



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

RENATA APARECIDA MONTEIRO

**ESTUDO MICROESTRUTURAL DO AÇO FERRAMENTA APLICADO
A INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO EM BOLAS DE MOINHO SOB
TRATAMENTO TÉRMICO.**

**MARABÁ
2012**

RENATA APARECIDA MONTEIRO

**ESTUDO MICROESTRUTURAL DO AÇO FERRAMENTA APLICADO
A INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO EM BOLAS DE MOINHO SOB
TRATAMENTO TÉRMICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. M.Sc. Márcio
Corrêa de Carvalho.

MARABÁ
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Monteiro, Renata Aparecida

Estudo microestrutural do aço ferramenta aplicado a indústria de mineração em bolas de moinho sob tratamento térmico / Renata Aparecida Monteiro ; orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. — 2012.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2012.

1. Aço - Metalurgia. 2. Aço - Tratamento térmico. 3. Indústria mineral. 4. Martensita. I. Carvalho, Márcio Corrêa de, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 669.1

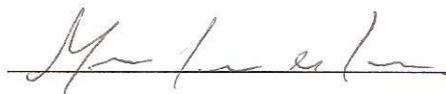
RENATA APARECIDA MONTEIRO

**ESTUDO MICROESTRUTURAL DO AÇO FERRAMENTA APLICADO
A INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO EM BOLAS DE MOINHO SOB
TRATAMENTO TERMICO.**

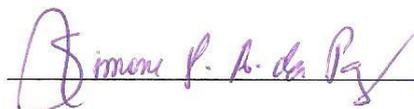
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. M.Sc. Márcio
Corrêa de Carvalho.

Data de aprovação: 14 de Novembro de 2012

Banca examinadora:

 _____ - Orientador

Prof. M. Sc. Márcio Corrêa de Carvalho – FEMAT - UFPA.

 _____ - Membro interno

Profª. M. Sc. Simone Patrícia Aranha da Paz – FEMAT - UFPA.

 _____ - Membro externo

Prof. Dr. Edinaldo Teixeira – FACEN - UFPA

Dedico este trabalho de conclusão de curso a minha família por seu amor e apoio e a meus mais leais amigos que estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, senhor da minha vida que me concedeu a graça de seguir tal caminho e a oportunidade de estar aqui neste momento,

Aos meus pais Haroldo e Gremia de Fátima Monteiro por seu amor e esforço me dando tal condição de alcançar este momento. Assim como ao meu irmão Rafael Lazáro Monteiro pelo apoio e presença indispensável em minha vida.

Aos meus amigos pela constante e duradoura amizade e apoio, em especial à Lilian Carolina Leite Pinheiro, Valdir Gomes Lima Junior, Lys Daniele Costa Tavares, Bruna Soares Moreira e Péricles Quadros além de agradecer a toda FEMAT 2007.

Aos colaboradores do Laboratório de Ensaios Destrutivos, Laboratório de Materiais Cerâmicos e laboratório de Preparação de Amostras, em especial à Adilton Rocha da Silva, Daniel Rodrigues Oliveira, Gustavo Ronielly Silva ambos alunos do Curso de Engenharia de Materiais, FEMAT 08 E FEMAT 09 respectivamente, gostaria também de agradecer em especial a Tatiani da Luz Silva, técnica do laboratório de Materiais Cerâmicos.

À instituição Universidade Federal do Pará e a Faculdade de Engenharia de Materiais.

Aos Professores da Faculdade de Engenharia de Materiais, a destacar meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof.^o M.Sc. Marcio Corrêa de Carvalho e aos demais membros da banca avaliadora.

"Ser grande é abraçar uma grande causa"

William Shakespeare

RESUMO

O desgaste dos corpos moedores (bolas de moinho) na indústria minero-metalúrgica é o componente de custo de produção mais importante. Sabe-se que tratamento térmico nessas peças metálicas pode ajudar a solucionar o problema, a exemplo tem-se a têmpera direta, tratamento que se destaca em utilização devido, aos bons resultados microestruturais obtidos. Objetivando, avaliar outros tratamentos térmicos, este trabalho, propõe um estudo do caráter microestrutural e da dureza do aço ferramenta aplicado na produção de bolas de moinho sob tratamento de austêmpera e recozimento pleno. Através da análise metalográfica e dos ensaios de microdureza efetuados nos corpos de prova estudados. Os resultados permitem então identificar claramente a eficácia do tratamento térmico de recozimento pleno e a ineficácia do tratamento de austêmpera realizados, assim como a martensita com maior valor de microdureza.

PALAVRAS-CHAVES: Corpos Moedores. Propriedades Mecânicas. Microestrutura. Aços Ferramenta. Tratamento Térmico.

ABSTRACT

The overall wear of grinding ball in a grinding mill is a phenomenon that depends on a complex interaction involving ball characteristics. As a solution the Materials Science and Engineering proposes a wide range of thermal treatments, and the direct tempering is the treatment that stands in use in large scale due to the good results obtained, and the martensitic microstructure. However the literature chooses the tempering as an ideal heat treatment, this paper proposes a study of the microstructural characteristics and the microhardness of the tool steel used in the production of mill balls under treatment of Full annealing and Austempering.

KEYWORDS: Ball Mills. Heat Treatment. Microstructure. Mechanical Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Lote de corpos moedores de aço.....	16
Figura 2.2 – Aspecto de uma bola de moinho após sofrer corrosão por pite.....	17
Figura 2.3 – Retirada de um corpo moedor esférico do equipamento de forjamento.....	18
Figura 2.4 – Diagrama Fe-C com destaque a faixa de temperatura de Austenitização no recozimento.....	24
Figura 2.5 – Representação esquemática do diagrama de transformação para Austêmpera.....	25
Figura 2.6– Representação esquemática do perfil de indentação durante ensaio de dureza Vickers.....	28
Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia aplicada a Prática desta Monografia.....	30
Figura 3.2 – Inspeção Visual das Bolas de Moinho.....	31
Figura 3.3 – Esquema representativo dos cortes realizados nas peças de estudo para obtenção dos corpos de prova.....	32
Figura 3.4 - Aspecto real dos corpos de prova obtidos após o corte.....	33
Figura 3.5 – Superfície dos corpos de prova, lixados e polidos.....	33
Figura 3.6- Mufas utilizadas no tratamento térmico.....	36
Figura 3.7 - Recipiente contendo sílica, utilizado na etapa isotérmica do tratamento de austempera.....	36
Figura 3.8 – Corpos de prova depois de retirados do forno.....	37
Figura 4.1 - Dureza obtida dos corpos de prova após Tratamento Térmico de Austêmpera ou Recozimento Pleno.....	41
Figura 4.2 – Micrografia dos Corpos de Prova em estado de obtenção. (a) Amostra M e (b) Amostra P.....	42
Figura 4.3 – Micrografia da Amostras após tratamento térmico de Recozimento Pleno ou Total. (a) Amostra M e (b) amostra P.....	43
Figura 4.4 – Micrografia da Amostras após tratamento térmico de Austempera. (a) Amostra M e (b) amostra P.....	44
Figura 4.5 - Micrografia da Borda da trinca em peça tratada termicamente.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1– Composição Química do Aço Ferramenta L2 dos Corpos Moedores estudados.....	38
Tabela 4.2 – Composição Química do Aço Ferramenta L2 segundo AISI.....	39
Tabela 4.3 – Carbono Equivalente obtido através do calculo das Equações 1 e 2...	40
Tabela 4.4 - Dureza obtida dos corpos de prova antes da submissão ao tratamento térmico de Austêmpera ou Recozimento Pleno.....	40
Tabela 4.5 - Dureza obtida dos corpos de prova após Tratamento Térmico de Austêmpera ou Recozimento Pleno.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASM	American Society for Metals
AWS	American Welding Society
D	Diâmetro
HV	Dureza Vickers
SAE	Society of Automotive Engineers
F	Força
FFBAC	Ferro Fundido Branco de Alto Cromo
IIW	International Institute of Welding
LMC	Laboratório de Materiais Cerâmicos
TTT	Transformation Time Temperature

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CORPOS MOEDORES	16
2.1.1	Corpos Moedores de Aço	18
2.2	AÇOS FERRAMENTA	19
2.2.1	Tipo Baixa Liga – Serie L	20
2.2.2	Aços Ferramentas L2	21
2.2.2.1	Influência dos Elementos de liga no Aço ferramenta L2	21
2.3	TRATAMENTO TÉRMICO DOS METAIS	22
2.3.1	Recozimento Pleno	23
2.3.2	Austêmpera	24
2.4	ANÁLISE METALOGRAFICA	27
2.5	DUREZA VICKERS	28
2.5.1	Microdureza Vickers	29
2.6	CARBONO EQUIVALENTE	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.4	MATERIAIS	31
3.5	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	32
3.6	CARACTERIZAÇÃO	32
3.6.1	Análise Metalográfica	32
3.6.2	Microdureza Vickers	34
3.7	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO	34
3.7.1	Carbono Equivalente	35
3.7.2	Tratamentos Térmicos	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.4	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	38
4.5	CARBONO EQUIVALENTE	39
4.6	MICRODUREZA VICKERS	40
4.7	ANÁLISE METALÓGRAFICA	42
5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

No beneficiamento de minérios, uma das grandes preocupações econômicas, diz respeito ao desgaste global dos equipamentos, isto é, o processo de desgaste que ocorre ao longo de toda a planta, sendo o efeito causador predominante à abrasão [1 e 2]. Dentre os equipamentos da indústria de beneficiamento de minérios, o moinho de bolas é um dos que sofre desgaste de forma mais acentuada, tendo como áreas críticas o revestimento e os corpos moedores (esferas metálicas maciças). No que diz respeito aos corpos moedores, esse desgaste é decorrente da forte interação (impactos físicos) entre o corpo moedor e o minério.

Na busca para aumentar a resistência mecânica das ligas metálicas dos corpos moedores da indústria mineral, frente à perda econômica causada pelo desgaste, objetivou-se avaliar outros tratamentos térmicos, embora a literatura então sugira o uso de peças com microestrutura martensítica, o presente trabalho avaliou a aplicação de Recozimento Pleno e Austêmpera ao aço ferramenta utilizado na fabricação das bolas de moinho.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido a forte presença do desgaste nos meios de cominuição, torna-se cada vez mais necessário, o desenvolvimento e aprimoramento de materiais metálicos que se apliquem a esse ramo industrial. Como o custo-benefício é a balança que a indústria busca sempre manter em equilíbrio para atingir uma margem de desenvolvimento e lucro esperado. O tratamento térmico para a obtenção de propriedades combinadas desejáveis, a dada liga metálica, para a aplicação em corpos moedores, torna-se economicamente mais viável que a substituição desta.

Conhecendo tal problemática do setor de mineração, também presente e fortemente instalado nessa região, este trabalho de conclusão de curso, apresenta um estudo da viabilidade das melhorias das características: microestruturais e de dureza do aço ferramenta aplicado na produção de corpos moedores esféricos usados em moinhos de cominuição.

Tendo como objetivo geral o estudo da eficácia do tratamento térmico de recozimento pleno e austêmpera sobre a liga metálica de Aço Ferramenta constituinte dos corpos moedores estudados. Visando de maneira específica a

obtenção de perlita e bainita como microestruturas da matriz metálica de composição dos corpos de prova através do tratamento térmico e a avaliação de sua eficácia por meio da caracterização microestrutural e de ensaios de microdureza em corpos de prova tratados e não tratados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CORPOS MOEDORES

Na indústria da mineração cerca de 40% dos custos de operação estão relacionados à etapa de beneficiamento de minérios e as operações unitárias de moagem, sendo este custo em quase que sua totalidade resultante do desgaste de revestimentos e corpos moedores e conseqüentemente sua troca ou substituição [3]. A Figura 2.1 apresenta uma vista dos corpos moedores de aço.

Figura 2.1 – Lote de corpos moedores de aço.



Fonte: Moly-Cop, 2012.

A princípio pode-se assumir esse desgaste como proveniente do esforço de abrasão ao qual este material é submetido de modo mais significativo. Entretanto como se trata do beneficiamento de um concentrado, em dados casos, o qual é composto não somente do minério em questão como também substâncias remanescentes de sua preparação (seja por meio de lixiviação, flotação e etc.) ainda ressalta-se a corrosão química que possa ser gerada nesse material como fator de seu desgaste e conseqüente acréscimo de custo a este ramo da indústria.

Na mineração destacam-se os seguintes modos de desgaste por abrasão:

- desgaste por sulcamento é um meio de desgaste que envolve partículas mais grosseiras que, quando ao entrarem em choque com a superfície metálica de baixa dureza com velocidades médias a altas, arrancam pedaços macroscópicos de metal (altas tensões e alto impacto);

- desgaste por riscamento e erosão, envolve partículas menores, cujo impacto sobre a superfície é menor (baixas tensões e baixo impacto). O movimento das partículas sobre e contra a superfície causando o riscamento desta, polindo-a e erodindo-a;

- desgaste por riscamento e moagem (lixamento), característico de altas tensões com impacto médio e baixo, é um comportamento intermediário entre os dois anteriores.

No que diz respeito à corrosão a qual os corpos moedores estão submetidos, se dá pela formação de pares galvânicos dentro da bola ou entre a bola e a polpa gerando a corrosão por pite desse material.

Um modo de minimizar os efeitos deste desgaste e da corrosão no corpo moedor é através do uso de um material adequado a operação. E no que diz respeito ao material de composição química dos corpos moedores utilizados na mineração atualmente eles podem ser tanto constituídos de aços forjados ou fundidos, ou ainda de ligas FFBC. A Figura 2.2 apresenta então o aspecto de uma bola de moinho após processo de corrosão.

Figura 2.2 – Aspecto de uma bola de moinho após sofrer corrosão por pite.



Fonte: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 59(2): 173-178 abr. jun. 2006.

Embora alguns ramos industriais já tenham substituído o aço pelo FFBC para a mineração devido ao alto nível de solicitações e demais variáveis, a seleção de um material apropriado ao corpo moedor dependerá de um estudo específico de cada caso, já que as propriedades destes materiais podem sofrer pequenas variações dependendo da específica aplicação.

O estudo de caso para corpos moedores envolve um grande número de testes, tanto em relação a desgaste quanto a reatividade do material imerso na polpa do minério, sendo a taxa de desgaste um dos fatores mais relevantes.

Figura 2.3 – Retirada de um corpo moedor esférico do equipamento de forjamento.



Fonte: Site da Moly-Cop, 2012.

A taxa de desgaste dos corpos moedores deve ser cuidadosamente explorada, através de dados comparativos ou por meios de ensaios com bolas marcadas para buscar o uso do corpo moedor que leve a um menor custo [4].

Um modo de melhorar em definitivo estes materiais é por meio de um controle da microestrutura, porcentagem de carbono e dureza destes conferindo lhes resistência à abrasão e corrosão adequadas.

2.1.1 Corpos Moedores de Aço

Para os corpos moedores de aço, corpo de prova utilizado neste estudo, à microestrutura preferencial é a martensita obtida por meio de tempera, pois esta combina de modo desejável resistência à corrosão e a abrasão, além disso, como foi dito antes a otimização deste material depende de um tripé onde tem se a microestrutura, a porcentagem de carbono e a dureza.

Numa ótica geral a dureza e será dependente da porcentagem de carbono e a microestrutura do tratamento térmico pelo qual os corpos moedores são submetidos após seu processo de produção, que geralmente é o forjamento, podendo em alguns casos ser produzidos por fundição.

Deste modo para obtenção de tal dureza a porcentagem de carbono nas ligas dos corpos moedores deve-se encontrar sempre na faixa entre 0,40% – 0,90%, sendo preferenciais as ligas com 0,90% de Carbono aproximadamente.

Isso se deve ao fato de que a dureza desejada nesse material de trabalho deve encontrar-se em valores altos em geral entre 58,3 e 64,2 HCR, já que a taxa de desgaste por abrasão tende a reduzir com o aumento da dureza do aço.

2.2 AÇOS FERRAMENTA

Os aços ferramenta inicialmente eram confundidos com "qualquer" aço que fosse usado para confecção de ferramentas, entretanto, essa classificação aço ferramenta engloba um vasto número e variedade de aços comerciais de diversas aplicações.

É importante dividir as numerosas composições de aços ferramenta em um número restrito de grupos ou famílias, visando a facilitar sua comparação e seleção, classificá-los por meio de composição química, como no caso da classificação SAE/ABNT para aços destinados à construção mecânica, não é viável, uma vez que as variações de composição química são extremamente amplas, mesmo em aços para aplicações semelhantes [5].

Deste modo, por meio de um consenso entre aqueles que manipulavam seja para uso ou produção, criou-se uma nomenclatura para estes aços baseada na divisão deles em famílias ou grupos de acordo com composição química, aplicação e tipo de tratamento térmico ao qual são submetidos. Os aços para ferramentas e matrizes foram assim classificados em sete categorias principais conforme apresentado a seguir, e o órgão responsável pela sua normativa de classificação foi o AISI- "American Iron and Steel Institute":

- Aços temperáveis em água, identificados pela letra W;
- Aços resistentes ao choque, identificados pela letra S;
- Aços-ferramenta para moldes, identificados pela letra P;
- Aços-ferramenta para fins especiais identificados pelas letras L e F ou sem identificação.
- Aços-ferramenta para trabalhos a frio, identificados pelas letras O, A, D;
- Aços-ferramenta para trabalho a quente, identificados pela letra H;
- Aços rápidos, identificados pelas T e M.

Devido ao alto grau de solicitação em sua aplicação os Aços ferramenta são aços que exigem uma alta confiabilidade em suas propriedades mecânicas. Dentre as características mais relevantes a esse material está sua resistência mecânica e ao desgaste.

A composição química desses aços liga lhes conferem ainda boa temperabilidade, usinabilidade e dureza a quente, além de um controle substancial sobre o tamanho dos grãos presentes na estrutura do aço.

Durante seu processo de produção este material deve possuir um controle rigoroso de composição química, visando que esta se mantenha homogênea ao longo de todo o material produzido para que se evitem regiões propensas a falha.

Outro cuidado bastante relevante a esses aços é a manutenção de um alto teor de limpidez interna dessas ligas metálicas que só é possível com ajustes controlados dos parâmetros de produção.

Esse conjunto de características encontradas no material e desejadas a ele só são possivelmente alcançadas por meio de uma perfeita combinação de composição química e processos de fabricação adequados e seguidos de tratamentos térmicos eficazes, então pode se dizer, que frequentemente eles são submetidos a duas etapas de confecção para alcançar tal confiabilidade e propriedades.

2.2.1 Tipo Baixa Liga – Serie L

Dentre os Aços Ferramenta os aços baixa liga para fins especiais ou simplesmente Aços Ferramenta de Serie L constituem uma família/grupo de aços que possuem como principal característica seu alto teor de carbono e apresentam como seu principal elemento de liga o cromo. Em geral sua composição química é semelhante aos Aços Temperáveis em Água com quantidades moderadas de cromo, vanádio, níquel ou molibdênio para melhor a temperabilidade.

Esses aços são em geral aplicados a funções que necessitem de boa resistência e elevada tenacidade.

2.2.2 Aços Ferramentas L2

É um aço de uso geral que possui 1,0% de Cr em sua composição química sendo a função do cromo agir como elemento de liga na melhoria da temperabilidade e resistência ao desgaste do aço, e ainda 0,2% de vanádio para promover um refino do grão do aço. Os aços ferramenta L2 também são conhecidos como aços ferramenta de baixa liga e fins especiais o aço L2 possui ainda alta estabilidade e baixa propensão à formação de trincas quando submetido a processos a quente além de ótima temperabilidade, usinabilidade e resistência a descarbonetação, isso devido sua composição química.

Em escala comercial esse material se encontra disponível numa gama de teores de carbono que varia de 0,50% a 1,10% sendo assim diferentemente de outras famílias de aço ferramenta um aço de alto teor de carbono, o aço L2 embora tendo peculiaridades em sua composição e propriedades mecânicas, possui uma alta semelhança com alguns aços específicos da construção civil, entretanto se diferencia em teor de carbono e na presença de específicos elementos de liga que frequentemente não são aplicáveis a essas outras ligas devido a baixas solicitações de projeto destas ou a suas aplicações.

2.2.2.1 Influência dos elementos de liga no Aço Ferramenta L2

Para a produção dos aços ligados é vasta a quantidade de elementos de liga que podem ser empregados no processo dependendo da função ao qual o material será aplicado. Entre os principais metais de adição ou elementos de ligas metálicas temos: Alumínio, Cromo, Cobalto, Manganês, Silício, Titânio, Tungstênio e Vanádio. Mas outros elementos também são usados, este por sua vez em aplicações específica e em menor teor o que é o caso do Boro, Cobre, Zircônio, Selênio, Chumbo e Níóbio.

No caso do Aço Ferramenta L2 os principais elementos de liga, isto é aqueles que pela AISI estão presentes na composição global do aço são: Manganês, Molibdênio, Cromo, Níquel, Silício e Vanádio cuja função está especificada abaixo:

Manganês: Age como desoxidante e dessulfurante quando adicionado em teores menores ou iguais a 0,5%. Em teores mais elevados seu efeito é melhorando a temperabilidade do aço, por sua vez esta é sua aplicação mais importante.

Molibdênio: por sua vez afeta a temperabilidade do aço melhorando-a, no que diz respeito à microestrutura da liga este elemento se dissolve na ferrita formando carbeto que conseqüentemente melhoram a “dureza a quente” do aço. Além desse efeito o Molibdênio aumenta também a resistência e ductilidade do aço.

Um fato importante a destacar é que no que diz respeito a agir como elemento de liga o Molibdênio também pode ser usado para substituir o tungstênio, obtendo assim resultados consideráveis e comparáveis com ligas sem substituição.

Cromo: Assim como os demais elementos de liga anteriormente citados o Cromo também influencia melhorando a temperabilidade do aço. No entanto sua aplicação mais importante, isto é, nobre é no que diz respeito à melhora da resistência ao desgaste propriedade esta obtida desde seus menores valores de adição.

Silício: Sempre utilizado em pequenos teores, já que em altos teores age na dissolução de carbeto, o silício age como desoxidante.

Vanádio: este elemento de liga é adicionado com a função de controlar o tamanho de grão isto é ele refina os grãos através do impedimento do crescimento destes, além de agir como desoxidante.

Esse mecanismo de refino de grão do Vanádio se baseia na formação de carbeto estáveis que além dessa função ainda agem melhorando a “dureza a quente” do aço.

Níquel: age aumentando a resistência do aço além de conferir a este melhoria em sua tenacidade.

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO DOS METAIS

O método mais comum de se alterar microestruturas é através dos vários tipos de tratamentos térmicos, cada qual destinado a produzir uma estrutura específica [6]. Por tratamento térmico compreende-se a operação de aquecer um material a uma dada temperatura e resfriá-lo após certo tempo, em condições determinadas com a finalidade de dar ao material propriedades especiais [7, 8 e 9]. Os principais fatores que devem ser levados em conta em um tratamento térmico são aquecimento, tempo de permanência à temperatura, resfriamento e atmosfera do local de aquecimento. O objetivo do tratamento térmico é alterar as

características mecânicas e estruturais dos materiais em função da sua aplicação como aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhoria da ductilidade, da usinabilidade, da resistência ao desgaste, das propriedades de corte, da resistência à corrosão, da resistência ao calor, modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

2.3.1 Recozimento

O tratamento térmico de recozimento se dá em geral em três etapas;

1) aquecimento a temperatura desejada, 2) manutenção do material a temperatura de tratamento e 3) resfriamento na maioria dos casos até a temperatura ambiente. Dentro desse ramo de tratamento térmico tem se cinco modos de se realizar esse tratamento, entre eles:

- Recozimento para alívio de tensões;
- Recozimento isotérmico ou cíclico;
- Esferoidização;
- Recozimento em caixa;
- Recozimento total ou pleno.

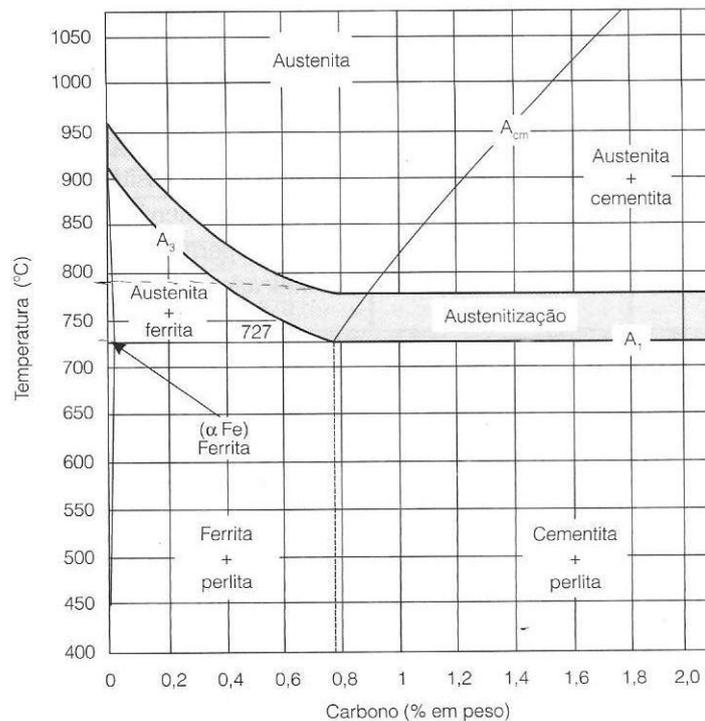
O recozimento pleno é o mais convencional e comum dos tratamentos de recozimento existentes, assim como, os demais recozimentos este tratamento térmico visa redução na dureza do aço e conseqüente melhoria da sua usinabilidade facilitando seu trabalho a frio. Possui ainda como objetivo melhorar as propriedades mecânicas do material e à obtenção de uma determinada microestrutura. Essa microestrutura pode ser: ferrita mais perlita para aços hipoeutetóides; perlita mais cementita em aços hipereutetóides e para aços eutetóides a microestrutura será composta somente por perlita.

Quanto aos parâmetros adotados para se realizar este tratamento térmico, é possível sua determinação pela análise do Diagrama Fe-C método este que necessita do conhecimento dos teores de carbono equivalente da liga a ser estudada, ou ainda através de handbooks de tratamentos térmicos.

O Recozimento Pleno consiste em austenizar o aço, resfriando-o lentamente em seguida [7], isto é, o aço é aquecido a uma temperatura de mais ou menos 50°C acima de A3 para aços hipoeutetóides, já para aços hipereutetóides essa temperatura deve ser de 50°C acima de A1, entretanto sem ultrapassar Acm para evitar assim que haja fragilização do aço. Como apresentado na Figura 2.4 o diagrama de fases tem explicitado as linhas de interesse.

A temperatura é assim determinada para que se possa alcançar a região de Austenitização tornando assim possível que o carbono e os elementos de liga que compõe o aço possam se encontrar em solução com o ferro gama para que deste modo com posterior resfriamento lento obtenha-se as microestruturas normais dispostas ao longo do diagrama de fases.

Figura 2.4 – Diagrama Fe-C com destaque a faixa de temperatura de Austenitização no recozimento.



Fonte: SILVA, André Luís V. da Costa, Aços e Ligas Especiais- 3ª ed. Revista.

2.3.2 Austêmpera

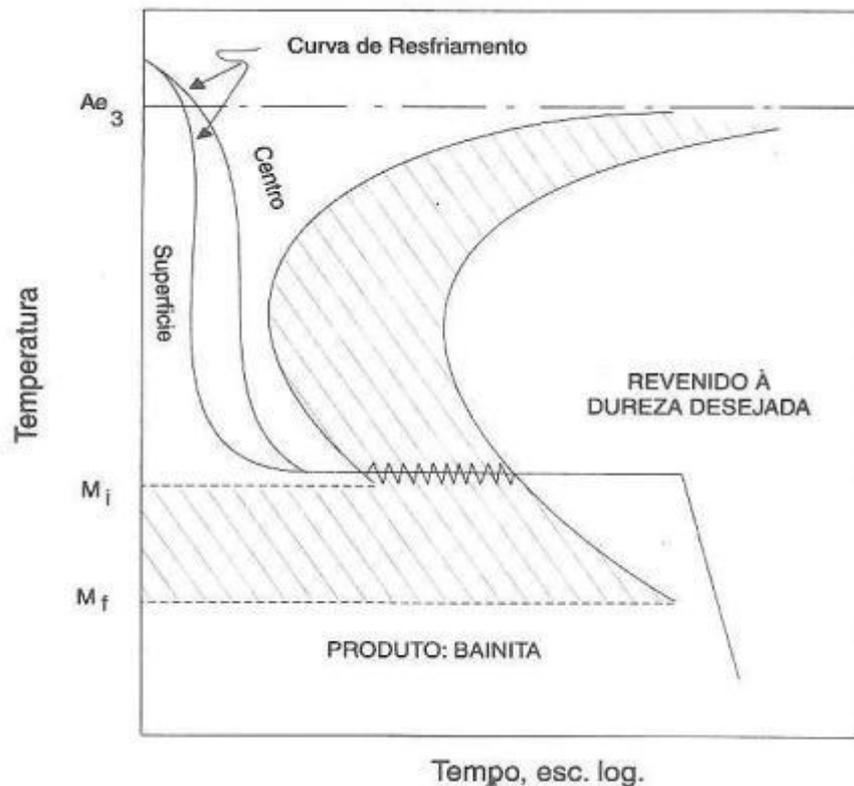
Embora também seja um tratamento térmico, a Austêmpera se enquadra no grupo de tratamentos isotérmicos, isso é o tratamento térmico de Austêmpera visa à

obtenção de uma dada microestrutura através das transformações autênticas a temperatura constante.

Em geral, a Austêmpera é aplicada no aço quando se tem por objetivo a obtenção de um material com valores significativos de tenacidade, ductilidade e resistência mecânica e a fadiga. Diferentemente do recozimento visto acima onde a microestrutura originada vai depender do teor de carbono do aço, na Austêmpera a microestrutura visada ou ainda desejada é a Bainita.

Sua obtenção a dado aço submetido a este tratamento só pode ser alcançada com análise previa dos parâmetros de tratamento por meio de um diagrama específico denominado diagrama TTT ou neste caso ITT. A seleção de um aço para austêmpera se baseia nas características desta curva, curva esta apresentada pela Figura 2.5.

Figura 2.5 – Representação esquemática do diagrama de transformação para Austêmpera.



Fonte: CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos e Principais Tipos.

E a partir deste diagrama pode se estabelecer três considerações para que se execute esse tratamento térmico e determine se este pode ser aplicável ou não a dada liga metálica:

1 - A localização do joelho da curva e o tempo disponível para contorná-lo devem ser observados, primeiramente para que se evite a formação de perlita no aço já que esta transformação é concorrente direta da transformação bainítica e para saber se este material confere tempo suficiente para que a transformação Austenita-Bainita seja possível, o que torna o aço austemperável;

2 - O tempo necessário para a completa transformação da austenita em bainita à temperatura de austêmpera,

3- A localização do ponto M_i novamente assim como o conhecimento preciso do joelho da curva o conhecimento deste ponto é necessário para que a liga de estudo ao ser tratada não sofra erros de operação no que diz respeito à determinação da temperatura de tratamento.

Com o conhecimento então destes dados parâmetros. De forma genérica o processo pode ser realizado do seguinte modo:

— Aquece-se o material até sua temperatura de Austenitização que se localiza na faixa de temperatura que compreende as temperaturas entre 760°C – 870°C , sendo a temperatura precisa dependente do material a ser tratado;

— Submete-se o material aquecido a um resfriamento rápido até uma temperatura entre 260°C a 400°C ; em banho isotérmico até se conseguir a transformação em bainita.

— O resfriamento final então do material tratado pode ser efetuado de modo lento ainda emergido no banho isotérmico assim resfriando a mesma taxa que este ou ainda em ambiente controlado.

Para a promoção de um resfriamento isotérmico no processo de Austêmpera é necessário um meio de resfriamento que possa ser aquecido à temperatura constante esse meio pode ser: banho de sal, chumbo derretido ou ainda óleos para austêmpera.

A temperatura do banho por sua vez irá determinar a dureza da peça tratada já que a microestrutura obtida dependerá do tempo ao qual estará exposta a essa dada temperatura do banho, deste modo a maior variação de temperatura aceitável no meio ao qual será usado como banho é na ordem de 10°C , já que variações superiores podem gerar defeitos e uma dureza aquém da desejada na peça tratada.

O tempo no banho deve ser suficiente para permitir a completa transformação Austenita-Bainita. Dentre os meios de se realizar o banho na peça o primeiro, banho de sais é o mais usado devido a sua boa estabilidade química e fácil controle de aquecimento além do seu baixo valor em relação aos outros

2.4 ANÁLISE METALOGRAFICA

Os efeitos da microestrutura sobre as propriedades físicas e mecânicas dos aços fazem do exame metalográfico uma necessidade para compreender e evidenciar as propriedades do material analisado [11] o processo de caracterização metalografica compreende três etapas distintas; lixamento, polimento e ataque. Do lixamento e polimento da peça a ser analisada resulta uma superfície lisa e “espelhada”. A superfície do metal polido corretamente reflete a luz de forma homogênea e não permite distinguir os microconstituintes de sua estrutura. A microestrutura é revelada somente por meio da aplicação de um ataque apropriado [12 e 13].

Deste modo para que se possa de fato observar a microestrutura pós-ataque químico há necessidade de se promover um dado grau de contraste entre as microconstituintes do metal, o que pode ser obtido mediante as seguintes medidas: o polimento da superfície deve ser eficaz não contendo riscos, a amostra a ser atacada deve estar limpa isto é sem resíduos do material usado no polimento, o reagente deve ser selecionado, preparado e aplicado sob condições de ataque meticulosamente controlada.

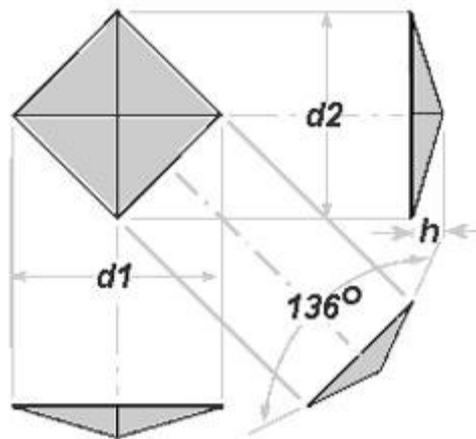
Há diversos métodos para realização do ataque químico e estes em geral dependem ou da forma ou dimensão da amostra e são escolhidos de acordo com a experiência e objetivo de seu usuário entre estes modos de ataque pode-se citar: a imersão, gotejamento, lavagem e esfregamento. O método de esfregamento é tido como alternativa a imersão devido seu uso em ataques químicos a materiais que necessitem de um dado tempo limite de ataque muito pequeno ou que sejam inconstantes em seu tempo de ataque evitando-se assim a queima da superfície atacada.

2.5 DUREZA VICKERS

O ensaio de dureza Vickers é muito utilizado em trabalhos de pesquisa porque fornece uma escala contínua de dureza para uma determinada carga [10] podendo determinar essa propriedade em materiais muito moles, o ensaio em si, se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo ao vértice de 136°(identador), sob uma determinada carga que varia de 10 a 120 Kgf.

O perfil de indentação ideal durante o ensaio de Microdureza, com os devidos parâmetros de angulação é apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6– Representação esquemática do perfil de indentação durante ensaio de dureza Vickers.



Fonte: CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedade das Ligas Metálicas.

O valor de dureza Vickers (HV) é calculado pela relação entre a Área (A) e a Força aplicada (F) como segue na equação 1:

$$HV = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Entretanto o calculo realizado pela maquina de ensaio se baseia nas medidas das diagonais indentadas sobre a peça analisada seguindo então a equação 2, que expressa área em função das diagonais indentadas;

$$HV = \frac{1,8544 F}{d^2} \quad (2)$$

2.5.1 Microdureza Vickers

Para aplicações específicas, voltadas principalmente para superfícies tratadas (carbonetação, têmpera) que é o caso do dado estudo aqui analisado, ou ainda para a determinação de dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, utiliza-se o ensaio de microdureza Vickers.

A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas reduzidas ou pequenas em relação ao procedimento anteriormente citado que não excedem 1 kgf. A carga pode ter valores tão pequenos como 10 gf.

2.6 CARBONO EQUIVALENTE

Devido a influencia dos elementos de liga na dureza o calculo do carbono equivalente se baseia então na correlação entre os valores de elementos de liga e de carbono em porcentagem peso que se possa adquirir através da analise de composição química do aço.

Para este cálculo existe uma extensa quantidade de fórmulas que podem ser ou não específicas a cada família/grupo de aços. Entretanto existem duas fórmulas “geral”, isto é, as mais comumente utilizadas, a primeira pertencente à American Welding Society (AWS), equação 3:

$$CE = \% C + \left(\frac{\%Mn + \%Si}{6} \right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right) \quad (3)$$

A outra fórmula para este cálculo é a equação 4, conhecida como formula de Dearden e O'Neill adotada pelo Instituto Internacional de Soldagem (International Institute of Welding – IIW).

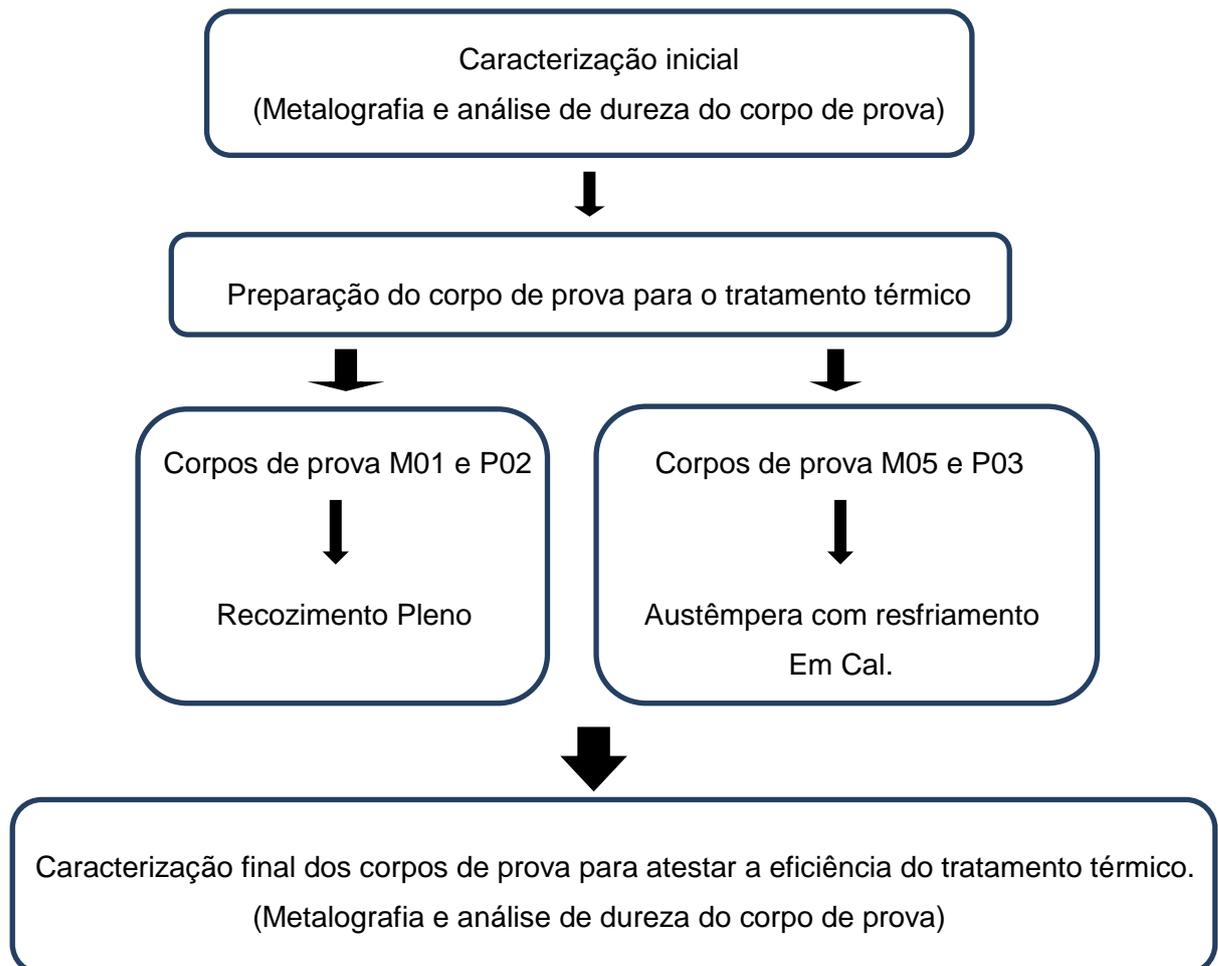
$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{3.6} + \frac{\%Cu}{20} + \frac{\%Ni}{9} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Mo}{4} \quad (4)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, estudou-se o efeito do tratamento térmico de Recozimento Pleno em comparativo com o tratamento de Austêmpera em aço de corpos moedores.

A metodologia aplicada foi dividida em três etapas distintas: 1ª) caracterização dos corpos de prova metálicos (material de partida), 2ª) determinação dos parâmetros e realização dos tratamentos térmicos (sendo os valores de temperatura empregados no tratamento térmico, estes definidos por meio do cálculo de carbono equivalente e análise de diagramas de fase e TTT); 3ª) caracterização e análise da eficiência do tratamento térmico, proposto por meio de ensaio de microdureza. As etapas podem então ser melhor visualizadas através da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia aplicada a Prática desta Monografia.



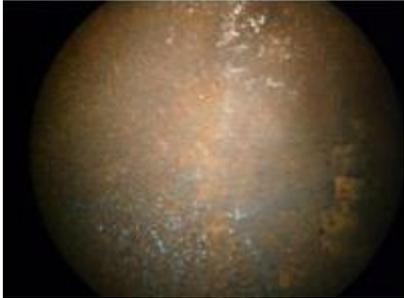
3.1 MATERIAIS

O material submetido ao estudo é um aço ferramenta L2 proveniente de esferas de aço comerciais utilizadas no processo de beneficiamento de minérios, material este cedido pela empresa Vale.

Na Figura 3.2 pode-se observar a superfície do material antes de seu corte e preparação para obtenção das amostras a serem estudadas. As esferas de aço utilizadas como corpos moedores, foram cedidas em seu estado de compra isto é, sem serem submetidas a trabalho ou esforços quaisquer.

É relevante quanto a análise desse material que se deixe claro que o aço presente nas amostras é um aço que previamente já sofreu tratamento térmico de tempera após ser submetido à conformação por forjamento para manutenção de características adequadas e desejadas a sua aplicação

Figura 3.2 – Inspeção Visual das Bolas de Moinho.

Amostras	Aspecto Visual	
	Visão geral da Peça	Visão da Superfície da Peça
M		
P		

Fonte: Autora, 2012.

3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química do aço estudado foi determinada via espectrômetro de emissão óptica.

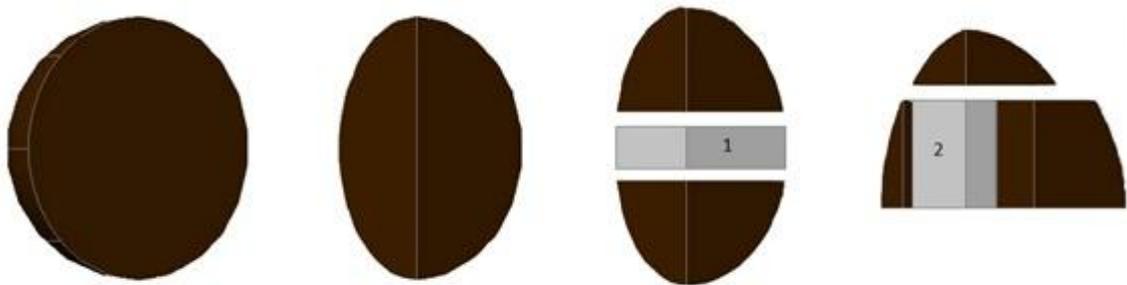
3.3 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização a qual os corpos de prova foram submetidos foi efetuada em dois estágios caracterização microestrutural por metalografia e caracterização mecânica baseada nos resultados dos ensaios de microdureza.

3.3.1 Análise Metalográfica

Os corpos de prova para análise metalográfica foram retirados das amostras através do corte destas nas secções numeradas e apresentadas conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Esquema representativo dos cortes realizados nas peças de estudo para obtenção dos corpos de prova.



Fonte: Autora, 2012.

As seções cortadas foram então rotuladas de amostra M e P, em relação ao lote de bolas, e assim numeradas de 1 a 5. Neste trabalho apenas os corpos de prova M01, M05, P02 e P03 foram utilizados. O aspecto real dos corpos de prova produzidos na etapa de corte está presente na Figura 3.4. Onde se apresentam as duas sessões obtidas.

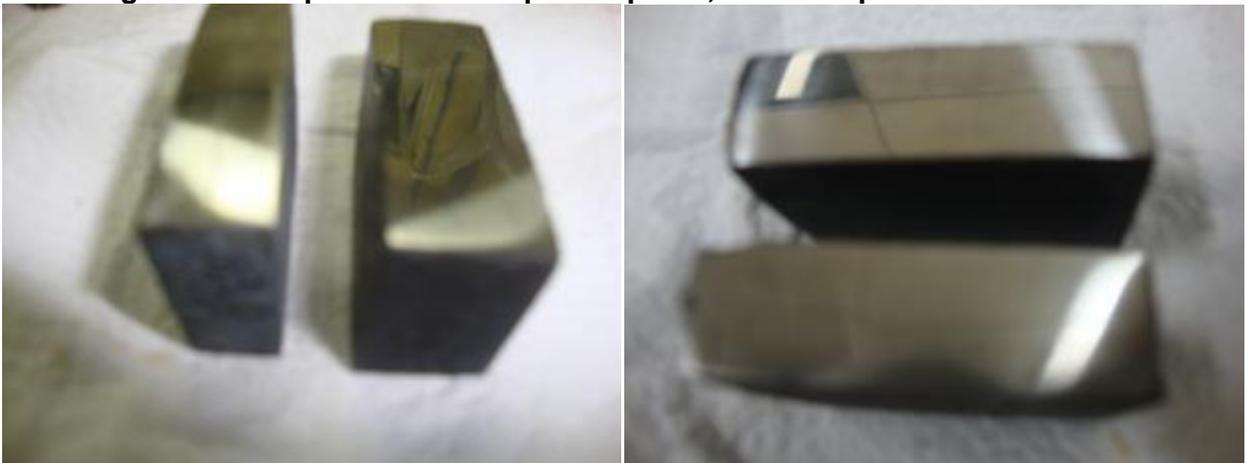
Figura 3.4 - Aspecto real dos corpos de prova obtidos após o corte.



Fonte: Autora, 2012.

Após o corte as amostras ou corpos de prova foram preparados para a análise metalográfica através de lixamento na sequência de lixas; 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, e então submetidas ao polimento em pasta de diamante com granulometria de 1 e 3 μ m para obtenção de uma superfície “espelhada” conforme apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Superfície dos corpos de prova, lixados e polidos.



Fonte: Autora, 2012.

Após a obtenção da superfície polida, o material seguiu a etapa de ataque. O método empregado neste trabalho foi à imersão e o procedimento para ataque consistiu no mergulho da superfície da amostra em uma placa petri contendo o

reagente químico Nital a 2% no tempo estimado de 4s. Após o ataque as amostras foram lavadas em água e álcool, e então secas com o auxílio de um secador portátil, para mais rápida secagem assim evitando a formação de oxidações na superfície do aço. O microscópio ótico utilizado então para o registro das micrografias foi da marca Olympus, pertencente ao Laboratório de Metalografia da Faculdade de Engenharia de Materiais.

3.3.2 Microdureza Vickers

A dureza das diversas amostras foi medida através da escala Vickers, sob carga de 2, 942 kg, utilizando-se um durômetro Digital Microhardness Tester modelo MHV 2000. As superfícies das amostras foram polidas previamente à medição. Foram determinados dez pontos para cada amostra, no sentido centro a extremidade.

Procurou-se desse modo minimizar a influência de eventuais defeitos de preparação de amostra e/ou orientações ou ainda defeitos existentes no material através da seleção visual dos pontos de ensaio.

Procedeu-se ao ensaio posicionando-se, primeiramente, o indentador da máquina sobre o local que teria sua dureza medida. A seguir o penetrador piramidal era aplicado sob a amostra para medida da dureza Vickers com uma carga de 2,942 e 1,9614 kg sobre o ponto previamente selecionado, durante 15 segundos. A seguir o penetrador era removido e as diagonais da impressão piramidal na amostra eram medidas gerando assim no painel do aparelho a medida da dureza.

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Os parâmetros do tratamento foram determinados mediante análise do diagrama ferro carbono e do handbook específico aos tratamentos térmicos para o dado aço em estudo, aço ferramenta. O diagrama de fases foi utilizado de modo combinado com o cálculo do carbono equivalente, para determinação assim das temperaturas por meio da relação entre a porcentagem de carbono (composição) e as linhas de transformação de fases (temperatura).

3.4.1 Carbono Equivalente

A obtenção dos valores de CE envolveram o uso das Equações 3 e 4 respectivamente, através dos dois valores obtidos pode-se com auxílio do diagrama de fases e Metal Handbook [14] especializado, determinar os valores de temperatura em que o tratamento foi efetuado. Destacou se, no entanto o uso da equação 3, por envolver os elementos de base da liga em maior numero, sendo um calculo mais preciso.

3.5 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Inicialmente os corpos de prova foram submetidos à lixamento para retirada de quaisquer substancias presentes ou aderidas a sua superfície e então levadas a tratamento térmico.

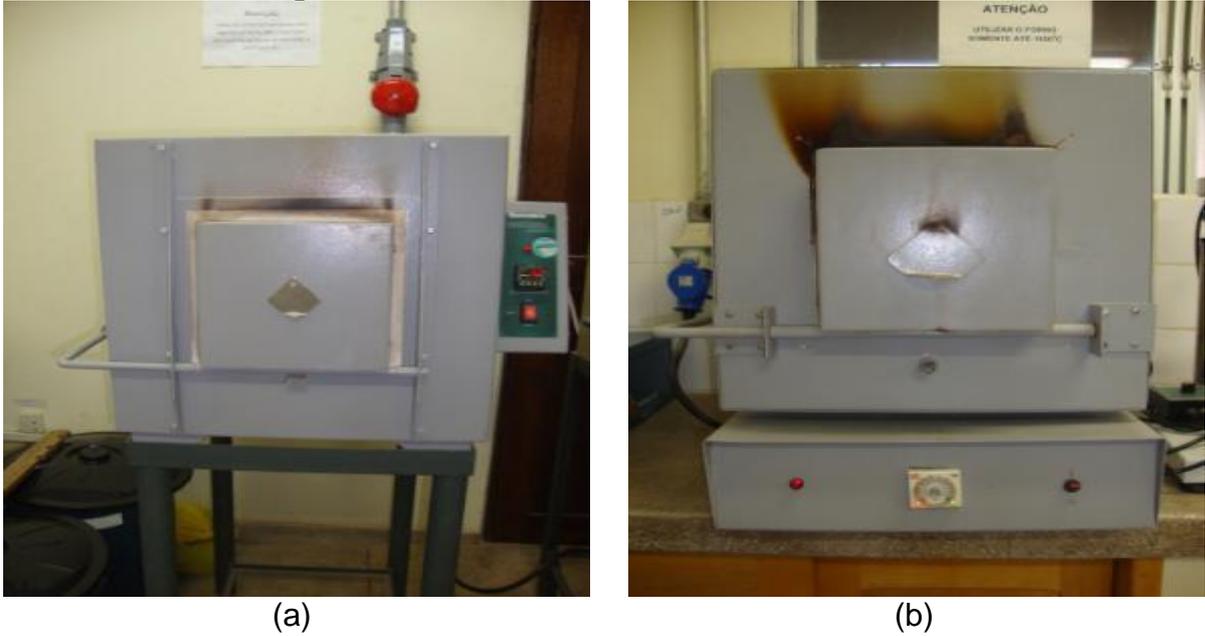
Os tratamentos térmicos foram efetuados no Laboratório de Materiais Cerâmicos- LCM da Faculdade de Engenharia de Materiais, utilizando se de dois fornos mufla a Figura 3.6 (a) apresenta forno nalgon utilizado para realização do recozimento e da primeira etapa da austempera, austenitização.

A segunda mufla apresentada na Figura 3.6 (b) serviu apenas de suporte na austempera, sendo empregada em sua segunda etapa, aquecimento isotérmico e posterior resfriamento ao forno.

Os corpos de prova foram austenitizados a temperatura de 790° C e 870° C respectivamente para os tratamentos de Recozimento e austempera com a seguinte variação de tempo de permanência a temperatura de interesse;

— No recozimento pleno o corpo de prova permaneceu por 40 minutos a temperatura de tratamento,

— Na austempera, no entanto o tempo de permanência a temperatura de interesse foi de 30 minutos.

Figura 3.6 - Muflas utilizadas no tratamento térmico.

Fonte: Autora, 2012.

A variação de tempo nos tratamentos se deu em função da secção e geometria dos corpos de prova. Quanto à segunda etapa da austempera os corpos de prova austenitizados foram transferidos do forno mufla nalgon para mufla de bancada onde foram submetidos à parte isotérmica do tratamento, aquecimento na temperatura de 340°C num tempo estimado de 20 minutos, em banho de cal, Figura 3.7.

Figura 3.7 - Recipiente contendo cal, utilizado na etapa isotérmica do tratamento de austempera.

Fonte: Autora, 2012.

A cal substituiu então os banhos convencionais ao processo. O aspecto final dos corpos de prova pós-tratamento é apresentado na figura 3.8.

Figura 3.8 – Corpos de prova depois de retirados do forno.



Fonte: Autora, 2012.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química obtida por meio da análise de espectrometria por emissão de elétrons revelou a presença e a dada porção de cada elemento na liga com os valores apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1– Composição Química do Aço Ferramenta dos Corpos Moedores estudados.

Amostra	P02	P03	M01	M05
Fe	96,866	97,227	97,119	97,281
C	0,813	0,605	0,968	0,902
Si	0,365	0,314	0,253	0,211
Mn	0,955	0,893	0,939	0,887
P	0,028	0,022	0,017	0,021
S	0,031	0,02	0,012	0,003
Cr	0,503	0,572	0,633	0,615
Mo	0,048	0,043	0,001	0,001
Ni	0,096	0,071	0,019	0,014
V	0,006	0,004	0,011	0,02
Al	0,036	0,036	0,001	0,001
Cu	0,183	0,154	0,01	0,012
Ti	0,001	0,001	0,017	0,024
Nb	0,003	0,003	0,003	0,002
W	0,042	0,017	0,001	0
As	0,006	0,006	0,002	0,003
Sn	0,011	0,01	0,001	0,001
Pb	0,004	0,003	0,001	0,001
B	0	0	0	0

Fonte: Autora, 2012.

A partir destes dados e com o uso da ferramenta de buscas do site Keys to Metals aliado ao uso de handbooks com composição e nomenclatura dos aços liga é possível então propor que o aço ferramenta do estudo em questão é o aço ferramenta para uso especial Aço L2. A tabela 4.2 apresenta a composição nominal normativa para o dado aço L2, tornando possível que se compare assim a composição presente na análise de espectrometria e a apresentada pela ASM.

Tabela 4.2 – Composição Química do Aço Ferramenta L2 segundo AISI.

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
0.45 - 1.0	0.10 - 0.90	0.50 máx	0.70 - 1.20	0.25 máx	0.10 - 30

Fonte: Heat treater's Guide, ASM International 1995.

Como perceptível a partir dessa comparação a análise química revela uma maior quantidade de elementos de liga e uma disparidade no valor específico que a norma atribui ao elemento de liga Vanádio, isso se dá simplesmente pelo fato de que os corpos moedores em si, devido a sua aplicação necessitam possuir uma dureza relativamente alta, o que implica assim, o planejamento de uma liga que combine elementos de liga para este fim.

Outro fator que deve ser ressaltado, é que os corpos moedores necessitam atingir patamares de dureza ao longo de seu volume, essa propriedade a dureza volumétrica é o fator que determinará a vida útil desta peça e que só é possível mediante ao balanço exato dos elementos de liga do aço a ser aplicado em sua produção.

A necessidade da dureza como uma escala volumétrica leva a indústria de corpos moedores a uma instabilidade, no que diz respeito, a composição das ligas, já que para atingir tal propriedade um aço deve ser ajustado corrida a corrida, de acordo com a variação de diâmetro das esferas a serem forjadas.

4.2 CARBONO EQUIVALENTE

Em relação ao carbono equivalente obtém-se para as dadas equações 3 e 4 os seguintes valores aqui apresentados na tabela, a partir do cálculo onde se fez uso dos dados de composição obtidos na análise de espectrometria.

O carbono equivalente do aço permitiu então que se confirma se o caráter hipereutetoide do mesmo e a determinação das temperaturas de tratamento térmico de 790° e 870° C respectivamente para o recozimento e para a Austenitização do aço para a austempera. Sendo estes parâmetros posteriormente confirmados com o uso do Handbook apropriado. Os valores de carbono equivalente para as equações 1 e 2 são apresentados a seguir na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Carbono Equivalente obtido através do cálculo das Equações 3 e 4.

Amostras	P02	P03	M01	M05
Carbono Equivalente Equação 3.	1.163	0.945	1.30	1.21
Carbono Equivalente Equação 4.	1.211	0.994	1.36	1.27

Fonte: Autora, 2012.

4.3 MICRODUREZA VICKERS

A dureza se caracteriza como a propriedade de maior importância vital aos corpos moedores, sendo também assim a mais almejada e necessária para a determinação da eficácia e aplicabilidade de determinado tratamento térmico. A tabela 4.4 apresenta os valores de microdureza para os corpos de prova antes da submissão destes ao tratamento térmico proposto neste estudo, considerando se assim estes em estado de obtenção.

Tabela 4.4 - Dureza obtida dos corpos de prova antes da submissão ao tratamento térmico de Austêmpera ou Recozimento Pleno.

Amostra	Comp. (mm)	Dureza HV - Distância da Extremidade (mm) – Carga - 2,94 N									
		0	4	8	12	16	20	24	28	32	Centro
P02	36,09	807	785	772	768	697	697	667	680	669	646
P03	38,28	631	593	603	650	605	614	556	570	515	461
M01	40,29	877	548	630	635	699	708	696	638	546	533
M05	35,07	767	758	724	719	642	621	586	593	590	623

Fonte: Autora, 2012.

Já a tabela 4.5 apresenta as microdurezas aos corpos de prova só que agora após o tratamento térmico proposto. A partir dos valores obtidos durante o ensaio de microdureza dos corpos de prova, tanto no estado de obtenção, como após o tratamento térmico, a uma primeira análise pode-se afirmar que, os corpos de prova de partida possuem a maior dureza, chegando a aproximadamente o dobro da dureza dos corpos de prova tratados, o que pode ser explicado por meio dos resultados obtidos da metalografia dos mesmos.

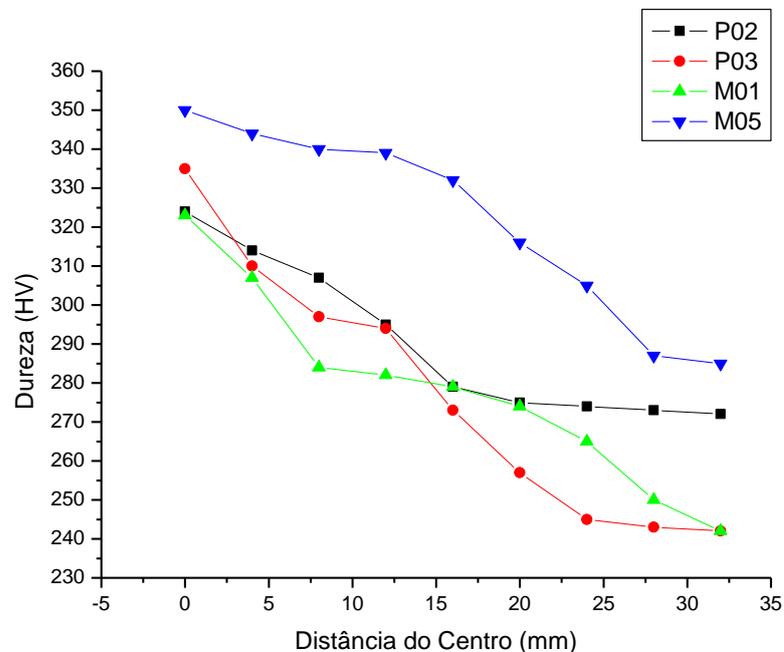
Tabela 4.5 - Dureza obtida dos corpos de prova após Tratamento Térmico de Austêmpera ou Recozimento Pleno.

Amostra	Comp. (mm)	Dureza HV - Distância do Centro (mm) – Carga - 2,94 N									
		0	4	8	12	16	20	24	28	32	Centro
P02	36,09	324	314	307	295	279	275	274	273	272	270
P03	38,28	335	310	297	294	273	257	245	243	242	232
M01	40,29	323	307	284	282	279	274	265	250	242	230
M05	35,07	350	344	340	339	332	316	305	287	285	270

Fonte: Autora, 2012.

Outro aspecto da dureza que podemos observar diz respeito aos corpos de prova tratados e pode ser mais bem observado na expressão dos dados na forma do gráfico apresentado anteriormente na Figura 4.1, as curvas de dureza tanto para as amostras austemperadas quanto recozidas apresentam valores aproximados o que nos faz afirmar então previamente a análise microestrutural que o tratamento térmico de Austêmpera não ocorreu de forma esperada não sendo eficaz, no entanto no que remete a obtenção de um acréscimo aos valores de dureza.

Figura 4.1 - Dureza obtida dos corpos de prova após Tratamento Térmico de Austêmpera ou Recozimento Pleno.



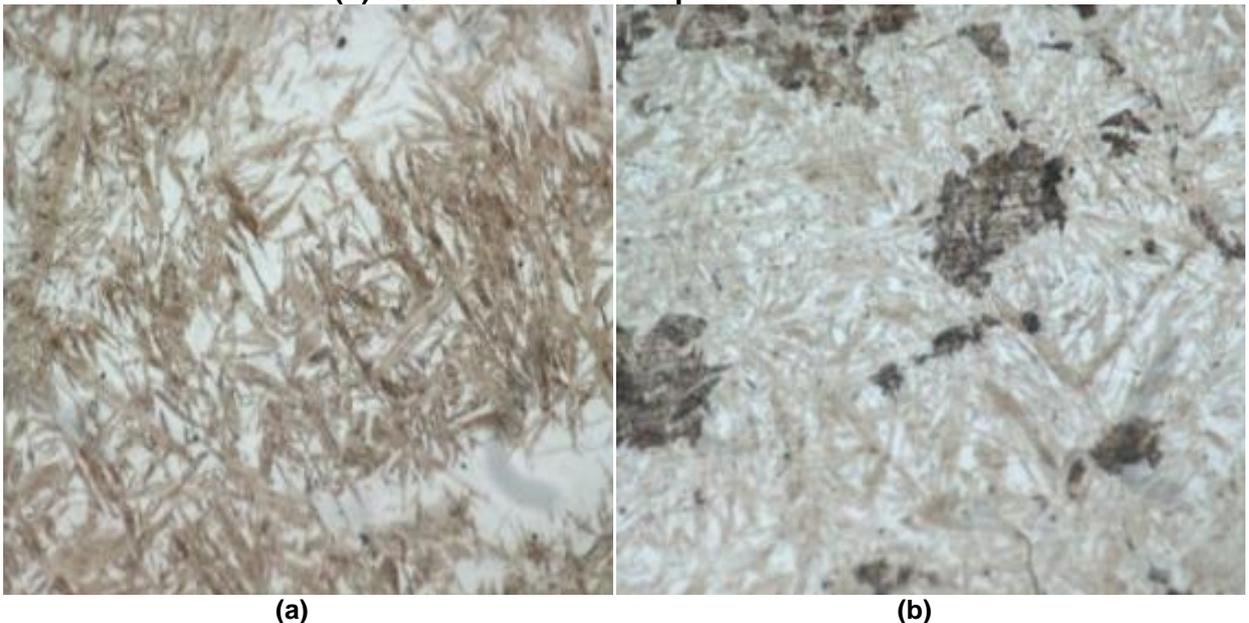
Fonte: Autora, 2012.

4.4 ANÁLISE METALÓGRAFICA

Os resultados de microdureza podem ser explicados através da microestrutura obtida no tratamento térmico dos aços, nesta seção será apresentada a microestrutura "original" do material, aquela encontrada no material em estado de obtenção, e a microestrutura adquirida por meio dos tratamentos térmicos aqui propostos.

Do processo de produção resulta na peça uma microestrutura Martensítica, como apresentada na Figura 4.2. A Figura 4.2 (a) apresenta a microestrutura da peça do grupo M e a Figura 4.2 (b) a microestrutura da peça do grupo P. Como se pode visualizar em ambas as imagens a martensita se encontra na presença de austenita retida (fase clara)

Figura 4.2 – Micrografia dos Corpos de Prova em estado de obtenção. (a) Amostra M e (b) Amostra P.100x. Ataque: Nital a 2%.

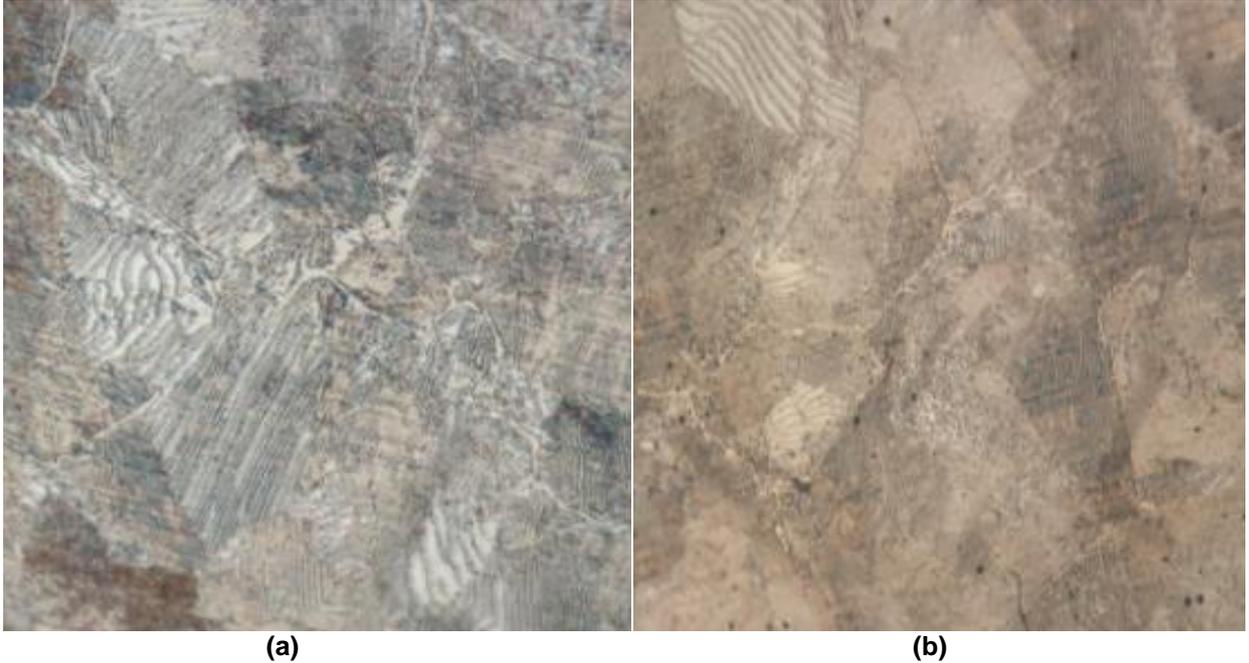


Fonte: Autora, 2012.

As fotomicrografias revelam uma microestrutura martensítica lenticular ou em placas, sendo os grãos de martensita (fase escura) com formato de agulhas [15 e16]. A micrografia da amostra P foi retirada da região próxima à borda ou superfície do corpo moedor região essa de maior dureza e mais exposta ao tratamento de tempera, para obtenção de uma superfície mais dura e resistente. Apesar de pouca ainda se nota a presença de austenita retida. Por sua vez a micrografia da amostra M retirada do centro da peça apresenta maior quantidade de austenita retida, esse

fato se explica pela diferença de tempo de resfriamento entre a superfície e centro da peça.

Figura 4.3 – Micrografia das Amostras após tratamento térmico de Recozimento Pleno ou Total. (a) Amostra M e (b) amostra P. 100x. Ataque: Nital a 2%.



Fonte: Autora, 2012.

Analisando as micrografias obtidas através da metalografia dos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico de recozimento pleno Figura 4.3, pode se notar a presença de regiões onde a perlita, apresenta se bem definida tal quais “colônias” de Perlita [17] tanto ao grupo M, Figura 4.3 (a) quanto ao grupo P, Figura 4.3(b).

As micrografias dos corpos de prova submetidos ao tratamento de austêmpera Figura 4.4(a) e 4.4(b) apresentaram microestruturas distintas. A fotomicrografia 4.4 (a) revela a presença na amostra M sob tratamento de uma microestrutura contendo cementita acicular e perlita [18].

A fotomicrografia na Figura 4.4(b) revela uma microestrutura com duas regiões distintas, Ferrita (fase clara) e uma região escura com prováveis traços de perlita e/ou ainda bainita o que não pode ser descartado já que a análise desse material foi efetuada apenas por meio de microscopia ótica.

Figura 4.4 – Micrografia das Amostras após tratamento térmico de Austempera. (a) Amostra M e (b) amostra P. 100x. Ataque: Nital a 2%.



Fonte: Autora, 2012.

As micrografias também revelaram na peça defeitos no processo de obtenção dos corpos de prova, trincas. Como apresentado na Figura 4.5, as bordas de trinca apresentaram uma microestrutura com regiões claras, Ferrita tendendo a forma de “nódulos” e a presença de cementita (fase escura) ao redor.

Figura 4.5 - Micrografia da Borda da trinca em peça tratada termicamente. 100x. Ataque: Nital a 2%.



Fonte: Autora, 2012.

5 CONCLUSÕES

Avaliando os tratamentos térmicos e as práticas efetuadas neste estudo, com base no conhecimento sobre propriedades dos corpos moedores, pode-se afirmar com base nos resultados obtidos e condições trabalhadas, que a dada aplicação, os corpos moedores de aço, cuja microestrutura seja Martensítica são mais resistentes aos impactos e esforços físicos sofridos durante uma operação de moagem, tendo em vista que sua dureza é mais elevada, fato este já comentado na literatura.

O tratamento térmico de recozimento pleno foi bem sucedido, com a obtenção da microestrutura visada, Perlítica e com resultados de microdureza condizentes com as características mecânicas próprias a essa estrutura. Por outro lado, o tratamento de Austempêra não foi eficaz, assim, a microestrutura desejada ao material não foi obtida.

Analisando a ineficácia do tratamento térmico de Austêmpera pode se apontar dois fatores como prováveis responsáveis pelo insucesso. Primeiro fator, a perda de temperatura da peça durante a troca de fornos, já que esta ocorreu em dado espaço de tempo relativamente curto com a peça exposta ao ambiente. Falha então de operação no processo de tratamento térmico.

O segundo fator a mencionar é a presença de trincas de corte, isto, pois as regiões de borda das trincas contidas nos corpos de prova apresentaram a formação de microestruturas diferentes da objetivada devido à perda de calor destas regiões serem superior as demais regiões da peça. Estes fatores resultaram na peça austemperada em uma dureza abaixo da esperada, e uma microestrutura aquém da almejada.

Recomenda se para trabalhos futuros o estudo do tratamento de Austêmpera com aplicação significativa de melhoras no procedimento do tratamento térmico, utilizando-se fornos mais próximos, o que reduza ao extremo os riscos de perda de calor ao qual a peça possa ser suscetível.

E ainda novos banhos na parte isotérmica do tratamento térmico para avaliação da eficácia desta inovação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.J. Meulendyke, P.J. Moroz and D.M. Smith, **Practical Aspects of Corrosion in the Wear of Grinding Media**, presented at the 1984 Fall Meeting SME-AIME, Denver, Colorado, October 1984.
- [2] BERALDO, J. L., **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. Edgar Blücher LTDA- São Paulo. 1987
- [3] GLENN IVES, líder da Deloitte para atendimento às empresas de mineração da região das Américas. **“Emergence of the new geopolitical risk-oil price paradigm”**. Acessado em http://www.deloitte.com/view/en_GX/global/index.html em 26 de Março de 2012.
- [4] M.J. Meulendyke, P.J. Moroz and D.M. Smith, **Practical Aspects of Corrosion in the Wear of Grinding Media**, presented at the 1984 Fall Meeting SME-AIME, Denver, Colorado, October 1984.
- [5] SILVA, André Luís V. da Costa, **Aços e Ligas Especiais**- 3ª ed. Revista- São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- [6] Callister, W. D. Jr., **Materials Science and Engineering: an introduction**, 5 ed. 2000, Wiley, New York.
- [7] Pereira, R. L.; **Curso de Tratamentos Térmicos dos Metais; Escola de Engenharia de São Carlos**, Universidade de São Paulo, pp.55-56, pp. 311-312.
- [8] CHIAVERINI, Vicente.**Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- [9] ASKELAND, Donald R., PHULÉ, Pradeep P., **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- SILVA, André Luís V. da Costa, **Aços e Ligas Especiais**- 3ª ed. Revista- São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- [10] PADILHA, A. F., **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. Curitiba: Hemus Livraria, Distribuidora e Editora S.A., 2000.
- [11] CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos e Principais Tipos**- 7ª ed. Ampliada e revista- São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

- [12] PETZOW, G. **Metallographic Etching: Techniques for Metallography, Ceramography And Plastography** – 2^a ed.-Ohio: American Society for Metals. ASM International, 2001.
- [13] CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedade das Ligas Metálicas**- 2^a ed.- São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [14] Metals Handbook, 1981, 9 ed, v. 4, **Heat Treating**; American Society for Metals Park Ohio 44073.
- [15] Callister, W. D. Jr., **Materials Science and Engineering: an introduction**, 5 ed. 2000, Wiley, New York.
- [16] Metals Handbook, 1981, 9 ed, v. 4, **Metallography and Microstructures**; American Society for Metals Park Ohio 44073.
- [17] Metals Handbook, 1981, 9 ed, v. 4, **Metallography and Microstructures**; American Society for Metals Park Ohio 44073.
- [18] Metals Handbook, 1981, 9 ed, v. 4, **Metallography and Microstructures**; American Society for Metals Park Ohio 44073.