos que facilitem a descarga;
- f) Projeto que deve obrigatoriamente ser desenvolvido contra fadiga;
- g) Precisam ser dotados de truques que privilegiem as rodas;

A codificação dos vagões estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), compõe-se de:

- a) Letras, onde as 2 primeiras identificam o tipo e o subtipo de vagão, a terceira indicando seu peso máximo (tara + lotação), de acordo com a bitola;
- b) 6 dígitos para a numeração, única para todo o Brasil, identificando a ferrovia;
- c) 1 dígito verificador (*checkdigit*), que permite a rotinas simples de cálculo rejeitarem erros de transcrição de dados;
- d) 1 letra opcional, que tradicionalmente indicava a Regional onde o vagão estava lotado;

Nesse sistema de codificação, vagões GDT e GDU correspondem ao tipo/subtipo Gôndola para descarga em virador (car dumper), para bitola de 1,60m. As letras T e U significam um peso máximo admissível de 119,5 t e 143,0 t, respectivamente. Exemplos podem visualizados nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Vagão GDT



Fonte: (ROSA, 2012)

Figura 2 - Vagão GDU



Fonte: (ROSA, 2012)

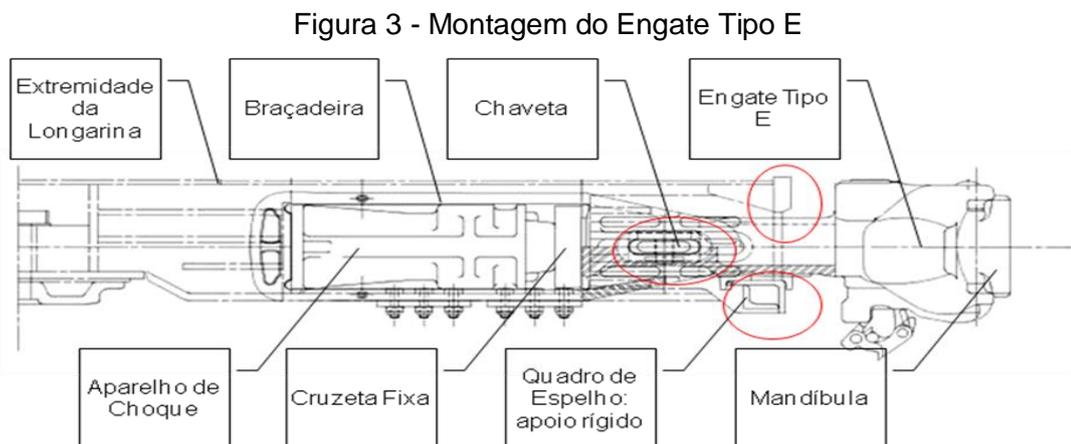
Sistemas de Choque e Tração são os mecanismos responsáveis pelo acoplamento seguro entre locomotivas e vagões para formação da composição ferroviária. Além de uma operação segura, são características fundamentais desses sistemas a flexibilidade, padronização e facilidade de manuseio. Devem garantir o rápido acoplamento e desacoplamento dos vagões, bem como transferir os esforços de tração e compressão ao longo do trem, dentro dos limites estabelecidos.

Os componentes principais destes sistemas são:

- a) Engates: acoplam-se mutuamente, transmitindo os esforços de tração e compressão entre si. No Brasil são operados Sistemas de Choque e Tração cuja montagem utiliza basicamente dois tipos de engates, “E” e “F”;
- b) Mandíbulas: atuam como um “fusível de segurança” do sistema, onde os engates devem ser preservados por seu custo mais alto, e as mandíbulas devem ser sacrificadas por sua característica de peça de reposição. Caso algum ponto venha a romper durante operações incorretas ou no limite, este ponto são as mandíbulas;
- c) Pinos de Conexão (engates tipo F) ou Chavetas (engates tipo E): promovem a conexão do engate com as braçadeiras quando o sistema é tracionado;
- d) Cruzetas: transferem o esforço do engate para o aparelho de choque e tração quando o sistema é comprimido e, quando tracionado, do aparelho de choque e tração para os batentes dianteiros da bolsa padrão (presente nas extremidades das longarinas dos vagões);

- e) Colar rotativo: utilizado na montagem de engates do tipo F, no caso rotativo. Transmite o esforço de tração do pino de conexão para a braçadeira rotativa;
- f) Braçadeiras: quando em tração, transferem a força do engate para o aparelho de choque e tração. Podem ser dos tipos E, F fixa ou F rotativa;
- g) Aparelho de choque e tração: absorvem a energia na operação, impedindo que impactos danosos à estrutura dos vagões causem quebras e / ou acidentes. Parte da energia do acoplamento é absorvida por atrito num conjunto de molas, cunhas e placas, transformando-a em calor.

Os engates do tipo E têm uma maior aplicação em vagões de carga geral. Neste tipo não existem travadores laterais (“interlockings”), sendo seu uso recomendado pela liberdade de movimentação vertical necessária nos pontos da via onde haja desníveis. Suas bases de apoio nos espelhos são rígidas, e evita-se com esta liberdade de movimentação o aparecimento de trincas junto às laterais dos espelhos (Rosa, 2012). A Figura 3 apresenta os componentes básicos da montagem para engates tipo E:



Fonte: (ROSA, 2012)

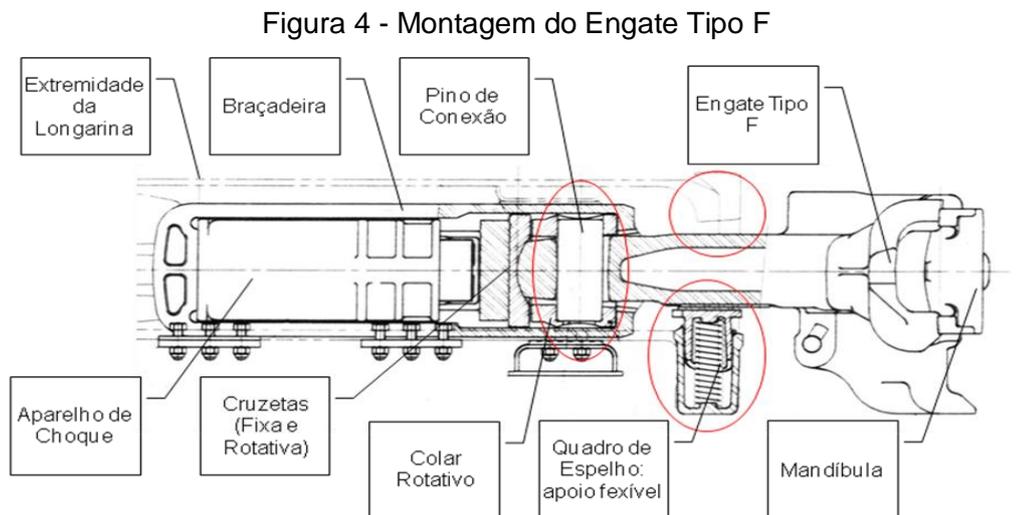
São características desta montagem:

- a) Uso de chaveta horizontal que limita o giro lateral em apenas 7°;
- b) Base de apoio do engate é fixa e rígida;
- c) Folga superior com o espelho é menor;
- d) Alinhamento entre engate, braçadeira e rasgo da viga é fundamental;
- e) Maior dificuldade de nivelamento do engate em caso de empenos da ponta da viga;
- f) Montagem da chaveta, com aparelho pré-encurtado, não deve exigir pancadas;

- g) Fundo da haste do engate é reto, não permitindo movimentos laterais com o Aparelho de Choque já expandido na bolsa padrão;
- h) Distância entre cabeça do engate e espelho deve ser de 95 mm.

2.1.1 Operação e Montagem dos Engates Tipo F

O uso mais frequente dos engates do tipo F é nos longos, pesados e lentos trens tipo unitário, onde a estabilidade é fundamental para uma boa operação ferroviária. Através de seu travamento lateral (“interlocking”) não é permitido o movimento vertical entre as cabeças, aumentando a proteção contra desacoplamentos indesejáveis e a consequente paralisação dos trens. No entanto, com a restrição à movimentação entre as cabeças F, é necessário que a base dos espelhos seja flexível. Embora mais segura, esta opção irá exigir uma folga maior entre o topo do espelho e a cauda do engate (Rosa, 2012). Um esquema simplificado da montagem do tipo F é apresentado na Figura 4 :



Fonte: (ROSA, 2012)

Características da montagem Tipo F:

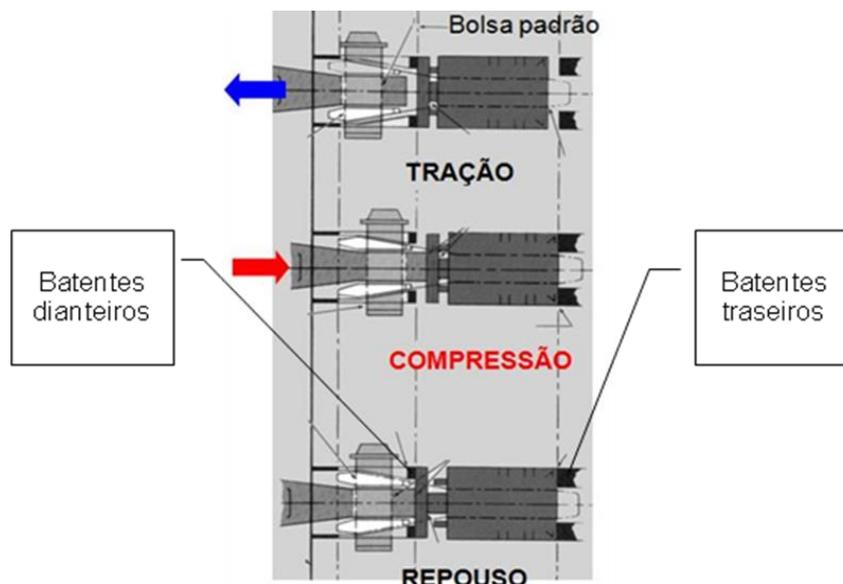
- a) Uso de pino vertical, ampliando o giro lateral para 13°;
- b) Base de apoio do engate é flexível, em função dos “interlockings” laterais;
- c) Folga superior com o espelho é maior em relação aos engates tipo E;
- d) Alinhamento entre engate e braçadeira da viga mantém-se importante;

- e) Maior facilidade de nivelamento do engate em caso de empenos da ponta da viga;
- f) Montagem dos pinos, com aparelho pré-encurtado, é mais difícil nos rotativos;
- g) Fundo da haste do engate (“cauda”) é convexo, permitindo movimentos laterais com o Aparelho de Choque já expandido na bolsa padrão;
- h) Distância entre cabeça do engate e espelho deve ser mantida em 95 mm.

2.1.2 Funcionamento dos Sistemas de Choque e Tração

A Figura 5 mostra o funcionamento de um Sistema de Choque e Tração do Tipo E. Tal funcionamento é basicamente o mesmo para a montagem do Tipo F, variando-se os tipos de componentes.

Figura 5 - Funcionamento do Sistema de Choque e Tração



Fonte: (ROSA, 2012)

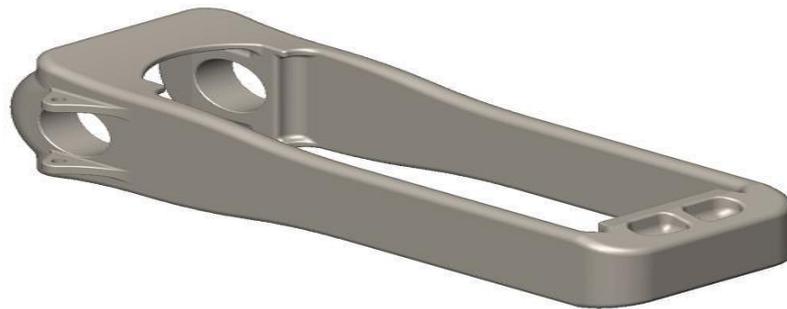
Quando o sistema é tracionado, o engate puxa a braçadeira (Figura 6) pela chaveta (ou pelo pino, no caso da montagem Tipo F), comprimindo o aparelho contra os batentes dianteiros. Na compressão, a cauda do engate empurra a cruzeta contra o aparelho de choque, comprimindo-o contra os batentes traseiros. Na posição de repouso, a pressão exercida no final da cauda pela chaveta permite centralização do engate.

É importante observar que a região da cauda dos engates tem a tração aplicada pela chaveta internamente ao rasgo (para o Tipo E), ou pelo pino de conexão internamente ao furo (no caso do Tipo F). A cauda passa a ser comprimida em sua extremidade pelas

cruzetas, quando da compressão do sistema. Engates do Tipo E e F são apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente, bem como a Mandíbula, figura 9.

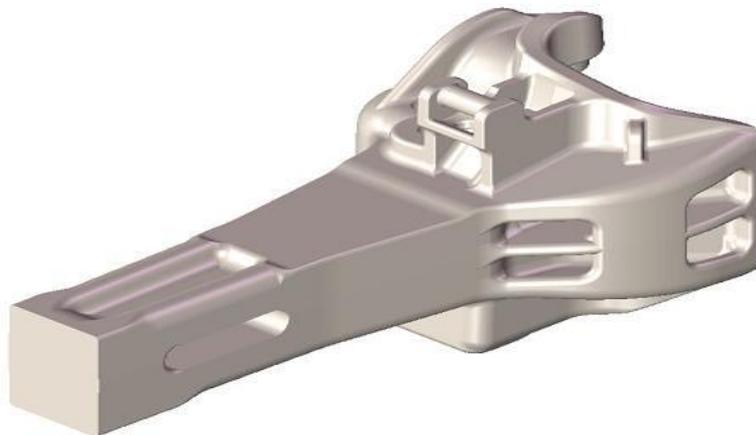
Em vagões conhecidos como Unidade Dual, dois engates podem ser substituídos por uma haste rígida (haste de ligação, figura 10). Estes elementos possuem menor custo, no entanto não permitem o desacoplamento dos vagões que constituem o conjunto.

Figura 6 - Braçadeira



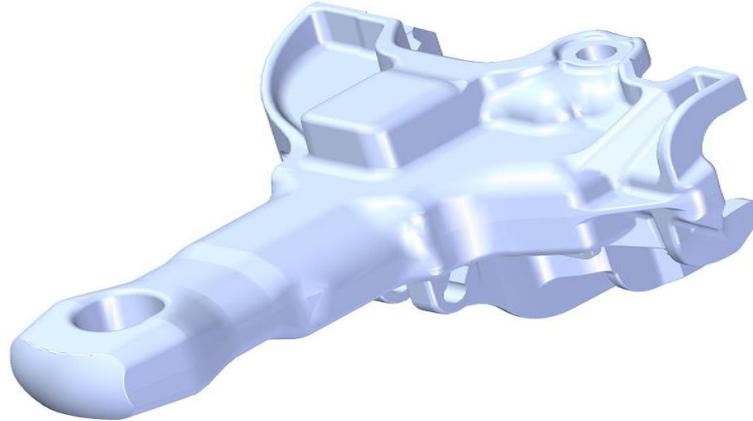
Fonte: O Autor

Figura 7 - Engate Tipo E



Fonte: O Autor

Figura 8 - Engate Tipo F



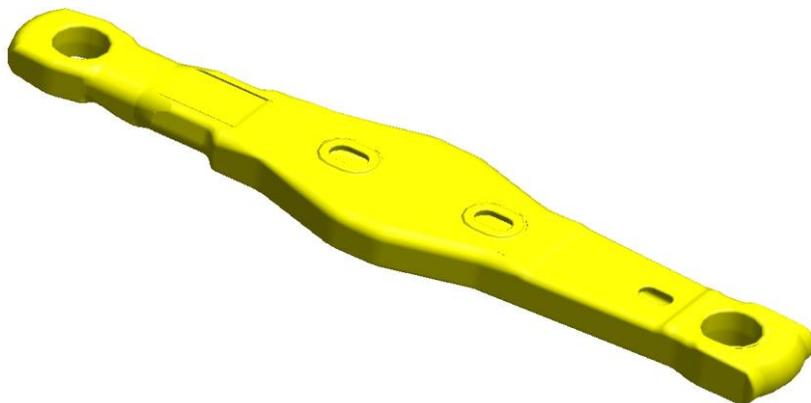
Fonte: O Autor

Figura 9 - Mandíbula



Fonte: O Autor

Figura 10 - Haste de Ligação



Fonte: O Autor

2.2 MOLDES

A obtenção de peças fundidas consiste em preencher um molde que há de vários modelos, com o metal fundido em estado líquido, um molde que reproduz exatamente a forma física das peças. Este molde pode ser de areia, quando só pode ser utilizada uma única vez, no qual é denominado de moldes perdidos. Se o molde é metálico ou coquilha, podem ser utilizadas várias vezes que recebe o nome de molde permanente (TORRE, 2004).

Os moldes metálicos são geralmente utilizados em fundição sobre pressão e em fundição em coquilha. A grande maioria de fundidos é produzida através de moldes confeccionados em areia, em moldação manual ou mecanizada (SENAI, 1987).

2.2.1 Modelos metálicos

Os moldes metálicos são construídos de ferro, latão e alumínio. Aonde constrói-se inicialmente um modelo de madeira com ajustes para mecanização, de onde se obtém por fundição o modelo metálico. Nestes casos deve-se prever a contração que será experimentada pelo modelo metálico que é obtido a partir do modelo original de madeira, pois os modelos de madeira deverão ser projetados com uma tolerância que compense as contrações produzidas na fundição do modelo metálico e depois a que resulta ao fundir as peças definitivas a partir do modelo metálico. Estes modelos são conhecidos como “de dupla contração” (TORRE, 2004).

2.2.2 Preparação de modelos com resinas

As resinas são muito utilizadas na preparação de modelos metálicos. Estas resinas são conhecidas hoje em dia por vários modelos, tipos de densidade e nomes comerciais, segundo a sua procedência e com elas podemos obter modelos e caixas de macho com um material leve, muito duro, resistente à abrasão indeformável com umidade e as variações de temperatura, que assegura uma estabilidade dimensional dos modelos (TORRE, 2004).

2.3 Areis de Moldagem

Os moldes que são utilizados apenas uma única vez, são denominados como perdidos aonde são feitos com areia. Esta areia de moldagem deve reunir uma série de propriedades, aonde possa preparar moldes facilmente e obter dos mesmos peças sem defeito (TORRE, 2004).

Devem ser refratárias, quer dizer, devem ser capazes de suportar as temperaturas do metal fundido sem que os moldes se rompam, gretem-se ou se fundam. Por esta razão, o ponto de fusão da areia de moldagem deve ser superior à temperatura de fusão do metal que se funde. Assim, por exemplo, para a fundição do alumínio pode ser utilizada areias

muito argilosas, cujo ponto de fusão é da ordem de 1250°C. Essas areias seriam completamente inadequadas para preparar moldes de peças de ferro cuja temperatura de colada é de uns 1300°C (TORRE, 2004).

Devem formar uma massa porosa, suficientemente permeável para a evacuação do ar do molde e dos gases que se formam durante a colada. Se o metal fundido não chega a preencher completamente o molde pelo fato do ar que tem em seu interior não possuir saída livre, tem-se como consequência a formação de peças defeituosas, e ademais a sempre o perigo de uma saída violenta dos gases retidos no interior do molde, rompendo bruscamente as paredes dos mesmos com seus consequentes riscos. Relativamente a isto devemos indicar que a permeabilidade requerida em uma areia depende da temperatura de colada do metal que deva ser fundido. Assim, por exemplo, para a fundição de alumínio podem ser utilizadas areias mais finas, isto é menos permeável que na fundição do ferro, já que a quantidade de gases que se desprendem será muito menor que no caso do ferro, portanto, mais fácil a sua evacuação (TORRE, 2004).

Devem ser suficientemente plásticos, a fim desse poder preparar facilmente os moldes, reproduzindo fielmente o contorno das peças, por complicada que seja sua forma e podendo efetuar retoques e reparos nos moldes em caso de necessidade (SENAI, 1987).

E finalmente os moldes obtidos devem ser suficientemente resistentes para suportar sem desmoronamento a entrada do metal fundido nos mesmos. Necessita-se especificar aqui que uma resistência excessiva do molde, por outro lado, pode ocasionar peças gretadas à solidificação do metal fundido e produção de sua contração, no caso em que por sua grande resistência o molde não ceda ante o esforço de contração da peça fundida. Indiquemos também que precisamente na fundição em moldes permanentes ou conquilhas, isto é, indeformáveis, é condição indispensável a desmoldagem rápida da peça, com o fito de não se produzirem gretas ao solidificar-se no interior da conquilha e possa ser retirada do molde com facilidade e além disso nestes casos sempre são utilizadas ligas especiais que possuem contração mínima (TORRE, 2004).

2.3.1 Composição das areias de moldagem

A composição das areias de moldagem são sílica, argila, água e várias outras impurezas que variam conforme o local aonde foram retiradas, como os óxidos de ferro, cal, magnésio, álcalis (TORRE, 2004).

A areia de moldagem deve apresentar elevada refratariedade, boa resistência mecânica, permeabilidade adequada e plasticidade, já a areia destinada a fabricação de machos, além dos requisitos exigidos para areia de moldagem, deve ter boa colapsibilidade, definida como perda de resistência da areia após o início da solidificação da peça evitando assim possíveis defeitos como fissuras e problema dimensional (SENAI, 1987).

2.3.2 Preparação das areias de moldagem

As areias, com o tempo, por estarem em contato com o metal fundido, perdem suas propriedades plásticas e refratárias, de forma que periodicamente é necessário misturá-las com areia nova. A areia que utiliza normalmente é composta de areia velha, areia nova, água e pó de carvão, acrescentando para evitar que a areia venha a aderir às peças, servindo como redutor ao decompor o óxido formado na zona externa das mesmas quando o metal fundido entra em contato com a umidade da areia (TORRE, 2004).

Estas mesclas devem ser preparadas em um moinho misturador e ser utilizadas como “Areias de moldagem” propriamente ditas, para cobrir o modelo, distinguindo-as das areias de enchimento, que são utilizadas unicamente para preencher as caixas e como não estão em contato com o modelo e não influem no acabamento das peças fundidas, podem ser de qualidade inferior ou ainda areia velha que já tenha sido utilizada muitas vezes (TORRE, 2004).

A proporção de umidade é de 5 a 10%, dependendo esta proporção do tipo de peças e do sistema de moldagem utilizados, isto é, moldagem manual ou à máquina. Este conteúdo de umidade influencia, como se pode perceber na plasticidade, permeabilidade e resistência dos moldes e portanto, no curso do tempo, e pela ação de sucessivas coladas em que a areia sofre um aquecimento devido ao metal fundido, deve ser umedecida constantemente a fim de que não perca suas propriedades. Se bem que, por outro lado, um alto grau de umidade produz um grande desprendimento de gases durante a colada e podem originar gretas e defeitos nas peças fundidas, por outro lado, com uma areia muito seca torna-se muito difícil, quando não impossível, a preparação dos moldes. Recomenda-se efetuar constantemente ensaios a fim de determinar o conteúdo de água da areia e mantê-lo sempre na proporção mais conveniente (TORRE, 2004).

2.4 RESINAS SINTÉTICAS

Além do uso de aglutinantes, tornou-se viável ultimamente a utilização das resinas sintéticas, devido a várias vantagens apresentadas sobre os métodos clássicos, como por exemplo a rapidez de preparação, facilidade de retirada dos machos uma vez estando as peças fundidas, eliminação de gases, bom acabamento. (TORRE, 2004).

As resinas fenólicas apresentam-se em forma análoga às uréias. Além destas são utilizados outros tipos de resinas fenólicas que são empregados para a preparação de areias para a moldagem em casca, sistema “crowning” ou “shell-moulding” (TORRE, 2004).

2.5 A FUNDIÇÃO DO AÇO

Os aços são ligas de ferro e carbono com baixo teor deste último elemento, pelo que essencialmente a obtenção do aço consiste na eliminação parcial do carbono contido numa fundição de ferro, bem como do silício e do manganês e até o máximo possível do fósforo e

do enxofre (TORRE, 2004).

Esta operação é efetuada através de uma oxidação, eliminando-se o carbono em forma gasosa formando-se anidrido carbônico ou óxido de carbono e os outros elementos formam óxidos que são eliminados com a escória (TORRE, 2004).

No forno elétrico é possível obter aços de alta qualidade. Como a carga não está em contato com os gases da combustão, reduz-se o perigo de oxidação dos elementos de liga que são juntados para o fabrico de aços especiais que são elevados preço, razão pelo qual o fabrico de aços inoxidáveis e aços rápidos para ferramentas é feito exclusivamente nos fornos elétricos (TORRE, 2004).

Os fornos elétricos de arco utilizam o calor desenvolvido ao produzir-se o arco voltaico entre os eletrodos através da carga metálica (TORRE, 2004).

2.6 CONCEITOS BÁSICOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

As etapas estabelecidas em um processo de tratamento térmico são denominadas pelo aquecimento aonde são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (CHIAVERINI, 2008).

Muitas microestruturas podem ser produzidas em ligas de aço, de acordo com cada um de seu diagrama de fases ferro-carbono de ferro, aonde deve se ressaltar que sua microestrutura se desenvolve a partir do tratamento térmico aplicado e seu teor de carbono apresentado (CALLISTER, 2007).

As propriedades e características dos aços dependem, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, a estrutura dos aços, resultando na alteração de suas propriedades (CHIAVERINI, 2008).

2.6.1 Principais motivos dos tratamentos térmicos

De acordo com Chiaverini (2008), existem alguns motivos para a realização dos tratamentos térmicos, tais como:

- Remoção de tensões.
- Aumento ou diminuição da dureza.
- Aumento da resistência mecânica.
- Melhora da ductilidade.
- Melhora da usinabilidade.
- Melhora da resistência ao desgaste.
- Melhora das propriedades de corte.
- Melhora da resistência a corrosão.
- Melhora da resistência ao calor.

2.6.2 Aquecimento

A ideia principal em um aquecimento de um aço para tratamento térmico é o simples processo para devidas propriedades que se deseja, mediante uma determinada modificação que se processa na sua estrutura. Assim sendo, o aquecimento é geralmente realizado a uma temperatura acima da crítica, para termos a completa austenitização do aço, ou seja, total dissolução do carboneto de ferro no ferro gama, essa austenitização é o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais vão ocorrer em função da velocidade de esfriamento adotada (CHIAVERINI, 2008).

A temperatura de aquecimento é um ponto no processo fixo, determinado pela estrutura do processo e propriedades das estruturas finas desejadas, assim como da composição química do aço, principalmente do seu teor de carbono (CHIAVERINI, 2008).

2.6.3 Tempo de permanência a temperatura de aquecimento

A temperatura escolhida para o aquecimento do aço para o processo é estabelecida pela máxima atingida até a suas características desejadas, isto é, quanto mais longo o tempo a temperatura de austenitização, mais completa a dissolução do carboneto de ferro ou de outras fases presentes (elementos de liga) no ferro gama, porém maior será o tamanho de grão resultante (CHIAVERINI, 2008).

2.6.4 Resfriamento

É a parte mais importante no processo pois é aonde vai determinar a estrutura desejada no aço e as propriedades finais dos aços. Como pela variação da velocidade de resfriamento pode-se obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza até a martensita que é constituinte mais duro resultante dos tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 2008).

2.6.5 Atmosfera do forno

Nos tratamentos térmicos dos aços, deve-se evitar dois fenômenos muito comuns e que podem causar sérios aborrecimentos: a oxidação que resulta na formação indesejada da “casca de óxido” e a descarbonetação que pode provocar a formação de uma camada mais mole na superfície do metal (CHIAVERINI, 2008).

2.7 NORMALIZAÇÃO

A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças de aço fundido principalmente; frequentemente, e com o mesmo objetivo, a normalização é aplicada em peças depois de laminadas ou forjadas. A normalização é ainda usada como tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, justamente para produzir estrutura mais uniforme do que a obtida por laminação, por exemplo, além de reduzir a tendência ao empenamento e facilitar a solução de carbonetos e elementos de liga. Sobretudo nos aços-liga quando os

mesmos são esfriados lentamente após a laminação, os carbonetos tendem a ser maciços e volumosos, difíceis de se dissolver em tratamentos posteriores de austenitização. A normalização corrige esse inconveniente. Os constituintes que se obtêm na normalização são ferrita e perlita fina, ou cementita e perlita fina (CHIAVERINI, 2008).

Para o tratamento de normalização o aço AAR M201 grau E deve ser aquecido até atingir a temperatura de austenitização e garantir um tempo de patamar que proporcione total austenitização, após esse patamar resfriar as peças ao ar calmo (AAR, 2007).

2.8 TÊMPERA

Consiste no aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização entre 815°e 870°C, seguido de resfriamento rápido (CHIAVERINI, 2008).

Os meios de resfriamento utilizados dependem da endurecibilidade dos aços (teor de carbono e presença de elementos de liga), da forma e dimensões das peças submetidas à têmpera, porque o que se procura nessa operação, é a obtenção da estrutura martensítica, para o que se deve, portanto, fazer com que a curva de resfriamento passe à esquerda do cotovelo da curva em C (CHIAVERINI, 2008).

De acordo com Colpaert (2008), para esclarecimento convém recapitular os seguintes fatos que ocorrem com a austenita quando o esfriamento é lento:

1°) Há separação de ferrita, ou de cementita, na zona crítica, conforme se trate de aço hipoeutetóide ou hipereutetóide.

2°) Todo o ferro gama se transforma em ferro alfa ao transpor a linha inferior da zona crítica, porque nessa temperatura a quantidade de carbono na austenita atinge a linha Acm e a precipitação da cementita baixa localmente o teor de carbono da austenita, favorecendo a nucleação de ferrita.

3°) Pelo mesmo mecanismo, o crescimento de ferrita produz uma elevação no teor de carbono da austenita adjacente, favorecendo a nucleação de cementita.

“Esse processo de nucleação e crescimento alternados de ferrita e de cementita, da origem a perlita” (COLPAERT, 2008).

Na tempera o aço deve ser aquecido a temperatura de austenitização e mantê-lo em um patamar para que proporcione total austenitização e depois resfria rapidamente em água para se obter estrutura martensítica. Após a tempera a peça devera ser imediatamente ou até no máximo 8 horas submetida ao tratamento térmico de revenido pois de passar desse tempo poderá ocorrer trincas devido as tensões geradas pela tempera (AAR, 2007).

De acordo com Chiaverini (2008), os meios mais comuns de resfriamento são líquidos, no caso dos meios líquidos, os mais comumente usados são:

- água.
- água contendo sal ou aditivos cáusticos.

- óleo, que pode conter uma variedade de aditivos.
- soluções aquosas de polímeros.

Como na têmpera o constituinte final desejado é a martensita, os objetivos dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, são aumento de dureza do aço e da sua resistência à tração. Na realidade, o aumento da dureza deve ocorrer até uma certa profundidade (CHIAVERINI, 2008).

Quando submetido a resfriamento rápido o fenômeno acima não acontece devido a migração dos elementos exige tempo para se efetuar. Em consequência o resfriamento brusco transforma a austenita numa solução sólida supersaturada de carbono no ferro alfa essa estrutura e chamada de martensita e se caracteriza no microscópio depois de um ataque mais demorado em finas estrias retas, que podem se dispôr em três posições, como triângulo, essas direções se dão devido a vestígio dos traços dos planos cristalográficos da austenita, que sofreram os escorregamentos na reação martensítica (COLPAERT, 2008).

Resultam também da têmpera, redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas, que podem, se não bem controladas, ocasionar deformação, empenamento e fissuração (CHIAVERINI, 2008).

Para que a operação de têmpera seja bem-sucedida, vários fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de resfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. De fato, as transformações de austenita nas altas temperaturas podem dar como resultado estruturas mistas, as quais ocasionam o aparecimento de pontos moles além de conferirem ao aço baixos valores para o limite de escoamento e para a resistência ao choque. Portanto, a secção das peças constitui outro fator importante porque pode determinar diferenças de esfriamento entre a superfície e o centro (CHIAVERINI, 2008).

Na estrutura martensítica o ferro está numa forma alfa modificada pelo excesso de carbono, cuja presença estorva as deformações plásticas a tal ponto, que elas se tornam praticamente impossível, daí se dá a grande dureza da martensita (COLPAERT, 2008).

A tempera modifica profundamente as propriedades do material tomando valores altos de dureza, resistência à tração, mas por outro lado à resistência ao choque, o alongamento, a estrição cai em valores muito baixos e também devido às tensões residuais devido à expansão da martensita podem ocorrer trincas no material (COLPAERT, 2008).

Então devido a esses valores baixos de algumas propriedades mecânicas fundamentais e também as tensões residuais fazem se necessárias à realização de um tratamento térmico posterior a tempera conhecido como revenido (COLPAERT, 2008).

2.9 REVINIDO

O processo de revenido é o tratamento térmico que vem logo após a têmpera, pois com ele pode-se eliminar a maioria dos defeitos que são produzidos no processo de têmpera, e ainda diminuir ou remover as tensões internas, melhora as durezas excessivas e as fragilidades do material, aumentando sua resistência ao choque e ductilidade (CHIAVERINI, 2008).

O revenido é um tratamento térmico que vem a corrigir esses inconvenientes restituindo ao aço grande parte das propriedades perdidas sem afetar aquelas visadas pela tempera (COLPAERT, 2008).

2.9.1 Fragilidade de revenido

Alguns aços, principalmente aços-liga de baixo teor em liga, demonstram uma característica por adquirirem fragilidade, quando são aquecidos na faixa de temperaturas 375 - 575°C, ou quando são resfriados, lentamente nesta faixa. Esse fenômeno é conhecido com o nome de 'fragilidade de revenido'. A fragilidade ocorre mais rapidamente na faixa 450 - 475°C. Os aços-carbonos comuns contendo manganês, níquel e cromo, além de uma ou mais impurezas, como o antimônio, fósforo, estanho ou arsênio são mais propícios ao fenômeno (CHIAVERINI, 2008).

2.9.2 Transformação da austenita retida

De acordo com a composição química de um aço e de acordo de como foi realizado o tratamento térmico ele pode apresentar "austenita retida" ou "austenita residual" que, ao ser transformar posteriormente, pode ocasionar o fenômeno de instabilidade dimensional (CHIAVERINI, 2008).

O revenido como pode ser chamado "2º estágio de revenido" entre 200° e 300°C, transforma a austenita retida em ferrita e cementita. Esta reação do revenido ocorre em aços de médio ou alto carbono. No revenido, para a obtenção de um certo grau de estabilidade dimensional, seria necessário empregar-se a máxima temperatura de aquecimento permissível, tendo em vista a dureza desejada, de modo a desenvolver-se a contração máxima possível (CHIAVERINI, 2008).

2.10 DEFEITOS E DISTORÇÕES DURANTE O TRATAMENTO TÉRMICO

Os defeitos que se apresentam durante o processo de tratamento térmico são vários e devem ser detectados desde o seu principio para que seja tomada as devidas precauções para realizar os reparos para ocorrer o processo adequado (CHIAVERINI, 2008).

2.11 MUDANÇAS DIMENSIONAIS

Estas compreendem mudanças nas dimensões e na forma das peças e são consequência da composição química, das mudanças de fases durante o aquecimento e o

resfriamento subsequente e das tensões mecânicas e térmicas que se originam no processo. A mudança na forma das peças é devida sobretudo as tensões mecânicas e térmicas, provocadas pelas modificações das características do reticulado cristalino. De fato, ao ser aquecido, o aço assume a estrutura austenítica e ao ser resfriado lentamente formam-se as fases ferrita e carboneto, ou a ser resfriado rapidamente a estrutura martensítica. Novas transformações ainda ocorrem quando o aço é submetido ao revenido. Como todas as fases mencionadas possuem diferentes estruturas cristalinas e de reticulado, o seu volume é diferente. Outra causa é a retenção da austenita, comum em aços de alto carbono e com elementos de liga. As modificações nas dimensões das peças são causadas também pelas tensões térmicas e mecânicas (CHIAVERINI, 2008).

2.12 FALHAS

As falhas mais comuns que podem ocorrer em um material são as trincas, que se originam através de suas tensões em um processo de tempera. As causas mais comuns estão o projeto das peças, tipos de aços, defeitos das próprias peças sob tratamento, a prática do tratamento térmico e a prática do revenido. Com relação ao projeto das peças está ligado aos cantos vivos que podem ocasionar falhas, o número, tamanho e localização dos orifícios, chavetas profundas, e mudanças profundas de espessura das secções, pois em um rápido resfriamento ocorrem vários pontos estruturais sobre tensões nas peças. Outros fatores que podem causar as trincas são defeitos superficiais, inclusões, etc. O tratamento térmico no qual seu material é submetido ocasiona o aparecimento de falhas que basicamente vão ser a granulação muito grosseira dos aços, aquecimento muito rápido em alguns tipos de aço e o tipo de meio de resfriamento. E outro tipo de falha que pode ser ocasionado pelo seu equipamento de tratamento térmico sobretudo no que se refere aos dispositivos de controle de temperatura, pois aquecimentos acima do estabelecido podem ocasionar excessivo crescimento de grão ou, na cementação, camadas mais espessas que as necessárias e, quando as temperaturas forem inferiores às especificadas, austenitização incompleta e estruturas finais diferentes das previstas. Não são falhas mecânicas, mas estruturais, as quais podem levar ao refugo das peças (CHIAVERINI, 2008).

2.13 PROPRIEDADES DE TRAÇÃO

A maioria dos materiais é projetado para que ocorra apenas deformação elástica quando uma tensão for aplicada, um material que se deformou plasticamente, ou que sofreu mudanças permanentes em sua estrutura, pode não ser capaz de funcionar como programado, sendo desejável conhecer o nível de tensão no qual a deformação plástica tem início ou aonde ocorre o fenômeno do escoamento. Os metais que apresentam essa

transição elastoplástica gradual aonde o ponto de escoamento se denomina pelo afastamento da linearidade na curva tensão-deformação, pode ser chamado de limite de proporcionalidade (CALLISTER, 2007).

Para determinar as propriedades mecânicas de um material é necessário a realização de um conjunto de testes, o qual se denomina ensaios mecânicos, a maioria destes ensaios são de caráter destrutivo inutilizando como por exemplo ensaio de tração, dobramento, impacto, torção, fadiga, flexão, compressão e também o ensaio de dureza que em algumas situações pode não inutilizar o material, mas também se enquadra como destrutivo (SOUZA, 1982).

2.13.1 Limite e resistência a tração

Após o escoamento em um metal, a tensão que se é aplicada para continuar a deformação plástica nos metais aumenta até chegar em seu valor máximo, e após vai decaindo até chegar a ocorrer a ruptura do material (CALLISTER, 2007).

O limite de resistência a tração é aonde ocorre a tensão máxima no material na curva tensão-deformação, toda deformação ocorrida neste intervalo é uniforme ao longo de toda sua região estreita do corpo de prova de tração (CALLISTER, 2007).

Nesta região ocorre uma pequena constrição ou estrangulamento que por sua vez é conhecido como empescoçamento, que é o local aonde ocorre a fratura (CALLISTER 2007)

2.13.2 Ductilidade

A ductilidade é uma propriedade mecânica que é representada como uma medida do grau de deformação plástica de um material que foi suportado até a sua fratura, quando um material apresenta uma deformação plástica muito pequena ou até mesmo nenhuma deformação plástica até a fratura é denominada de fratura frágil (CALLISTER, 2007).

Pode ser expressa quantitativamente tanto como alongamento percentual ou como uma redução percentual de área (CALLISTER, 2007).

2.13.3 Resiliência

É a capacidade de um material absorver energia quando ele for deformado elasticamente e, depois ocorra a remoção da carga e recuperação desta energia (CALLISTER, 2007).

2.14 DIAGRAMA DE FASES FERRO-CARBETO DE FERRO

O ferro puro em seu aquecimento apresenta duas mudanças em sua estrutura cristalina antes de chegar a fundir, que a temperatura ambiente está forma estável é chamada de ferrita que possui uma estrutura cristalina CCC (CALLISTER, 2007).

A 912°C a ferrita sofre uma transformação polimórfica em sua estrutura para a austenita que possui sua estrutura cristalina CFC que por si continua em sua estrutura atual

até a temperatura de 1394°C, aonde a sua estrutura CFC se reverte novamente a uma fase CCC que é conhecida como ferrita e que finalmente se funde a 1538°C (CALLISTER, 2007).

2.15 SIGNIFICADO DE ENSAIO MECÂNICO

Para determinar as propriedades mecânicas de um material é necessário a realização de um conjunto de testes, o qual se denomina ensaios mecânicos, a maioria deste ensaio são de caráter destrutivo inutilizando como por exemplo ensaio de tração, dobramento, impacto, torção, fadiga, flexão, compressão e também o ensaio de dureza que em algumas situações pode não inutilizar o material, mas também se enquadra como destrutivo (SOUZA, 1982).

Existem também ensaios que são de caráter não destrutivos onde o material não é inutilizado esses ensaios são para verificar a sanidade internas e externas dos materiais podendo detectar algum defeito de fabricação no material com, por exemplo, trincas, rechupes, porosidades de gás, inclusões e outros, dentro deste grupo temos os ensaios de Partícula magnética, Ultrassom, Raio X, liquido penetrante e outros (SOUZA, 1982).

Os tipos de ensaios mecânicos que serão realizados são escolhidos conforme o tipo de propriedade física que será analisada no material e também de sua finalidade, ou seja, o tipo de esforço que o mesmo será submetido na sua aplicação (SOUZA, 1982).

Na maioria das vezes já existe especificações para todo tipo de material fabricado e nessas especificações já indica quais os ensaios que devem ser realizados para saber se o material esta em conformidade com a especificação (SOUZA, 1982).

2.16 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração por sua vez é um dos ensaios mais importante devido a sua facilidade de execução e a reprodutividade dos resultados (SOUZA, 1982).

Esse ensaio consiste de uma aplicação de força em um corpo sólido promovendo uma deformação do material no sentido do esforço, ou seja, esse esforço aplicado tende a esticá-lo ou alonga-lo (SOUZA, 1982).

Os copos de provas são padronizados por normas para que os resultados possam ser comparados e se necessário reproduzidos em novas amostras. Este corpo de prova é fixado em uma maquina de ensaio que aplica uma carga crescente na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes por intermédio de um aparelho especial que acoplado a maquina o mais comum é o extensômetro. Os esforços ou cargas são medidos na própria maquina de ensaio e o corpo de prova é levado até a sua ruptura (SOUZA, 1982).

Com esse tipo de ensaio,

Pode se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo seu corpo, pelo menos até ser

atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material. A uniformidade da deformação em função da tensão aplicada. Essa variação, extremamente útil para o engenheiro, é determinada pelo traçado da curva de tensão-deformação, a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos. A uniformidade de deformação termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estrição ou diminuição da secção do corpo de prova, nos casos de metais com certa ductilidade. A ruptura sempre se dá na região estrita do material, a menos que um defeito interno no material, fora dessa região, promova a ruptura do mesmo, o que raramente acontece (SOUZA, 1982).

A precisão do ensaio de tração depende de vários fatores, por exemplo, a precisão dos instrumentos e equipamento os mesmos deverão estar devidamente calibrados por órgãos competentes, o correto posicionamento do corpo de prova na máquina de tração porque se o mesmo estiver desalinhado levarão a falsa leitura das deformações para uma mesma carga aplicada devido a os esforços assimétricos que aparecerão. Outro fator muito importante é a velocidade do ensaio, em geral os métodos de ensaio especificam a velocidade em torno de 1kgf/mm^2 por segundo (SOUZA, 1982).

Através do ensaio de tração convencional é possível obter propriedades como limite de resistência, limite de escoamento, alongamento e estrição (SOUZA, 1982).

2.17 ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto é um dos primeiros e até hoje um dos ensaios mais empregados para o estudo de fratura frágil nos metais (SOUZA, 1982).

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico que é utilizado para determinar a aceitação de matérias para aplicação em baixas temperaturas. O corpo de prova é padronizado conforme norma e provido de um entalhe para direcionar a sua ruptura e produzir estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão por impacto, produzida por um martelo pendular (SOUZA, 1982).

Conforme (SOUZA, 1982)

A energia que o corpo de prova absorve, para se deformar e romper, é medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo. Nas máquinas em geral essa energia é lida na própria máquina através de um ponteiro que corre numa escala graduada, já convertida em unidade de energia. Pela medida da área da secção entalhada do corpo de prova, pode-se então obter a energia absorvida por unidade de área, que também é útil. Quando menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material aquela solicitação dinâmica (SOUZA, 1982).

O resultado do ensaio de impacto representa apenas uma medida de energia absorvida e não fornece indicações seguras sobre o comportamento do metal ao choque em

geral, o que seria possível se pudesse ensaiar uma peça inteira sob as condições práticas (SOUZA, 1982).

Os corpos de prova para ensaio de impacto podem ser de duas classes, corpo de prova Charpy e corpo de prova Izod, que são normatizados pela ASTM E23. Os corpos de prova Charpy são divididos em 3 tipos conforme o tipo de entalhe, dessa forma tem-se o corpo de prova Charpy tipo (A) com entalhe em forma de V, o Charpy tipo (B) com entalhe em forma de fechadura e o Charpy tipo (C) com entalhe em forma de U sendo que todos eles com a seção quadrada de 10mm de lado e um comprimento de 55 mm e o entalhe feito no meio do corpo de prova, no caso do corpo de prova Izod tem uma seção quadrada de 10mm de lado com comprimento de 75 mm e o entalhe é feito sempre em forma de V, a uma distância de 28mm de uma das extremidades (SOUZA, 1982).

O corpo de prova tipo Charpy é apoiado e o corpo de prova tipo Izod é engastado na máquina de ensaio, sendo o martelo montado na extremidade de um pêndulo e ajustado num ponto, de tal maneira que sua energia cinética, no ponto de impacto, tenha um valor fixo e especificado. O martelo é solto e bate no corpo de prova seja tipo Charpy ou Izod. Depois de romper o corpo de prova, o martelo sobe até uma altura que é inversamente proporcional à energia absorvida para deformar e romper o corpo de prova. Assim quanto menor for a altura atingida pelo martelo, mais energia o corpo de prova terá absorvido. Essa energia é lida diretamente na máquina de ensaio (SOUZA, 1982).

A temperatura de ensaio tem influência decisiva nos resultados obtidos e deve, portanto, ser mencionada no resultado, juntamente com o tipo de corpo de prova que foi ensaiado (SOUZA, 1982).

2.18 ENSAIO DE DUREZA

Dureza é uma das propriedades mecânicas que é largamente utilizada nas especificações de matérias e em estudos e pesquisas no campo da metalurgia e metal mecânico, sendo assim existe vários significados para dureza, por exemplo, para o metalurgista dureza significa a resistência à deformação plástica permanente, para um engenheiro mecânico significa a resistência à penetração de um material duro no outro, para um projetista a dureza é considerada a base para medidas de resistência e do tratamento térmico ou mecânico de um metal e de sua resistência ao desgaste e para um técnico em usinagem de metais dureza significa a resistência ao risco que um material pode fazer em outro (SOUZA, 1982).

Assim não é possível obter uma definição única para dureza que englobe todos os conceitos mencionados acima. Sob esse ponto de vista o ensaio de dureza pode ser dividido em três tipos principais 1) por penetração; 2) por choque e 3) por risco (SOUZA, 1982).

O método de dureza brinell simbolizada por HB é o tipo de dureza mais usada até os dias de hoje na engenharia (SOUZA, 1982).

Esse método consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço de diâmetro D , sobre uma superfície de um metal plana e preparada com aspecto polido através de uma carga Q , durante um tempo t . Essa compressão provocara uma impressão (calota) permanente no metal tendo um diâmetro, d , o qual se realiza sua medida com um micrômetro ou lupa graduada, depois de removida a carga. O valor do diâmetro da calota, d , deve ser a media de duas leituras a 90° uma da outra (SOUZA, 1982).

“Inicialmente J.A. Brinell propôs uma carga, Q , igual a 3000 kg de uma esfera de aço com 10 mm de diâmetro e as tabelas existentes, que fornecem diretamente a dureza brinell calculada para cada valor d , são na maioria baseadas nestes dois valores de Q e D .” (SOUZA, 1982).

Existe uma relação empírica ente a dureza Brinell e o limite de resistência convencional para o caso de aços que é muito útil para saber aproximadamente o limite de resistência de um aço sem precisar realizar ensaio de tração, algumas vezes impossível devido ao comprimento da amostra, e é dada pela relação seguinte: Limite de resistência a tração = $0,36 \cdot HB$ (SOUZA, 1982).

2.19 MICROGRAFIA

A metalografia microscópica dos metais estuda os produtos metalúrgicos, com o auxilio do microscópio, visando a determinação de constituintes e de sua textura. Este estudo e realizado em superfícies metálicas devidamente preparadas polidas e atacadas por um reativo adequado para o tipo de metal e o que deseja se revelar (COLPAERT 2008).

Todos os aços têm sua microestrutura aonde apresenta-se as suas fases e seus defeitos cristalinos existentes na mesma. As propriedades de cada material estão ligada e são dependente da sua microestrutura, um caso muito comum é o tamanho do grão em uma estrutura cristalina que interfere no limite de escoamento dos sólidos policristalinos, de certa forma as propriedades estão diretamente ligadas a sua quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases e dos defeitos cristalinos (PADILHA, 1997).

O estudo metalográfico foca inicialmente em esclarecer que os metais de um modo geral são agregados cristalinos cujos cristal perfeitamente justaposto e unidos tanto podem ser quimicamente idênticos, como de composição química diferente. Esses cristais são chamados de grãos em virtude de sua conformação, mas quando apresentam formas ou aspectos particulares, podem ser chamados de veios, nódulos, agulhas, glóbulos etc (COLPAERT, 2008).

Com análise realizada em um microscópio pode-se observar a microestrutura de um aço e suas diferentes fases e defeitos presentes em sua estrutura, assim como todas suas propriedades (PADILHA, 1997).

São necessários parâmetros para quantificar as microestruturas dos materiais e na maioria das vezes, os parâmetros utilizados são os tridimensionais, com alguns exemplos a fração volumétrica, para quantificar a quantidade e o diâmetro médio, para quantificar o tamanho (PADILHA, 1997).

Há algumas propriedades que são pouco dependentes da microestrutura como a densidade, aonde depende da natureza dos átomos e tipo de ligação química e de estrutura cristalina e da quantidade das fases presentes, a forma, tamanho e distribuição pouco interferem na densidade de um material (PADILHA, 1997).

A importância do exame metalográfico decorre do fato de as propriedades mecânicas não dependerem somente da composição química como também de sua estrutura cristalina. Um mesmo material pode assumir diversas propriedades mecânicas de acordo com o tipo de estrutura cristalina o qual é constituído podendo ser duro, mole, quebradiço, elástico, tenaz etc., essa estrutura pode ser modificada por meio de trabalhos mecânicos ou tratamento térmico (COLPAERT, 2008).

Os parâmetros tridimensionais podem apresentar suas medidas em duas dimensões que já apresentam sua estrutura, em alguns casos a metalografia quantitativa utiliza parâmetros que não são exatos com os valores reais em três dimensões, mas que representam a microestrutura relativamente bem que é o caso do diâmetro médio de grão (PADILHA, 1997).

A análise química e de extrema importância para definir qual os constituintes (elementos químicos) que compõe o material e análise metalográfica é crucial para entender como o material adquiriu as propriedades que apresenta. Essas informações são muito importantes para a fabricação e melhoria do produto (COLPAERT, 2008).

2.20 CLASSIFICAÇÃO DAS MICROESTRUTURAS

De acordo com Padilha (1997), as microestruturas de um material são consideradas complexas, e mesmo assim há maneiras de classifica-las de acordo com suas propriedades:

Propriedades fortemente dependentes da microestrutura

- Limite de escoamento;
- Limite de resistência;
- Alongamento;
- Tenacidade;
- Temperatura de transição dúctil-frágil;
- Resistência ao impacto;

- Condutividade elétrica;

Propriedades pouco dependentes da microestrutura

- Módulo de elasticidade;
- Módulo de cisalhamento;
- Coeficiente de Poisson;
- Módulo de compressibilidade;

2.21 CARACTERÍSTICAS DO AÇO E, NORMA AAR-M201

A publicação “Manual of Standards and Recommended Practices”, do departamento de Segurança e Operações da AAR, inclui todas as normas, especificações e práticas recomendadas pela Associação Americana de Ferrovias. Em sua seção S, parte I (“Casting Details”), é detalhado os requerimentos para fundidos e sistemas de acoplamento. A especificação M-201 em particular, cobre fundidos de aço carbono e baixa liga para locomotivas e vagões usando os graus denominados A, B, B+, C, D e E. Diversos componentes do sistema de choque e tração são fundidos no grau E, que deve ser fornecido temperado e revenido (AAR, 2007).

Devem ser atendidos os requisitos de composição química conforme Tabela 1, bem como os de propriedades mecânicas conforme Tabela 2:

Tabela 1 - Composição Química do Aço E, AAR-M201

Elemento	C	Mn	Si	P	S
% Máximo	0,32	1,85	1,50	0,04	0,04

(AAR, 2007)

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas do Aço E, AAR-M201

Propriedade (mínimo/faixa)	LR(Mpa)	LE(Mpa)	AL(%)	RA(%)	Dureza (HB)	Charpy (J,-40°C)
Engates	827	689	14	30	241-311	27
Braçadeiras	827	689	14	30	241-311	27
Mandíbulas	827	689	14	30	241-291	27

(AAR, 2007)

Conforme o manual AAR o aço M-201 grau E pode ser fornecido na condição de normalizado, temperado e revenido ou então somente na condição de temperado e revenido (AAR, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Características do aço e, norma AAR– M201

As características de composição química e propriedades mecânicas do aço AAR estão demonstradas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Composição Química do Aço E AAR-M201

TIPOS AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS BAIXA LIGA ao Cr-Mo (%)													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	B	Ti*	Zr*	V	Al
E	0,21 0,27	1,40 1,80	0,35 0,60	0,025 máx	0,025 máx	0,32 0,42	0,20 0,30	0,25 máx	0,50 máx	-	0,005 0,030	-	-	0,020 0,050

Fonte: Autor

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Aço E AAR-M201

TIPOS AÇO	PROPRIEDADES MECANICAS DOS AÇOS BAIXA LIGA ao Cr-Mo – VALORES MINIMOS						
	LR (MPa)	LE (MPa)	AI (%)	RA (%)	DUREZA (HB)	Trat. Térmico	Normas Equivalentes
E	827	689	14	30	241 - 311	NO + TE + RV	AAR M-201 Grau E

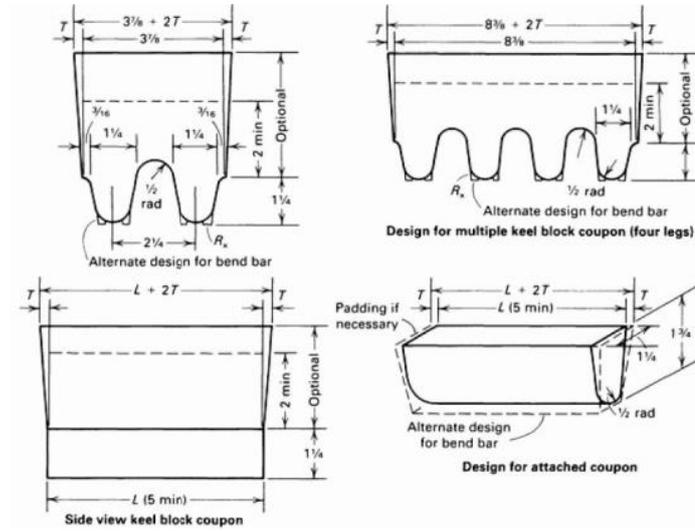
Fonte: O Autor

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Moldagem e vazamento dos corpos de prova

Foram fundidos vinte corpos de prova em aço AAR M-201 GRAU E . A figura 11 demonstra o modelo de corpo de prova (Keel block) utilizado para fundir as peças para testes de tratamento térmico. A figura 12 mostra os corpos de prova sendo fundidos e a figura 13 os corpos de prova primários serrados após a fundição e desmolde. Do total de 20 corpos de prova, dez foram submetidos ao tratamento térmico de normalização. Após a normalização dos dez corpos de prova os mesmos foram temperados e revenidos juntamente com os dez restantes que não foram submetidos ao tratamento de normalização.

Figura 11 - Keel Block



Fonte: O Autor

Figura 12 - Moldes Vazados



Fonte: O Autor

Figura 13 - Corpos de Prova Primários



Fonte: O Autor

3.2.2 Análise Química do material fundido

Foi realizada análise química em espectrômetro óptico de queima para se determinar a análise química real dos corpos de prova fundidos. A figura 14 demonstra o tipo de equipamento utilizado para análise. A tabela 4 demonstra a análise química encontrada.

Tabela 5 - Composição Química Elementos

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	B	Al	T	V	Ceq
0.22	1.64	0.43	0.012	0.006	0.39	0.24	0.03	0.04	0.0004	0.030	0.0225	0.011	0.70

Fonte: O Autor

Figura 14 - Espectrômetro Óptico de Queima

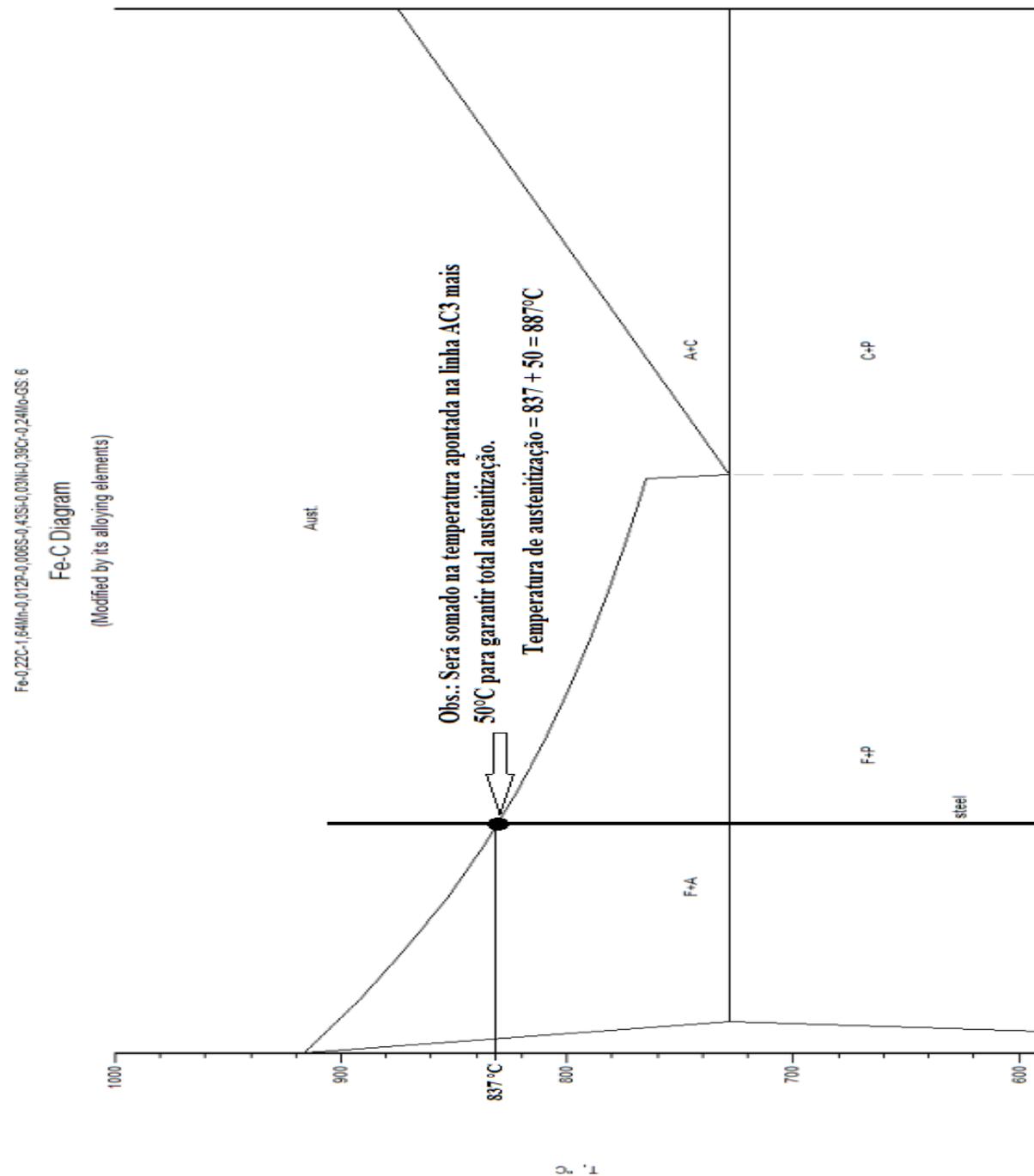


Fonte: O Autor

3.2.3 Tratamento térmico de Normalização.

Antes de se executar o tratamento de Normalização, foi utilizado o software SteCal 3.0 para se determinar a temperatura ideal para austenitização. O gráfico 1 demonstra a temperatura encontrada pelo software.

Gráfico 1 - Diagrama Ferro Carbono Temperatura de austenitização



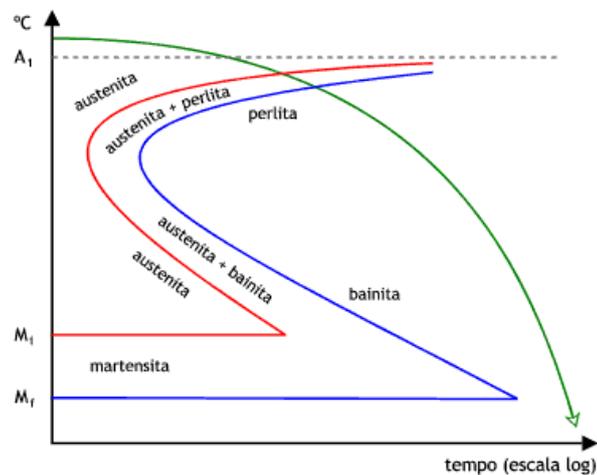
Após a limpeza e preparação, foi realizado o tratamento térmico de Normalização em 10 corpos de provas. A tabela 6 descreve todos os vinte corpos de prova e mostra que somente os de número 1 a 10 sofreram este tipo de tratamento. Na tabela também é demonstrado os parâmetros utilizados para realização da Normalização. Os corpos de prova de 11 a 20 não passaram por esse tratamento. Na figura 15 é colocado a curva TTT para o Aço AAR M201 GRAU E.

Tabela 6 - Normalização dos corpos de provas

Nº Amostra	Identificação			Normalização						
	Aço	Numero do Corpo de Prova	Corrida	Forno	Carga	Temperatura [°C]	Início da carga	Início de Patamar	Fim de patamar	
1	E	AH907 (1)	153597	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
2		AH908 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
3		AH911 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
4		AH915 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
5		AH916 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
6		AH917 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
7		AH919 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
8		AH923 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
9		AH926 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
10		AH928 (1)	153997	5020	12877	910	10:59:00	14:35:00	16:50:00	
11		AH907 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
12		AH908 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
13		AH911 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
14		AH915 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
15		AH916 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
16		AH917 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
17		AH919 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
18		AH923 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
19		AH926 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
20		AH928 (2)	153997	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Fonte: O Autor

Figura 15 - Curva TTT Aço AAR M201 GRAU E (Normalização)



Fonte: O Autor

3.2.4 Tratamento térmico de têmpera e revenido.

Após a normalização foi realizado a têmpera junto com os outros 10 corpos de prova que não sofreram normalização. O Gráfico 2 mostra a curva de revenido para o Aço AAR M-201 Grau E, as tabelas 7 e 8 mostra os parâmetros utilizados para o tratamento térmico de têmpera e revenimento. As figuras 16, 17 e 18 mostra a material sendo temperado, entrando na água para têmpera e saindo da água após o resfriamento. A figura 19 mostra a curva TTT utilizada para a realização da têmpera no aço AAR M-201 Grau E.

Gráfico 2 - Curva de revenido para o aço AAR M-201 Grau E

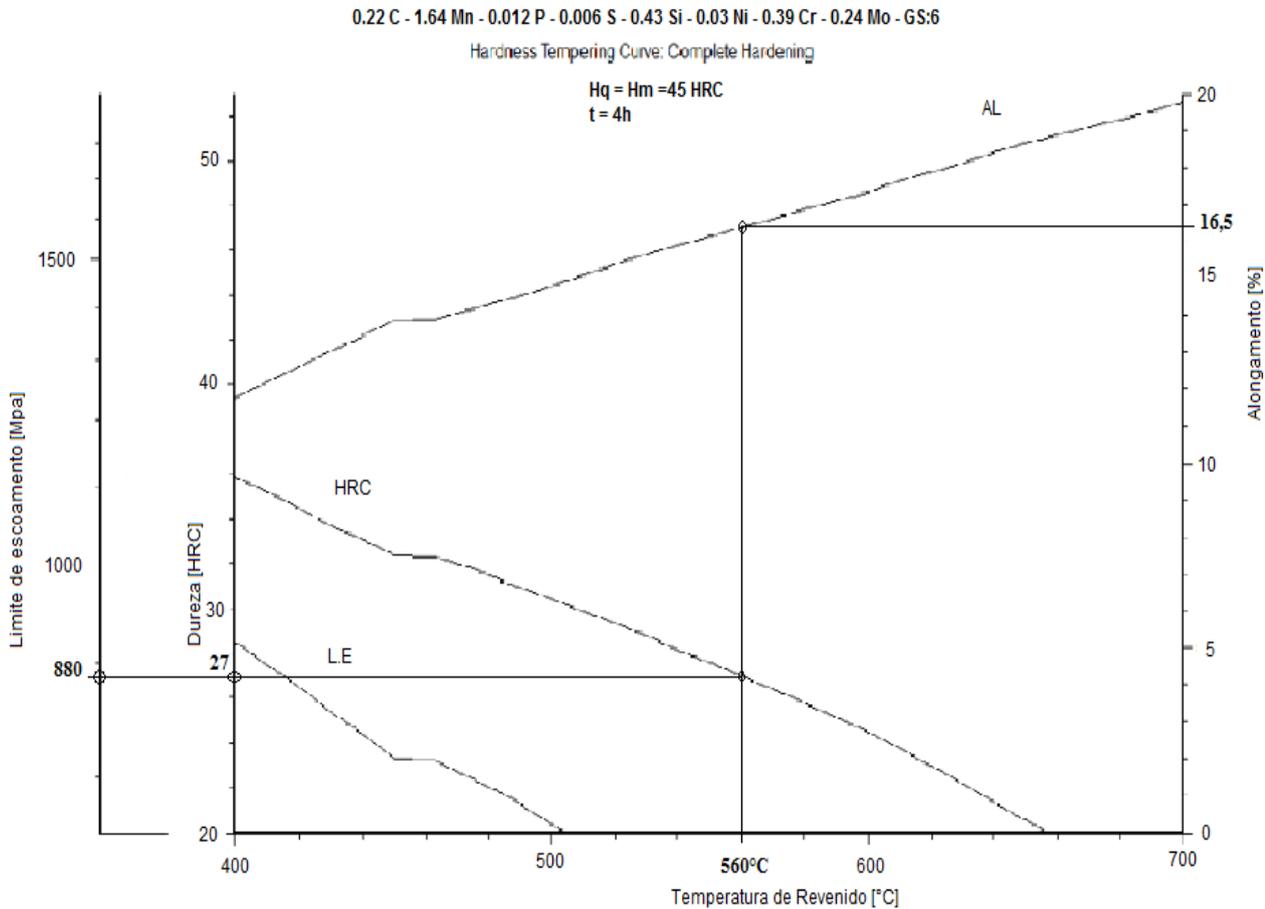


Tabela 7 – Dados de Tempera

Identificação		Tempera							Dureza	
Nº Amostra	Numero do Corpo de Prova	Forno	Carga	Temperatura [°C]	Início da carga	Início de Patamar	Fim de patamar	Temperatura da Água [°C]	Dímetro da Calota [mm]	HB
1	AH907 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	3,0	415
2	AH908 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
3	AH911 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
4	AH915 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	2,9	444
5	AH916 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	2,9	444
6	AH917 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	3,0	415
7	AH919 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
8	AH923 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
9	AH926 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	3,0	415
10	AH928 (1)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
11	AH907 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
12	AH908 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	3,0	415
13	AH911 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
14	AH915 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	3,0	415
15	AH916 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
16	AH917 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	2,8	477
17	AH919 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
18	AH923 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	2,8	477
19	AH926 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26		
20	AH928 (2)	5020	12880	870	23/06/2016 08:16	23/06/2016 11:10	23/06/2016 13:15	26	2,8	477

Fonte: O Autor

Tabela 8 - Dados Revenido

Identificação		Revenido						Dureza	
Nº Amostra	Numero do Corpo de Prova	Forno	Carga	Temperatura [°C]	Início da carga	Início de Patamar	Fim de patamar	Dímetro da Calota [mm]	HB
1	AH907 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,72	266
2	AH908 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46		
3	AH911 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,76	260
4	AH915 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,74	263
5	AH916 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46		
6	AH917 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46		
7	AH919 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,74	263
8	AH923 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46		
9	AH926 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46		
10	AH928 (1)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,78	257
11	AH907 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,56	292
12	AH908 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46		
13	AH911 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,72	266
14	AH915 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,7	269
15	AH916 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,6	285
16	AH917 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,64	278
17	AH919 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,7	269
18	AH923 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46		
19	AH926 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,74	263
20	AH928 (2)	5021	13406	560	23/06/2016 17:10	23/06/2016 19:46	23/06/2016 23:46	3,62	282

Fonte: Autor

Figura 16 - Saída da Carga (Austenitização)



Fonte: O Autor

Figura 17 - Carga imersa na água



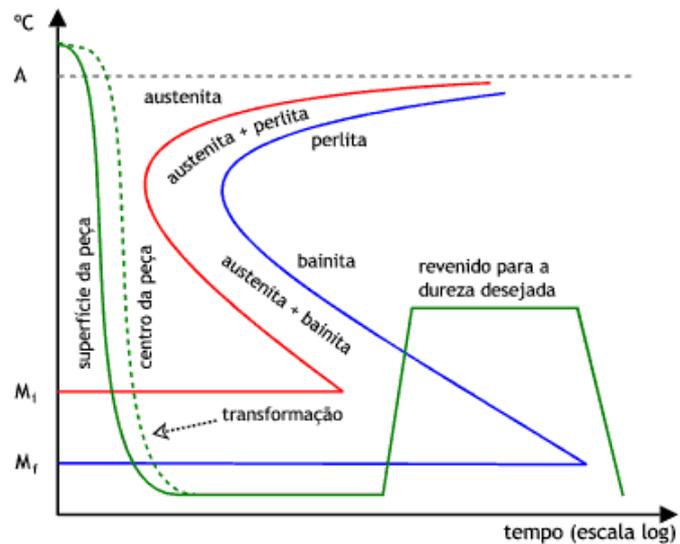
Fonte: O Autor

Figura 18 - Retirada da carga do tanque de resfriamento



Fonte: O Autor

Figura 19 - Curva TTT Aço AAR M201 GRAU E (Tempera)



Fonte: O Autor

3.2.5 Ensaio mecânicos e metalográficos

Após tratamento térmico e ensaio de dureza foram separados e preparados 5 CPs que foram submetidos a normalização, tempera e revenido e 5 CPs que foram submetidos somente a tempera e revenido para realização dos ensaios de tração conforme ASTM A370.

As figuras 20 a 21 demonstra o tipo de máquina de ensaio de tração utilizada e a figura 22 mostra os corpos de prova de ensaio de tração usinados prontos para serem ensaiados.

Figura 20 - Máquina de Ensaio de Tração



Fonte: O Autor

Figura 21 - Máquina de Ensaio de Tração (Corpo de Prova)



Fonte: O Autor

Figura 22 - Corpo de prova usinados



Fonte: O Autor

Também foi separado 4 CPs que foram submetidos a normalização, tempera e revenido e 4 CPs que foram submetidos somente a tempera e revenido para realização dos ensaios de impacto charpy conforme ASTM E23, onde estes ensaios foram realizados com os corpos de prova a uma temperatura de -40°C tendo como especificado pela norma AAR M-201 GRAU E o valor mínimo de energia absorvida de 27 J. A figura 23 mostra os corpos de provas já usinados conforme ASTM E23, a figura 24 mostra a broçadeira máquina que realiza a abertura do entalhe em “V” no centro do corpo de prova, a figura 25 mostra a máquina para realização do ensaio de charpy, a figura 26 mostra o recipiente onde os corpos de provas sofrem encharque em uma solução de álcool e Co_2 até atingirem a temperatura de -40°C aferida por um termômetro de contato demonstrado na figura 27 e a figura 28 mostra a fratura nos corpos de provas após realização dos ensaios.

Figura 23 - Corpos de prova charpy conforme ASTM E23



Fonte: Autor

Figura 24 - Máquina de entalhe para corpo de prova charpy



Fonte: Autor

Figura 25 - Máquina de ensaio de impacto charpy



Fonte: Autor

Figura 26 - Recipiente de encharque corpo de prova charpy



Fonte: Autor

Figura 27 - Termômetro de Contato



Fonte: Autor

Figura 28 - Corpo de prova charpy após o ensaio



Fonte: Autor

Para análise metalográfica foi preparada as amostras retirando uma pequena amostra dos corpos de prova primário onde as mesmas foram embutidas conforme figura 29 e 30 e lixadas na sequência de lixas 220; 320; 400; 600; 1000; 1500; 2000 na politriz conforme figura 31 e realizado o polimento com pasta de diamante, logo em seguida foi realizado o ataque em nital 2% por 7 segundos para revelar microestrutura resultante do tratamento térmico e analisado em microscópio óptico conforme figura 32. Para análise de tamanho de grão austenítico foi realizado ataque com reagente composto por 1,5 g ácido pícrico+100ml de água destilada +1g de detergente aquecido a 60°C.

Figura 29 - Embutidora



Fonte: Autor

Figura 30 - Amostra embutida



Fonte: Autor

Figura 31 - Politriz



Fonte: Autor

Figura 32 - Microscópio Óptico



Fonte: Autor

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIOS MECÂNICOS E METALOGRAFICOS.

4.1.1 Ensaio de tração.

A Tabela 9 mostra os resultados dos ensaios de tração realizado em 5 corpos de provas na condição de temperado e revenido, podemos analisar que os resultados foram satisfatórios atendendo os valores especificados pela norma AAR M-201 GRAU E mostrado na tabela 3.

Tabela 9 - Resultados obtidos no ensaio de tração (Temperado e Revenido)

N° CP	L.R [MPa]	L.E [MPa]	AL [%]	R.A [%]	Média	D.P
AH928 (2)	845,5	738,1	16,8	44,46	411,2	99,3
AH907 (2)	833,7	705,2	18,56	48,3	401,4	90,9
AH923 (2)	839,6	731,5	16,46	46,11	408,4	97,4
AH908 (2)	828,1	696,5	17,16	45,48	396,8	84,9
AH916 (2)	847,4	738,1	19,1	49,66	413,5	98,4

Fonte: O Autor

A Tabela 10 mostra os resultados dos ensaios de tração realizado em 5 corpos de provas na condição de normalizado, temperado e revenido, podemos analisar que os resultados não atenderam os valores especificados pela norma AAR M-201 GRAU E mostrado na tabela 3 sendo que o limite de resistência e o limite de escoamento ficaram abaixo do especificado. Mas para esta situação podemos atingir facilmente os valores especificados alterando os parâmetros de revenido, ou seja, abaixar um pouco mais a temperatura de revenido permitindo assim um aumento na dureza e conseqüentemente uma melhora nos limites de resistência e escoamento e a redução mínima no alongamento e na redução de área.

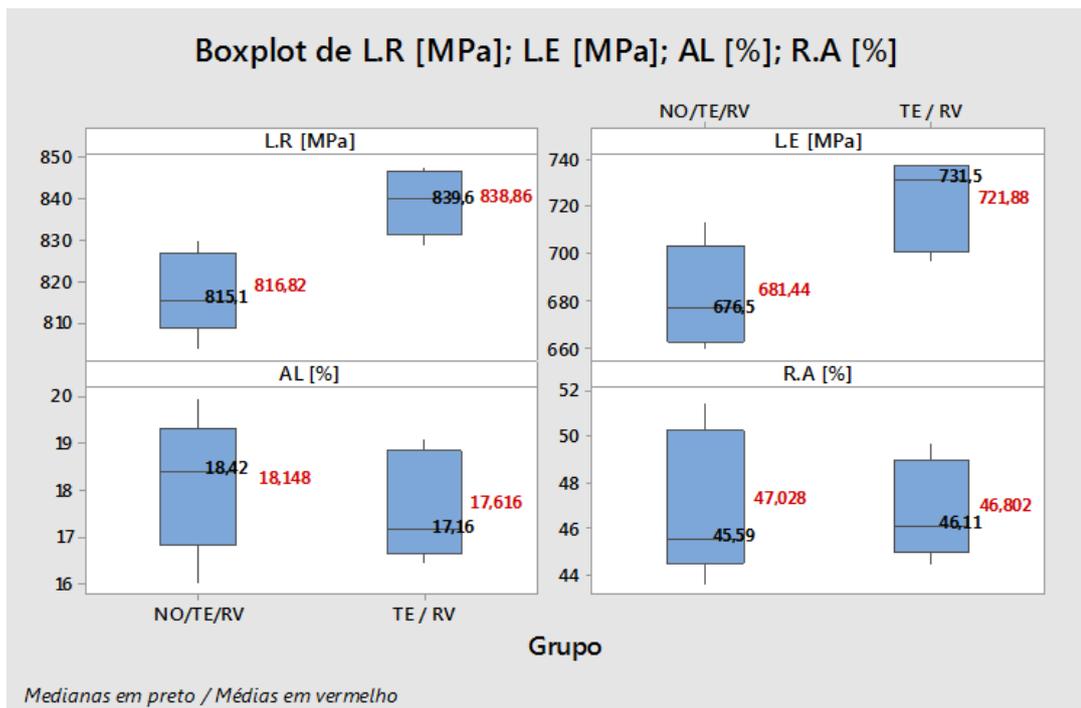
Tabela 10 - Resultados no ensaio de tração (Normalizado Temperado e Revenido)

N° CP	L.R [MPa]	L.E [MPa]	AL [%]	R.A [%]	Média	D.P
AH926 (1)	813,1	665,4	17,66	45,59	385,4	82,3
AH916 (1)	803,2	692,1	18,66	51,44	391,3	86,3
AH917 (1)	815,1	676,5	18,42	49,08	389,7	84,1
AH908 (1)	822,9	659,2	19,98	45,4	386,8	81,4
AH923 (1)	829,8	714	16,02	43,63	400,8	93,5

Fonte: O Autor

Para uma melhor análise dos resultados encontrados nos ensaios de tração, os valores foram plotados em um gráfico Boxplot com auxílio do software Minitab. Os mesmos estão demonstrados nos gráficos 3, 4, 5, 6 e 7. Nesses gráficos foram comparados as médias e medianas dos cinco corpos de prova ensaiados em cada teste.

Gráfico 3 - Resultados dos ensaios de tração

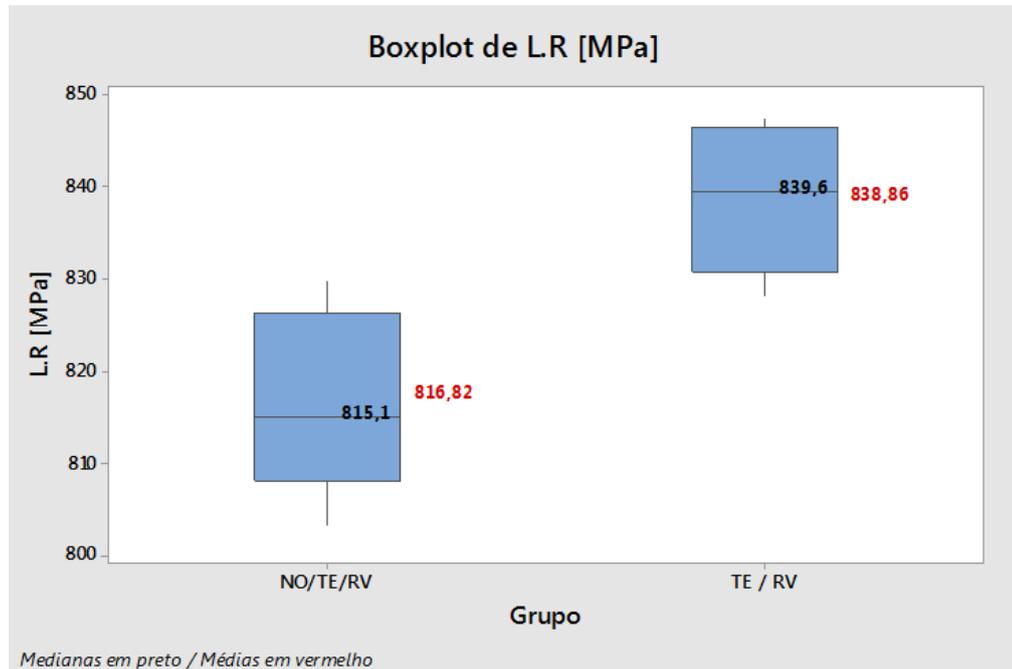


Fonte: O autor

Esse gráfico demonstra as médias (em preto) e as medianas (em vermelho) dos cinco corpos de prova de cada condição, onde o eixo y mostra a dispersão dos valores encontrados, lembrando que quanto mais próximo o valor da mediana for do valor da média isso indica que teremos uma distribuição normal.

Veremos nos gráficos que os valores de cada propriedade como limite de resistência, limite de escoamento, alongamento e redução de área estão em gráficos separados para melhor análise, e também foi realizado teste "T" conhecido como teste de hipótese que compara o valor de duas médias e determina se esses valores são iguais ou diferentes.

Gráfico 4 - Limite de Resistencia



Fonte: O autor

Figura 33 - Análise estatística (L.R.)

Teste T para Duas Amostras e IC: L.R [MPa]; Grupo**Método** μ_1 : média de L.R [MPa] quando Grupo = NO/TE/RV μ_2 : média de L.R [MPa] quando Grupo = TE / RVDiferença: $\mu_1 - \mu_2$

Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.

Estatísticas Descritivas: L.R [MPa]

Grupo	N	Média	DesvPad	Média EP
NO/TE/RV	5	816,8	10,1	4,5
TE / RV	5	838,86	8,06	3,6

Estimativa da diferença

IC de 95%

para a

Diferença	Diferença
-22,04	(-35,70; -8,38)

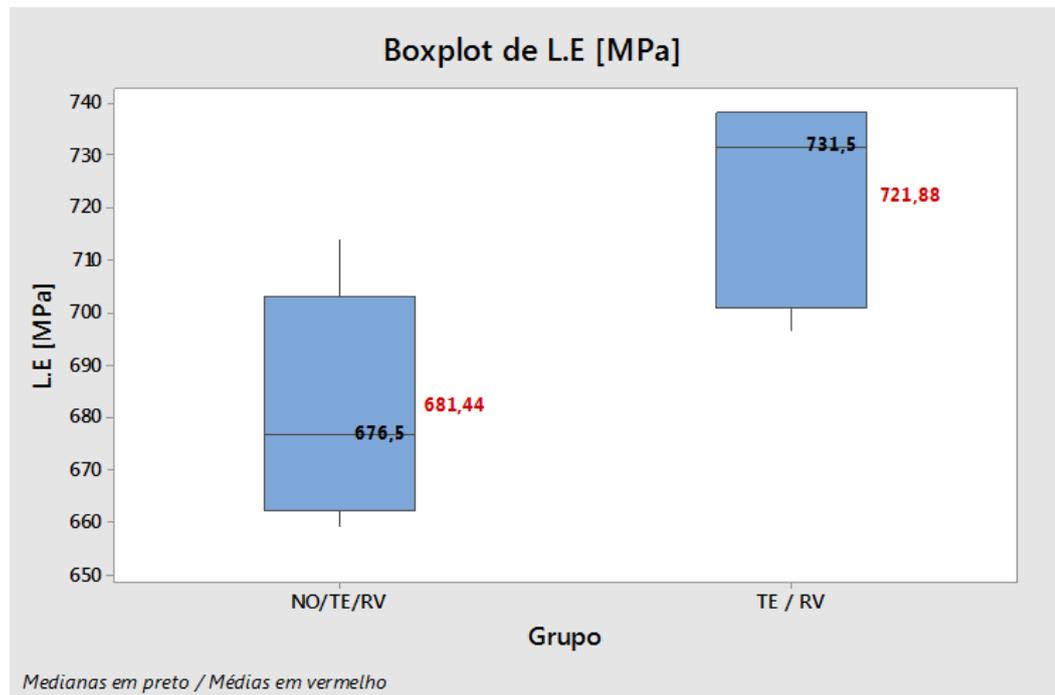
TesteHipótese nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ Hipótese alternativa $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
-3,81	7	0,007

Fonte: O autor

Podemos concluir pela análise do gráfico 4 e do teste de hipótese que as médias são diferentes devido a não assumir uma igualdade de variância e o **valor p** está inferior a 0,05 e adotarmos a hipótese alternativa.

Gráfico 5 - Limite de Escoamento



Fonte: O autor

Figura 34 - Análise estatística (L.E.)

Teste T para Duas Amostras e IC: L.E [MPa]; Grupo**Método** μ_1 : média de L.E [MPa] quando Grupo = NO/TE/RV μ_2 : média de L.E [MPa] quando Grupo = TE / RVDiferença: $\mu_1 - \mu_2$

Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.

Estatísticas Descritivas: L.E [MPa]

Grupo	N	Média	DesvPad	Média EP
NO/TE/RV	5	681,4	22,1	9,9
TE / RV	5	721,9	19,6	8,8

Estimativa da diferença

IC de 95%

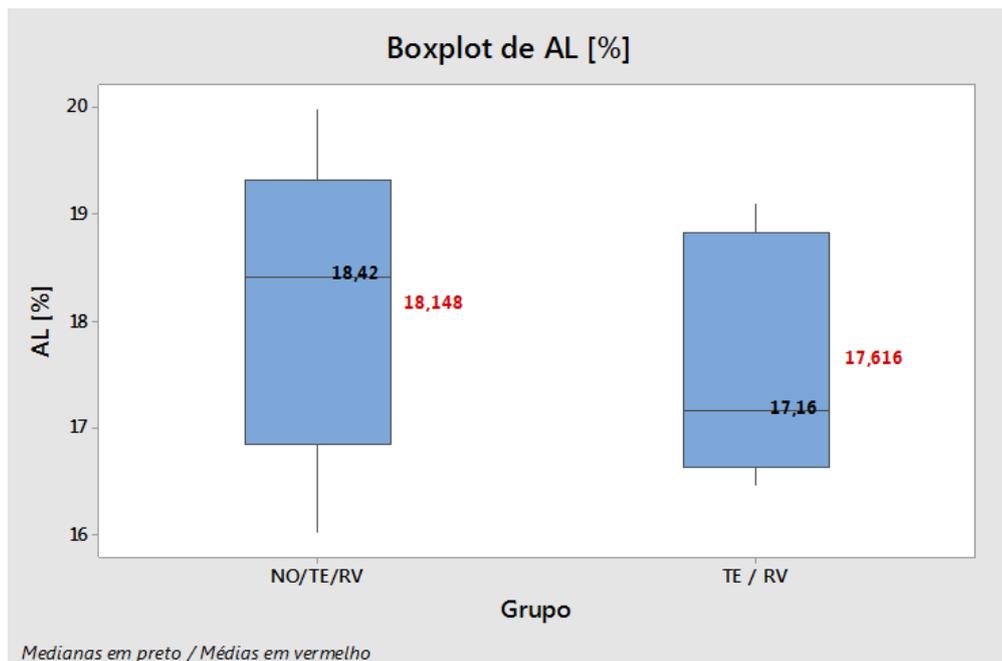
para a

Diferença Diferença
-40,4 (-71,7; -9,2)**Teste**Hipótese nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ Hipótese alternativa $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ Valor-T GL **Valor-p**
-3,06 7 **0,018**

Fonte: Autor

Podemos concluir pela análise gráfico 5 e do teste de hipótese figura 34 que as médias são diferentes devido a não assumir uma igualdade de variância e o valor p esta inferior a 0,05 e adotarmos a hipótese alternativa.

Gráfico 6 - Alongamento



Fonte: O autor

Figura 35 - Análise estatística (A.L.)

Teste T para Duas Amostras e IC: AL [%]; Grupo

Método

μ_1 : média de AL [%] quando Grupo = NO/TE/RV

μ_2 : média de AL [%] quando Grupo = TE / RV

Diferença: $\mu_1 - \mu_2$

Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.

Estatísticas Descritivas: AL [%]

Grupo	N	Média	DesvPad	EP	Média
NO/TE/RV	5	18,15	1,45		0,65
TE / RV	5	17,62	1,15		0,51

Estimativa da diferença

IC de 95%

para a

Diferença	Diferença
0,532	(-1,430; 2,494)

Teste

Hipótese nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

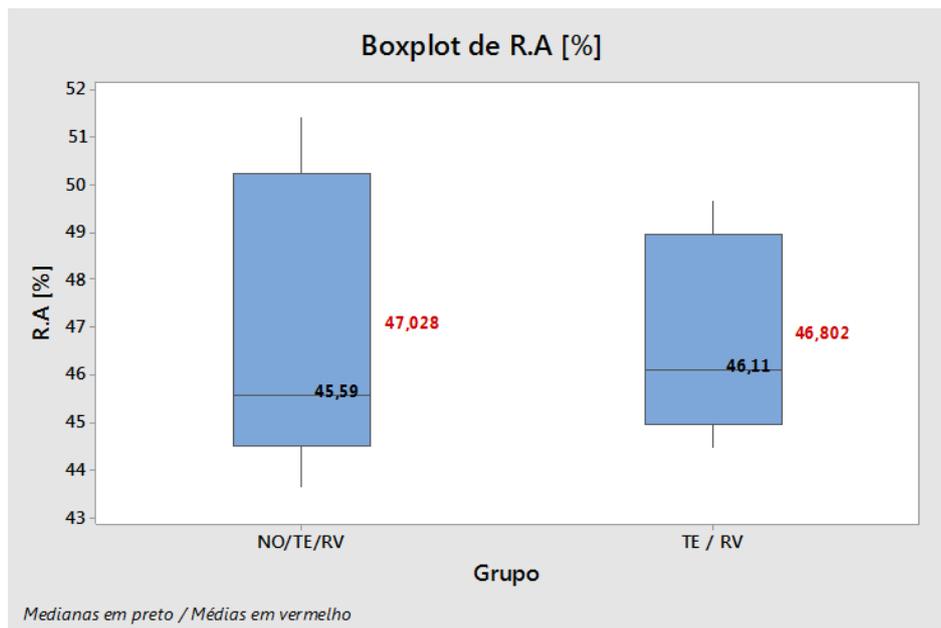
Hipótese alternativa $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
0,64	7	0,542

Fonte: Autor

Após a análise do gráfico 6 e do teste de hipótese figura 35 onde o valor p está acima de 0,05, dessa forma temos que adotar a hipótese nula, não podemos afirmar que as médias são diferentes isso porque se aumentarmos o número de amostra essa condição poderá sofrer alterações.

Gráfico 7 - Redução de área



Fonte: O autor

Figura 36 - Análise estatística (R.A.)

Teste T para Duas Amostras e IC: R.A [%]; Grupo**Método** μ_1 : média de R.A [%] quando Grupo = NO/TE/RV μ_2 : média de R.A [%] quando Grupo = TE / RVDiferença: $\mu_1 - \mu_2$

Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.

Estatísticas Descritivas: R.A [%]

Grupo	N	Média	DesvPad	EP	Média
NO/TE/RV	5	47,03	3,16	1,4	
TE / RV	5	46,80	2,13	0,95	

Estimativa da diferença

IC de 95%

para a

Diferença	Diferença
0,23	(-3,80; 4,26)

TesteHipótese nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ Hipótese alternativa $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
0,13	7	0,898

Fonte: Autor

Após a análise do gráfico 7 e do teste de hipótese figura 36 onde o valor p está acima de 0,05, dessa forma temos que adotar a hipótese nula, não podemos afirmar que as médias são diferentes isso porque se aumentarmos o número de amostra essa condição poderá sofrer alterações.

4.1.2 Ensaio de impacto charpy.

A tabela 11 mostra os resultados obtidos no ensaio de impacto charpy realizado nos corpos de prova que foram submetidos a tratamento termico de tempera e revenido, onde os valores de energia absorvida não atenderam a norma AAR M-201 GRAU E que especifica o valor minimo de 27 J a uma temperatura de -40°C.

Tabela 11 - Resultados obtidos no ensaio de charpy (Temperado e Revenido)

N° CP	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.P
AH926 (2)	19,62	14,71	20,6	18	6,40
AH919 (2)	16,68	18,64	22,56	19	5,03
AH917 (2)	23,54	18,64	22,56	22	4,38
AH911 (2)	17,66	17,66	18,64	18	0,28

Fonte: O Autor

A tabela 12 mostra os resultados obtidos no ensaio de impacto charpy realizado nos corpos de prova que foram submetidos a tratamento térmico de normalização, tempera e revenido, onde os valores de energia absorvida atenderam a norma AAR M-201 GRAU E.

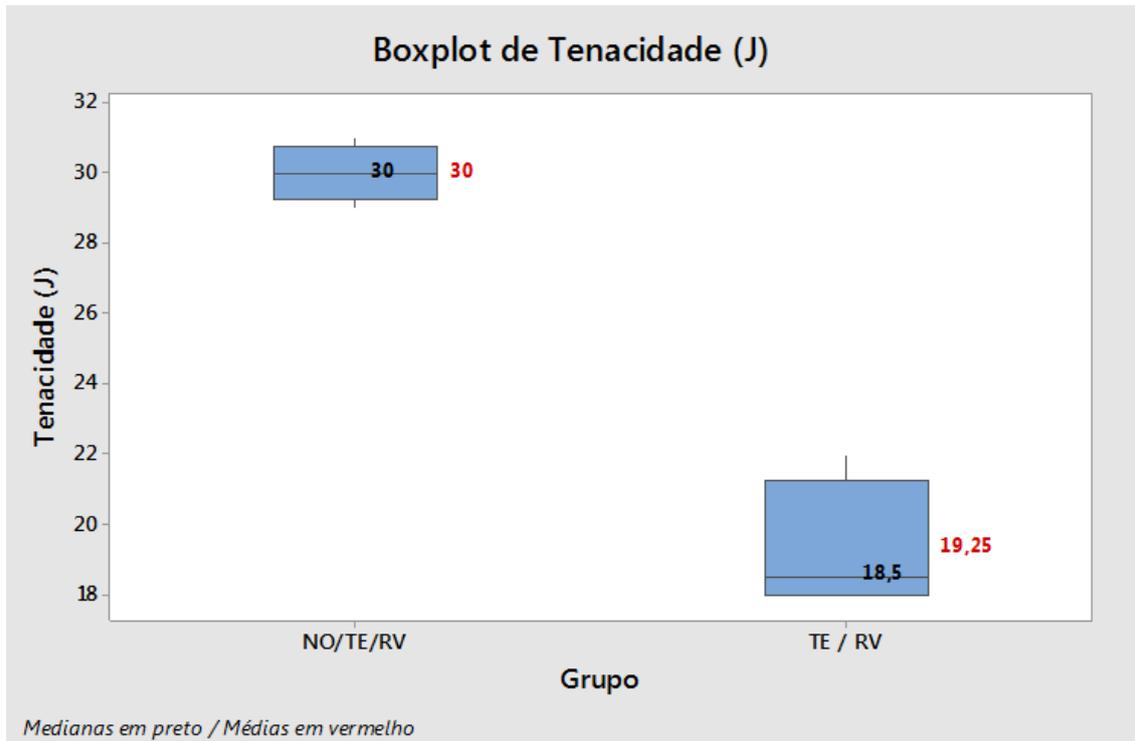
Tabela 12 - Resultados obtidos no ensaio de charpy (Normalizado, Temperado e Revenido)

N° CP	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.P
AH907 (1)	29,43	28,45	32,37	30	2,86
AH919 (2)	28,45	31,39	29,43	30	1,26
AH917 (2)	29,43	31,39	31,39	31	0,62
AH911 (2)	30,41	29,43	27,47	29	1,31

Fonte: O Autor

Para uma melhor analise dos resultados encontrados nos ensaios de impacto charpy, os valores encontrados foram plotados em um gráfico Boxplot com auxílio do software Minitab. Os mesmos estão demonstrado no gráficos 8. Nesse gráfico foi comparado as médias e medianas dos quatro corpos de prova ensaiados em cada teste.

Gráfico 8 - Resultados ensaio de impacto charpy



Fonte: Autor

Podemos verificar que a dispersão dos resultados obtidos na condição de normalizado, temperado e revenido esta bem menor quando comparado com a dos resultados obtidos na condição de temperado e revenido.

Figura 37 - Analise estatística (Charpy)

Teste T para Duas Amostras e IC: Tenacidade (J); Grupo

Método

μ_1 : média de Tenacidade (J) quando Grupo = NO/TE/RV

μ_2 : média de Tenacidade (J) quando Grupo = TE / RV

Diferença: $\mu_1 - \mu_2$

Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.

Estatísticas Descritivas: Tenacidade (J)

Grupo	N	Média	DesvPad	EP	Média
NO/TE/RV	4	30,000	0,816	0,41	
TE / RV	4	19,25	1,89	0,95	

Estimativa da diferença

IC de 95%

para a

Diferença Diferença
10,75 (7,89; 13,61)

Teste

Hipótese nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótese alternativa $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T GL Valor-p
10,43 4 0,000

Fonte: Autor

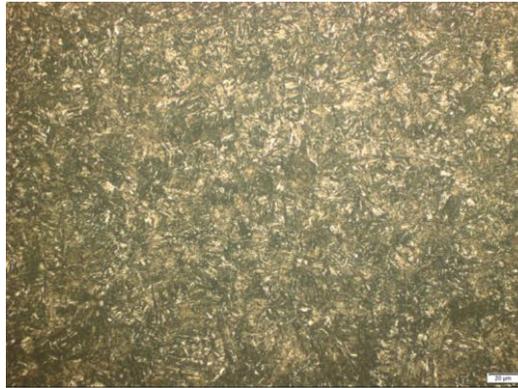
Podemos concluir pela análise gráfico 8 e do teste de hipótese figura 37 que as médias são diferentes devido a não assumir uma igualdade de variância e o valor p esta inferior a 0,05 e adotarmos a hipótese alternativa.

4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA DAS ESTRUTURAS RESULTANTES

4.2.1 Estrutura resultante

Na micrografia realizada na amostra normalizada, temperada e revenida com ampliação de 200x foi encontrada uma estrutura de matriz martensitica com ferrita acicular conforme figura 38, isso devido à baixa temperabilidade.

Figura 38 - Ferrita acicular em matriz de martensita revenida



Fonte: O Autor

Na micrografia realizada na amostra temperada e revenida com ampliação de 200x foi encontrada uma estrutura de martensita revenida conforme figura 39, isso devido a diferença de tamanho de grão austenítico, sendo que tamanho de grão austenítico maior favorece a temperabilidade.

Figura 39 - Martensita Revenida

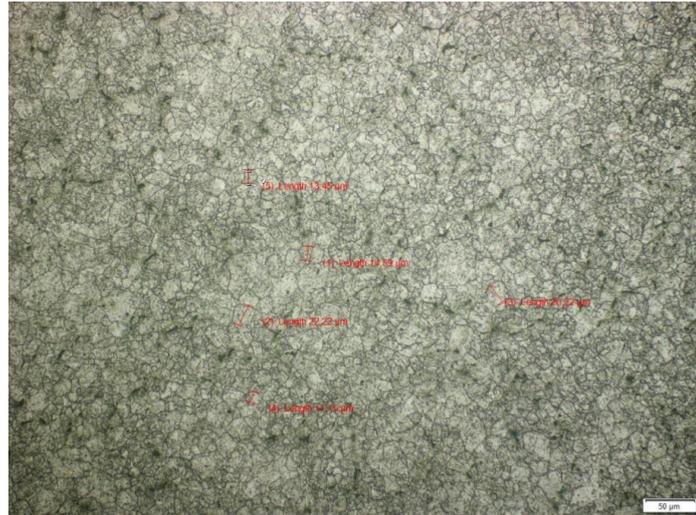


Fonte: O Autor

4.2.2 Tamanho de grão austenítico

Na micrografia realizada na amostra normalizada, temperada e revenida com ampliação de 100x foi encontrado uma estrutura austenítica bem homogênea e tamanho de grão austenítico na média de 16 μm conforme figura 40.

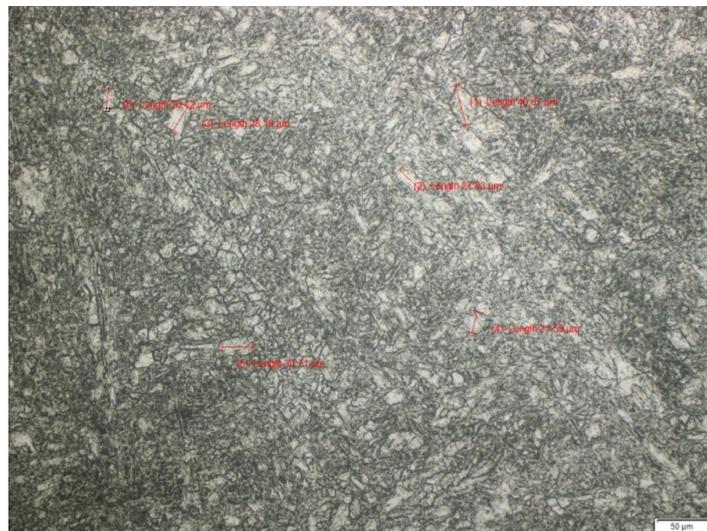
Figura 40 - Tamanho de grão austenítico 100x Média 16 μm



Fonte: O Autor

Na micrografia realizada na amostra temperada e revenida com ampliação de 100x foi encontrado uma estrutura austenítica heterogênea e de tamanho de grão austenítico na média de 28 μm , com a presença de redes de carbonetos não dissolvidos conforme figura 41, isso ocorreu devido a não realização do tratamento térmico de normalização.

Figura 41 - Tamanho de grão austenítico 100x Média 28 μm



Fonte: O Autor

5 CONCLUSÃO

Após análise dos resultados obtidos, podemos verificar que o aço AAR M-201 Grau E quando normalizado, temperado e revenido obteve resultados de limite de resistência e escoamento inferiores ao mesmo aço na condição de temperado e revenido, quanto ao alongamento e a redução de área, não podemos afirmar que os resultados foram diferentes conforme teste "T" (Teste de hipótese) figuras 35 e 36, no ensaio de impacto charpy verificamos uma diferença significativa na tenacidade, onde o material normalizado, temperado e revenido absorveu 35,8% de energia a mais em relação ao material submetido somente a tempera e revenido, que não atingiu o especificado pela norma AAR (27 J a -40°C) conforme gráfico 8.

Essa diferença no limite de resistência a tração, escoamento e impacto (tenacidade) se dá devido a diferença de tamanho de grão austenítico conforme demonstrado na figura 40 e 41, o tamanho de grão é uma das variáveis que aumenta ou diminui a temperabilidade de um aço, maior terá menos contornos e menor área para nuclear ferrita e cementita que favorece a formação de martensita, assim obtendo valores diferenciados de propriedades mecânicas, outro fator que também influencia é a falta de homogeneidade da austenita que pode ocorrer da presença de impurezas não solúveis (inclusões), ou da presença de partículas de carbonetos não dissolvidas, ou mesmo de áreas de ferrita, como no caso dos aços hipoeutetóides temperados de dentro da zona crítica. A presença dessas fases favorece as reações isotérmicas por constituírem núcleos para as transformações, de modo que diminuem a temperabilidade.

Para que as peças fabricadas em série apresentem resultados de propriedades parecidos como dureza resistência ao choque, etc., o tamanho do grão austenítico deve ser sempre o mesmo no instante em que deixam o forno para serem temperados. Para produções seriadas as peças devem ser em primeiro momento normalizadas para garantir um refino e uniformidade na granulação das peças que serão temperadas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation A370-12a Standard Test Methods and definitions for mechanical testing of steel products.** Norma. West Conshohocken. PA. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation E23-12c Standard Test Methods for notched bar impact testing of metallic materials.** Norma. West Conshohocken. PA. 2013.

BELCHIOR, Carlos Marcelo. **Desenvolvimento de Aço Baixa Liga para Componentes do Sistema de Choque e Tração em Vagões Ferroviários.** 2015. Dissertação. Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo. Lorena. 2016.

CALLISTER, Jr. Willian D. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução.** 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas.** 1ª ed. São Paulo: ABM, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos.** 7ª ed. São Paulo: ABM, 2008.

COLPAERT, Hubertos. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.

DIETER, G.E. **Mechanical metallurgy.** London: McGraw-Hill, 1988.

MEI, P. R.; SILVA, A. L. C. **Aços e ligas especiais.** 3ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

MINITAB INC. **Minitab Statistical Software.** 17ª ed. Manual. State College, Pennsylvania. 2014.

PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades.** São Paulo: Hemus, 1997.

ROSA. P.M.C.F. **Sistemas de Choque e Tração.** Curso. Amsted Maxion Fundição Equipamentos Ferroviários. Hortolândia. 2012.

SILVA, André Luíz da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Tecnologia dos Aços.** 1ª ed. Sumaré: Gráfica Editora Hamburg Ltda., 1981.

SOUZA, S.A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos.** 5ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

TORRE, Jorge. **Manual prático de fundição.** 1ª ed. São Paulo: Hemus. 2004.

THE ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. **Manual of standards and recommended practices.** Norma. Washington. D.C.: ASM International, 2007.

SENAI. **Areias de fundição.** Publicação técnica. Belo Horizonte: SENAI/MG. 1987